



HAL
open science

Comment prédire la qualité de la viande bovine issue d'élevages à faibles intrants ?

Moïse Alexandre Kombolo Ngah

► To cite this version:

Moïse Alexandre Kombolo Ngah. Comment prédire la qualité de la viande bovine issue d'élevages à faibles intrants ?. Science des productions animales. Université Clermont Auvergne, 2023. Français. NNT : 2023UCFA0098 . tel-04505612

HAL Id: tel-04505612

<https://theses.hal.science/tel-04505612v1>

Submitted on 15 Mar 2024

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.

Thèse

Présentée à l'Université Clermont Auvergne pour l'obtention de

Docteur d'Université

Spécialité : **Biologie Santé**

Soutenue publiquement le **18 septembre 2023**

par :

MOÏSE ALEXANDRE KOMBOLO NGAH

COMMENT PRÉDIRE LA QUALITE DE LA VIANDE ISSUE D'ÉLEVAGES À FAIBLES INTRANTS ?

Directeur de thèse : Dr. Jean-François Hocquette Directeur de Recherches, INRAE, Theix
Co-directeur de thèse : Dr. Dominique Rocha Directeur de Recherches, INRAE, Jouy-en-Josas

Membres du jury :

Président : Pr. Philippe Michaud Professeur, Université Clermont Auvergne,
Rapporteurs : Dr Elisabeth Duval Directrice de Recherches, INRAE, Val de Loire
Pr. Antoine Clinquart Professeur d'Université, Université de Liège
Examineurs : Dr. Véronique Santé- Directrice de Recherches, INRAE, Theix
Lhoutellier
Dr. Valérie Monteils Professeure d'Université, VetAgro Sup
Dr. Hélène Chardon Responsable R&D Interbev

Laboratoires d'accueil :

Unité Mixte de Recherches sur les Herbivores (UMRH), Equipe PERAQ
INRAE Centre Auvergne Rhône-Alpes
Unité Génétique Animale et Biologie Intégrative (GABI),
INRAE Centre de Jouy-en-Josas

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse, **Dr. Jean-François Hocquette** et **Dr. Dominique Rocha**, pour m'avoir accompagné et encadré tout au long de cette thèse. Je dois reconnaître que vous avez dû faire preuve de patience et de compréhension envers moi pour ces travaux.

Vous m'avez également fait bénéficier de vos conseils, de votre niveau d'expertise et de votre réseau qui m'a été très bénéfique dans le cadre de cette thèse et en dehors.

Un merci particulier à **Jean-François** pour sa disponibilité, son aide lors de la rédaction de ce manuscrit et des différentes publications. Merci de m'avoir fait bénéficier de ton très large réseau qui m'a été utile pour ces travaux et au-delà.

Un grand merci à **Dominique**, pour sa disponibilité, ses remarques, ses suggestions d'amélioration de la rédaction de ce manuscrit de thèse.

Merci également à **Isabelle Legrand**, qui a coordonné tous les tests consommateurs ainsi que l'acquisition des muscles. Une bonne partie de cette thèse n'aurait pas pu être réalisée sans son aide.

Merci à la Région **Auvergne-Rhône-Alpes** et au **FEDER** pour le financement des trois années de thèse.

Je remercie également les membres de mon jury de thèse à savoir :

M. Philippe Michaud d'avoir accepté de présider ce jury pour ma soutenance de thèse

M. Antoine Clinquart et à **Mme. Élisabeth Duval**, d'avoir accepté la charge de rapporter ce travail de thèse en pleine vacances d'été.

Mme. Véronique Santé Lhoutellier, **Mme Valérie Monteils** et à **Mme Hélène Chardon** d'avoir accepté d'examiner mon travail de thèse.

Je remercie, également, tous les membres de mon comité de suivi de thèse, à savoir : **Philippe Michaud**, **Alix Neveu**, **Marie-Pierre Ellies-Oury**, **François Cassagnol**, **Thierry Astruc**, **Isabelle Legrand** et **Aline Bonifacie** pour les échanges, les critiques, les suggestions que vous avez apportées lors de ces comités.

Un merci particulier à **Thierry Astruc** à qui je dois mon intégration dans le monde de la recherche. Je te serais toujours reconnaissant pour tous tes conseils à différents stades de mon ascension dans le grade de docteur. Commençant dès mon stage de Master, mon CDD en tant qu'Assistant ingénieur et ensuite pendant ma thèse, tu as toujours été présent pour me conseiller et m'encourager.

Je remercie toutes les personnes au sein de l'**IDELE** et de **INRAE** qui m'ont aidé lors des classifications carcasses, des mesures instrumentales, des échantillonnages de muscles et des tests consommateurs. Je tiens à dire particulièrement merci :

À **Faustine Noël**, pour l'organisation des tests consommateurs notamment à Limoges, à Rennes, et à Lille. Elle nous a notamment aidé également sur le stockage des échantillons, leur acheminement vers les sites de dégustations et ainsi que dans la préparation des plateaux de dégustations. Merci beaucoup pour ta sympathie et ton sens de l'organisation.

À **Laure Thoumy**, **Pascal Faure**, **Christophe Cogneras**, **Nathalia Mendes Rodrigues Da Silva**, **Jingjing Liu**, **Amanda Gobeti Baro** pour les classifications carcasses et les prélèvements d'échantillons de

muscle, pour les tests consommateurs et les analyses de marqueurs génétiques ainsi que les mesures instrumentales. Merci à chacun pour votre sympathie, votre dévouement et pour certains vos nuits très courtes pour être de bonne heure à l'abattoir.

Je remercie l'académie de la viande, notamment **François Landrieu** et **Brigitte Richon** pour leur collaboration et leur enthousiasme.

À **Sophie Aubin** et **Jeremy Yon** pour leur collaboration, leur pédagogie et leur patience sur une thématique qui m'était totalement nouvelle.

À **Marie-Pierre Ellies-Oury** et **Sghaier Chriki** qui ont toujours été disponible pour m'apporter leur expertise et leurs nombreux conseils. Je vous suis énormément reconnaissant.

À **Pascal Beraud**, pour son aide lors des réservations pour les différents déplacements que j'ai eu à faire. Merci pour ta patience. Cette thèse n'aurait pas pu être réalisée sans la possibilité d'effectuer ces déplacements qui parfois devrais être préparés à la dernière minute.

À **Cyril Labonne**, **Didier Bany** et à **Isabelle Constant**, **Emilie Tixier**, **Carine Dezandre** pour leur disponibilité, le stockage des échantillons, la réservation et la commande de matériel ainsi que l'envoi des échantillons.

À **Pascal Champciaux** pour les inscriptions pour les congrès internationaux auxquels j'ai pu participer.

À **Isabelle Cassar-Malek**, **Nathalie Gocel**, **Christine Delmas**, **Laurence Olivier** pour tous les aspects administratifs. Ça n'a pas toujours été facile de gérer les contraintes par rapport aux démarches spécifiques aux étrangers.

Je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe **PERAQ** pour les échanges instructifs ainsi que les suggestions et les apports qui m'ont été faits.

Je tiens également à remercier particulièrement toute l'Unité **UMRH** ainsi que les équipes **IT** et **BPM** de l'Unité **QuaPA**. Toutes les personnes rencontrées dans ces différents laboratoires en dehors de mon équipe PERAQ m'ont toujours apporté des échanges enrichissants, des perspectives différentes toujours accompagnés de sympathie et d'encouragements.

Je remercie toute l'équipe de basket **ADAS** notamment **Matthieu Reichstadt**, **David Chadeyron**, **Sylvain Emery**, **Yoan Gaudron**, **Logan Morinière**, **Daniel Taillandier**, **Cyril Labonne** et **Xavier Bailly**.

Je remercie tous les stagiaires, doctorants et CDDs que j'ai pu rencontrer sur le site INRAE de Clermont-Ferrand-Theix, pour tous les moments conviviaux que nous avons passés ensemble, notamment : **Coline**, **Ruben**, **Louise**, **Charles**, **Pauline**, **Lucille**, **Valentin**, **Alyce**, **Steve**, **Elfried**, **Donnelle**, **Blandine**, **Lumena**, **Julien**, **Pierra**, **Maria**, **Seoyong**, **Huang**, **Morgane**, **Lucie**, **Abdel**, **Matthieu**, **Tobi**, **Laurianne**, **Josias**, **Aline**, **Angéline**, **Elena**.

Merci à la **Maison du Gospel** pour tous les moments musicaux et conviviaux que j'ai pu vivre grâce à ce groupe.

Merci à la Radio Campus Clermont-Ferrand pour toutes les personnes formidables, l'apprentissage que j'ai en termes de vulgarisation et en tant que membres du comité d'administration.

Un grand merci, enfin, à ma famille...

Tout d'abord à ma mère, **Pr. Esther Ngah** qui est un modèle de travail et d'excellence et qui a également énormément sacrifié pour que je puisse faire mes études à l'étranger. Merci à ma grand-

mère qui est aussi un exemple de rigueur et de détermination. Merci à mes oncles et tantes, pour le soutien dont j'ai pu bénéficier tout au long de mes études. Merci pour vos conseils et accompagnements. Merci à mes cousins pour les échanges sympathiques. Bien que vous soyez loin, vous avez toujours fait ressentir votre présence.

Merci à ma fiancée **Brenda Tenou Meupea** pour son soutien moral, pour les prières ainsi que les encouragements. Tu as toujours su être à l'écoute et un réconfort dans les moments qui étaient pour moi les plus difficiles.

De manière générale, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ma thèse et au bon déroulement de ces années.

Ma foi m'ayant permis de tenir jusqu'au bout de cette thèse, je tiens donc à remercier **DIEU** pour sa grâce, son souffle de vie, d'avoir été en santé dans l'ensemble de ces années, sa protection lors de ces déplacements et les innombrables grâces qui pourront certainement remplir plein d'autres pages.

RESUME

La baisse progressive de la consommation de viande bovine s'explique notamment par des questions sociétales relatives à l'environnement et au bien-être animal, mais aussi par son prix d'achat relativement élevé et la déception de ses consommateurs face à la variabilité non maîtrisée de la qualité sensorielle, tout ceci conduisant au développement de substituts de viande. Dans le cadre de cette thèse, une enquête a tout d'abord été menée sur la perception des consommateurs concernant les enjeux autour de l'élevage et surtout de la production de « viande » par culture de cellules. Cette enquête a été conduite notamment dans douze pays africains, et a confirmé l'importance de garantir la qualité sensorielle tout en répondant aux attentes de prix et aux attentes sociétales des consommateurs. Les travaux de cette thèse ont ensuite permis d'étudier la mise en place d'un système prédictif de la qualité sensorielle de la viande bovine, un enjeu important pour des professionnels européens. Les résultats de ces travaux ont permis de premièrement créer une ressource sémantique, le « Thésaurus de la viande » à partir du dictionnaire de la viande, dans laquelle tout le vocabulaire lié à la viande y compris les critères liés à la qualité gustative ont été définis pour être mieux standardisés. Cette standardisation permet d'améliorer les travaux de recherche prédictive en facilitant la communication, la collaboration et l'interopérabilité des données entre les chercheurs. Le système MSA (Meat Standards Australia) et son équivalent européen (le système 3G) ont été étudiés pour prédire la qualité sensorielle de la viande issue de vaches de race Limousine, en complément à des recherches antérieures qui portaient sur des lots d'animaux de différentes races en France. Les prédictions de la qualité sensorielle ont donc été comparées entre le modèle 3G issu de précédents travaux et le modèle Australien d'origine. Comme attendu, la prédiction intra-race est moins précise qu'avec un système basé sur plusieurs races et différents muscles. Toujours pour améliorer la prédiction de la qualité sensorielle en s'éloignant des mesures visuelles, nous avons évalué la performance d'un spectromètre infrarouge portable et d'une caméra pour prédire, directement sur la chaîne de production, le score MSA de persillé, critère déterminant pour la qualité sensorielle. Ces deux outils donnent des résultats satisfaisants à très satisfaisants. L'ensemble de ces travaux a fourni des éléments pour améliorer la prédiction de la qualité sensorielle de la viande bovine afin de maintenir la compétitivité de la filière face aux substituts de viande. En résumé, les travaux de cette thèse ont montré la possibilité de prédire la qualité sensorielle de la viande bovine. Ainsi, une méthode de prédiction précise de la qualité sensorielle de la viande bovine, en combinaison avec une meilleure standardisation terminologique, l'évaluation instrumentale du persillé et une meilleure compréhension des préférences des consommateurs, peuvent contribuer à maintenir la compétitivité de la filière viande face aux substituts de viande.

Mots clés : Viande bovine, qualité sensorielle, prédiction, thésaurus de la viande, consommateur

ABSTRACT

The progressive decline in beef consumption can be attributed to societal concerns about the environment and animal welfare, as well as its relatively high purchase price and consumer dissatisfaction with uncontrolled variability of sensory quality, all of which are contributing to the development of meat substitutes. As part of this thesis, a survey was first carried out on consumer perceptions of livestock-related issues, particularly the production of "meat" by cell culture. This survey was carried out in twelve African countries and confirmed the importance of guaranteeing sensory quality while meeting consumer price expectations and societal demands. The remainder of this thesis focused on the implementation of a sensory quality prediction system for beef, a major challenge for European professionals. The results of this work first led to the creation of a semantic resource, the "Meat Thesaurus," derived from the meat dictionary. It defines all meat-related vocabulary, including taste-related criteria, for greater standardization. This standardization improves predictive research by facilitating communication, collaboration, and data interoperability between researchers. The MSA (Meat Standards Australia) system and its European equivalent (the 3G system) were examined to predict the sensory quality of meat from Limousin breed cows, complementing earlier research involving batches of animals from different breeds in France. Sensory quality predictions were therefore compared between the 3G model from previous studies and the original Australian model. As expected, intra-breed prediction was less accurate than with a system based on multiple breeds and different muscles. To further improve sensory quality prediction by moving away from visual measurements, we evaluated the performance of a portable infrared spectrometer and a camera to predict, directly on the production line, the MSA marbling score, a crucial criterion for sensory quality. Both tools produced satisfactory to very satisfactory results. All this work has helped to improve the prediction of the sensory quality of beef, with the aim of supporting the industry's competitiveness in the face of substitutes. In summary, the research carried out as part of this thesis has demonstrated the feasibility of predicting the sensory quality of beef. Consequently, an accurate method for predicting the sensory quality of beef, combined with improved terminological standardization, instrumental marbling assessment, and a better understanding of consumer preferences, can help maintain the meat industry's competitiveness against meat substitutes.

Key words: Beef, eating quality, prediction, meat thesaurus, consumers

LISTE DES PUBLICATIONS ET PRESENTATIONS A DES CONGRES

Articles scientifiques

1. **Kombolo Ngah**, M., Yon, J., Landrieu, F., Richon, B., Aubin, S., & Hocquette, J.-F. (2022). A new semantic resource responding to the principles of Open Science: The meat thesaurus as an IT tool for dialogue between sector actors. *Meat Science*, 192, 108849. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108849>
2. **Kombolo-Ngah**, M., Goi, A., Santinello, M., Rampado, N., Atanassova, S., Liu, J., Faure, P., Thoumy, L., Neveu, A., Andueza, D., De Marchi, M., & Hocquette, J.-F. (2023). Across countries implementation of handheld near-infrared spectrometer for the on-line prediction of beef marbling in slaughterhouse. *Meat Science*, 200, 109169. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109169>
3. **Kombolo Ngah**, M., Chriki, S., Ellies-Oury, M.-P., Liu, J., & Hocquette, J.-F. (2023). Consumer perception of “artificial meat” in the educated young and urban population of Africa. *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2023.1127655>
4. Liu, J., Chriki, S., **Kombolo**, M., Santinello, M., Pflanzner, S. B., Hocquette, É., Ellies-Oury, M.-P., & Hocquette, J.-F. (2023). Consumer perception of the challenges facing livestock production and meat consumption. *Meat Science*, 200, 109144. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109144>

Article de Vulgarisation

5. **Kombolo**, M., Yon, J., Landrieu, F., Richon, B., Aubin, S., & Hocquette, J.-F. (2022). Une nouvelle ressource sémantique répondant aux principes de la science ouverte : le thésaurus de la viande comme outil informatique de dialogue entre les acteurs de la filière, *Viandes et Produits Carnés*, VPC-2022-3842.

Congrès et séminaires (communications orales)

1. Landrieu F., **Kombolo-Ngah M.**, and Hocquette J.F. (2020). The French Meat Dictionary (collective work of the French Meat Academy). 71st annual meeting of the European Association for Animal Production. Virtual meeting. (vol. 26, p. 600).
2. **Kombolo M.**, Aubin S., Yon. J., Landrieu F., Richon B. and Hocquette J.F (2021). Creation of a semantic resource responding to the principles of open science for the meat sector. 72nd annual meeting of the European Association for Animal Production. Davos, Switzerland (vol. 27, p. 318).
3. **Kombolo M.**, Goi A., Andueza D., Liu J., Neveu A., Faure P., Thoumy L., Cogneras C., De Marchi M. and Hocquette J.-F. (2021). Prediction of marbling score in slaughterhouse using a pocket-sized near-infrared spectrophotometer. 72nd annual meeting of the European Association for Animal Production. Davos, Switzerland (vol. 27, p. 318).
4. Goi A., **Kombolo M.**, Santinello M., Rampado N., Hocquette J.-F., Penasa M. and De Marchi M. (2022). Across countries NIRS technology to predict MSA marbling score. 73rd annual meeting of the European Association for Animal Production. Porto, Portugal (vol. 28, 525).
5. **Kombolo M.**, Chriki S., Ellies-Oury M.P., and Hocquette J.-F. (2022). Consumer perception of cultured meat in certain African countries. 73rd annual meeting of the European Association for Animal Production. Porto, Portugal (vol. 28, 617).
6. **Kombolo M.**, Goi A., Andueza D., Liu J., Neveu A., Faure P., Thoumy L., Cogneras C., De Marchi M., J.-F. Hocquette (2022). Portable near infrared spectrometer to better predict meat eating quality. Journée de l'École doctorale SVSAE, UCA, Clermont-Ferrand, France, 18 mai 2022.
7. **Kombolo M.**, Goi A., Santinello M., Rampado N., Atanassova S., Liu J., Faure P., Thoumy L., Neveu A., Andueza D., De Marchi M., Hocquette J.-F. (2023). PLS-DA analysis on hand-held spectrometer for on-line prediction of beef marbling in slaughterhouse. 74th annual meeting of the European Association for Animal Production. Lyon, France (vol. 29, 181).

Congrès et séminaires (Affiches)

8. **Kombolo M.**, Aubin S., Yon. J., Hocquette J.F and Landrieu F. A new semantic resource responding to the principles of open science: the meat thesaurus for dialogue between sector actors. (2022). E-poster. International Congress of Meat Science and Technology. Kobe, Japan.
9. **Kombolo M.**, Legrand I., Liu J., Noel F., Faure P., Thoumy L., Pethick D., Hocquette J-F. French consumer evaluation of eating quality of limousin beef. (2023). Poster. International Congress of Meat Science and Technology. Padova, Italy.

10. **Kombolo M.**, Mendes NSR., Neveu A., Barro A.G., Christensen Mette., Hocquette J.-F. (2023). Beef marbling assessment by accredited graders and a hand-held camera device (Q-FOM Beef). Poster. 74th annual meeting of the European Association for Animal Production. Lyon, France (vol. 29, 320).

Communications orales non-scientifiques

11. Participation au concours Ma thèse en 180 secondes le 11 Mars 2021 à Clermont-Ferrand. <https://youtu.be/dH1zkOqS-Sw>
12. Intervention à la Radio RCF le 14 juin 2021 à Clermont-Ferrand : « La qualité de la viande Bovine ». Emission présenté par Cécile Nore. <https://www.rcf.fr/culture-et-societe/science-et-vie?episode=78523>
13. Participation au concours ABG pitch professionnel le 21 septembre 2022 (1^{er} prix du public et 2^e prix du Jury) <https://youtu.be/E5615aXmmOo>
14. Participation au concours de pitch vidéo OTECI le 25 mai 2023
15. Travaux Dirigés de 2h aux étudiants en 1^{ère} année de Master GLOQUAL. Race effect and indicators. Campus des cézeaux, 17 novembre 2022
16. Travaux Dirigés de 2h aux étudiants en 1^{ère} année de Master GLOQUAL. Race effect and indicators. Campus des cézeaux, 22 octobre 2021

ABREVIATIONS

AOC : Appellation d'Origine Contrôlée

AOP : Appellation d'Origine Protégée

ATOL: Animal Trait Ontology for Livestock

ATP : Adénosine Triphosphate

CEE-ONU : Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies

DAP : Disposition à Payer

EUROP : Système de classification Européen

FG : Fast Glycolytic pour rapide glycolytique

FOG : Fast Oxido-Glycolytic pour rapide oxydo-glycolytique

GEB : Département Économie de l'Institut de l'Élevage

GM : *Gluteus Medius*

GMS : Grandes et Moyennes Surfaces

HVN : Haute Valeur Naturelle

IGP : Indication Géographique Protégée

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

JMGA : Japanese Meat Grading Association

INAO : Institut National de l'origine et de la qualité anciennement appelé Institut national des Appellations d'Origine

LR: Label Rouge

LT: *Longissimus Thoracis*

MLA : Meat Livestock Australia

MSA: Meat Standards Australia

MQ4: Meat Quality 4

MyHC : Myosin Heavy Chain

MyLC : Myosin Light Chain

OGM : Organisme Génétiquement Modifié

RMSEP : Root mean Square Error of Prediction pour Racine Carrée de l'Erreur Moyenne de Prédiction

SIQO : Signe de l'Identification de l'Origine et de la Qualité

SNP: Single Nucleotide Polymorphism

SO : Slow Oxidative pour lente oxydative

STG : Spécialité Traditionnelle Garantie

SPIR : Spectrométrie Proche Infrarouge

TEC : Tonne équivalent carcasse

TAC : Tomographie assistée par ordinateur

3G: Global Guaranteed Grading

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	II
RESUME.....	V
ABSTRACT.....	VI
LISTE DES PUBLICATIONS ET PRESENTATIONS A DES CONGRES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX (HORS ARTICLES).....	XIV
LISTE DES FIGURES (HORS ARTICLES).....	XIV
INTRODUCTION ET CONTEXTE DE LA THESE.....	1
A. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE (PARTIE I) : BIOLOGIE MUSCULAIRE ET QUALITE DES VIANDES.....	5
1. DU MUSCLE A LA VIANDE.....	5
1.1. STRUCTURE DU MUSCLE SQUELETTIQUE	5
1.2. FACTEURS AYANT UN IMPACT SUR LA QUALITE SENSORIELLE DE LA VIANDE BOVINE	11
1.3. TRANSFORMATION DU MUSCLE EN VIANDE	13
2. QUALITE ORGANOLEPTIQUE DES VIANDES.....	17
2.1. Couleur	17
2.2. La jutosité	17
2.3. La flaveur	17
2.4. Tendreté	18
B. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE (PARTIE II) : PRODUCTION DE VIANDE BOVINE ET GESTION DE LA QUALITE.....	19
1. GENERALITES SUR L'ELEVAGE BOVIN ET LA PRODUCTION DE VIANDE EN FRANCE.....	19
1.1. Production	19
1.2. Viande sous SIQO	25
1.3. Echanges internationaux	29
2. LES SYSTEMES DE CLASSIFICATION.....	30
2.1. Vue globale des systèmes de classification dans le monde	30
2.2. Etats-Unis	31
2.3. Japon	33
2.4. Pays en voie de développement	34
2.5. Le système EUROP	35
2.6. Système MSA	37
3. EVALUATION INSTRUMENTALE DES CARACTERISTIQUES DES CARCASSES.....	40
3.1. Tomographie assistée par ordinateur (TAC)	40
3.2. Ultrasons	41
3.3. Analyse d'images par ordinateur	41
3.4. Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR)	42
4. MARQUEURS GENETIQUES POUR PREDIRE LA QUALITE GUSTATIVE DE LA VIANDE BOVINE.....	43
4.1. Le génome bovin	43
4.2. Etudes d'association pangénomique (GWAS)	43
4.3. Génotypage	44
OBJECTIFS DE LA THESE.....	46
C. ATTENTES SOCIETALES DES CONSOMMATEURS.....	47
INTRODUCTION.....	47
CHAPITRE 1 : PERCEPTION DES CONSOMMATEURS FACE AUX ENJEUX DE L'ELEVAGE.....	49
CHAPITRE 2 : PERCEPTION DE LA VIANDE ARTIFICIELLE PAR DES CONSOMMATEURS ISSUES DE PAYS D'AFRIQUE.....	60
CONCLUSION.....	79

D. PREDICTION DE LA QUALITE SENSORIELLE.....	81
INTRODUCTION.....	81
PREDICTION DE LA QUALITE SENSORIELLE DE LA RACE LIMOUSINE	82
CONCLUSION	93
E. PREDICTION DU PERSILLE MSA PAR DES METHODES OBJECTIVES	94
INTRODUCTION.....	94
CHAPITRE 1 : PREDICTION DU PERSILLE PAR SPIR	95
CHAPITRE 2 : PREDICTION DU PERSILLE PAR ACQUISITION D'IMAGES.....	109
CHAPITRE 3 : MARQUEURS GENETIQUES	116
CONCLUSION	120
F. IMPLEMENTATION DE LA METHODOLOGIE DE PREDICTION.....	121
INTRODUCTION.....	121
CONSTRUCTION DU THESAURUS DE LA VIANDE	122
CONCLUSION	132
G. DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION	133
1. ATTENTES DES CONSOMMATEURS AU REGARD DES SYSTEMES DE PREDICTION DE LA QUALITE DE LA VIANDE BOVINE.....	133
2. PERFORMANCE DU MODELE DE PREDICTION.....	134
3. APPORT D'UN SYSTEME DE PREDICTION DE LA QUALITE SENSORIELLE DE LA VIANDE BOVINE	136
4. IMPORTANCE DU PERSILLE SUR LA QUALITE SENSORIELLE DE LA VIANDE BOVINE	138
5. MESURES INSTRUMENTALES DES CRITERES DE LA QUALITE SENSORIELLE	138
6. ROLE DES SYSTEMES D'INFORMATION DANS LA PREDICTION DE LA QUALITE SENSORIELLE.....	140
7. LA PREDICTION DE LA QUALITE DE LA QUALITE SENSORIELLE COMME STRATEGIE FACE AUX ALTERNATIFS A LA VIANDE	141
8. PERSPECTIVES DE CETTE ETUDE	142
CONCLUSION GENERALE.....	144
BIBLIOGRAPHIE.....	145
ANNEXES.....	154

Liste des Tableaux (hors articles)

Tableau 1: Caractéristiques des principaux types de fibres musculaires rencontrés chez les bovins (Interbev et Idele, 2023)	7
Tableau 2 : Liste de Viandes bovines sous AOP en France (oriGIn, 2018a)	26
Tableau 3 : Liste de Viandes bovines sous IGP en France (oriGIn, 2018b).....	27
Tableau 4 : Label Rouge pour les viandes bovines en France (oriGIn, 2018.).....	28
Tableau 5 : Critères principaux de certains systèmes de classification et de classement de la viande bovine dans certains pays du monde (R. J. Polkinghorne & Thompson, 2010).	31
Tableau 6 : Scores de rendement selon le système JMGA	34
Tableau 7 : Classement des carcasses dans les pays en voie de développement (Chingala et al., 2017)	35

Liste des Figures (hors articles)

Figure 1 : Structure d'un muscle Squelettique (Interbev et Idele, 2023).....	6
Figure 2 : Viande produite destinée à la consommation en France (source : IDELE)	20
Figure 3 : quatre circuits commerciaux des viandes bovines (NB : Les poids des carcasses sont donnés à titre indicatif) (Interbev et Idele, (2023))	22
Figure 4 : Débouchés de la viande bovine française importée (Interbev et Idele, 2023)	24
Figure 5 : Évolution de la répartition des circuits de commercialisation des viandes sous SIQO hors AB (Agriculture Biologique) (INAO, 2022)	26
Figure 6 : Relation entre le persillé, la maturité et les catégories de qualité de la carcasse (USDA, 2017).....	32
Figure 7 : Classement de carcasse JMGA (Gotoh et al., 2014).....	33
Figure 8 : Classement EUROP	36

INTRODUCTION ET CONTEXTE DE LA THESE

La consommation de viande bovine continue de croître globalement (Font-i-Furnols, 2023) que ce soit en quantité totale ou par habitant. Son marché mondial devrait passer de 414,98 milliards de dollars en 2022 à 604,34 milliards de dollars en 2029, avec un taux de croissance annuel composé de 5,52% au cours de la période de prévision, 2022-2029 (Fortune Business Insights, 2022). Cependant cette croissance de la consommation ne s'observe que dans les pays en voie de développement. Les pays développés connaissent une régression de la consommation de viande par habitant depuis les années 1980 (Hocquette & Chatellier, 2011). Cette différence de dynamique pourrait être expliquée par le fait que les pays développés ayant connu une surconsommation de protéines animales sont devenus plus exigeants sur la qualité de la viande que sur la quantité tandis que les pays non développés peinent encore à satisfaire la demande locale. De plus, les citoyens des pays développés ont, dans l'ensemble, développé de nouvelles préoccupations qui concernent le bien-être animal, la protection de l'environnement (avec l'idée que l'élevage contribue à sa dégradation) et une approche morale de plus en plus exigeante (a-t-on le droit de tuer des animaux pour les manger ?). Tout ceci a conduit les sociologues à parler de qualités extrinsèques (liées à la façon de produire) qui se rajoutent aux qualités dites intrinsèques incluant les qualités sanitaires, nutritionnelles et sensorielles (liées aux caractéristiques du produit) (Beric et al., 2017).

En effet, la notion de qualité n'est pas figée et a toujours évolué au fil des décennies (Gruffat et al., 2015). La viande, qui, à une époque était parée de toutes les vertus est progressivement de plus en plus considérée aujourd'hui comme potentiellement dangereuse pour la santé des consommateurs. Ce phénomène commence dans les années 1970 et 1980 où la viande est considérée comme un vecteur majeur dans le déclenchement des maladies coronariennes. Avec les crises sanitaires dans la filière viande, une prise de conscience de l'impact carbone associé à la production des produits carnés et les notions de bien-être animal accentuent cette évolution. La notion de qualité est de plus en plus complexe et la filière bovine doit se saisir aujourd'hui de ces difficultés (Ellies-Oury & Hocquette, 2018).

Toutefois, le marché de la viande ne cesse de se développer, les premières exportations de viande ayant eu lieu à la fin des années 1800. Dès lors, il y a eu un besoin grandissant de normes officielles publiques étant donné que les carcasses étaient négociées sans être vues par l'acheteur. Le premier objectif des systèmes de description des carcasses était de faciliter le commerce en décrivant des attributs ayant une importance commerciale (Price, 1995). Les différentes filières bovines dans le monde ont donc développé différents systèmes de classifications pour communiquer entre elles et pour répondre aux différents enjeux du marché.

De tous ces enjeux auxquels l'industrie de la viande devrait faire face, la qualité sensorielle est primordiale car la satisfaction des consommateurs lors de la dégustation doit être l'objectif majeur.

Or, la viande bovine se caractérise par une forte variabilité sensorielle souvent non maîtrisée. Cette variabilité constitue donc malheureusement une cause majeure de l'insatisfaction des consommateurs (Polkinghorne et al., 2008). Plusieurs études de recherche réalisées en collaboration avec des acteurs de l'industrie de la viande bovine tels que les abatteurs, les coopératives et les éleveurs, ont démontré que divers facteurs tels que le type d'animal, le niveau de stress, le type de muscle, la maturation, et d'autres encore, ont une influence sur la qualité de la viande (Avilés et al., 2015; Bonny et al., 2018; Kaneko, 2021; Soulat et al., 2022). La qualité sensorielle de la viande bovine est donc caractérisée par une forte variabilité dépendant de chacun de ces facteurs. En plus de cette variabilité, l'insatisfaction des consommateurs peut avoir plusieurs autres causes telles que la diminution des connaissances des consommateurs sur les pièces de boucherie ou encore les différents modes de cuisson correspondant à ces pièces. Par ailleurs, cette diminution de la consommation de la viande bovine a aussi coïncidé avec une croissance de produits parfois plus compétitifs (tels que les alternatives à la viande) apportant d'autres sources de protéines et pouvant offrir une plus grande cohérence et exigeant moins de connaissances de ces produits (Bonny et al., 2015a). Il serait avantageux pour la filière bovine de mieux informer le consommateur du niveau de qualité sensorielle auquel il peut s'attendre au regard des informations affichées dont le type de produit et le prix (Normand et al., 2009). Au niveau européen, il existe une demande par les consommateurs d'un système de prédiction de qualité sensorielle fiable (Verbeke et al., 2010). Ceci pourra permettre à la filière d'orienter différents morceaux de la carcasse vers la bonne destination de commercialisation (steak haché pour une qualité inférieure et la vente en pièce pour les morceaux les plus nobles de la carcasse dont le score de qualité est plus élevé). Dans ce contexte, les consommateurs se déclarent prêts à acheter plus de viande de bœuf même à des prix plus élevés, si la qualité sensorielle pouvait être fiable (Verbeke et al., 2010 ; Bonny et al., 2017 ; Pethick et al., 2018).

La forte variabilité de la qualité gustative de la viande peut être expliquée par le fait que la viande est avant tout, issue d'un long processus biologique. Elle dépend donc de plusieurs facteurs aussi importants les uns que les autres de la ferme à l'assiette. Mais comment prendre tous ces facteurs en considération de manière pratique, afin de fournir un produit de bonne qualité ? Plusieurs recherches ont démontré que la qualité gustative de la viande bovine est le reflet de tous ces événements qui se sont produits du lieu d'élevage au lieu de la consommation, y compris la méthode de cuisson utilisée. Toutes ces étapes ont donc un impact sur la satisfaction finale et la disposition à payer (DAP) du consommateur.

Depuis 2021, les prix de la viande en France continuent de croître pour atteindre des niveaux historiques même si la qualité n'a pas été pour autant améliorée. Mais cela ne se traduit pas forcément par une augmentation des revenus des producteurs car même si les prix augmentent, les coûts de

production font également de même.

La disposition à payer (DAP) pour une viande ayant des caractéristiques identifiables (persillé, tendreté, ou flaveur) est supérieure à celle d'un produit équivalent sans indication de ces caractéristiques (Cicia & Colantuoni, 2010). Les systèmes de classification des carcasses, les critères organoleptiques, les labels de qualité ou encore un système de production bio ont tous un rôle sur la DAP des consommateurs. A noter que les DAP des consommateurs pour les substituts de viande demeurent, pour l'instant, inférieures à celles pour les viandes d'origine animale (Marette, 2021). Cet écart se réduit quand des informations sur l'impact des produits sur la santé humaine et l'environnement sont communiquées aux consommateurs (Marette, 2021). Les labels de qualité ont donc un impact positif sur les dispositions à payer pour les viandes d'origine animale. Dans le cadre des États généraux de l'Alimentation (MASA, 2018), le plan de la filière viande bovine française prévoit, dans les dix prochaines années, d'augmenter la part de produits sous signes officiels de qualité (par exemple, Label rouge, Agriculture biologique) et d'intégrer des exigences organoleptiques minimales dans les cahiers des charges (Légifrance, 2018).

Les premiers systèmes de classification ont été développés quand la viande bovine a cessé d'être un produit local et qu'elle pouvait désormais parcourir de longues distances de leur lieu d'élevage au lieu d'abattage, de découpe et de consommation (Polkinghorne & Thompson, 2010). Les systèmes de classification étaient alors un moyen de description des attributs qui étaient économiquement importants. Ils étaient centrés sur le rendement en viande sans prendre en compte les attentes gustatives des consommateurs. Des décennies plus tard, certains pays ont commencé à considérer des critères liés à la qualité sensorielle pour les incorporer dans leurs systèmes de classification leur permettant ainsi de se rapprocher des attentes des consommateurs.

Les signes officiels de qualité se basent sur des analyses sensorielles avec des consommateurs entraînés, c'est-à-dire des experts. Malheureusement, ce type de consommateurs n'est pas représentatif des consommateurs moyens et ne représente à minima qu'une niche. Un nouveau système de classification développé en Australie a donc proposé de changer de paradigme pour s'éloigner de l'avis des experts pour se baser sur des consommateurs non entraînés. C'est donc le système australien, MSA (Meat Standards Australia) qui a franchi cette étape et qui est devenu globalement reconnu pour sa capacité à prédire la qualité gustative de la viande bovine en ayant une approche globale de l'étable à l'assiette. Par la suite, une fondation internationale a été mise en place

afin de faire avancer la recherche collaborative sur la qualité de la viande bovine en s'inspirant des recherches en Australie (Hocquette et al., 2020). Une difficulté dans cette approche est que le langage utilisé entre les différents acteurs (éleveur, abatteur, boucher, distributeur, consommateur, etc.) n'est pas toujours le même. Il est important de pouvoir harmoniser le langage et les normes utilisées entre ces différents acteurs mais aussi entre différents pays.

Un autre enjeu majeur concerne l'évaluation des critères de qualité qui n'est pas toujours homogène. En effet, ces critères sont principalement évalués visuellement rendant ainsi ces mesures parfois faiblement répétables. Plusieurs technologies ont donc connu un intérêt croissant pour la mesure automatisée de ces critères. Il faut également que ces technologies s'adaptent à la réalité des chaînes de production tout en étant faciles d'utilisation, non invasives et peu onéreuses.

La maîtrise des indicateurs qui permettent de prédire la qualité gustative de la viande bovine aura plusieurs avantages. Tout d'abord, elle facilitera la sélection des animaux avec des caractéristiques d'intérêt ainsi que leur reproduction. Ceci permettra également d'optimiser les pratiques favorisant une bonne qualité gustative (Berri et al., 2019).

Pour bien illustrer les travaux que nous avons conduits à la fois sur la prédiction de la qualité de la viande (par des approches de modélisation, de génétique et des nouvelles technologies) et sur les attentes des consommateurs, la revue bibliographique abordera successivement la biologie du muscle avant et après abattage en relation avec la qualité de la viande bovine (partie A), puis l'élevage bovin en France et les systèmes de classification à dire d'experts ou par des nouvelles méthodes plus automatisées (partie B).

A. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE (PARTIE I) : BIOLOGIE MUSCULAIRE ET QUALITE DES VIANDES

1. DU MUSCLE A LA VIANDE

Les processus qui sont impliqués dans la transformation du muscle à la viande sont tous importants dans la détermination de la qualité gustative de cette dernière. Il est important de comprendre ces processus afin de mieux maîtriser la qualité gustative de la viande et la prédire. Cette première partie décrira la structure d'un muscle squelettique ainsi que ses différentes composantes et leurs relations avec la qualité gustative de la viande bovine.

1.1. STRUCTURE DU MUSCLE SQUELETTIQUE

Les muscles assurent une fonction motrice du squelette et s'y attachent par l'intermédiaire des tendons. Ils assurent également le soutien de l'organisme et assurent une thermorégulation de chaleur au cours de la contraction musculaire (Hocquette et al., 1998). Les muscles représentent 30 à 45% du poids des animaux de rente et sont constitué de 75 à 80% d'eau. Ils contiennent également environ 15 à 20% de protéines et 3% de lipides, le reste étant constitué de glucides et micronutriments tel que les vitamines (Ellies-Oury & Hocquette, 2018). Le muscle requiert de l'énergie pour ses fonctions de contraction et de maintien. Cette énergie provient de L'ATP (Adénosine Triphosphate) qui à son tour provient de la dégradation immédiate de la phosphocréatine et à moyen terme du glycogène stocké dans les cellules.

La viande est une résultante des changements biochimiques et physiques dans le muscle de l'animal abattu. Ces changements peuvent être influencés par un nombre de facteurs tels que la race, l'âge et le sexe de l'animal, le type de muscle, sa localisation et sa fonction *in vivo* qui déterminent les caractéristiques du muscle de départ. Le muscle squelettique est constitué d'environ 90% de fibres musculaires et de 10% de tissus conjonctif et adipeux (Listrat et al., 2016). Chacune de ses composantes sera décrites ci-dessous.

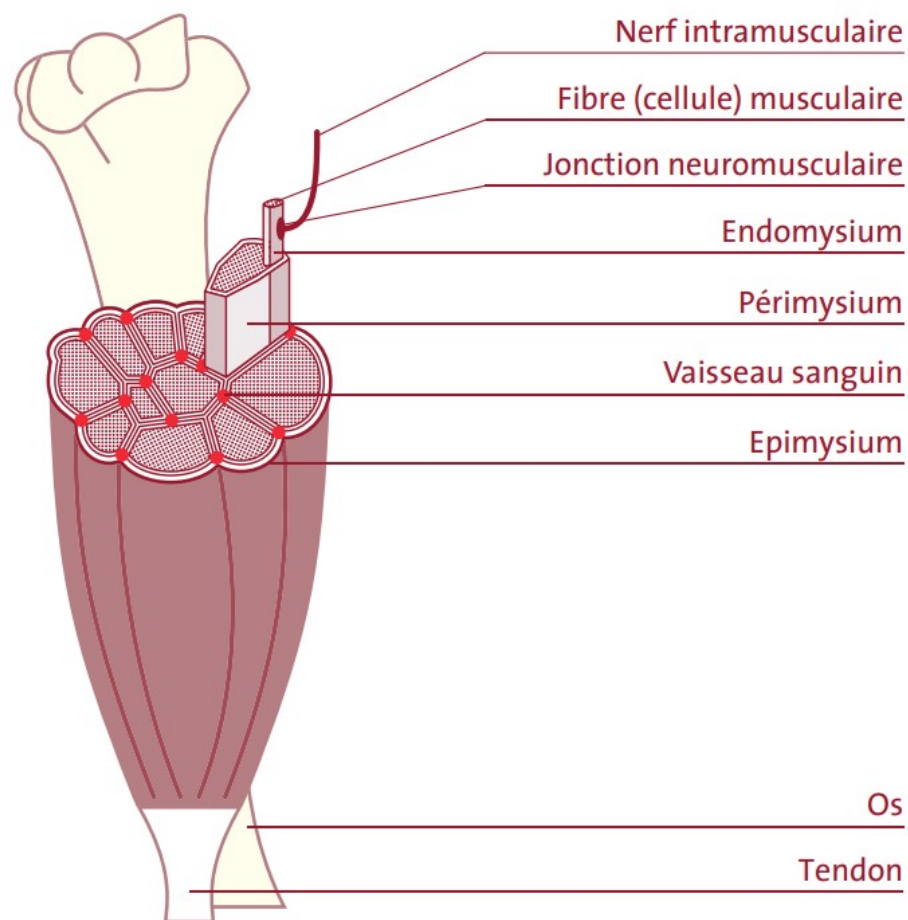


Figure 1 : Structure d'un muscle Squelettique (Interbev et Idele, 2023)

1.1.1. Fibres musculaires

Le muscle squelettique est constitué de milliers de fibres musculaires. Ces fibres sont des cellules cylindriques, plurinucléées, très longues et étroites. Les fibres sont regroupées en faisceaux entourés de tissu conjonctif. Chaque fibre est constituée de myofibrilles, qui sont les unités contractiles du muscle (Astruc, 2014). Les myofibrilles sont ensuite constituées d'unités répétées de sarcomère (Choi & Kim, 2009). Les sarcomères contiennent 2 protéines majeures : l'actine et la myosine qui coulissent l'une sur l'autre à l'intérieur des cellules pour permettre la contraction et le relâchement des muscles.

La myosine représente 50% des protéines myofibrillaires et est composée de 2 chaînes lourdes (MyHC, pour myosin heavy chain) et de 4 chaînes légères (MyLC, pour myosin light chain).

Les muscles contiennent différents types de fibres musculaires avec des propriétés contractiles et métaboliques différentes qui peuvent affecter la qualité gustative de la viande.

La classification des fibres musculaires se base sur un critère fonctionnel (vitesse de contraction) et métabolique (Picard et al., 2014). Chaque critère correspond respectivement à la vitesse de contraction (et donc à la vitesse d'utilisation de l'énergie) et à la source principale d'énergie. Les muscles sont constitués de différents types de fibres : I, IIA et IIX (anciennement IIB) ou respectivement fibres lentes oxydatives, rapides-oxydo glycolytiques et rapides glycolytiques. Ces différents types de fibres sont présentes en différentes proportions selon le type de muscle. La composition en type de fibres est variable selon :

- La fonction du muscle : les muscles posturaux (au niveau du cou et du dos) sont plus riches en fibres I tandis que les muscles sollicités de façon plus irrégulière (tel que les muscles locomoteurs) contiennent plus des fibres II
- La localisation du muscle (avant ou arrière de l'animal) : la partie avant de l'animal contient plus de fibres de type I (41%) que la partie arrière (31%). Les fibres de type IIX ont une répartition équivalente (37 à 38%)

Tableau 1: Caractéristiques des principaux types de fibres musculaires rencontrés chez les bovins (Interbev et Idele, 2023)

	Type I	Type IIA	Type IIX
Diamètre	Faible	Faible à moyen	Élevé
Couleur	Rouge	Intermédiaire	Pâle
Vitesse de contraction	Lente	Intermédiaire	Rapide
Résistance à la fatigue	Très élevée	Élevée	Faible
Quantité de myoglobine	Très élevée	Moyenne	Faible
Vascularisation	Très élevée	Moyenne	Faible
Activité ATPasique	Faible	Moyenne	Élevée
Métabolisme oxydatif (aérobie)	Très élevé	Élevé	Faible
Métabolisme glycolytique (anaérobie)	Très faible	Très élevé	Très élevé
Réserves en glycogène	Très faibles	Très élevées	Élevées
Réserves en triglycérides	Très élevées	Faibles	Très faibles

Le type de fibres a une influence sur les différentes vitesses de transformation du muscle en viande telles que la vitesse de chute du pH *post mortem* et la vitesse de maturation de la viande. La vitesse de chute de pH est plus rapide dans les muscles rapides glycolytiques que dans les muscles lents oxydatifs (Maltin et al., 2003). Plus la proportion de fibres I ou IIA est élevée, plus le métabolisme sera oxydatif.

Malgré des résultats contradictoires, les relations suivantes ont été généralement rapportées entre les caractéristiques des fibres musculaires et les propriétés physicochimiques de la viande (Park et al., 2022) :

- Les proportions de fibres de type I et IIA sont positivement corrélées avec la couleur rouge et la capacité de rétention d'eau, tandis que les proportions de fibres de type IIX sont négativement corrélées avec la capacité de rétention d'eau et la tendreté ;
- Les muscles composés d'une grande quantité de fibres de type I ont généralement une teneur plus élevée de gras intramusculaire ;
- Les proportions de fibres de type IIA présentent une corrélation positive avec le pH *post-mortem* tandis que les proportions en fibres de type IIX présentent souvent une corrélation négative avec la tendreté.
- En fonction du type de muscle, les proportions des différentes fibres musculaires sont différentes, ce qui signifie que les caractéristiques de la qualité sensorielle varient en fonction de chaque découpe.

Pendant le processus de maturation, les fibres subissent des altérations de leur structure par relâchement des liens entre elles. Ceci favorise l'attendrissage. Les fibres de type IIX ont une vitesse de maturation plus élevée que les fibres rouges de type I. Ceci est expliqué par le fait que leur pH chute plus rapidement et que leurs réserves en glycogène sont plus grandes (Interbev, 2023). Une proportion de fibres de type IIX plus élevée pourrait donc améliorer la tendreté de certains muscles en accélérant la vitesse de maturation.

Lors de l'entrée en rigidité cadavérique (*rigor mortis*), l'état relâché ou contracté des fibres va conditionner la bonne maturation ultérieure de la viande. Le potentiel de tendreté sera définitivement altéré si les fibres se trouvent à l'état contracté lors de cette phase. Ceci peut être le cas lors de l'application d'un froid trop intense.

La flaveur est plus élevée dans les muscles plus oxydatifs qui ont des teneurs en lipides intramusculaires plus élevées que les muscles glycolytiques. Les muscles plus oxydatifs ont également une jutosité plus élevée. Ces relations sont davantage observées dans les viandes de vaches que dans celles des taurillons (Listrat et al., 2016).

1.1.2. Tissu conjonctif

Chaque fibre musculaire est entourée d'une fine couche de collagène appelée endomysium. Les fibres sont ensuite regroupées par centaines en faisceaux eux aussi entourés d'une fine couche de collagène appelée pérимysium. Ces faisceaux se regroupent pour former le muscle entier qui est également entouré d'une couche de collagène appelée épимysium (également appelé aponévrose).

Ce sont ces 3 niveaux de collagène (endomysium, perimysium et épимysium) qui assurent l'attachement des muscles aux os et aux articulations ainsi que leur mouvement.

Chacune de ces couches est constituée de fibrilles de collagène. Les molécules de collagène sont liées entre elles par des liaisons chimiques appelées *cross-links*. Les protéoglycanes lient les fibrilles de collagènes entre elles et stabilisent le tissu conjonctif. Ils peuvent être soit extracellulaires, soit membranaires, soit intracellulaires. Ils participent à l'assemblage de la matrice et lui confèrent des propriétés tel que l'hydratation et la résistance aux forces compressives.

Plus une viande contient du collagène, plus elle est dure. La solubilité du collagène et par conséquent la dureté de la viande est impactée par le degré de réticulation défini par le nombre et la nature de *cross-links* présents. Plus la viande contient des *cross-links*, moins le collagène est soluble et plus la viande est dure (Purslow, 2005).

Les muscles à cuisson rapide sont moins riches en collagène et sont principalement situés à l'arrière de la carcasse. Les muscles à cuisson lente, riches en collagène, sont eux plutôt situés sur l'avant (Interbev, 2023).

Le taux de collagène peut également varier au sein d'un muscle, les parties les plus dures se situant généralement aux extrémités.

Les protéoglycanes sont dégradés au cours de la maturation de la viande. Ceci a pour conséquence d'exposer le collagène aux collagénases et de diminuer la dureté de la viande (Nishimura, 2010). La charge négative élevée des protéoglycanes leur permet d'interagir avec l'eau en la piégeant dans la matrice extracellulaire. Ceci a un impact direct sur la jutosité (Dubost, 2012). Cet impact des protéoglycanes sur la qualité de la viande reste encore à démontrer.

1.1.3. Tissu adipeux

Le tissu adipeux est le principal organe de stockage d'énergie chez de nombreux animaux. Le tissu adipeux est constitué de cellules appelées adipocytes, dont la particularité est de stocker les lipides et de les restituer. Les lipides constituant les tissus adipeux sont majoritairement les triglycérides (85% en moyenne) et, dans une moindre mesure, les phospholipides (12%) et le cholestérol (3%) (Bauchart et al., 2008).

Plusieurs études sur les races bovines ont montré que les lipides intramusculaires joueraient un rôle modéré mais significatif et positif sur la tendreté de la viande en augmentant la sensation de jutosité et en diminuant la perception des résidus de mastication. Les lipides ont également un effet lubrificateur durant la mastication. De plus, la matrice de collagène du muscle pourrait être déstructurée par un taux élevé de lipides intramusculaires (Nishimura, 2010).

Le gras intramusculaire désigne l'ensemble des dépôts lipidiques présents à l'intérieur du muscle. La partie visible du gras intramusculaire est appelé « persillé » dans l'industrie de la viande et est utilisé comme indicateur de la qualité de la viande dans les systèmes de classements dans les pays comme le Japon, les Etats-Unis et l'Australie. Le pourcentage de gras intramusculaire est une mesure objective qui peut s'effectuer grâce à une analyse chimique tandis que la mesure du persillé, plus subjective se fait à l'aide d'une notation visuelle par un opérateur à l'aide d'une grille. Le persillé peut expliquer environ 75% de la variation du pourcentage de gras intramusculaire (Ferguson, 2004). Les systèmes de classification qui évaluent le persillé apportent une plus-value aux carcasses qui ont un niveau de persillé plus élevé. L'importance du persillé vient de son influence positive sur la qualité gustative.

Pour résumer, les différents compartiments du muscle squelettique peuvent chacun affecter la texture, la jutosité et la flaveur de la viande. Par conséquent, il est important de prendre en compte les différents compartiments du muscle lors de l'évaluation de la qualité gustative de la viande bovine.

Chacun de ces compartiments sera à son tour influencé par un certain nombre de facteurs ayant donc ainsi un impact sur la qualité sensorielle de la viande.

Chacun de ces compartiments subira des processus de transformation pour arriver au produit final. L'ensemble de ces processus sera décrit dans la partie suivante.

1.2. FACTEURS AYANT UN IMPACT SUR LA QUALITE SENSORIELLE DE LA VIANDE BOVINE

1.2.1. La race

La viande bovine est principalement issue de deux sous-espèces à savoir : *Bos indicus* et *Bos taurus* (Coles et al., 2014). Les races de la sous-espèce *Bos indicus*, également appelée zébu, telles que le Brahman ou le Nelore, ont généralement une tendreté moindre en raison de la taille des fibres musculaires ou de leurs propriétés métaboliques (Wright et al., 2018). Elles peuvent également contenir davantage de collagène. Ce type de race est surtout apprécié pour sa résistance à la chaleur et aux parasites. Les races de la sous-espèce *Bos taurus* telles que l'Aberdeen Angus ou les races laitières ou à viande françaises (Limousine, Charolaise, etc) produisent généralement une viande d'une meilleure qualité. Leur viande est plus tendre et présente une texture plus fine.

Il existe aussi la notion de races précoces et de races tardives. Les races précoces ont une maturation plus rapide et atteignent leur poids adulte plus tôt que les races tardives, qui ont une maturation physiologique plus lente et nécessitent plus de temps pour atteindre leur poids adulte. Les races plus précoces telles que l'Aberdeen Angus tendent à déposer plus de collagène et de gras intramusculaire que les races à maturation physiologique tardive telles que la race Limousine ou Blonde d'Aquitaine (Ellies-Oury & Hocquette, 2018).

Il a été observé qu'il existait des différences significatives pour la tendreté, la jutosité et la flaveur entre les races Aberdeen Angus, Gasconne, Holstein et Simmental (Bureš et al., 2018). Néanmoins une étude récente n'a observé aucune différence significative de qualité sensorielle entre les races quand les animaux sont élevés et la viande maturée dans les mêmes conditions (Conanec et al., 2021) suggérant que les différences observées seraient dues à une interaction avec d'autres facteurs tels que la conduite des animaux en ferme.

1.2.2. Le sexe

L'effet du sexe serait dû à la différence de niveaux d'hormones des animaux (Bonfatti et al., 2013). Les mâles castrés déposent plus de gras en raison d'un niveau de testostérone plus bas (Venkata Reddy et al., 2015). Les viandes des génisses sont généralement plus tendres que celles des bœufs et des taurillons et taureaux, en raison d'une teneur plus faible en tissu conjonctif et d'un diamètre de fibre plus petit (Venkata Reddy et al., 2015). Les mâles entiers ont une vitesse de croissance plus rapide et ainsi déposent moins de gras intramusculaire. Les viandes issues des bœufs seraient plus tendres que celles des taureaux car ont davantage de gras intramusculaire (Nogalski et al., 2018). Le sexe a

également une influence sur la couleur avec la viande issue d'animaux mâles plus foncée que celle des femelles et des mâles castrés en raison d'une activité physique plus élevée et donc une concentration en myoglobine plus élevée.

1.2.3. L'âge

La tendreté de la viande a tendance à diminuer avec l'âge de l'animal (Oury et al., 2007). Le niveau de collagène augmente et devient plus rigide et ainsi plus résistant à la cuisson (Hopkins et al., 2007), les fibres musculaires deviennent plus dures et résistantes à la mastication. La couleur de la viande est également influencée par l'âge, les animaux plus âgés produisant une viande plus foncée (Kopuzlu et al., 2018). Les animaux plus âgés ont plus de gras intramusculaire. La flaveur augmente jusqu'à 18 mois en raison de l'accumulation de lipides puis atteint un plateau (Lebret et al., 2015). L'âge peut être mesuré de manière numérique et chronologique mais on peut aussi estimer la maturité physiologique de l'animal soit par la dentition soit par le degré d'ossification de l'animal (Polkinghorne et al., 2010).

1.2.4. Les pratiques d'élevage

Les pratiques d'élevage ont une influence sur la qualité sensorielle car elles affectent l'apport en énergie, la vitesse de croissance ainsi que la composition de la carcasse des animaux (Janssen et al., 2021). Les nutriments apportés par l'alimentation peuvent sensiblement modifier la composition du muscle (Cassignol, 2018). Différents types de finition des animaux peuvent conduire à différentes qualités de la viande bovine.

La viande provenant de bœuf fini à l'herbe est plus maigre et généralement perçue comme de moins bonne qualité en raison d'une faible accumulation de gras intramusculaire (Duckett et al., 2009; Owens & Purser, 2021). Les animaux nourris à l'herbe ont généralement une couleur de gras plus jaune due à l'accumulation de β -carotène (Owens & Purser, 2021).

De nouveaux systèmes agricoles ont été développés pour répondre aux attentes sociétales des consommateurs. C'est le cas de l'agriculture à « Haute Valeur Naturelle » (HVN). Ce type d'agriculture désigne les formes d'agriculture associées à une biodiversité riche, via des interactions complexes entre espèces et pratiques agricoles. » (Solagro, 2014). Ce type d'élevages se caractérise par un faible niveau d'intrants, de pesticides et d'engrais chimiques. Ce sont essentiellement des zones de polyculture- élevage. Elles sont liées à des terroirs, à des pratiques, à l'utilisation de races animales spécifiques (ovines et bovines notamment) et à la production de différents produits typiques dans le domaine des viandes, de l'huile d'olive, du fromage ou encore du cidre.

1.3. TRANSFORMATION DU MUSCLE EN VIANDE

Après la mort de l'animal, plusieurs étapes complexes se succèdent conditionnant la qualité gustative de la viande. Après la mort de l'animal, les processus métaboliques cessent et les muscles sont l'objet de différents types de mécanismes biochimiques pour produire la viande. Ces différents mécanismes seront décrits dans les prochains paragraphes.

Au moment de l'abattage, la circulation sanguine s'arrête en provoquant d'une part une rigidité cadavérique, et d'autre part une chute d'oxygène dans les muscles. Les cellules continuent à survivre par la régénération de l'ATP suite à la dégradation immédiate de la phosphocréatine et surtout par la dégradation progressive des stocks de glycogène par la glycolyse anaérobie qui conduit à une diminution progressive du pH. Au fur et à mesure que le pH diminue, différentes enzymes sont activées pour couper les protéines (c'est le mécanisme de la protéolyse) conduisant ainsi à un attendrissage de la viande.

1.3.1. Mécanismes biochimiques

A la mort de l'animal, la production de molécules d'ATP diminue progressivement. Ces molécules sont utilisées par les cellules musculaires pour alimenter leur contraction. La synthèse de l'ATP dépend du niveau d'une molécule appelée phosphocréatine qui est présente dans le muscle et qui permet sa synthèse. Cette première phase de baisse progressive du niveau d'ATP constitue la phase de pantelance. Cette phase dure 2 à 4 heures. Pendant cette phase, le muscle continue donc de fonctionner mais avec un épuisement progressif de ces réserves énergétiques. Cette phase correspond également à ce qui est appelé « viande chaude » où les masses musculaires sont encore molles, relâchées et élastiques.

Une fois les stocks de phosphocréatine épuisés, la dégradation des stocks de glycogène par la glycolyse prend rapidement le relai notamment durant un ou deux jours après abattage.

A l'issue de la glycolyse, de l'acide lactique est produit par la dégradation progressive du pyruvate issu lui-même de la dégradation du glycogène. Cet acide lactique s'accumule dans la cellule baissant ainsi le pH du muscle. Le pH se stabilise ensuite à une valeur appelée « pH ultime » ou « pH_u » observée après 24 ou 48h après abattage (Bendall 1973). Cette stabilisation survient suite à différents mécanismes : l'épuisement total du glycogène, la disparition de l'AMP (Adénosine Monophosphate) qui est un cofacteur d'enzymes de la glycogénolyse ou encore quand la chute du pH inhibe les enzymes du métabolisme.

1.3.2. Mécanismes structuraux

Après la saignée de l'animal, le muscle est encore extensible et élastique (phase de pantelance). Cette extensibilité provient de la présence d'ATP qui permet le glissement des filaments fins (riches en actine) par rapport aux filaments épais (riches en myosine). Lorsque le taux d'ATP baisse, les molécules d'actine et de myosines se lient pour former le complexe actomyosine. Ce glissement des 2 filaments devient alors impossible et tout le système myofibrillaire devient rigide. Cette phase correspond à la rigidité cadavérique encore appelé « *rigor mortis* ». Elle survient 24 à 48h après abattage et est directement perceptible sur la carcasse lorsque la musculature devient progressivement raide et inextensible.

A l'échelle ultra structurale, il y a un resserrement des myofilaments. Ceci conduit à une contraction latérale des myofibrilles et des fibres musculaires (Pearce et al., 2011). Lors de cette étape, il y a des transferts d'eau vers l'extérieur des cellules dans l'espace extracellulaire. Les conditions de mise en place de la phase de rigidité cadavérique telles que le stress ou la cinétique de refroidissement de la carcasse, sont déterminantes pour le bon déroulement de la maturation par la suite.

- Effet du stress pré-abattage

Le transport et l'abattage sont source de stress pour les animaux. Le stress est d'origine psychologique (peur, changement d'environnement...) et physique (activité physique inhabituelle, excitation entre animaux, mouvements dans le camion) (Terlouw, 2015).

Ce stress produit une surconsommation du glycogène musculaire conduisant à une réduction des stocks de glycogène avant abattage. Or, si la teneur en glycogène est faible pendant la saignée, le pH de la viande se stabilisera à des valeurs supérieures à 6,2 (la valeur normale est de l'ordre de 5,5 à 5,8 dans de bonnes conditions d'abattage). Ceci rend la couleur de la viande plus sombre et donc plus difficile à commercialiser. Ces viandes sont communément appelées viandes DFD de l'anglais Dark-Firm-Dry (Adzitey et Nurul, 2011). Les viandes de couleur sombre ont une capacité de rétention d'eau plus élevée, leur donnant ainsi un aspect ferme au toucher. Ces conditions de pH élevé et de teneur en eau conséquente favorisent le développement de microorganismes. Réduire le stress de pré-abattage chez les animaux peut donc réduire la fréquence d'apparition de viande DFD.

Dans certaines conditions dépendant du stress pré-abattage ou du type génétique, la chute du pH est plus rapide qu'attendu alors que la température est encore élevée. Ces conditions entraînent une dénaturation d'une partie des protéines musculaires, diminuant leur pouvoir de rétention d'eau.

- Cinétique de refroidissement

La cinétique et l'importance des réactions biochimiques du métabolisme *post mortem* sont affectées par la température et donc la vitesse de réfrigération des carcasses. Le refroidissement des muscles ralentit les réactions biochimiques en inhibant les activités enzymatiques. La variabilité de la qualité de la viande dépend donc du mode et de la vitesse de refroidissement des carcasses. Une réfrigération trop lente conduit à une contraction des sarcomères (« heat shortening » ou « rigor shortening »). Ceci a pour effet de rendre la viande moins tendre (Kim et al., 2014). La dénaturation partielle des protéines limite la protéolyse *post mortem* et ceci a pour conséquence une contraction au chaud des muscles causant ainsi une baisse de la tendreté de la viande (Kim et al., 2012). Ce phénomène s'observe rarement grâce à la vigilance et le respect de la chaîne de froid au sein des abattoirs.

Symétriquement, une viande qui se refroidit trop rapidement se contracte et devient dure (« cold shortening »). Ce phénomène est appelé contraction au froid. Elle ne s'observe que pour les viandes rouges (ovine et bovine). En effet, les fibres de ces animaux sont à métabolisme oxydatif et contiennent une pompe calcium ATPase située dans la membrane du réticulum sarcoplasmique. Les températures basses inhibent cette pompe provoquant ainsi une fuite de calcium dans le sarcoplasme (Ji & Takahashi, 2006). La présence d'ATP et d'ions Ca^{++} dans le sarcoplasme cause une contraction des cellules musculaires et la résistance mécanique de la viande augmente. Afin de réduire ce phénomène, certains pays ont pour pratique la stimulation électrique peu après la saignée. Ceci a pour effet de consommer plus de la moitié de l'ATP initial. Les carcasses peuvent donc ainsi être refroidies rapidement sans risque de contracture au froid.

1.3.3. Maturation et qualité de la viande

Lors de la maturation, les carcasses ou les pièces de viandes sont stockées en chambre froide pendant plusieurs jours pour améliorer la tendreté. Cette phase correspond à un attendrissement progressif de la viande dû à une dégradation des protéines myofibrillaires. Ce mécanisme de dégradation est enzymatique et indépendant de la présence de microorganismes. La durée de maturation va rarement au-delà de 2 à 3 semaines. Certains abattoirs ont développé des maturations plus longues qui vont jusqu'à 6 semaines mais ceci reste anecdotique. Les longues périodes de conservation peuvent être à risque pour le développement de flore bactérienne d'altération qui peuvent nuire à la qualité de la viande. Les muscles nobles sont des muscles pauvres en tissu conjonctif et ne sont pas maturés longtemps. Ils sont extraits de la carcasses 2 à 3 jours après l'abattage et sont conditionnés sous vide.

L'allongement de la durée de maturation favorise l'attendrissement de la viande en absence d'oxygène en raison des processus protéolytiques.

Il existe plusieurs systèmes protéolytiques :

- Les protéinases neutres calcium dépendantes ou calpaïnes qui sont actives à pH neutre,
- Les protéines lysosomales ou cathepsines, actives entre pH 4 et pH 6
- Le complexe multi catalytique ubiquitine-protéasome dépendant qui est présent dans le cytoplasme et dans le noyau des cellules (Ouali & Talmant, 1990)

Un autre groupe de protéases serait potentiellement impliqué dans la maturation des viandes, le groupe des caspases (Bhat et al., 2018).

Les calpaïnes semblent représenter le système majeur intervenant dans l'attendrissement de la viande. Il existe 3 isoformes de calpaïnes : la μ -calpaïne, la m-calpaïne et la P94 ou calpaïne 3 dont l'activité est dépendante du calcium. Les m et μ -calpaïnes sont inhibées par la calpastatine.

En plus d'améliorer la tendreté de la viande, la maturation joue un rôle dans le développement de la saveur de la viande. Cette saveur est liée aux arômes perçus par le consommateur. Ce sont les peptides, les acides aminés libres, le lactate ou encore les produits de dégradation des acides nucléiques qui sont impliqués dans les substances de ces arômes (Dashdorj et al., 2015). Des saveurs indésirables peuvent également être générées par l'oxydation des lipides (c'est le rancissement). La maturation de la viande a également une influence sur la couleur de la viande. Elle va modifier la myoglobine qui pigmente la viande rouge modifiant ainsi la couleur.

2. QUALITE ORGANOLEPTIQUE DES VIANDES

2.1. Couleur

La couleur est la première caractéristique que le consommateur perçoit. C'est souvent le critère principal au moment de l'achat en particulier dans les Grandes et Moyennes Surface (GMS). La couleur de la viande influence donc les décisions d'achat plus que les autres critères de qualité. Le consommateur peut utiliser à tort ou à raison la décoloration comme indicateur de la détérioration éventuelle de la qualité du produit.

Le couleur de la viande provient de la myoglobine qui est un pigment musculaire et dont le rôle est de capter l'oxygène véhiculé par l'hémoglobine et de le transporter dans le muscle (Tomasevic et al., 2021). La myoglobine est sous forme réduite non oxygénée dans le muscle et de couleur pourpre. Une fois que la surface du muscle est en contact avec l'air, la myoglobine se trouve sous forme réduite oxygénée (oxymyoglobine) et devient rouge vif, couleur appréciée lors de l'achat. Une exposition prolongée à l'air rend cette couleur instable car le pigment s'oxyde en metmyoglobine qui est de couleur brunâtre et induit une réaction de rejet par le consommateur lors de l'achat (Altmann et al., 2023).

2.2. La jutosité

La jutosité représente le caractère plus ou moins juteux de la viande lors de la consommation (Micol et al., 2010). La jutosité se décompose en jutosité initiale qui est celle perçue au premier coup de dent et la jutosité soutenue qui persiste au-delà. La jutosité initiale est liée à la quantité d'eau présente et libérée lors de la mastication tandis que la jutosité soutenue est en relation avec la teneur en lipides de la viande. La jutosité initiale dépend ainsi fortement de la capacité de rétention d'eau du muscle. Le pH est également déterminant pour la jutosité de la viande. A pH très bas (<5,4), la viande a tendance à perdre son eau (viande exsudative) et donc à être sèche en bouche. A pH élevé (>5,8), la viande a une bonne rétention d'eau et présente une jutosité supérieure (Monin, 1991).

2.3. La flaveur

La flaveur (combinaison du goût et l'odeur) est le résultat des sensations olfactives, gustatives et trigéminales (sensation de douleur, de picotement ou de brûlure). Elle représente ce qui perçu par le nez interne (arômes), la langue et les muqueuses buccales qui elles-mêmes détectent les stimuli gustatifs et les stimuli irritants (piquant, froid, chaud...). La perception de l'odeur (par voie interne ou rétro nasale, une fois le produit en bouche) est due à des composés volatils de faible poids moléculaire

stimulant les récepteurs de l'épithélium nasal. Ce sont ces composés volatils qui constituent les arômes. Le goût provient généralement de substances solubles dans l'eau et d'un poids moléculaire plus élevé que les composés volatils (Micol et al., 2010).

La viande crue a une saveur peu prononcée. La cuisson agit sur les précurseurs d'arômes formés pendant la maturation pour développer la saveur caractéristique des différentes viandes. Le chauffage induit par la cuisson est responsable de deux grands types de réactions qui vont libérer les composés aromatiques qui sont responsables de la saveur.

La première réaction est la réaction de Maillard entre les acides aminés et les sucres. La deuxième réaction est la dégradation des lipides. C'est cette dégradation des lipides (composés de triglycérides et de phospholipides) qui conduit à une large gamme de composés aromatiques. C'est donc de cette manière que la quantité et la nature des lipides, qui sont variables selon le type d'animal et sa conduite d'élevage, sont souvent en relation avec l'appréciation de la saveur des viandes (Micol et al., 2010)

La saveur varie d'un muscle à l'autre (Monin, 1991) et dépend également du type métabolique du muscle (Hocquette et al., 2015). Le déterminisme exact de la saveur demeure encore complexe en raison d'un grand nombre de composés impliqués.

2.4. Tendreté

La tendreté de la viande est définie comme une somme de sensations perçues lors de la mastication (Evrat-Georgel, 2008). Elle dépend des caractéristiques du collagène et des fibres musculaires. En France, au niveau professionnel, la tendreté de la viande bovine ne fait pas l'objet d'une prise en compte dans les classements sauf en vente en libre-service par le système des étoiles décrit plus loin.

Comme démontré par plusieurs enquêtes, la tendreté de la viande est un critère très important pour les consommateurs (Grunert et al., 2004). Mais c'est aussi l'un des critères de qualité le plus variable et aussi le plus difficile à maîtriser ou à prédire (Geay et al., 2001). La tendreté est souvent décevante et ceci constitue un problème pour la filière bovine qui est confrontée à la concurrence des viandes blanches offrant un rapport qualité/prix plus attractif pour les consommateurs.

Les animaux les mieux conformés et ceux de type culard offrent une proportion de viande à cuisson rapide plus élevée. A poids de carcasse égal, les muscles de l'arrière (à cuisson rapide pour la très grande majorité) sont plus développés chez ces animaux. Les animaux de race allaitante sont généralement mieux conformés que les animaux laitiers et offrent donc une proportion plus élevée de viande à cuisson rapide et par conséquent davantage de viande tendre. Néanmoins, l'impact du cahier de charges de découpe peut significativement modifier les proportions de viande à cuisson rapide et lente obtenues.

B. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE (PARTIE II) : PRODUCTION DE VIANDE BOVINE ET GESTION DE LA QUALITE

1. GENERALITES SUR L'ELEVAGE BOVIN ET LA PRODUCTION DE VIANDE EN FRANCE

La production de viande bovine est faite à partir de bovins sélectionnés pour la production de viande (races allaitantes ou races à viande) ou pour la production laitière (races laitières), et aussi à partir des bovins dits mixtes (production de viande et de lait).

Chacun de ces types raciaux se distingue par leurs critères de sélection et par conséquent par la conformation et l'engraissement de leurs carcasses. Pour les races à viande et mixtes, les critères ayant le plus d'importance sont le développement musculaire et squelettique, les aptitudes maternelles et les performances de croissance.

1.1. Production

La France est le premier producteur de viande bovine en Europe avec 1,2 million de tonnes équivalent carcasses (veaux compris). La filière bovine Française compte environ 134 000 élevages avec au moins 5 vaches pour 17,3 millions de têtes de bovins au total (Interbev & Idele, 2023).

Plus de quarante races bovines sont répertoriées en France. Les races allaitantes sont dominées par 3 races à savoir les races Charolaise, Limousine et Blonde d'Aquitaine.

En élevage laitier, les génisses vêlent pour la première fois entre 24 et 30 mois et sont élevées pour être ultérieurement traitées. Les mâles et les femelles non conservés sont souvent vendus à l'âge de 8 jours. Les élevages laitiers approvisionnent le marché de la viande bovine principalement par la réforme des vaches laitières, mais certains mâles et femelles peuvent être conservés pour être engraisés pour la production de viande.

En élevage allaitant, on distingue principalement 3 types d'élevages :

- Elevages naisseurs spécialisés (32 010 élevages en 2021), où les vaches reproductrices sont l'atelier principal. Les génisses vêlent généralement à l'âge de 30 à 36 mois et les vaches assurent environ 5 cycles de gestation/lactation. Après le sevrage (8-9 mois), certains veaux femelles peuvent être vendus comme broutards, ainsi que les veaux mâles, pour être engraisés dans d'autres élevages y compris dans d'autres pays (comme par exemple l'Italie). Le tri des génisses peut également avoir lieu pendant la phase d'élevage ou après leur première mise-bas. Certains éleveurs choisissent d'élever toutes leurs génisses et effectuent une réforme significative lors de leur première mise-bas (Roche et al., 2001). Un éleveur naisseur fournit donc principalement des animaux réformés (vaches et quelques taureaux

reproducteurs) sur le marché de la viande bovine.

- Elevages naisseurs-engraisseurs (7 750 élevages en 2021), où les éleveurs choisissent d'engraisser les animaux non destinés au renouvellement. Ces éleveurs produisent de la viande bovine également à partir de vaches de réforme mais aussi de jeunes bovins, de génisses de boucherie et/ou de bœufs en fonction des différents ateliers d'engraissement. Certains éleveurs naisseurs-engraisseurs peuvent acheter des broutards qu'ils engraisent en plus de ceux qui naissent sur leur exploitation. Ce sont les naisseurs-engraisseurs avec achat.
- Elevages engraisseurs spécialisés (4 750 élevages en 2021), où les éleveurs achètent des broutards (mâles ou femelles) pour produire de la viande après engraissement des animaux.

Il existe également des élevages producteurs de veaux lourds ou veaux sous la mère où les vaches nourrissent leurs propres veaux (4 040 élevages en 2021).

La production de viande bovine en France provient donc d'une variété d'animaux issus de différentes catégories et de races (Figure 2) : Environ 47% de la viande provient de vaches de réforme des troupeaux laitiers et allaitants (49% et 51% des vaches, respectivement), 17% de génisses de boucherie (3% provenant de troupeaux laitiers et 97% de troupeaux allaitants), 30% de jeunes bovins (19% provenant de troupeaux laitiers et 81% de troupeaux allaitants) et 5% de bœufs (57% provenant de troupeaux laitiers et 43% de troupeaux allaitants) (GEB - Institut de l'élevage 2023).

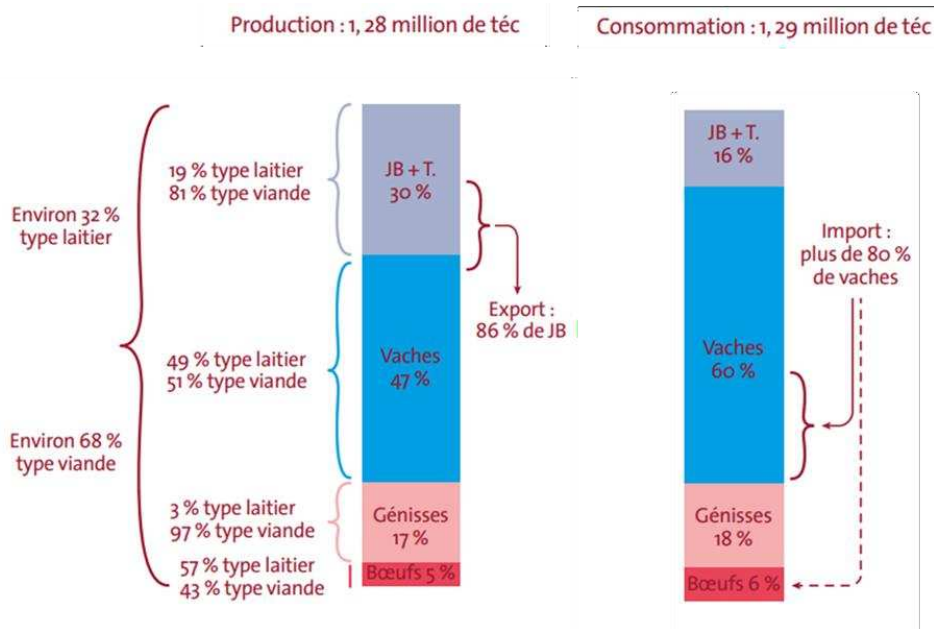


Figure 2 : Viande produite destinée à la consommation en France (source : IDELE)

a. Consommation

Les Français sont les plus gros consommateurs de viande bovine dans l'Union Européenne. La viande bovine représente 22% en 2020 de la consommation de viande totale à domicile (en considérant la volaille et la charcuterie fraîche). En 2020, les Français ont consommé individuellement 22,5 kgec (kg

équivalent carcasse) de viande bovine. La période de la pandémie a conduit à une augmentation de la consommation à domicile de viande hachée fraîche. Elle a augmenté de 11% du fait de sa facilité de préparation en pleine crise sanitaire.

b. Circuits de commercialisation

Il existe quatre circuits de commercialisation pour les carcasses bovines : la cheville, le reconstitué, le catégoriel et le haché comme expliqué en Figure 3. L'orientation vers un circuit donné est déterminée par le poids de la carcasse, sa conformation (qui sera définie plus bas) et son état d'engraissement. Une carcasse peut être potentiellement orientée vers plusieurs circuits. Par exemple, une demi carcasse peut être orientée vers le reconstitué et l'autre demi carcasse sera orientée à la cheville pour optimiser la vente

- Le circuit du "haché" concerne les carcasses les plus légères, généralement inférieures à 230-250 kg. La majorité des muscles de la carcasse est utilisée pour produire de la viande hachée, fraîche ou surgelée. Le haché surgelé est principalement destiné à la restauration hors domicile et aux magasins à bas prix, tandis que le haché frais est plutôt destiné aux grandes surfaces.
- Le circuit "catégoriel" concerne des carcasses légèrement plus lourdes, d'environ 240-290 kg. Les carcasses sont découpées et désossées, fournissant différentes catégories de morceaux sans référence directe à la carcasse d'origine. Ces morceaux, tels que les faux-filets ou les rumstecks, sont utilisés notamment dans la restauration hors domicile et lors des promotions.
- Le circuit "reconstitué" ou "compensé" concerne les viandes issues d'animaux plus lourds, généralement d'environ 290-300 kg et plus. Les carcasses sont découpées et désossées, puis les morceaux provenant de la même carcasse sont reconstitués pour former une carcasse entière. Cela permet la commercialisation de carcasses sous forme de morceaux déjà désossés, principalement dans les grandes surfaces tout au long de l'année.
- Le circuit de la "cheville" concerne les carcasses les plus lourdes, généralement supérieures à 380-400 kg. Dans ce circuit, les carcasses ou leurs quartiers sont eux-mêmes l'unité de transaction. La viande de la "cheville" est principalement destinée à la boucherie artisanale.

Le circuit du haché est en plein essor tandis que les circuits catégoriel et reconstitué connaissent une tendance à la diminution.

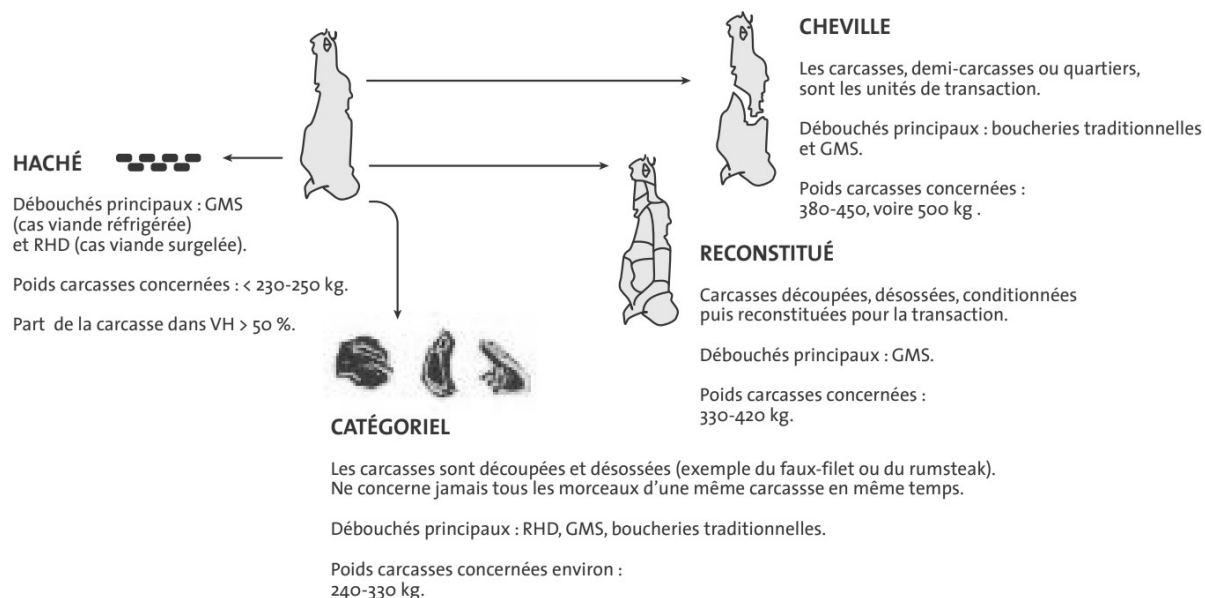


Figure 3 : quatre circuits commerciaux des viandes bovines (NB : Les poids des carcasses sont donnés à titre indicatif) (Interbev et Idele, (2023))

Il est important de noter que les caractéristiques sensorielles de qualité varient considérablement d'un muscle à l'autre, ce qui entraîne des utilisations différentes (viande destinée à être grillée, rôtie, braisée, bouillie), et cela a une influence directe sur leur valeur commerciale (Clinquart et al., 2022). Ces variations de qualité et d'utilisation des différents muscles soulignent l'importance des circuits de commercialisation de la viande bovine, qui permettent de gérer de manière efficace la distribution et la valorisation de chaque type de viande en fonction de ses caractéristiques gustatives spécifiques. Cette distinction entre ces différentes orientations permet d'optimiser l'utilisation des différentes parties de la carcasse en fonction des besoins du marché et des préférences des consommateurs. Dans la partie suivante, nous explorerons les différents débouchés de cette viande en détail.

c. Débouchés de la viande bovine

On dénombre généralement cinq grands types de débouchés de la viande bovine : Les GMS (Grande et Moyenne Surface), boucherie traditionnelle, RHD (Restauration Hors Domicile), Transformation (plats préparés) et export.

Les GMS constituent la majeure partie des débouchés de la viande bovine avec un pourcentage de 42% (Interbev & Idele, 2023). Les débouchés suivants sont l'export et la boucherie traditionnelle loin devant la RHD (Figure 4). Pour les viandes importées, la RHD absorbe près de deux tiers des volumes tandis que la GMS ne représente qu'un tiers et la boucherie moins de 10%.

i. Les Grandes et Moyennes Surfaces (GMS)

Les animaux des troupeaux laitiers dominent la vente de viande dans les GMS. Les distributeurs préfèrent s'approvisionner en catégoriel pour pouvoir s'adapter aux variations des achats des consommateurs. La viande piécée réfrigérée provient principalement des quartiers arrière des animaux, tandis que les quartiers avant sont utilisés pour le haché frais et surgelé. La vente de haché a connu une croissance constante, passant de 37% en 2008 à 45% en 2017. Le haché provient principalement de femelles laitières françaises, mais d'autres catégories de bovins peuvent également être utilisées. Le commerce en ligne de viande bovine représente 2,4% en 2019, mais reste limité en raison de la difficulté de standardiser les poids des pièces de viande. Les attentes des consommateurs ont évolué avec une demande croissante de qualité intrinsèque (principalement la qualité organoleptique) et extrinsèque (protection de l'environnement, bien-être animal), favorisant le succès des viandes sous signes officiels de qualité et d'origine (SIQO) dont les volumes de vente en GMS ont augmenté.

ii. La boucherie traditionnelle

La commercialisation de viande dans ce secteur se démarque par des approvisionnements sur mesure pour chaque point de vente, selon la proximité avec les régions d'élevage, leur mode de découpe, leur niveau d'élaboration et leur clientèle. Comme ailleurs dans la distribution, les ventes de viande hachée ont également progressé.

iii. La RHD

La RHD regroupe deux segments :

- La restauration collective telle que les restaurants d'entreprise, les cantines scolaires, les prisons, etc. Ils représentent environ 29% des volumes de viande bovine en RHD en 2017
- La restauration commerciale comportant 71% des volumes restants. Les secteurs spécifiques de ce segment sont :
 - La restauration rapide représentant environ 37% des volumes en 2017
 - La restauration avec service à table (restauration traditionnelle et cafétérias) représentant 33% des volumes et diminuant au profit de la restauration rapide.
 - Les circuits alternatifs représentant environ 1% du volume

Le commerce de viande en RHD connaît une hausse, principalement due à l'augmentation des volumes de viande hachée, tandis que les volumes de la viande piécée diminuent tout en provenant majoritairement de l'étranger. La restauration rapide utilise une grande quantité de viande française,

notamment pour les burgers. Cela est également le cas dans la restauration traditionnelle, où la viande hachée est majoritairement d'origine française.

iv. L'export

La France a exporté 201 000 téc (tonne équivalent carcasse) de viande en 2020 : 31% des volumes étaient destinée à l'Italie, qui reste le premier marché de la viande française suivie par l'Allemagne (23%) et la Grèce (20%) (GEB, Idele, 2021). La viande exportée provient majoritairement de jeunes bovins qui sont mieux valorisés à l'export que sur le marché intérieur. Les quartiers avant des jeunes bovins sont principalement valorisés sur les marchés grec ou allemand tandis que les quartiers arrière le sont sur le marché italien et le désossé sur le marché allemand.

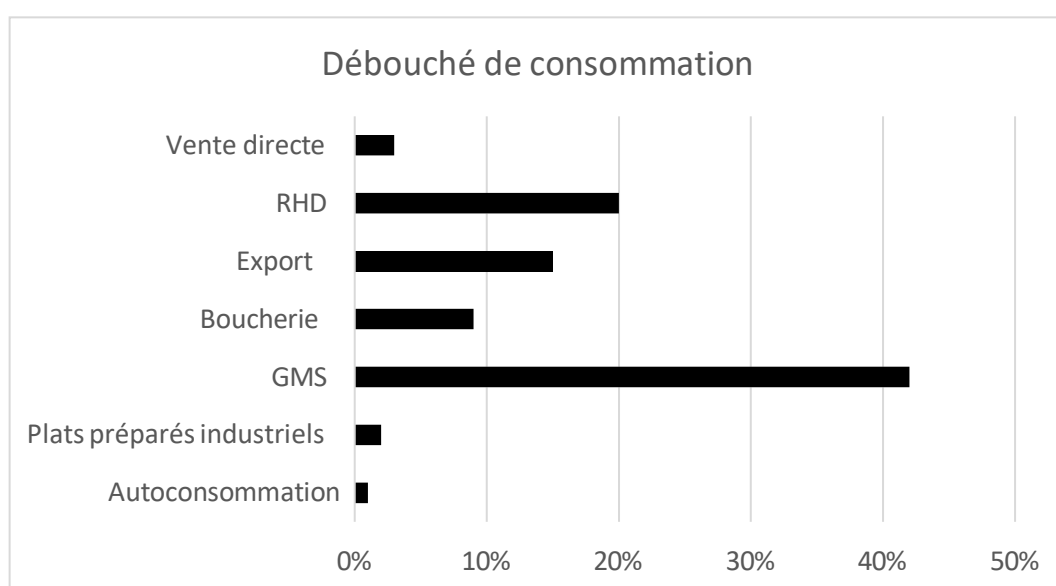


Figure 4 : Débouchés de la viande bovine française importée et commercialisée en 2017 (Interbev et Idele, 2023)

Pour résumer, la découpe et le désossage des quartiers de viande bovine donnent lieu à une diversité de morceaux qui sont destinés à différentes utilisations et débouchés. Ces débouchés peuvent avoir des impacts variés sur la qualité gustative de la viande et l'expérience en bouche du consommateur. Par exemple, les morceaux obtenus en vente directe ou en boucherie peuvent subir une cuisson lente ou être mijotés permettant d'obtenir une viande tendre et juteuse. Les produits transformés, quant à eux, offrent une texture uniforme et des saveurs ajoutées. Au-delà des aspects gustatifs, le choix des consommateurs sont également déterminés par leurs attentes sociétales. Dans la section suivante, seront présentées les stratégies pour répondre à ces exigences.

1.2. Viande sous SIQO

Les signes de qualité peuvent servir comme opérateur de construction de la confiance entre le vendeur et l'acheteur notamment en situation d'incertitude. Les viandes sous Signes d'Identification de Qualité et de l'Origine (SIQO) sont supposées répondre aux exigences des consommateurs en termes de qualité spécifique. Ces qualités spécifiques peuvent être par exemple la qualité supérieure, désignant par là des productions qui se distinguent des produits génériques par un goût jugé comme supérieur par le consommateur moyen. Les viandes sous signes de qualité peuvent également être liées à des territoires réputés pour leur production gastronomique. Enfin, en raison de la croissance des préoccupations environnementales et sociétales, le mode de production biologique avec son label associé a pris de l'ampleur dans les pays développés. Les SIQO s'intègrent donc dans une politique publique de la qualité et de l'origine portée par l'Etat à travers le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Les animaux élevés et commercialisés sous SIQO représentent environ 5% à 6% des abattages nationaux pour le porc, le veau et le gros bovin (INAO, 2021b). Les animaux commercialisés sous SIQO représentent 5,5% de la production bovine en France (INAO, 2022). Ce pourcentage est en pleine croissance alors que la consommation annuelle de viande bovine par habitant baisse en France. Il existe cinq SIQO, dont quatre à l'échelle européenne : les Appellations d'Origine Protégée (AOP), les Indications Géographiques Protégées (IGP), les Spécialités Traditionnelles Garanties (STG) et l'Agriculture Biologique (AB), et un dernier label spécifique à la France, à savoir le Label Rouge (LR).

Ils sont gérés par l'Institut National de l'Origine et de la Qualité (INAO) travaillant avec l'appui et la certification d'organismes indépendants. L'INAO définit à l'échelle nationale les cahiers des charges pour chaque produit. Le signe AB quant à lui est réglementé par un cahier des charges européen unique, qui peut être complété par des pratiques à l'échelle nationale.

Les viandes sous identification géographique (IGP et AOP) et label rouge sont généralement commercialisées en boucherie artisanale, en GMS, en restauration commerciale et collective ou utilisées comme matière première pour élaborer un produit transformé.

La boucherie artisanale représentait initialement le circuit principal des viandes sous SIQO mais cette part a diminué progressivement au profit des GMS et de la restauration (Figure 5).

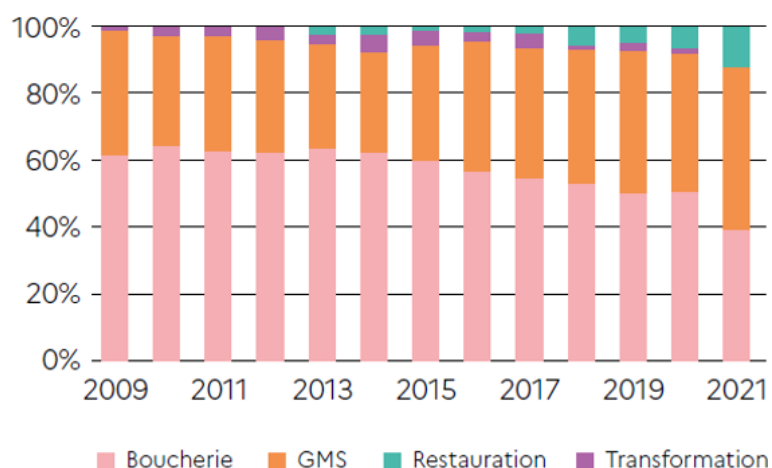


Figure 5 : Évolution de la répartition des circuits de commercialisation des viandes sous SIQO hors AB (Agriculture Biologique) (INAO, 2022)

- *L'appellation d'origine protégée*

« Elle désigne tous les produits dont toutes les étapes de fabrication (la production, la transformation et l'élaboration) sont réalisées dans une zone géographique déterminée, selon un savoir-faire reconnu et un cahier des charges particulier donnant ainsi des caractéristiques particulières aux produits » (INAO, 2021a). Cette appellation protège le nom du produit dans toute l'Union Européenne. Une autre appellation plus ancienne répondant aux critères de l'AOP et protégeant la dénomination sur le territoire français est l'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) qui a été généralisée en Europe avec l'appellation AOP. La viande bovine compte quatre AOP citées dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Liste de Viandes bovines sous AOP en France (oriGIn, 2018a)

Viandes bovines sous AOP	Nature de la viande	Date d'enregistrement
Appellation d'origine taureau de Camargue	Taureau	AOC (1996) AOP (2002)
Maine Anjou AOP (rouge des près)	Bœuf	AOC (2004) AOP (2010)
Fin gras du Mézenc	Bœuf, génisse	AOC (2006) AOP (2013)
Appellation d'origine bœuf de Charolles	Bœuf	AOC (2010) AOP (2014)

- *L'indication Géographique protégé (IGP) :*

« L'IGP identifie un produit agricole brut ou transformé, dont la qualité, la réputation ou autres caractéristiques sont liées à son origine géographique » (INAO, 2021b). Afin d'obtenir cette appellation, au moins une étape parmi la production, la transformation ou, l'élaboration de ce produit doit avoir lieu dans cette aire géographique délimitée. Il est noté que l'IGP est liée à un savoir-faire ou une qualité déterminée attribuables à l'origine géographique. Elle ne se crée pas mais elle peut se baser sur la réputation du produit, qui s'entend par une forte reconnaissance du public à un instant donné. Un produit peut simultanément bénéficier d'une appellation IGP et Label Rouge.

La viande bovine compte 10 produits IGP cités dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Liste de Viandes bovines sous IGP en France (oriGIn, 2018b)

Viandes bovines sous IGP	Nature de la viande	Date d'enregistrement
Charolais de Bourgogne	Bœuf	2017
Rosée des Pyrénées Catalanes	Veau	2016
Bœuf de Vendée (IGP et Label Rouge)	Bœuf	2011
Génisse Fleur d'Aubrac	Génisse	2010
Bœuf de Bazas (IGP et Label Rouge)	Bœuf	2008
Veau d'Aveyron et du Ségala (IGP et Label Rouge)	Veau	2008
Bœuf charolais du Bourbonnais (IGP et Label Rouge)	Bœuf	1996
Bœuf fermier du Maine (IGP et Label Rouge)	Bœuf	1996
Veau fermier du Limousin (IGP et Label Rouge)	Veau fermier	1996
Bœuf de Chalosse (IGP et Label Rouge)	Bœuf	1996

- *Label Rouge (LR)*

« Le Label Rouge désigne les produits qui par leurs conditions de production ou de fabrication ont un niveau de qualité supérieure par rapport aux autres produits similaires sur le marché » (INAO, 2021c). Ce label est spécifique à la France. En plus des qualités sensorielles des produits sous Label Rouge, la

qualité supérieure repose sur :

- Les conditions de production se distinguant des conditions de production des produits similaires habituellement commercialisés,
- L'image du produit améliorée en raison des conditions de production
- Les éléments de présentation ou de services.

La mise en place d'une démarche Label Rouge repose sur un cahier des charges axé sur le choix des animaux, leur alimentation et leur bien-être. Leur qualité gustative est déterminée à l'aide d'analyses sensorielles et de tests organoleptiques réalisés régulièrement en comparant le produit Label Rouge avec le produit courant. Le Label Rouge est ouvert à tous les produits quelle que soit leur origine géographique.

Il existe 17 produits de viandes en Label Rouge et 3 produits transformés. Le Tableau 4 présente les viandes exclusivement sous Label rouge, le Tableau 3 ayant présenté les viandes ayant la double labélisation IGP et Label Rouge.

Tableau 4 : Label Rouge pour les viandes bovines en France (oriGIn, 2018.)

Label Rouge pour les viandes bovines en France	Nature de la viande
Blanc Bleu	Bœuf
Bœuf blond d'Aquitaine	Bœuf
Bœuf de vos prés (Autre Pays du Bovin Allaitant)	Race à viande (blonde d'Aquitaine, Limousine, Parthenaise, Charolaise)
Bœuf de nos campagnes	Bœuf de type race à viande (Basadaise, blonde d'Aquitaine, Limousine)
Bœuf Excellence	Bovin (Blonde d'Aquitaine)
Bœuf fermier Aubrac	Bœuf
Bœuf Gascon	Bœuf
Bœuf Limousin	Bœuf
Charolais	Bœuf
Parthenaise	Bœuf
Bœuf Salers	Veau, bœuf
Veau fermier Breton	Veau
Veau des Monts du Velay et Forez (Vedelou)	Veau de lait

Les éleveurs bovins sous IGP et Label Rouge représentent 18% des éleveurs de bovins allaitants en France.

- *Spécialité Traditionnelle Garantie (STG)*

La STG désigne un produit dont les qualités spécifiques sont liées à une composition, des méthodes de fabrication ou de transformation fondées sur une tradition. La STG est définie par deux éléments ; la

spécificité et l'aspect traditionnel. Elle ne fait pas référence à une origine géographique mais plutôt aux caractéristiques traditionnelles du produit par sa composition ou son mode de production. Il existe en Europe une seule STG en viande bovine à savoir le « Bœuf traditionnel de race normande »

- Agriculture Biologique

« L'agriculture et l'aquaculture biologiques lient la qualité à un mode de production respectueux de l'environnement et du bien-être animal. » (INAO, 2021). Il favorise les équilibres écologiques, l'autonomie alimentaire, la rotation des cultures et les méthodes de défense naturelles, tout en interdisant l'utilisation de produits chimiques de synthèse et d'OGM (Organisme Génétiquement Modifié). Les éleveurs dans ce type d'agriculture accordent une grande attention au bien-être des animaux. La production hors sol est proscrite, ce qui signifie que le bétail ne peut être nourri qu'avec des aliments provenant de sources internes à la ferme. Le label AB, qui garantit le respect des normes biologiques, est de plus en plus présent dans la production de viande bovine en France, avec plus de 3% de la production totale en 2020, commercialisée principalement dans les grandes et moyennes surfaces, les boucheries, les magasins spécialisés et en vente directe (Chatellier et al., 2021).

1.3. Echanges internationaux

Les échanges concernent les animaux vivants et la viande. Ces échanges s'effectuent principalement au sein de l'union Européenne. Les clients principaux de la France pour les échanges de viande sont l'Italie, la Grèce et l'Allemagne. Les viandes fraîches constituent 82% de ces exportations.

La France importe la viande principalement des Pays-Bas, d'Irlande, d'Allemagne, de Belgique et Pologne (80% de volume de viande importée en 2020). Ces importations sont majoritairement constituées de viandes fraîches (63%) et viandes congelées (30%)

L'industrie de la viande bovine constitue un secteur important de l'industrie agroalimentaire française. En France ou partout ailleurs, la production de viande bovine doit répondre à plusieurs segments de marché à savoir : le marché intérieur, l'exportation ou encore la production de viande haut de gamme. Afin de répondre aux attentes de ces différents segments, différents pays ont élaboré des systèmes de classification leur permettant également de gérer la chaîne d'approvisionnement. La prochaine partie fera donc un état de l'art de certains systèmes de classification dans le monde.

2. LES SYSTEMES DE CLASSIFICATION

Les différentes filières bovines dans le monde ont établi des critères de paiement afin d'orienter la production en fonction de leurs attentes, celles des marchés et des consommateurs. Ces critères peuvent être mesurés, appréciés ou calculés et permettent de déterminer la valeur marchande des carcasses. Ces systèmes de classification ont évolué avec le temps. Ces systèmes étaient pour la plupart d'abord centrés sur le rendement en viande et au fil des années, ils se sont progressivement adaptés en intégrant des critères liés aux attentes de consommateurs.

2.1. Vue globale des systèmes de classification dans le monde

La plupart des systèmes de classement dans le monde contiennent des indicateurs simples tels que le sexe, l'âge et le poids des animaux. Ces critères peuvent être évalués de différentes manières. Par exemple, l'âge est considéré en tant que tel en Afrique du sud et en France mais est considéré par l'intermédiaire du nombre d'incisives permanentes en Nouvelle-Zélande et au Brésil. Le poids permet de définir les différentes catégories de carcasses en combinaison avec le sexe de l'animal. Certains pays intègrent le mode de production en prenant compte l'absence d'implants hormonaux.

Le Tableau 5 présente les critères de classification et d'évaluation de la qualité de la carcasse bovine dans différents pays. Chaque pays utilise des unités de classement spécifiques et des critères de pré-abattage, d'abattage, de refroidissement et de post-refroidissement pour évaluer la viande. Les critères varient également d'un pays à l'autre. Seul le système de classement australien prend en compte la carcasse et la spécificité des découpes ainsi que les critères pré-abattage. Tous les systèmes prennent en considération à minima le poids de la carcasse et le sexe de l'animal. Cette diversité de critères reflète les différentes normes et préférences des consommateurs dans chaque pays, mais surtout les pratiques spécifiques des professionnels de la viande.

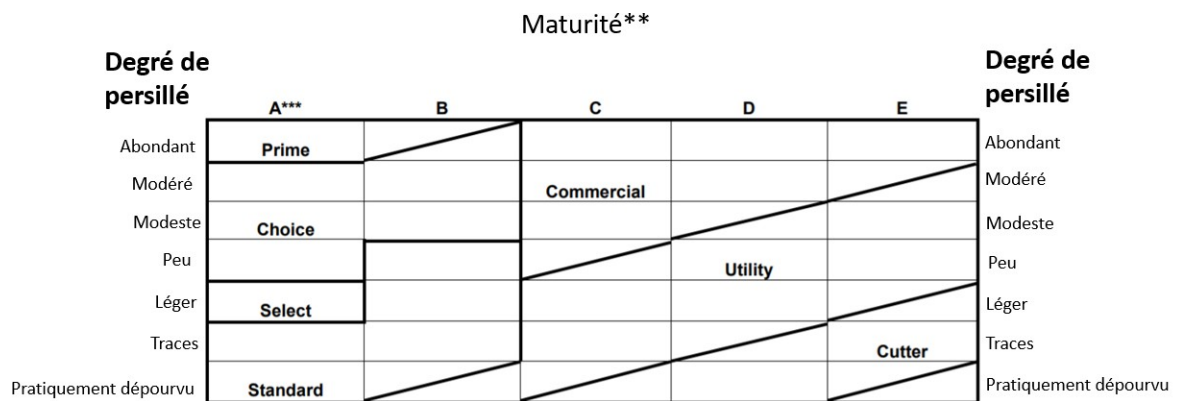
Tableau 5 : Critères importants des principaux systèmes de classification et de classement de la viande bovine dans certains pays du monde (R. J. Polkinghorne & Thompson, 2010).

	Canada	Europe	Japon	Corée du sud	Afrique du sud	USA	Australie	
Classificateur	Canada	EUROP	JMGA (Japanese Meat Grading Association)	Corée du sud	Afrique du Sud	USDA	AUS-MEAT	MSA
Unité de classement	Carcasse	Carcasse	Carcasse	Carcasse	Carcasse	Carcasse	Carcasse	Découpe
Critères avant abattage							Alimentation au grain	- % <i>Bos indicus</i> - Hormone de croissance
Critères à l'abattage	- Poids de carcasse - Sexe - Conformation	- Poids de carcasse - Sexe - Couverture du gras - Conformation	- Poids de carcasse - Sexe	- Poids de carcasse - Sexe	- Poids de carcasse - Sexe - Dentition - Graisse des côtes	- Poids de carcasse - Sexe	- Poids de carcasse - Sexe - Forme de bout - Dentition - Graisse P8	- Poids de carcasse - Sexe - Stimulation électrique - Suspension
Critère au moment du refroidissement	- Score de persillé - Couleur de la viande - Texture - Couleur de gras - Epaisseur du gras		- Score de persillé - Couleur de la viande - Clarté de la viande - Couleur du gras - Clarté du gras - Texture du gras - Fermeté du gras - EMA (surface de la noix) - Epaisseur de la côte - Epaisseur du gras	- Score de persillé - Couleur de la viande - Couleur du gras - Fermeté - Texture - Maturité (du maigre) - EMA (surface de la noix) - Epaisseur du gras		- Persillé - Score d'ossification - Couleur de la viande - Texture de la viande - Lard costal (rib fat) - EMA (surface de la noix) - Gras rénal et péri rénal	- Score de persillé - Couleur de la viande - Couleur du gras	- Score de persillé - Score d'ossification - Couleur de la viande - Hauteur de la bosse - pH Ultime
Critères post-refroidissement								- Temps de maturation - Méthode de cuisson

2.2. Etats-Unis

Les Etats-Unis classent la viande en fonction du rendement et de la qualité de la carcasse (USDA). Le rendement en viande des carcasses se décline en 4 classes ; « Yield Grade 1 » « Yield Grade 2 » « Yield Grade 3 » et « Yield Grade 4 ». De plus, il existe 8 scores de qualité de viande bovine aux Etats-unis : « Prime », « Choice », « Select », « Standard », « Commercial », « Utility », « Cutter » & « Canner » (USDA, 2017). Les classes de qualité sont basées sur deux critères principaux : le degré de persillé de la viande bovine et la maturité (âge estimé de l'animal à l'abattage)

- « *PRIME* » : La viande bovine de cette catégorie est produite à partir de jeunes bovins bien nourris. Cette viande présente un persillé abondant (la quantité de graisse intercalée dans la viande maigre) et est généralement vendue dans les restaurants et les hôtels.
- « *CHOICE* » : La viande bovine de cette catégorie est de haute qualité, mais elle est moins persillée que celle de la catégorie « *PRIME* ».
- « *SELECT* » : Cette catégorie décrit une viande de qualité très uniforme et normalement plus maigre que les catégories supérieures. Elle est assez tendre, mais comme elle est moins persillée, elle peut ne pas avoir la jutosité et la saveur des catégories supérieures.
- « *STANDARD* » et « *COMMERCIAL* » : les viandes de ces catégories sont souvent vendues comme viande non classée ou comme viande de marque de magasin. Les catégories « *utility* », « *Cutter* » & « *Canner* » sont rarement, voire jamais, vendues au détail. Elles sont plutôt utilisées pour fabriquer du bœuf haché et des produits transformés.
- Depuis 2012 une nouvelle catégorie a été conçue ; « *USDA CERTIFIED TENDER* » qui est un programme de marketing qui aide les consommateurs à choisir les coupes de bœuf qu'ils achètent. Afin de commercialiser la viande sous cette catégorie, les grossistes ou les détaillants doivent tester certains muscles bovins par une mesure de la force de cisaillement de la tranche qui détermine la dureté du muscle et des muscles associés.



* Suppose que la fermeté du maigre est développée de manière comparable au degré de persillé et que la carcasse n'est pas de "coupe sombre".

** La maturité augmente de gauche à droite (A à E).

*** La partie de la figure concernant la maturité A est la seule applicable aux carcasses de Jeunes bovins.

Figure 6 : Relation entre le persillé, la maturité et les catégories de qualité de la carcasse (USDA, 2017)

2.3. Japon

Le système de classement Japonais, élaboré par la Japanese Meat Grading Association (JMGA), a connu ses dernières modifications en 1988 (Gotoh et al., 2014). Les carcasses sont coupées à la 6^e et 7^e côte au moins une heure après l'abattage sur laquelle sont mesurés différents critères (Figure 7). Les carcasses sont classées en fonction du rendement en viande (A, B ou C) calculé à partir des critères mesurés et de la qualité (sur une échelle de 1 à 5). L'évaluation de la qualité se base sur l'évaluation de 4 éléments à savoir : le persillé, la couleur du muscle et du gras, la fermeté, la texture ainsi que l'éclat du muscle et du gras. La note de qualité est ensuite attribuée en fonction de la note la plus basse pour ces 4 éléments (Figure 7).

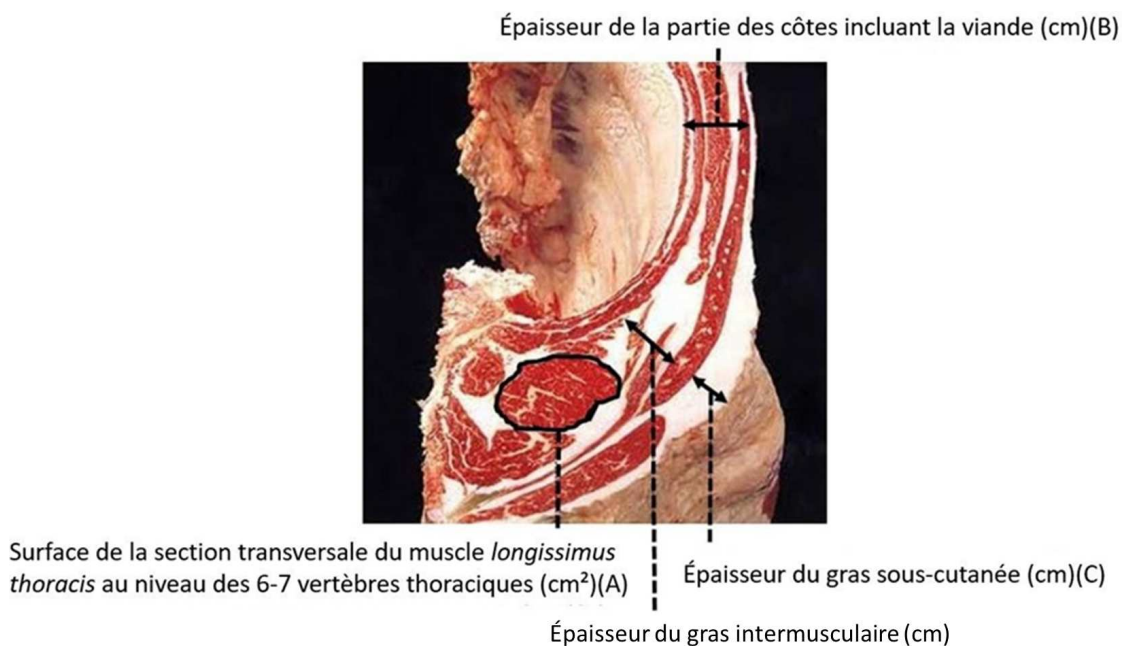


Figure 7 : Classement de carcasse JMGA (Gotoh et al., 2014)

i) Estimation du rendement en viande

Pourcentage estimé du rendement en viande (%) = $67.37 + (0.130 \times \text{Aire de la noix en cm}^2) + (0.667 \times \text{épaisseur de la côte en cm}) - (0.025 \times \text{Poids du côté gauche à froid en kg}) - (0.896 \times \text{épaisseur du gras sous-cutané en cm})$. Le score de rendement est classé en 3 classes : A, B, C

Tableau 6 : Scores de rendement selon le système JMGA

Classe	Pourcentage estimé de rendement	Spécification
A	72 % et plus	Le rendement des coupes totales est supérieur à la moyenne
B	Supérieur ou égal à 69 %, inférieur à 72 %	Rendement moyen
C	Moins de 69 %	En dessous de la moyenne

ii) Persillé

La classification se fait sur une échelle de 1 à 12 en comparant le persillé de la carcasse à une grille standard d'images de persillé. Ces scores de persillé sont ensuite répartis en 5 catégories pour déterminer la qualité.

iii) Couleur et clarté du muscle

La couleur est évaluée en utilisant un modèle en plastique fabriqué à partir de résine de silicone. Les scores de couleurs vont de 1 à 7, le score 1 étant rouge pale et le score 7 étant rouge foncé. La clarté est évaluée visuellement avec une lampe spéciale qui est également utilisée pour l'évaluation de la couleur. Les scores de couleur et l'évaluation de la clarté sont ensuite répartis entre les 5 catégories de qualité.

iv) Fermeté du muscle et texture

L'évaluation de la fermeté se fait selon la quantité d'exsudat sous forme d'eau liée contenant les protéines libérées par le muscle et présent sur la surface du muscle coupé. Elle se fait également selon le degré de dépression de la surface d'incision. Une viande très persillée a une grande capacité de rétention d'eau et une bonne fermeté (Gotoh et al., 2014).

2.4. Pays en voie de développement

La majorité des systèmes de classement et de classification dans les pays en voie de développement notamment en Afrique australe (Tableau 4), appliquent des schémas similaires ou dérivés des principaux systèmes qui existent de part et d'autre dans le monde. (Allen, 2014). Ces pays mettent l'accent sur la maturité de la carcasse (liée à l'âge de l'animal), l'état d'engraissement et la conformation (Malawi Meat & Meat Products Act, 1985 ; South African Meat Industry Company (SAMIC), 2006 ; Botswana Livestock & Meat Industries, 2007 ; Zimbabwean Carcass Classification &

Grading Regulations, 2016). Malheureusement, à l'exception de l'Afrique du Sud et de la Namibie, les informations décrivant les systèmes de classification et de classement des carcasses de bovins dans les pays d'Afrique australe sont limitées. Les principaux critères de classement utilisés dans certains pays d'Afrique australe sont résumés dans le Tableau 7.

Le système de classification décrit les carcasses sur la base de leurs caractéristiques physiques. Ces caractères sont facilement évalués sur la carcasse et comprennent l'âge de l'animal, le score de gras (épaisseur de la graisse sous-cutanée) et la note de conformation de la carcasse. Les taureaux sont classés séparément. Ce système constitue un moyen efficace de classer et de gérer les variations des caractéristiques et de la qualité de la carcasse et de la viande, qui sont indiquées au moyen de marques distinctives et de codes d'identification et de classification de l'abattoir en fonction du type et de la taille de l'abattoir (Webb., 2015).

Tableau 7 : Classement des carcasses dans les pays en voie de développement (Chingala et al., 2017)

Pays	Botswana	Malawi	Namibie	Zimbabwe
Caractéristiques évaluées sur la chaîne d'abattage	<ul style="list-style-type: none"> - Poids de la carcasse - Dentition 	<ul style="list-style-type: none"> - Poids de la carcasse - Dentition - Sexe 	<ul style="list-style-type: none"> - Poids de la carcasse - Dentition - Sexe - Gras de couverture - Conformation - Contusions 	<ul style="list-style-type: none"> - Poids de la carcasse - Dentition - Sexe - Gras de couverture - Conformation - Contusions - Ossification
Caractéristiques évaluées sur la carcasse en chambre froide	<ul style="list-style-type: none"> - Couleur du gras 	<ul style="list-style-type: none"> - Poids de la carcasse à froid - Conformation - Score de persillé - Gras de couverture - Couleur de gras - Ossification - Contusions 		

2.5. Le système EUROP

Le système de classification EUROP a été implémenté en 1981. Il est appliqué sur les gros bovins, le veau, l'agneau et le porc. Il permet d'établir le niveau de qualité des carcasses sur 2 critères principaux ; la conformation et l'état d'engraissement. Ce système de classification est obligatoire pour toute carcasse et est indiqué sur l'étiquette de traçabilité.

Le niveau de conformation est réparti en 5 classes principales désignées par les lettres E (développement musculaire excellent), U (développement musculaire très bon), R (bon développement musculaire), O (développement musculaire moyen) et P (développement musculaire médiocre) (Figure 8). Les classes sont souvent subdivisées en sous-classes supérieures (+), moyennes (=) et inférieures (-) et dans certains cas, une échelle de conformation de 15 points est utilisée en créant trois subdivisions (élevée, moyenne et faible) dans chacune des classes EUROP.

Une classe supplémentaire, la classe S (Supérieure), a été ajoutée en 1991 afin de différencier les animaux de type culard. Par la suite la grille communautaire est devenue SEUROP. Cette classe supplémentaire est facultative et la France ne l'a pas retenue ni inclus les animaux de type culard dans la classe E.

L'état d'engraissement est également divisé en cinq classes désignées numériquement de 1 (très maigre) à 5 (très gras). Là encore, les classes 4 et 5 sont souvent subdivisées en sous-classes plus maigres (L) et plus grasses (H) et, à certaines fins, une échelle de quinze points est utilisée en créant trois subdivisions dans chaque classe de graisse (FranceAgrimer, 2010).

Le classement est effectué par des classificateurs qualifiés et agréés par FranceAgrimer.

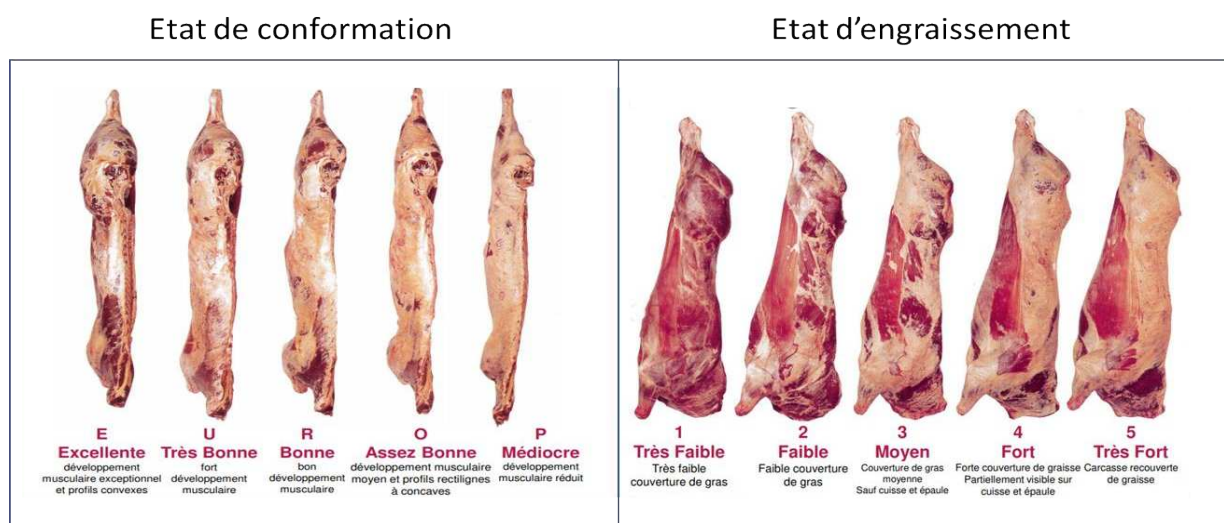


Figure 8 : Classement EUROP

Le système de classement EUROP met l'accent sur le rendement en viande plutôt que sur la qualité organoleptique de la viande. Plusieurs études ont permis de démontrer que le classement EUROP ne reflète pas la qualité gustative (Bonny et al., 2016; Liu, et al., 2020a).

Il existe une relation positive entre les scores de conformation et la proportion de gras mais aussi entre la note de persillé et la teneur en gras intramusculaire déterminée par un dosage chimique. Etant donné l'importance du gras intramusculaire sur la qualité sensorielle, il semblerait logique que le score de conformation européen ait une relation négative avec la qualité sensorielle. Toutefois, Guzek et al.,

(2013) ont démontré que le score de conformation n'aurait aucune relation avec la tendreté. Ceci serait dû à l'influence de la mutation de la myostatine. Cette mutation augmente avec le score de conformation et améliore la tendreté tout en diminuant la teneur en gras intramusculaire (Bonny et al., 2016). Les scores de jutosité sont également similaires quelle que soit la conformation. Il n'existe donc pas de relation significative entre le score de conformation et la qualité sensorielle, en raison des relations multiples et contradictoires notamment entre la musculature, le potentiel de protéolyse musculaire et la quantité de gras dans la carcasse ou dans le muscle (Bonny et al., 2016).

Les études de Thompson (2001 et 2004) ont révélé qu'il y avait une très forte relation positive entre la jutosité et la flaveur de la viande avec les scores de persillé et le pourcentage de gras intramusculaire chimique. Logiquement, il existe aussi une corrélation entre la note de persillé et le pourcentage de gras intramusculaire chimique ($R^2 = 0.29$ à 0.49) (Indurain et al., 2009).

L'ensemble de ces études permet de conclure que le classement européen des carcasses n'est pas suffisant pour prédire la qualité organoleptique de la viande bovine. C'est pourquoi, il a été proposé des critères additionnels pour mieux refléter cette qualité tel que le persillé, par exemple (Monteils et al., 2017)

En 2022, suite aux Etats Généraux de l'Alimentation, la filière bovine française a prévu d'intégrer de nouveaux paramètres d'évaluation des viandes afin d'améliorer l'expérience gustative pour le consommateur. Elle a retenu le persillé en complément des outils actuels considérant que le persillé est susceptible d'améliorer la jutosité, et de favoriser la tendreté et la flaveur. Des travaux menés par l'institut de l'Elevage pour Interbev ont permis de valider une grille de mesure de persillé en 6 classes (notées de 1 à 6) (Interbev, 2022).

2.6. Système MSA

En 1996, l'Australie a développé un système de garantie de la qualité gustative de la viande bovine destiné aux consommateurs appelé, MSA (Meat Standards Australia) (Ferguson et al., 1999 ; Polkinghorne et al., 1999 ; Thompson et al., 1999a et 1999b ; Thompson, 2002). Ce système intègre à la fois les informations avant et après abattage couplées à des caractéristiques de carcasse ou d'autres indicateurs à l'abattoir (comme le stress *post mortem*, le pH et baisse de température) (Polkinghorne et al. 2015).

Le système MSA (Meat Standards Australia) est le premier système de classement élaboré pour la prédiction de la qualité sensorielle de la viande bovine et se base sur les différentes combinaisons de muscle, de mode de cuisson, de durée de maturation ainsi que sur les appréciations par des consommateurs non entraînés. Ce système est exploité sur le plan commercial depuis l'an 2000.

Le modèle MSA a initialement été développé à l'aide de tests consommateurs et des données de production et de transformation issues de 12 pays différents et de 12 700 échantillons de viande bovine (Bonny et al., 2018). La version actuelle de l'année 2022 utilise des données qui proviennent de plus de 200 000 consommateurs de 13 pays et de plus de 82 000 morceaux (Meat & Livestock Australia, 2022). En Australie, alors qu'il s'agit du système dont l'adoption est volontaire (donc non obligatoire), 55% des bovins abattus ont été classés selon le système MSA avec 38 678 producteurs de viande bovine enregistrés auprès du Meat Livestock Australia (MLA) (soit 26% des exploitations bovines) (Meat & Livestock Australia, 2022).

a. Principes du modèle

Le système MSA a pour objectif de s'éloigner d'un système d'évaluation se basant soit sur les caractéristiques de la carcasse seulement soit sur des analyses sensorielles avec des experts au profit de l'analyse sensorielle avec des consommateurs non-entraînés, reflétant ainsi d'une meilleure manière les attentes des consommateurs réels.

Ces consommateurs notent les échantillons sur des échelles linéaires de 0 à 100 mm (correspondent à des notes de 1 à 10) pour quatre caractéristiques sensorielles à savoir : la tendreté, la jutosité, la flaveur et l'appréciation globale.

Les consommateurs classent les échantillons dans une des quatre catégories de qualité : Non satisfaisant (déclassé), Bon pour tous les jours (3 étoiles), Meilleur que le quotidien (4 étoiles), Qualité supérieure (5 étoiles).

Ensuite, un score décrivant l'ensemble de l'expérience organoleptique du consommateur est généré, il est appelé MQ4 (Meat Quality 4) et va d'une échelle de 0 à 100. Pour cela, les scores de tendreté, de jutosité, de flaveur et d'appréciation globale sont combinés après pondération par différents coefficients (initialement 0,4 ; 0,1 ; 0,2 et 0,3, pour la tendreté, la jutosité, la flaveur et l'appréciation globale respectivement) (Watson, Polkinghorne, et al., 2008).

L'étape suivante consiste à établir un lien entre le score MQ4 et les quatre catégories de qualité pour obtenir des limites entre chacune de ces classes. Une analyse discriminante est utilisée pour obtenir ces limites, à savoir, en Australie, une valeur de 45 pour le MQ4 entre les catégories Non satisfaisant et 3 étoiles, 63,5 entre les catégories 3 et 4 étoiles et 76,5 entre les catégories 4 et 5 étoiles (Watson, Gee, et al., 2008).

L'indice MSA a été créé pour avoir une approximation de la qualité gustative potentielle de la carcasse entière. L'indice MSA est un nombre généralement compris entre 30 et 80 sur l'échelle de 0 à 100 et représente le potentiel de qualité gustative de toute la carcasse. Il est calculé en combinant les scores MQ4 de chaque muscle après pondération par le poids relatif de chaque muscle en considérant un

temps de maturation minimum (5 jours) et la méthode de cuisson la plus courante pour le muscle considéré (McGilchrist et al., 2019).

b. Composante du modèle MSA

L'abattoir constitue le pivot du système MSA. Il centralise les données émanant des éleveurs, des caractéristiques des carcasses ainsi que les caractéristiques de maturation et de transformation. Il existe des seuils obligatoires de certaines caractéristiques (pH, couleur, épaisseur de gras, etc) pour qu'une carcasse puisse être classée. Différents critères sont incorporés dans un modèle de classement pour prédire la qualité gustative pour des combinaisons individuelles de muscles et de méthodes de cuisson (Bonny et al., 2018). Ces différents critères ont des niveaux d'impact variables en fonction des différents muscles de la carcasse tel que la méthode de suspension des carcasses. Les critères qui composent ce modèle sont :

- Avant abattage : Pourcentage de *Bos indicus* (évalué en mesurant la hauteur de la bosse de l'animal), le type d'animal, le poids de la carcasse, l'utilisation ou non d'implants hormonaux, la présence ou non d'une alimentation lactée.
- Après abattage : le score d'ossification, la nature du muscle, la note de persillé sur le *Longissimus dorsi* (LD), l'épaisseur de gras sous cutané au niveau de la 10^{ème} côte, le mode de suspension de la carcasse, la couleur du muscle LD
- Transformation : Durée de maturation et méthode de cuisson

Ces critères ou points critiques sont évalués par un classificateur agréé par AUS-MEAT pour le MLA ou la Fondation 3G avec une remise à niveau périodique. Ces évaluations sont faites de manière visuelle et peuvent donc être considérées comme en partie subjectives. Dans la prochaine partie, je décrirai des travaux qui ont été effectués pour avoir des mesures instrumentales perçues comme plus objectives.

3. EVALUATION INSTRUMENTALE DES CARACTERISTIQUES DES CARCASSES

Les procédures conventionnelles de classement des carcasses par l'être humain sont parfois considérées comme subjectives et il y a une volonté de pouvoir mettre en œuvre, à la place, des mesures instrumentales non invasives directement sur la ligne de production (Coombs et al., 2021). Des critères de qualité tels que la teneur ou la proportion en eau ou en gras sont des mesures plus précises et objectives mais requièrent des méthodes de mesures qui sont longues, invasives, destructives et coûteuses. Ces méthodes de mesures ne sont donc pas adaptées au milieu industriel. Il est donc nécessaire de développer des technologies faciles à utiliser par les opérateurs en abattoir, ou plus généralement les acteurs de la filière afin de les aider à prédire la qualité de leur produit.

Plusieurs technologies objectives et non destructives sont déjà sur le marché. Plusieurs sont limitées par leur manque de portabilité ou leurs coûts d'installation élevés (Scholz et al. 2015).

Différents critères de validation sont utilisés comme par exemple la corrélation entre un jeu de valeurs observées et un jeu de valeurs prédites appréciée par la valeur R^2 , R étant le coefficient de corrélation entre ces deux jeux de valeurs. Certains auteurs utilisent des données de calibration puis de validation tandis que d'autres n'utilisent que des données de calibration. Il faut donc faire attention en comparant les différentes valeurs de R^2 .

3.1. Tomographie assistée par ordinateur (TAC)

La TAC permet de reconstruire une image en trois dimensions d'un objet à partir de mesures effectuées à travers cet objet. La technique utilisée consiste à projeter à partir de différentes directions des rayons X sur un objet et de mesurer la quantité de rayonnement qui traverse l'objet à chacune de ces directions. Les projections sont ensuite détectées par un système de détection. Les données obtenues sur ce système sont ensuite utilisées pour reconstruire une image en trois dimensions.

La tomographie assistée par ordinateur est une technique non invasive qui peut fournir des prédictions *in vivo* sur la composition de la carcasse. Elle a déjà été étudiée dans le cas de la viande porcine et ovine (Prieto et al., 2010). Cette technique a permis d'avoir des résultats encourageants sur la prédiction de la teneur en graisses, en muscles et en os des carcasses bovines à partir d'un scan de l'animal vivant (Navajas et al., 2010 ; Prieto et al., 2010). Les valeurs de prédiction (R^2) varient entre 0.89 à 0.99 dépendant du tissu et de la méthode de calibration. Prieto et al. (2010) ont utilisé ce type de scanner pour prédire la composition, la teneur en acides gras et les critères liés à la qualité gustative (couleur, tendreté, jutosité, flaveur) pour les bovins de race croisée Aberdeen Angus et Limousine. Un R^2 a été

obtenu pour chacune des races pour prédire le gras sous- cutané (respectivement 0,94 et 0,92), le gras intermusculaire (respectivement 0,81 et 0,86), le gras total (respectivement 0,89 et 0,93) et la masse musculaire totale (respectivement 0,99 et 0,97). Les profils d'acides gras et la teneur en gras intramusculaire ont été modérément prédits avec des prédictions R^2 allant de 0,61 à 0,75 et de 0,71 à 0,76, respectivement.

La capacité de prédiction des critères liés à la qualité gustative reste faible avec des coefficients de détermination inférieurs à 0,30 (Farmer & Farrell, 2018 ; Prieto et al., 2010). Son utilisation sur la chaîne de production est fortement limitée par le prix et la taille de l'équipement mais son utilisation reste pertinente pour la recherche et la calibration d'autres outils.

3.2. Ultrasons

Les ultrasons sont des ondes sonores de haute fréquence pouvant pénétrer dans les tissus et permettant de mesurer leur densité. Lorsque les ultrasons pénètrent dans la viande, ils sont réfléchis par différentes couches de tissus y compris le gras et les muscles. La quantité de gras sera donc déterminée par une analyse de la façon dont les ondes sonores sont réfléchies.

L'ultrason a été utilisé pour prédire des critères en rapport avec le gras tel que l'épaisseur de gras et la teneur en gras intramusculaire.

3.3. Analyse d'images par ordinateur

La vision par ordinateur est une technique qui fait usage d'algorithmes informatiques pour traiter et analyser des images. Elle consiste à utiliser des caméras pour capturer des images de la surface de la viande pour ensuite les analyser à l'aide d'algorithmes afin de déterminer différentes caractéristiques telles que la couleur, le persillé, la tendreté, etc.

Différentes études (Jackman et al., 2008) ont prédit la couleur, le persillé et la qualité gustative de la viande bovine maturée entre 2 et 21 jours. Les résultats ont permis de prédire « l'acceptation globale » et la force de cisaillement de Warner Bratzler avec des valeurs de R^2 de 0,88 et 0,85 respectivement. Les autres critères sensoriels ont été moins bien prédits ; jutosité (0,60), flaveur (0,49).

3.4. Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR)

La spectroscopie peut être définie comme l'étude de l'interaction entre la lumière et la matière et a été découvert par F.W. Herschel en 1800. Ce type de rayonnement couvre une plage de longueurs d'onde de la lumière comprise entre 780 et 2500 nm. Son principe repose sur l'absorbance des rayonnements infrarouge à des longueurs d'onde spécifiques par les liaisons chimiques des molécules d'un produit et en convertissant cette absorption en vibration moléculaire. Ces molécules peuvent être ensuite identifiées et quantifiées grâce à la signature d'absorption caractéristique aux liaisons de ces molécules.

La SPIR comprend premièrement une source de rayonnement qui émet de la lumière proche infrarouge dirigée vers l'échantillon à analyser. Une partie de cette lumière va traverser l'échantillon et une autre partie sera absorbée par les liaisons des molécules en fonction de leurs propriétés chimiques. Un détecteur mesure ensuite la lumière qui a été transmise ou celle réfléchiée par l'échantillon à différentes longueurs d'onde. Ce détecteur convertit ensuite les mesures en spectre représentant l'absorption de la lumière en fonction de la longueur d'onde.

La SPIR a déjà été longtemps utilisée dans la recherche alimentaire et nutritionnelle notamment dans le domaine de la viande (Dixit et al., 2017; Prieto et al., 2009).

Dans la viande, les myofibrilles ont la capacité de disperser la lumière et cette dispersion dépend de leur taille (Meurens & Yan, 2006). Les valeurs d'absorption sont plus élevées sur des échantillons intacts que ceux finement broyés

Le niveau de précision varie en fonction des études (Prevolnik et al., 2004). Elle a permis de déterminer les principaux constituants dans la viande et les produits à base de viande tels que l'humidité, les matières grasses et les protéines. Elle a été approuvée par l'AOAC (Association of Official Agricultural Chemists) pour l'analyse commerciale de l'humidité, les matières grasses et les protéines dans la viande et les produits carnés à l'aide des modèles de prédiction (Prieto et al., 2009). Elle permet également de faire une discrimination entre la viande congelée et non congelée ainsi qu'entre la viande issue de différents types d'animaux tels que le bœuf, le kangourou ou le poulet. Plusieurs études ont également été effectuées afin de prédire les paramètres technologiques et sensoriels de la viande et ces études ont montré une fiabilité moindre (Prevolnik et al., 2004).

4. MARQUEURS GENETIQUES POUR PREDIRE LA QUALITE GUSTATIVE DE LA VIANDE BOVINE

4.1. Le génome bovin

Le génome bovin est l'ensemble complet de son ADN et qui contient toutes les informations nécessaires pour construire et assurer le fonctionnement physiologique d'un bovin. La séquence du génome bovin a été obtenue en 2009, à partir d'une vache de race Hereford (Elsik et al., 2009). Plus tard, des données de séquençage de races Holstein, Angus, Limousin, Jersey, Norwegian Red et Brahman ont été obtenues. Le tout dernier assemblage date d'avril 2018 (ARS-UCD1.2) et a été publié par l'USDA-ARS (United States Department of Agriculture- Agricultural Research Service). Le génome bovin est constitué d'environ 3 milliards de paires de base (combinaison de deux molécules complémentaires ; adénine avec thymine ou guanine avec cytosine, reliées par des liaisons hydrogène dans la double hélice de l'ADN) et de 29 paires d'autosomes (chromosomes qui ne sont pas impliqués dans la détermination sexuelle) et d'une paire de gonosomes (chromosomes sexuels XY).

La dernière version de la base de données Ensembl : UMD3.1 (Martin et al., 2023) indique que les bovins possèdent 21 880 gènes codant (un gène codant est un segment d'ADN qui contient les instructions pour la production d'une protéine spécifique) et 5 235 non codants (ne codent pas pour une protéine, mais peut jouer un rôle dans la régulation de l'expression génique) qui produisent au total 43 984 transcrits différents (Ensembl, 2018).

Le génome bovin a été exploré afin d'identifier des marqueurs génétiques qui sont associés à des critères de qualité tels que la tendreté ou le gras intramusculaire. La méthode la plus utilisée pour déterminer ces associations est la méthode d'association pangénomique appelée GWAS pour Genome Wide Association Studies.

4.2. Etudes d'association pangénomique (GWAS)

Les études d'association à l'échelle du génome (GWAS) peuvent tester des dizaines voire des centaines de milliers de variantes génétiques tout au long du génome dans une population donnée pour trouver celles qui sont statistiquement associées à un caractère spécifique (Uffelmann et al., 2021). La première étape est le génotypage des échantillons d'ADN de la cohorte.

Les variants génétiques couramment étudiées dans les études d'association pangénomique sont les polymorphismes nucléotidiques simples (SNP).

4.3. Génotypage

Le génotypage est réalisé à l'aide des puces à ADN. Une puce à ADN est un support rigide (en verre, silicium ou plastique) mesurant quelques centimètres carrés, sur lequel de courtes séquences d'ADN ont été déposées. Ces courtes séquences d'ADN sont appelées « sondes ». Le principe d'une sonde à ADN repose sur la propriété qu'a un simple brin d'ADN dénaturé de reformer spontanément sa double hélice lorsqu'il est en présence d'un brin complémentaire. Les quatre bases nucléiques de l'ADN (A, G, C, T) s'apparient deux à deux par des liaisons hydrogène (A = T et T = A ; G ≡ C et C ≡ G). Les puces à ADN permettent donc de mesurer la présence et la quantité de milliers à des millions de fragments d'ADN simultanément. De ce fait, elles permettent la détection des variants génétiques comme notamment les SNP.

4.3.1. SNP (Single Nucleotide Polymorphisms)

Un SNP est une variation (polymorphisme) d'une seule paire de bases du génome entre individus d'une même espèce ou entre un individu et la version de référence du génome de cette espèce. Les SNP peuvent se retrouver n'importe où sur l'ADN : au sein de régions codantes (exon) ou non-codantes de gènes (intron, 3'- et 5'-UTR), ou dans les régions intergéniques (entre les gènes).

La première puce à ADN spécifique au bovin a été conçue dans le cadre d'une collaboration entre des chercheurs du ministère américain de l'agriculture (USDA) et Illumina, une société spécialisée dans les technologies de séquençage et d'analyse génomique (Matukumalli et al., 2009). Les chercheurs ont utilisé les informations issues du projet de séquençage du génome bovin, qui s'est achevé en 2009, pour identifier des marqueurs SNP potentiels. Ces marqueurs ont ensuite été validés et utilisés pour concevoir la première puce à ADN bovin, qui a été publiée en 2009 et contenait environ 54 000 SNP. Depuis, d'autres réseaux SNP à plus haute densité ont été développés pour la recherche sur les bovins.

Cette puce à ADN contient des sondes qui vont se lier spécifiquement aux séquences d'ADN correspondant à un SNP donné. En mesurant la quantité de liaison de chaque sonde, il est possible de déterminer la présence ou l'absence d'une variation génétique.

4.3.2. Imputation

Il peut arriver que certaines informations manquent dans les séquences d'ADN analysées. C'est là que l'imputation est utilisée. L'imputation est une technique qui permet de prédire les données manquantes dans les séquences d'ADN en utilisant des informations provenant de marqueurs génétiques voisins. En d'autres termes, l'imputation génotypique est une technique qui permet d'évaluer avec précision les preuves d'association à des marqueurs génétiques qui ne sont pas directement génotypés (Li et al., 2009). Elle augmente la puissance des analyses d'association et permet de combiner les résultats d'analyses d'association entre les différentes études qui reposent sur les différentes plates-formes de génotypage.

4.3.3. Quantitative trait locus (QTL)

Une fois que les génotypes des SNPs ont été identifiés, l'analyse QTL peut être réalisée en déterminant les régions génomiques (c'est-à-dire les segments chromosomiques) les plus susceptibles d'abriter les variantes génétiques associées au caractère d'intérêt. Pour ce faire, on calcule généralement le déséquilibre de liaison (DL) entre les SNP associés et le caractère, puis on utilise des méthodes statistiques pour déduire l'emplacement du QTL dans le bloc déséquilibre de liaison.

Les marqueurs génétiques et les études d'association pangénomique sont essentiels pour identifier des marqueurs pour la qualité gustative de la viande bovine. En utilisant ces marqueurs, il est ensuite possible de prédire la qualité gustative de la viande à partir de l'ADN, offrant une évaluation objective et efficace avant l'abattage. Ces marqueurs permettent d'améliorer la sélection génétique des animaux destinés à produire de la viande de haute qualité, répondant ainsi aux attentes des consommateurs en termes de goût et de satisfaction.

OBJECTIFS DE LA THESE

Il ressort de cette étude bibliographique que la qualité sensorielle de la viande bovine est dépendante de plusieurs facteurs qui doivent tous être considérés simultanément. Cependant, la méthode de classification des carcasses en vigueur en France et dans l'Union Européenne ne prend pas en considération la totalité de ces facteurs. Il y a donc ainsi un faible lien entre cette méthode de classification et la qualité sensorielle de la viande contribuant ainsi à la difficulté de maîtriser et de prédire cette qualité gustative. Il ressort également que l'évaluation en abattoir des critères en lien avec la qualité gustative se fait majoritairement visuellement et ceci peut rendre ces mesures peu précises voire subjectives. Cette thèse vise donc à tester un modèle de prédiction de la qualité sensorielle en race Limousine, ainsi que d'évaluer diverses méthodes pour la collecte de données et l'interopérabilité de ces données en lien avec la qualité sensorielle. Les résultats de ces travaux pourront permettre de garantir la qualité sensorielle pour les consommateurs et ainsi permettre à la filière viande de garder sa part de marché face au nombre grandissant de substituts de viande.

Afin de répondre à cet objectif, nous avons décomposé ce travail de thèse en quatre grandes parties :

1. Comprendre les attentes des consommateurs (pour la viande et la « viande artificielle ») dans différents pays du monde où la consommation de viande est soit croissante, soit stable dans un contexte de concurrence avec les substituts de viande.
2. Contribuer à la base de données européenne existante sur la viande bovine en fournissant de nouvelles données obtenues dans diverses conditions (principalement avec des vaches alimentées à l'herbe) afin d'améliorer un modèle européen innovant de prédiction de la qualité sensorielle de la viande bovine basé sur le modèle MSA. Ensuite nous avons testé la capacité du système MSA et du modèle 3G (son équivalent européen) à prédire la satisfaction des consommateurs
3. Evaluer de nouveaux outils de mesures instrumentales pour une mesure objective d'un critère important déterminant la qualité gustative de la viande bovine, le persillé.
4. Créer un thésaurus spécialisé pour la viande bovine afin de fournir une terminologie standardisée et des termes spécifiques liés à la qualité et aux caractéristiques sensorielles.

C. ATTENTES SOCIETALES DES CONSOMMATEURS

Introduction

La viande bovine doit aujourd'hui faire face à de nouveaux concurrents due à l'évolution des biotechnologies (approches de FoodTech) et à des évolutions dans les attentes des consommateurs. Les concurrents principaux de la viande bovine sont les autres types de viande tels que la volaille et le porc en raison de leurs prix plus bas. Il existe aussi des concurrents émergents tels que les substituts de viande élaborés à partir de protéines végétales. Un concurrent potentiel dans les années à venir pourrait être les substituts de viande élaborés à partir de cellules animales. Ces derniers sont souvent appelés « viande artificielle », « viande in vitro » ou encore « viande de culture ». Contrairement aux produits élaborés à partir de protéines végétales, la « viande artificielle » n'est pas encore approuvée ni commercialisée en Europe, mais a été approuvée à la vente à Singapour en décembre 2020. Cependant, elle gagne en notoriété dans les médias grand public et vient d'être autorisée à la commercialisation par deux entreprises aux Etats-Unis.

Ces nouveaux concurrents prennent de l'ampleur due à l'évolution des attentes sociétales des consommateurs. Nous avons donc étudié dans un premier temps les perspectives des consommateurs face aux enjeux de l'élevage, leurs différentes attentes sociétales et, dans un second temps, leur acceptation de la « viande artificielle », notamment en Afrique. Nous avons collecté des informations sur les facteurs qui influencent les choix alimentaires des consommateurs alors que la consommation de viande est croissante à l'échelle mondiale. Ces résultats peuvent aider à mieux anticiper les changements qui pourraient survenir dans le commerce de la viande et explorer les opportunités et les défis potentiels de la viande bovine, ainsi que les différentes options d'évolution possibles afin que les acteurs de la filière prennent des décisions éclairées pour l'avenir de la filière viande bovine.

L'objectif de cette première enquête était donc de comprendre comment les opinions des répondants sur la production et la consommation de viande varient dans différents contextes et influencent la demande de viande et de substituts de viande. L'hypothèse sous-jacente est qu'avec l'augmentation de la population humaine et des revenus, la consommation de viande en quantité totale (voire par habitant) augmentera, ainsi que celle des substituts de viande. Cette enquête résulte d'un travail de groupe avec une traduction en chinois, portugais, anglais et français des mêmes questions ensuite diffusées dans cinq pays dont deux en Afrique (Cameroun et Afrique du Sud par mes soins).

Pour la deuxième partie, une enquête a spécifiquement été réalisée sur le continent Africain. Nous avons émis comme hypothèse que l'acceptation de la viande artificielle par les consommateurs dans plusieurs pays africains sera influencée par divers facteurs dont l'importance serait variable selon les

pays. L'objectif de cette étude est donc d'identifier les déterminants clés de l'acceptation de la viande artificielle et d'anticiper les opportunités et les défis potentiels liés à son introduction dans un marché où la consommation de viande est croissante, offrant ainsi des informations essentielles pour la filière viande bovine dans ses prises de décision d'orientation stratégique.

Chapitre 1 : Perception des consommateurs face aux enjeux de l'élevage

Meat Science 200 (2023) 109144



Contents lists available at ScienceDirect

Meat Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/meatsci



Consumer perception of the challenges facing livestock production and meat consumption

Jingjing Liu^a, Sghaier Chriki^{a,b}, Moïse Kombolo^a, Matteo Santinello^c, Sérgio Bertelli Pflanzler^d, Élise Hocquette^b, Marie-Pierre Ellies-Oury^{a,e}, Jean-François Hocquette^{a,*}

^a INRAE, Clermont-Ferrand, VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

^b Isara, 23 rue Jean Baldassini, 69364 Lyon cedex 07, France

^c Department of Agronomy, Food, Natural Resources, Animals and Environment (DAFNAE), University of Padova, 35020 Legnaro, VEN, Italy

^d Department of Food Engineering and Technology, University of Campinas, Rua Monteiro Lobato, 80, Campinas 13083-862, SP, Brazil

^e Bordeaux Sciences Agro, 1 cours du Général de Gaulle, CS 40201, 33175 Gradignan, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Consumer
Livestock meat production
Meat consumption
Animal welfare
Environment

ABSTRACT

With the global meat market growing and intensive livestock farming systems increasing, the impacts of livestock are a growing concern among consumers, further influencing their meat consumption. Understanding consumer perceptions of livestock production is therefore a key issue. This study surveyed 16,803 respondents in France, Brazil, China, Cameroon and South Africa to investigate the different perceptions of the ethical and environmental impacts of livestock production among consumer segments in different countries based on their socio-demographic characteristics. On average, the current respondents in Brazil and China and/or who consume little meat, are female, not in the meat sector and/or more educated, are more likely to think that livestock meat production causes serious ethical and environmental problems; while those in China, France and Cameroon and/or who consume little meat and/or are women, younger, not in the meat sector, and/or more educated, are more likely to agree that reducing meat consumption could be a good solution to these problems. Additionally, an affordable price and sensory quality are the main drivers of food purchases for the current respondents. In conclusion, sociodemographic factors have significant effects on consumer perception of livestock meat production and meat consumption habits. Perceptions of the challenges facing livestock meat production differ between countries in different geographic regions based on social, economic, cultural contexts and dietary habits.

1. Introduction

For centuries, the livestock industry has played a very important role in the development of agriculture, human society, the economy and culture. The major services, benefits and impacts of the livestock industry are mainly related to production (efficiency, quality, etc.), economics (market, employment, etc.), social function (gastronomy, social cohesion, educational value, agritourism, animal health and welfare which are major concerns today) and negative or positive interactions with the environment (greenhouse gas emissions, landscape heterogeneity and biodiversity conservation, carbon sequestration, etc.) (Dumont et al., 2019). Livestock production also contributes to sustainability by transforming inedible plants or waste into human food (Mottet & Tempio, 2017) despite the highly publicized negative impacts of livestock in terms of environmental footprint, human health, animal

welfare and biodiversity loss (Xu et al., 2021).

Indeed, the impacts of livestock can be controversial depending on the context (Salmon et al., 2020). In low- and middle-income countries, livestock is often perceived positively since it provides essential nutrients and meets certain consumer expectations in terms of gastronomy and socioeconomic status, especially when consumers have emerged from poverty (Salmon et al., 2020). Nevertheless, in high-income countries, high consumption and the continuing growth in global meat production and demand, as well as increasing consumer awareness of animal ethics and environmental issues, have put pressure on livestock meat production (Parlasca & Qaim, 2022). Reducing meat consumption is therefore seen as a viable way to reduce the negative impacts of livestock meat production on animal welfare and environmental pollution (Sijpestijn, Wezel, & Chriki, 2022). However, consumer perceptions and expectations of livestock and meat production are becoming

* Corresponding author.

E-mail address: jean-francois.hocquette@inrae.fr (J.-F. Hocquette).

<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109144>

Received 28 July 2022; Received in revised form 16 February 2023; Accepted 16 February 2023

Available online 20 February 2023

0309-1740/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

increasingly complex and consequently less well understood, depending on the different sociocultural contexts.

As the human population and incomes increase, meat consumption per capita or in total amount will inevitably increase (Charles et al., 2018), which in part fuels the market for meat substitutes. Since meat demand and consumption are dependent on sociodemographic, economic and cultural factors (Charles et al., 2018), understanding the effects of these factors on consumer perceptions of livestock production and meat consumption in different geographical regions is important. Therefore, a survey study was carried out by means of an international online questionnaire distributed worldwide, which was designed to capture respondents' opinions on meat production and consumption in different contexts.

2. Materials and methods

2.1. Questionnaire design

The questionnaire was designed and organized into three sections: 1) sociodemographic information was collected to characterize the current participants, including country of origin, gender, age, income, area of work, education and level of meat consumption; 2) a multiple-choice question "What are the most important criteria when you do your food shopping?" was asked first; 3) then, participants were asked about their perception of the challenges (ethical and environmental issues) facing the livestock industry and meat production and their opinion on reducing their meat consumption. For this part, the respondents were asked to answer using a 5-point Likert scale, ranging from much less/strongly disagree to much more/strongly agree.

This questionnaire was part of a much larger work on meat substitutes but only the first questions above were considered in this study, as other responses on meat substitutes (cultured meat) have been published independently for China (Liu, Hocquette, Ellies-Oury, Chriki, & Hocquette, 2021), Brazil (Chriki et al., 2021) and France (Hocquette, Liu, Ellies-Oury, Chriki, & Hocquette, 2022) only, without considering the questions and their answers analyzed in this work. The questions used in this study are presented in the supplementary material.

2.2. Data collection and management

The questionnaire was designed in English and translated into French, Chinese and Portuguese by native speakers, then converted into an online survey and disseminated in France, China, Brazil, South Africa and Cameroon from June 2020 to February 2022. A total of 16,803 responses were collected through a variety of means including commercial sampling service providers, social platforms (Facebook, Twitter, LinkedIn, etc.), face-to-face interviews and computer-assisted self-interviews (respondents' answer on a dedicated computer located in a special hub). The process fully adhered to the ESOMAR (European Society for Opinion and Market Research) guidelines for ethical online research, as previously described (Chriki et al., 2021).

Because different countries have different education systems and currencies, for the purpose of subsequent analysis, education and income levels were aligned according to similar scales for all the respondents. For the level of education, while the level of education prior to university was classified as a lower level of education, studying at university or having obtained a bachelor's degree was considered as a medium level of education, and finally, having obtained a master's degree (or studying to do so) and above was classified as a higher level of education. For income, the median incomes of the different countries were used as a benchmark to classify income levels: income was considered low when it was less than 0.5 times the median income, income was considered high when it was more than 1.5 times the median income and income between these two limits was considered a medium income level. This classification was corrected according to the average price of meat (beef/pork) in each country, especially for African

countries, to better approximate real purchasing power in the different countries.

2.3. Statistical analysis

Descriptive statistics for the respondents within each demographic group were calculated using the SAS 9.4 MEANS procedure (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). An ANOVA was performed with the SAS GLM procedure for the three questions (regarding ethical, environmental issues and reducing meat consumption). The different classes for each fixed effect are indicated in Table 1. A multiple comparison of least squares means was performed using the Bonferroni post hoc test ($P < 0.05$). The model was performed with all data according to the country of origin of the respondents and other sociodemographic factors:

$$y_{ijkl} = \mu + \text{Gender}_i + \text{Country}_j + \text{Age}_k + \text{Education}_l + \text{Area of work}_m + \text{Income}_n + \text{Meat consumption}_o + \text{Gender}_i \times \text{Country}_j + \text{Age}_k \times \text{Country}_j + \text{Gender}_i \times \text{Age}_k + \text{Gender}_i \times \text{Income}_n + \text{Country}_j \times \text{Income}_n + \text{Country}_j \times \text{Area of work}_m + \text{Age}_k \times \text{Meat consumption}_o + \text{Country}_j \times \text{Meat consumption}_o + \text{Area of work}_m \times \text{Meat consumption}_o + \text{Income}_n \times \text{Meat consumption}_o + \text{Age}_k \times \text{Education}_l + \text{Age}_k \times \text{Income}_n + e_{ijklmno}$$

where y is the dependent variable (ethical, environmental issues and reducing meat consumption); μ is the overall mean, Gender_i is the fixed effect of the i^{th} gender of the respondents, Country_j is the fixed effect of the j^{th} Country of origin of the respondents, Age_k is the fixed effect of the k^{th} class of age of the respondents, Education_l is the fixed effect of the l^{th} class of education of the respondents, Area of work_m is the fixed effect of the m^{th} area of work of the respondents, Income_n is the fixed effect of the n^{th} class of income of the respondents, $e_{ijklmno}$ is the random residual $\sim N(0, \sigma_e^2)$, where σ_e^2 is the error variance. Only the significant factors and interactions were included in the model.

Multiple correspondence analysis (MCA) was performed to represent and model datasets as clouds of points in a multidimensional space, showing whether relationships exist between variables. The MCA was performed by R package "FactoMineR" and the function "MCA". To reveal more knowledge focused on consumer segments and their attitudes towards meat production, consumption and food purchase, a hierarchical cluster was constructed using the R packages "cluster" and "ComplexHeatmap" and presented in the form of a heatmap using the "heatmap" function.

3. Results and discussion

3.1. Overall perception of the issues related to the livestock industry and meat consumption

The current respondents were characterized by an almost equal proportion of women (51.1%) and men (47.5%), mainly middle-aged and young people (39.1% and 39.9% respectively). Most of them were well-educated (92.7% with a medium or high level of education) consumers, working outside the meat sector (71.3%) and were meat-eaters (94%) but with varying frequencies (from rarely to daily) (Table 1).

Across all responses, women, highly educated people, people who never eat meat (vegans/vegetarians), and/or people working outside the meat sector were the most likely to perceive livestock as causing significant ethical and environmental problems (Table 1, questions 1 and 2). As a consequence, they were the most likely to agree that reducing meat consumption could be a good solution to the problems caused by meat production and consumption (Table 1, question 3). Conversely, male respondents, on average less educated but more familiar with the meat sector, were less likely to share these opinions. These observations

Table 1

Demographic information of current respondents and least squares means of each category for **Question 1**) Does the livestock industry cause important ethical problems? **Question 2**) Does the livestock industry cause important environmental problems? **Question 3**) To deal with the problems caused by the livestock industry, do you think reducing meat consumption is a good solution? Respondents answered each question using a 5-point Likert scale ranging from 1 to 5, representing much less/strongly disagree to much more/strongly agree.

Factor	Category	n	%	Question 1		Question 2		Question 3	
				LSMeans ¹	SEM ²	LSMeans ¹	SEM ²	LSMeans ¹	SEM ²
Gender	Women	8591	51.1	3.18 ^a	0.03	3.23 ^a	0.03	3.21 ^a	0.03
	Men	7988	47.5	2.80 ^b		2.89 ^b		2.86 ^b	
Age	18–30 years old	6705	39.9	2.74 ^c	0.04	3.00	0.04	3.84 ^a	0.04
	31–50 years old	6576	39.1	2.82 ^b		2.94		3.84 ^a	
	51+ years old and more	3522	21.0	2.95 ^b		2.95		2.96 ^b	
Country	France	5907	35.2	2.84 ^c	0.05	2.94 ^c	0.05	3.00 ^b	0.05
	Brazil	4683	27.9	3.15 ^a		3.34 ^a		2.78 ^c	
	China	4684	27.9	3.06 ^b		3.25 ^b		3.15 ^a	
	South Africa	784	4.70	2.20 ^d		2.36 ^d		2.43 ^d	
	Cameroon	745	4.40	2.94 ^{bc}		2.93 ^c		3.03 ^{ab}	
Working area	Not scientists outside the MS ³	7968	47.4	3.13 ^a	0.04	3.25 ^b	0.04	3.21 ^b	0.04
	Scientists outside the MS ³	4021	23.9	3.18 ^a		3.39 ^a		3.33 ^a	
	Not scientists in the MS ³	3609	21.5	2.31 ^c		2.38 ^d		2.23 ^c	
	Scientists in the MS ³	1205	7.20	2.74 ^b		2.84 ^c		2.74 ^b	
Education	High education	8119	48.3	3.09 ^a	0.04	3.22 ^a	0.04	3.11 ^a	0.05
	Medium education	7458	44.4	2.93 ^b		3.01 ^b		2.90 ^b	
	Low level of education	994	5.90	2.66 ^c		2.92 ^b		2.90 ^b	
Income	High income	7818	46.5	2.78 ^b	0.04	2.90 ^b	0.04	2.85	0.04
	Medium income	2722	16.2	2.91 ^a		2.98 ^a		2.91	
	Low income	4935	29.4	2.8 ^b		2.96 ^{ab}		2.82	
Meat consumption	Never ⁴	1000	6.0	3.59 ^a	0.04	3.55 ^a	0.04	3.65 ^a	0.04
	Rarely	2680	15.9	2.81 ^b		3.01 ^b		2.95 ^b	
	Regular	7245	43.1	2.52 ^c		2.73 ^c		2.55 ^c	
	Daily	5878	35.0	2.44 ^d		2.56 ^d		2.35 ^d	

a, b, c, d Different letters indicate significant differences between groups in the same category ($P < 0.05$).

¹ LSMMeans: Least Squares means.

² SEM: standard error of the means.

³ MS: meat sector.

⁴ Never: considered as vegans/vegetarians.

fit very well with published literature indicating that women, highly educated people express more concern about animal welfare and the environment (Alonso, González-Montaña, & Lomillos, 2020). This may also suggest that consumers who are highly concerned about animal welfare and environmental issues are likely to consider livestock meat production as causing more ethical and environmental problems than their counterparts, which may affect their meat consumption. It has also been demonstrated that animal welfare concerns have become more important over the years (Alonso et al., 2020). Nonetheless, according to our results, there is still a general perception that livestock farming causes more environmental than ethical problems (Table 1).

3.2. Effects of key sociodemographic factors and their interactions on perceptions of issues related to the livestock industry and meat consumption

3.2.1. Country of origin and its interaction with other factors

Among other demographic factors, country of origin is the most significant factor ($P < 0.001$) interacting with level of meat consumption ($P < 0.001$), income level ($P < 0.001$) and area of work ($P < 0.001$) affecting respondents' perception on the livestock industry and meat consumption. On average, the current respondents from Brazil, China, France and Cameroon were more concerned about ethical and environmental issues than South Africans. They were more likely to believe that reducing meat consumption could be a good option to alleviate these issues, especially the Chinese, Cameroonian and French respondents ($P < 0.001$, Table 1).

The Brazilian respondents were the most convinced that the livestock industry causes serious environmental problems ($P < 0.001$, Table 1) although environmental issues of meat production are less important to Brazilian consumers than the price and sensory quality of the meat (Hötzel & Vandresen, 2022). This is most likely due to the fact that meat

production is considered one of the main causes of deforestation in the Amazon, which may have a significant impact on the perception that Brazilian citizens have of meat production from cattle (Ferrante & Fearnside, 2022).

In general, ethical concerns appear to be the most pronounced in Northwestern Europe (Parlasca & Qaim, 2022). However, the current Brazilian respondents were more concerned than the French respondents that the livestock industry causes serious ethical problems ($P < 0.001$, Table 1). As explained by Hötzel and Vandresen (2022), in Brazil, animal welfare initiatives are increasingly encouraged and implemented recently by the Ministry of Agriculture, universities and research centers. As a result, the growing interest in animal welfare is observed in agricultural academia with great interest from students and continuing education of professionals. According to a search of scientific publications concerning farm animal welfare in the Web of Science platform covering the period from 2001 to 2021, Brazil ranks high and ahead of France and China (Phillips & Molento, 2020).

The fact that the current opinions of the French and Chinese respondents differ significantly on the ethics associated with livestock production ($P < 0.001$) is not consistent with earlier findings from a decade ago. In the study by Phillips et al. (2012), students from European countries were more concerned about animal welfare than students from Asian countries and the Chinese respondents were the least concerned about animal welfare. These previous findings may be explained by ideological differences at that time, which appear to arise as a result of the social, political and economic situation in different parts of the world rather than religious or moral differences. Since then, the Animal Husbandry Law of the People's Republic of China was approved by the National People's Congress in 2005, but the absence of an indication of "animal welfare" reflects the fact that most of the public and legislators did not consider animal welfare important enough to be written into the law. Then, the first Farm Animal Welfare Standard in China was finally

introduced in 2014 for pigs and standards for cattle and sheep have been drafted (Nizam & Tahman, 2019). Clearly, with the rapid development of China's economy and national legislation, the gap between China and the West on animal welfare is narrowing. Carnovale et al. (2021) also noted that Chinese consumer awareness of animal welfare has increased: most of them would be willing to pay more for products with high welfare levels, as they would be associated with good taste and safety (Carnovale et al., 2021).

The consumer-perceived link between animal welfare and meat quality was also seen by European consumers; Bozzo, Barrasso, Grimaldi, Tantillo, and Roma (2019) found that consumers were willing to pay 10% more for higher welfare products, most likely due to the perceived improvement in taste of animal products and the expected positive environmental impact. The representativeness of the research population is particularly important for this type of research. Local demographic, regional and cultural characteristics should be considered when interpreting consumer willingness. Consumers in Shanghai and Beijing (two of the most westernized cities in China) with probably a high-income level attach great importance on the ethical and environmental attributes of pork production. Moreover, they emphasized that ensuring animal welfare is not only about improving the taste of pork (Lai, Wang, Ortega, & Widmar, 2018).

Although there are very few similar studies in Africa, one study on game meat found that South African consumers consider sensory quality, ethical production of meat and safety to be important (Wassenaar, Kempen, & van Eeden, 2019) although the current South African respondents are the least concerned about ethical and environmental issues associated with the livestock industry ($P < 0.001$, Table 1). Indeed, unlike consumers from Europe and Asia, Africans place less importance on animal welfare standards, due to their traditional customs and beliefs as well as a lack of knowledge of animal handling and substandard handling facilities (Ndou, Muchenje, & Chimonyo, 2011). However, in some parts of Africa, awareness of animal welfare and environmental issues is quite advanced as shown in this study for the Cameroonian respondents.

Interestingly, the respondents from China, Cameroon and France tended to agree the most with the need to reduce meat consumption to solve the problems caused by livestock meat production, although the respondents from Brazil were the most concerned about ethical and environmental issues. On the other hand, the respondents from South Africa disagreed the most with the idea that reducing meat consumption could be a good solution to the problems caused by livestock production. This can be explained by different factors and reasons such as historical cultural gastronomy and income level. For instance, up to three quarters of Brazilians consume meat as a staple food three or more days a week (Rodrigues et al., 2021) in contrast with the French, Chinese and Africans. In comparison, meat consumption in Africa is the lowest in the world (Statista, 2021). This suggests that people disagree about reducing their meat consumption, either because they are privileged heavy meat-eaters due to their long-established eating habits, or because they rarely eat meat due to their inaccessibility to enough meat for economic or other reasons.

In recent decades, meat-rich consumption patterns have further advanced in China (Whitnall & Pitts, 2019), as an increasing number of middle-class people can afford to consume meat regularly for functional, sensory and symbolic reasons (Dagevos, 2021). Therefore, the differences in demand and perception of meat between China and Europe or America would gradually decrease (Komarek et al., 2021) despite still significant differences. For example, daily meat-eaters in China gave the highest scores for the perception of problems caused by the livestock industry, whereas opposite results were observed in France (Table 2A). Moreover, Chinese respondents with high or medium incomes expressed more concerns about ethical and environmental issues than their French counterparts ($P < 0.001$, Table 2B). In addition, for South Africa, Brazil and France, the higher the income, the less people seem to express concerns about the problems caused by the livestock industry and do not

agree to reducing their meat consumption. On the other hand, the higher the income, the more the Chinese respondents express concern about these problems and seem to be more willing to reduce meat consumption ($P < 0.001$, Table 2B). This is in fact more than desirable: indeed, rich people should probably change their meat-eating habits more because they are likely to overconsume meat and are less likely to suffer from malnutrition than poor or vulnerable people.

We also observed that the respondents from Brazil and France who worked outside the meat sector were more likely to perceive meat production as causing serious problems than those who worked in the meat sector ($P < 0.001$, Table 2C) unlike the Chinese respondents. It is likely that in China, regulations regarding animal welfare and environmental protection are not yet well developed, making workers in the meat industry more aware of the negative externalities of meat production on animal welfare and environmental pollution.

3.2.2. Gender and its interaction with other factors

On average, for the female respondents, the livestock industry causes more ethical and environmental problems and women agreed more that reducing meat consumption is a good solution compared to men ($P < 0.001$, Table 1) with a significant gender x country interaction ($P < 0.001$, Fig. 1). Different orientations in social dominance and empathy have been discussed at length to explain the gender difference (Graça, Calheiros, Oliveira, & Milfont, 2018). Women have less faith in technological solutions and are more willing to change, whereas men tend to eat more meat and are less willing to reduce their meat consumption (Dibb & Fitzpatrick, 2014). This observation regarding higher concerns from women can only be observed in France and Brazil ($P < 0.001$, Fig. 1A, C, E), two countries with respondents of European origin, unlike Chinese or African respondents. However, in China, men seem to perceive the problem as somewhat more serious than women, especially with regard to ethics ($P < 0.001$, Fig. 1A) and agree more to reducing meat consumption ($P < 0.001$, Fig. 1E), although the difference is small. No or small differences in mindsets or behaviors between genders were indeed noticed among Chinese citizens, as a study conducted in China on willingness to pay for welfare-friendly products reported no gender differences (Su & Martens, 2017). Contrary to this previous finding, the more critical views of the Chinese male respondents may be partly due to the prevalence of patriarchy not only in China but throughout Asia.

Finally, the lack of a gender effect in Cameroon and South Africa ($P > 0.05$, Fig. 1A, C, E) might be a consequence of the less developed social, political and economic situation in Africa compared to other countries.

3.2.3. Age and its interaction with other factors

As presented in Table 1, on average, older respondents tended to agree more that livestock and meat consumption cause ethical and environmental problems than younger respondents ($P < 0.001$). This does not appear to be in line with the general view that younger consumers are more concerned with environmental and animal welfare issues, while older participants are more focused on the health benefits of food (Kemper & Ballantine, 2020). However, this discrepancy is explained by a significant age x country interaction ($P < 0.001$, Fig. 1B, D): indeed, the 18–30 year-old respondents from France and Brazil agreed more that meat production from livestock results in serious ethical and environmental issues ($P < 0.001$) with opposite views from the Chinese respondents. This may be related to the survival pressure in China, or more broadly, in Asian societies. Due to a better economic situation and less pressure, older Chinese people, who express a broader view, are more concerned about social issues. Alternatively, as younger Chinese people, about to assume societal responsibility, are under more pressure, they may focus more on their own development than on social issues (Liu et al., 2021).

Our observations may also be related to the different types of ideologies formed in the different education systems in connection with societal distinctions. Western education systems are more

Table 2
Effects of "Country x Meat consumption", "Country x Income" and "Country x Working area" interactions on **Question 1** Does the livestock industry cause important ethical problems? **Question 2** Does the livestock industry cause important environmental problems? **Question 3** To deal with the problems caused by the livestock industry, do you think reducing meat consumption is a good solution? Respondents answered each question using a 5-point Likert scale ranging from 1 to 5, representing much less/strongly disagree to much more/strongly agree.

	Question 1					Question 2					Question 3				
	Brazil	China	France	Cameroon	South Africa	Brazil	China	France	Cameroon	South Africa	Brazil	China	France	Cameroon	South Africa
A - Least Squares Means and pairwise comparisons between "Country x Meat consumption"															
Meat consumption															
Never	4.92 ^a	2.38 ^f	4.8 ^a	2.69 ^a	2.06 ^g	4.87 ^a	2.34 ^f	4.79 ^a	2.92 ^{fz}	2.05 ^h	4.88 ^a	2.57 ^f	4.84 ^a	2.94 ^f	2.13 ^h
Rarely	4.24 ^b	2.99 ^e	3.99 ^e	2.75 ^b	2.21 ^g	4.37 ^b	3.30 ^e	4.19 ^b	2.64 ^f	2.36 ^g	4.10 ^c	3.20 ^g	4.40 ^b	2.82 ^f	2.30 ^{gh}
Regular	3.24 ^d	3.14 ^d	2.94 ^e	2.87 ^a	2.28 ^g	3.46 ^d	3.44 ^d	2.97 ^f	2.88 ^f	2.45 ^g	2.85 ^f	3.26 ^d	2.99 ^e	2.92 ^f	2.52 ^{gh}
Daily	2.81 ^e	3.54 ^c	2.15 ^f	3.04 ^a	2.60 ^f	2.93 ^{ef}	3.63 ^c	2.23 ^h	3.07 ^{de}	2.69 ^f	2.56 ^{gh}	3.59 ^e	2.14 ^h	3.06 ^f	2.71 ^{fg}
SEM	0.07					0.07					0.07				
B - Least Squares Means and pairwise comparisons between "Country x Income"															
Income															
High	3.03 ^c	3.51 ^a	2.77 ^e	2.96 ^c	1.64 ^d	3.14 ^c	3.63 ^{ab}	2.89 ^d	2.86 ^{cd}	1.91 ^e	2.58 ^d	3.69 ^a	2.89 ^c	2.87 ^{cd}	1.81 ^e
Medium	3.62 ^a	3.38 ^{ab}	2.88 ^c	3.06 ^b	1.68 ^d	3.83 ^a	3.55 ^b	2.84 ^c	3.08 ^c	1.87 ^e	3.21 ^c	3.47 ^b	2.91 ^{cd}	3.21 ^{bc}	1.78 ^e
Low	3.79 ^a	2.84 ^c	3.23 ^b	2.69 ^c	2.65 ^c	4.00 ^a	3.19 ^c	3.41 ^b	2.71 ^{de}	2.74 ^{de}	3.39 ^{bc}	2.89 ^c	3.45 ^b	2.78 ^d	2.82 ^d
SEM	0.07					0.07					0.07				
C - Least Squares Means and pairwise comparisons between "Country x Working area"															
Working area															
Not scientist outside the MS ¹	3.63 ^a	3.19 ^e	3.26 ^c	2.86 ^d	2.65 ^d	3.79 ^b	3.40 ^c	3.31 ^c	2.91 ^d	2.72 ^d	3.32 ^b	3.33 ^b	3.26 ^b	2.92 ^{cd}	2.79 ^d
Scientist outside the MS ¹	3.73 ^a	3.14 ^{cd}	3.47 ^b	2.92 ^d	1.83 ^f	4.02 ^a	3.42 ^c	3.70 ^b	2.81 ^d	1.99 ^f	3.38 ^b	3.22 ^{bc}	3.82 ^a	2.96 ^c	2.05 ^f
Not scientist in the MS ¹	2.19 ^e	3.81 ^a	2.24 ^e	2.87 ^d	1.82 ^f	2.23 ^e	3.85 ^a	2.28 ^e	2.85 ^d	2.18 ^{de}	1.53 ^g	3.86 ^a	2.18 ^e	2.96 ^c	2.05 ^f
Scientist in the MS ¹	2.80 ^d	3.64 ^a	2.63 ^d	2.67 ^d	1.61 ^f	2.84 ^d	3.88 ^a	2.73 ^d	2.67 ^d	1.74 ^f	2.02 ^f	3.62 ^a	2.93 ^d	3.08 ^{bc}	1.68 ^g
SEM	0.08					0.08					0.08				

a, b, c, d, e, f, g, h Different letters indicate significant differences between groups in the same category ($P < 0.05$).

¹ Meat Sector

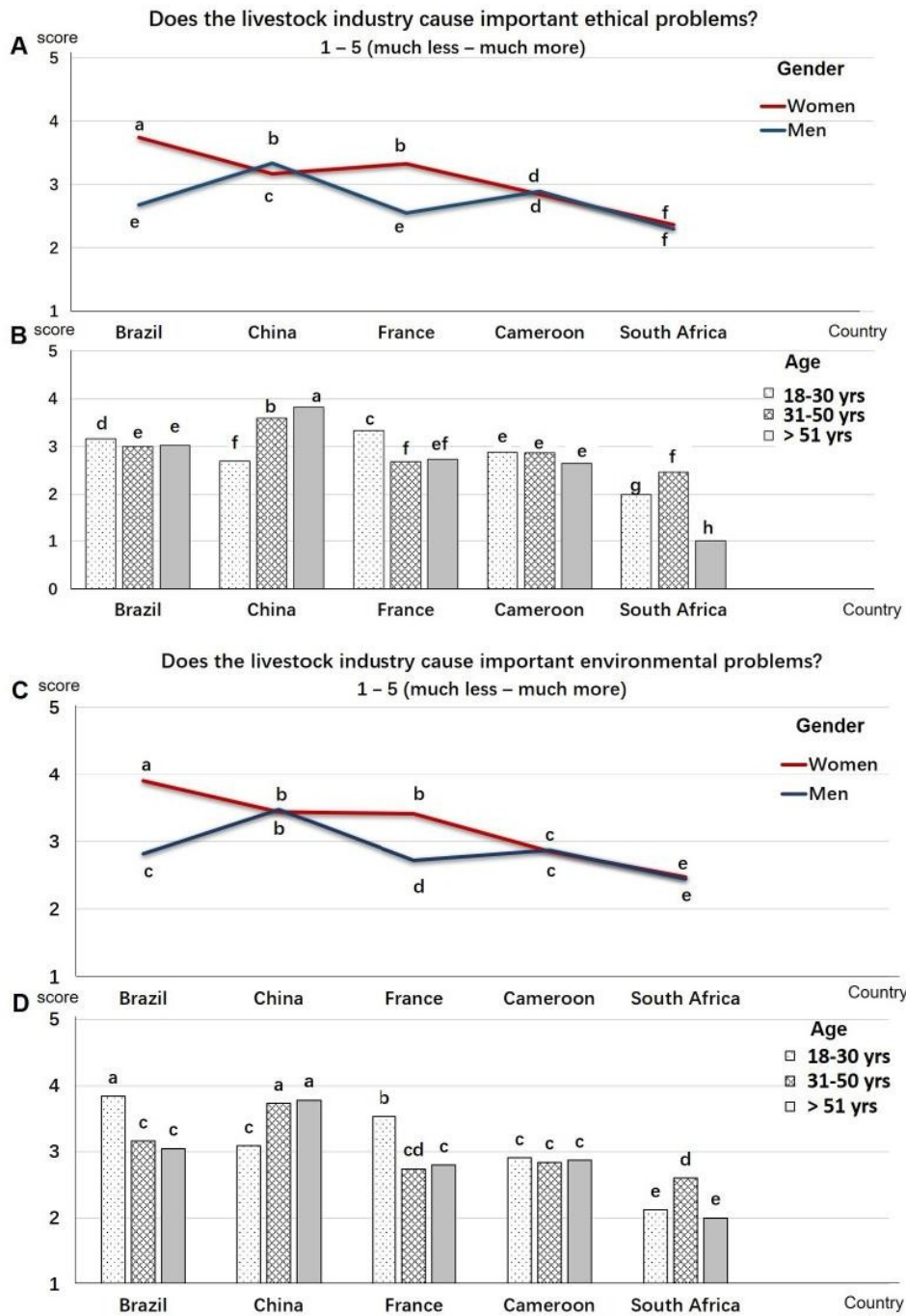


Fig. 1. Effects of “continent x gender” (line chart) and “continent x age” (bar chart) interactions on **Question 1**) Does the livestock industry cause important ethical problems? (A, B) **Question 2**) Does the livestock industry cause important environmental problems? (C, D) **Question 3**) To deal with the problems caused by the livestock industry, do you think reducing meat consumption is a good solution? (E, F). Respondents answered each question using a 5-point Likert scale ranging from 1 to 5, representing much less/strongly disagree to much more/strongly agree. a, b, c, d, e, f, g, h Different letters indicate significant differences between groups in the same category ($P < 0.05$). “yrs” means “years old”

comprehensive and inspirational, young people in the West can be more self-oriented, open-minded and focused on a sustainable future for humanity, society and the environment. Conversely, Asian education systems, especially in China, are more exam-oriented, with young people being trained to achieve high grades rather than to think independently and critically. This therefore creates a different perspective on societal issues (Liu et al., 2021).

In addition, the 31–50 year-old respondents from South Africa were the most concerned by issues about meat production ($P < 0.001$, Fig. 1B, D) with no difference in the answers of different age groups in Cameroon regarding attitudes towards the problems caused by livestock production ($P > 0.05$). Despite the lower numbers of respondents in Africa to highlight robust differences, these results may be explained by the stronger effects of economic drivers of meat consumption in Africa

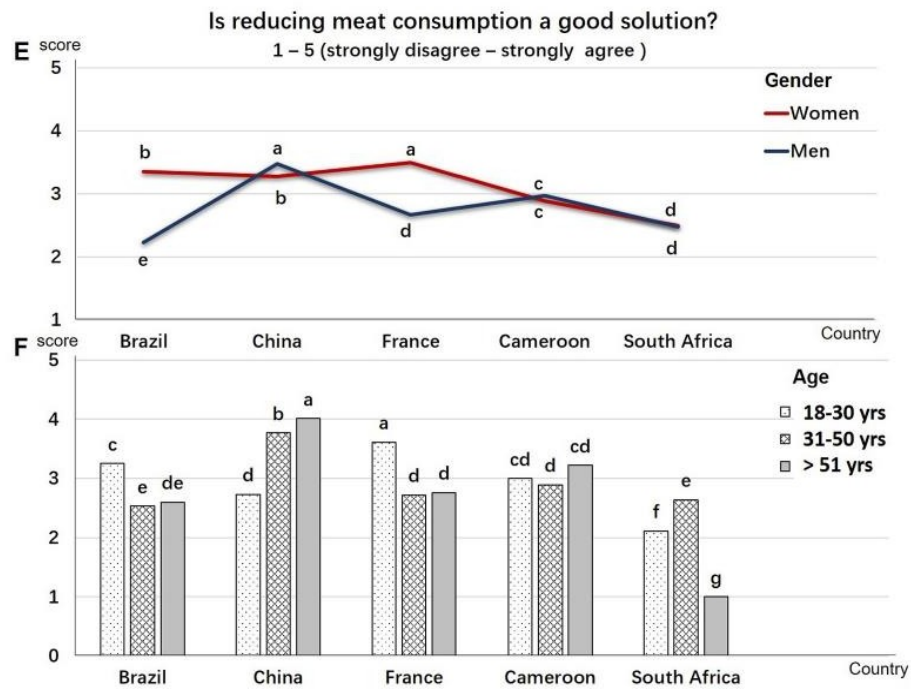


Fig. 1. (continued).

compared to other drivers (concerns for social issues) that are more important in developed countries.

In accordance with the concerns generated by livestock meat production, reducing meat consumption appears to be a good strategy for younger people from France and Brazil, but for older people from China ($P < 0.001$, Fig. 1F).

3.2.4. Meat consumption and its interaction with other factors

Generally, concerns about livestock and meat decreased as meat consumption increased ($P < 0.05$, Table 1) in interaction with country ($P < 0.001$, Table 2A) and income ($P < 0.001$, Table 3B). Indeed, the respondents from France and Brazil who consume meat daily were

inclined to consider livestock production as causing fewer problems, whereas the opposite is observed for the Chinese respondents ($P < 0.05$, Table 2A). On the other hand, vegans/vegetarians from France and Brazil (and to a lesser extent from South Africa) were the most likely to think that livestock production causes serious problems.

The adoption of vegan/vegetarian diets in developed countries is mainly driven by concerns about animal welfare, public health and environmental issues (Janssen, Busch, Rödiger, & Hamm, 2016). This explains why vegans/vegetarians were more concerned about animal welfare and environmental issues than meat-eaters. Yet, conversely, Chinese meat-eaters were more likely to believe that meat production from livestock poses serious problems ($P < 0.05$, Table 2A). This can be

Table 3

Effects of “Meat consumption x Age” and “Meat consumption x Income” interactions on Question 1) Does the livestock industry cause important ethical problems? Question 2) Does the livestock industry cause important environmental problems? Question 3) To deal with the problems caused by the livestock industry, do you think reducing meat consumption is a good solution? Respondents answered each question using a 5-point Likert scale ranging from 1 to 5, representing much less/strongly disagree to much more/strongly agree.

		A. Least Squares Means and pairwise comparisons between “Meat consumption x Age”			B. Least Squares Means and pairwise comparisons between “Meat consumption x Income”		
Meat consumption		Years of Age			Income level		
		18–30	31–50	> 51-	Low	Medium	High
Question 1	Never	4.49 ^a	3.86 ^b	3.69 ^b	4.29 ^a	3.71 ^b	4.06 ^a
	Rarely	3.38 ^c	3.30 ^c	3.58 ^b	3.25 ^c	3.27 ^c	3.51 ^b
	Regular	3.08 ^d	2.91 ^e	2.96 ^e	2.98 ^d	2.99 ^d	2.99 ^d
	Daily	2.74 ^e	2.82 ^e	3.20 ^c	2.65 ^e	3.03 ^d	2.96 ^d
	SEM	0.07			SEM	0.06	
Question 2	Never	4.49 ^a	3.87 ^b	3.51 ^c	4.30 ^a	3.67 ^c	4.02 ^b
	Rarely	3.66 ^{bc}	3.44 ^c	3.74 ^b	3.51 ^c	3.48 ^c	3.66 ^c
	Regular	3.38 ^d	3.07 ^e	3.04 ^e	3.24 ^d	3.08 ^e	3.17 ^{de}
	Daily	3.00 ^e	2.86 ^f	3.10 ^{de}	2.86 ^e	3.08 ^{ef}	3.00 ^f
	SEM	0.05			SEM	0.06	
Question 3	Never	4.50 ^a	3.94 ^b	3.80 ^b	4.36 ^a	3.78 ^b	4.09 ^a
	Rarely	3.57 ^c	3.47 ^c	3.88 ^b	3.42 ^c	3.47 ^c	3.75 ^b
	Regular	3.18 ^d	2.89 ^e	2.88 ^e	3.11 ^d	2.94 ^e	2.95 ^e
	Daily	2.58 ^f	2.60 ^f	3.01 ^{de}	2.59 ^f	2.79 ^{ef}	2.73 ^f
	SEM	0.05			SEM	0.06	

a, b, c, d, e, f, g Different letters indicate significant differences between groups in the same category ($P < 0.05$).

explained by different dietary habits and meat consumption levels in different regions, with the Chinese having a tradition of eating plant-based proteins and Africans often lacking food/protein.

With respect to meat consumption, Chinese/Asian and African diets contain more monogastric meat and Western diets more ruminant meat, which would pose different environmental and ethical problems. This pattern of meat consumption also has significant impacts on consumer perceptions of livestock production. Although the demand for ruminant meat will increase with urbanization in China and African countries, the consumption of monogastric meat in developing countries far exceeds that of ruminant meat, and far exceeds the demand for monogastric meat in developed countries (Delgado, 2005).

On average, for the different meat consuming groups in Africa, livestock production does not pose serious problems. In fact, the current respondents from Cameroon and South Africa have the highest proportion of vegans/vegetarians (34%) and the lowest proportion of daily meat-eaters (27%) compared to the French, Brazilian and Chinese respondents. Although there are no or few significant differences in perceptions of animal welfare and environmental issues related to livestock production among the African respondents with different meat consumption habits (Table 2A), this suggests that the lower average level of meat consumption in Africa may not be sufficient for a high level of ethical and environmental concerns about livestock, as economic issues are by far the main drivers of meat consumption. This differs from analyses performed by Miassi et al. (2022) which show, for example, that older people with a high level of education and a steady monthly income are more in favor of a vegetarian or vegan diet. This may be due to the fact that the number of elderly respondents differs across studies.

A significant difference was found among vegans/vegetarians of different ages ($P < 0.001$, Table 3A), meaning that the current young vegans/vegetarians perceive livestock production as causing more problems than older vegans/vegetarians, and young vegans/vegetarians strongly agree that reducing meat consumption is a viable solution to the problems caused by meat production. In fact, young adults, particularly in Western countries, are the most likely of all age groups to adopt a flexitarian diet (Bayer, 2019). They are partly driven by certain egoistic and altruistic motivations (health, environment and ethics), as well as positive emotions such as pride or a positive image on social media (Kemper & White, 2021). On the other hand, daily meat-eaters over the age of 51 tended to agree more with issues related to meat production and the need to reduce meat consumption than younger daily meat-eaters ($P < 0.001$, Table 3A). As this seems counterintuitive, we speculate that this discrepancy may originate from the Chinese data, in which older people expressed more concern about societal issues than younger people.

Generally, with growing concerns about the negative aspects of livestock production in high-income countries, the proportion of vegan/vegetarian is increasing (Gill, Gibson, & Lee, 2018). Indeed, in high-income countries, a significant reduction in meat consumption would be desirable and important to promote sustainable development (Parlasca & Qaim, 2022). However, high earners are unlikely to be forced to reduce their meat consumption to protect animals and the planet. Nevertheless, as we observed in our study, for vegans it did not matter whether income was high or low, but for daily meat-eaters, those with higher incomes agreed more on the issues of livestock and reducing meat consumption than low-income people ($P < 0.05$, Table 3B).

3.2.5. Other factors

Knowledge of the livestock sector due to professional activity or education may influence respondents' opinions. On average, non-scientist respondents who work within the meat sector tend to think that the livestock industry causes fewer ethical and environmental problems and disagree that reducing meat consumption could be a good option to solving those problems ($P < 0.001$, Table 1). However, this is only for the respondents from Brazil and France due to a significant "country x working area" interaction ($P < 0.001$, Table 2C). In contrast,

in these two countries plus South Africa, non-scientist respondents who work outside the meat sector hold the opposite opinion. The fact that people choose to work in a particular industry means that they more or less agree with the frameworks within that industry. However, the main reason may be that they know more about these issues than people outside the industry. In other words, the opinions of the respondents who are familiar with the meat industry are likely to be based on robust knowledge, whereas the opinions of the respondents who are not familiar with the meat industry are likely to be based on false or incomplete information or on emotional feelings not supported by facts. For instance, the environmental footprint of livestock production remains controversial, especially in relation to the newly emerging "cultured meat" industry. However, the high-profile publicity given to its advantages by the "cultured meat" industry has led the general public (especially young people and city dwellers) to believe that "cultured meat" is much more environmentally friendly than livestock produced meat, although this deserves further investigation (Rodríguez Escobar et al., 2021).

As the level of education increases, the respondents are more likely to believe that the livestock industry does cause ethical and environmental problems and that reducing meat consumption could be a good option. This finding is indeed consistent with previous research demonstrating that meat consumption decreases with increasing level of education (Pfeiler & Egloff, 2018). This fits with Maslow's hierarchy of needs, when people are more educated and their basic needs are met, they are more aware of what they do not have, making social and moral issues more developed.

3.3. Relationship between food purchasing criteria and consumption of meat and meat substitutes

Given the challenges that the livestock industry and meat production have faced, a shift in the market share of conventional meat may occur in the future with the rapid development of novel meat substitutes, which are currently being touted as more sustainable options (Newton & Blaustein-Rejto, 2021). There is a need to understand what consumers are looking for and how this relates to the consumption of meat and meat substitutes.

Generally, meat is rated more favorably by meat-eaters, whereas vegans/vegetarians rate meat substitutes more favorably than meat-eaters (Kings, Dhont, & Hodson, 2022). On average, without considering the origin of the consumers, our observation goes in the direction of this general view. As shown in Fig. 2A, daily/regular meat-eaters were highly sensitive to sensory quality as they prefer not to eat meat substitutes. Never/rarely meat-eaters (vegans/vegetarians) were more concerned about ethical and environmental issues and would be willing to eat meat substitutes, while safety seems to be a common concern of consumers, regardless of their meat consumption habits (Fig. 2A). Those using food production systems [i.e. minimally/unprocessed, organic and non-genetically modified foods] and origin/traceability as purchasing criteria appear to be more reluctant towards meat substitutes, as they prefer real meat of good quality. Consumption of meat substitutes is more associated with concerns about energy intake, nutrition, appearance, price and a desire to consume less meat. Meat alternatives also tend to be more appealing in appearance (i.e. packaging) to those who would be more willing to accept meat alternatives.

Moreover, as shown in Fig. 2B, these conclusions have to be nuanced according to the country. Indeed, the origin/traceability of food is more important for the French respondents; safety is more important for the Chinese and Brazilian respondents; ethical and environment issues are extremely important for French and Brazilian vegans/vegetarians; price, appearance, nutrition and energy intake are more valued by the respondents from South Africa who consume meat regularly or daily and sensory quality is more important for the respondents from South Africa and Brazil who eat meat. Overall, the perception of ethical and environmental issues and the desire to reduce meat consumption are more

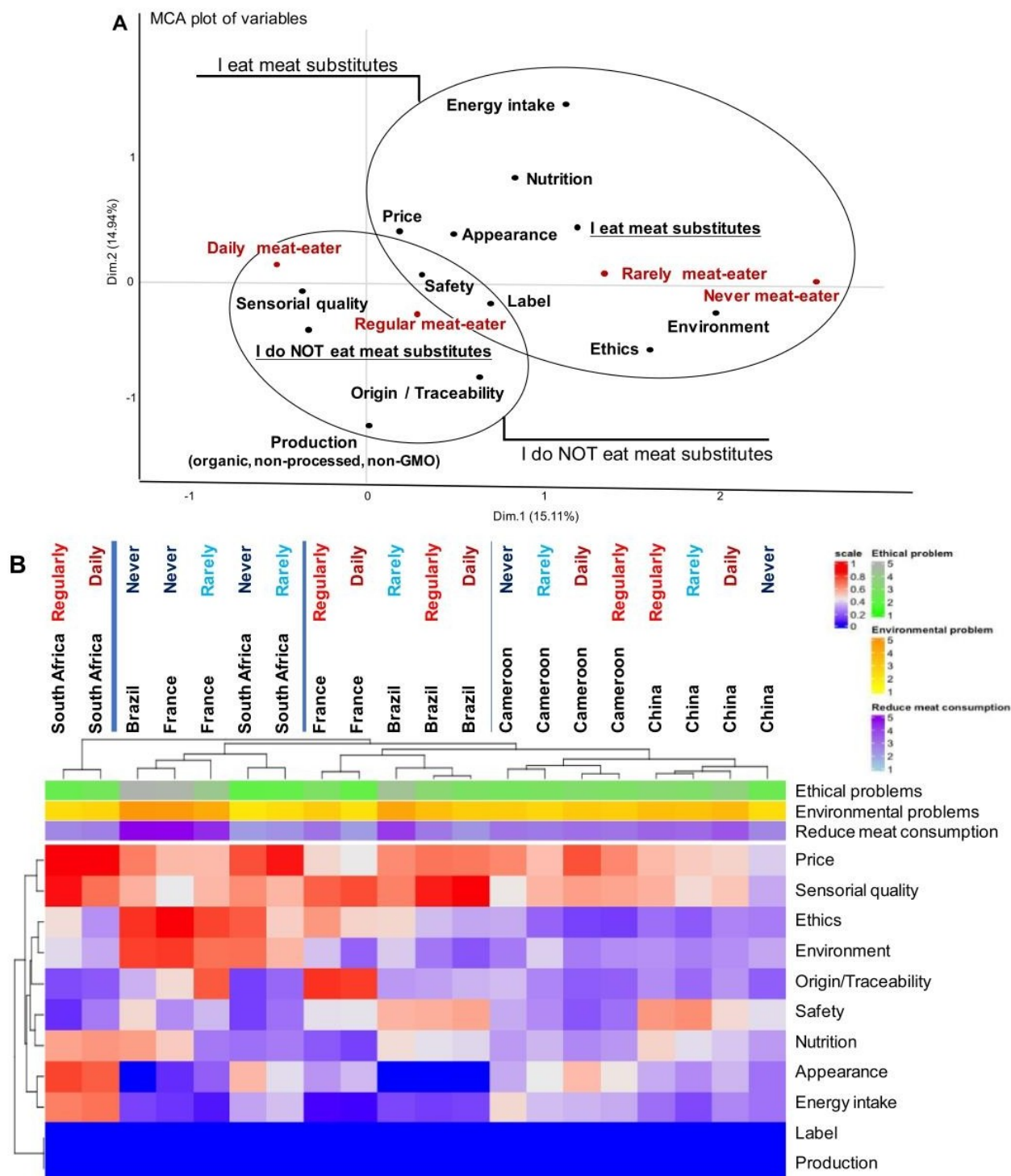


Fig. 2. Multiple component analysis (A) and hierarchical cluster analysis (B) of food purchasing criteria as a function of meat and meat substitute consumption (A) or according to the “Country x Meat consumption” interaction (B).

serious and justified for French and Brazilian vegans/vegetarians and Chinese daily meat-eaters confirming our previous observations.

Moreover, the cluster analysis (Fig. 2B) indicates that the respondents from China and Cameroon share on average the same opinions about livestock and the same criteria for buying food. Similarly, the French and Brazilian respondents who eat meat express the same

opinions that differ from the respondents from France and South Africa who rarely or never eat meat.

This cluster analysis clearly indicates that price and sensory quality are the main drivers for food purchases for the current respondents. Additionally, ethical and environmental concerns are other strong drivers but only for the respondents from Brazil, France and South Africa

who never eat meat. Conversely, labels and production systems and, to a lesser extent, appearance are weak drivers of food purchases.

Overall, the above observations would provide insights for readers in the meat and livestock production industry, who should first ensure sensory quality at an affordable price for consumers. In addition, traceability, animal welfare and environmental sustainability should be promoted on the French market to convince consumers who wish to eat less meat for societal concerns. Food safety should be strongly emphasized everywhere, but particularly in the Chinese and Brazilian markets. Affordability of meat should be the main challenge for the African meat industry and this issue has obviously been part of the debate on sustainability: the question of how to balance the increasing demand for meat with the sustainable development of the meat industry and its negative environmental and animal welfare impacts. Significant changes in various dimensions of sustainability will be required and the global livestock industry should take on these responsibilities. The current results are expected to contribute to the above issues.

4. Conclusion

This study allows us to observe how sociodemographic shifts may induce different perceptions of the impacts of livestock and meat production on animal welfare and the environment, as well as on meat consumption. Based on a large number of answers and variability in demographics and origin, this study provides a broad view of the general perception of livestock production with consistent observations. We found some national specificities and distinctions such as, compared to the French and Brazilian respondents, Chinese respondents may be more willing to reduce their meat consumption. The Chinese respondents from different sociodemographic groups have completely different opinions from their western counterparts. Overall, these findings suggest that consumer perceptions of livestock production and meat consumption, on one hand, and the drivers of critical ideas about the livestock sector, on the other, are the result of different population needs and social, cultural, dietary habits and economic interactions in different regions of the world.

A deeper view of the future of the livestock sector would be more appropriate than a polarized and emotional discourse, especially in light of the differences between the different regions of the world studied. Our conclusion is that there is a need to express specific points of view, analyze the results and draw conclusions about the livestock industry and meat consumption according to the origin, cultural background and eating habits of different consumer segments. Our findings provided a wealth of insights into the current context of academia and industry. For example, with the rise of the economy in East Asia, especially China, the consumption of meat by Chinese consumers has increased. Therefore, to be more sustainable, there are indications that Chinese consumers should reduce their meat consumption despite their lower awareness of environmental issues. However, according to our results, it does seem that Chinese consumers (especially the wealthier ones) are more likely to reduce their meat consumption, at least compared to France. This again underscores the need to weed out polarized narratives and promote more nuanced ones based on local consumer characteristics.

Author statement

Jingjing Liu: data analyses, statistics and original draft preparation;
 Jingjing Liu, Elise Hocquette, Sghaier Chriki, Marie-Pierre Ellies-Oury, Jean-François Hocquette: conception of the survey;
 Jingjing Liu, Moïse Kombolo, Sérgio Bertelli Pflanzler, Élise Hocquette: distribution of the survey and data collection;
 Matteo Santinello: data analyses and statistics.
 Sghaier Chriki, Marie-Pierre Ellies-Oury, Jean-François Hocquette: conception of the project;
 Jean-François Hocquette: project supervision.
 All authors have read and agreed the published version of the

manuscript.

Declaration of Competing Interest

None.

Data availability

Data will be made available on request.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109144>.

References

- Alonso, M. E., González-Montaña, J. R., & Lomillos, J. M. (2020). Consumers' concerns and perceptions of farm animal welfare. *Animals*, *10*(3), 385.
- Bayer, N. Z. (2019). Nutrition Foundation, Auckland University of Technology. The Bayer Food Focus Project. Available online: https://nutritionfoundation.org.nz/sites/default/files/Bayer_Survey%20Report_v10.pdf.
- Bozzo, G., Barrasso, R., Grimaldi, C. A., Tantillo, G., & Roma, R. (2019). Consumer attitudes towards animal welfare and their willingness to pay. *Veterinaria Italiana*, *55*(4), 289–297.
- Carnovale, F., Jin, X., Arney, D., Descovich, K., Guo, W., Shi, B., & Phillips, C. J. (2021). Chinese public attitudes towards, and knowledge of, animal welfare. *Animals*, *11*(3), 855.
- Charles, H., Godfray, J., Aveyard, P., Garnett, T., Hall, J. W., Key, T. J., ... Jebb, S. A. (2018). Meat consumption, health, and the environment. *Science*, *361*(6399), 1–8.
- Chriki, S., Payet, V., Pflanzler, S. B., Ellies-Oury, M. P., Liu, J., Hocquette, É., ... Hocquette, J. F. (2021). Brazilian Consumers' attitudes towards so-called "cell-based meat". *Foods*, *10*(11), 2588.
- Dagevos, H. (2021). Finding flexitarians: Current studies on meat eaters and meat reducers. *Trends in Food Science & Technology*, *114*, 530–539.
- Delgado, C. (2005). Rising demand for meat and milk in developing countries: Implications for grasslands-based livestock production. *Grassland: A Global Resource*, 29–39.
- Dibb, S., & Fitzpatrick, I. (2014). Let's talk about meat. In *Eating Better*. available at: <https://www.ciwf.cz/media/7435605/letstalkaboutmeat.pdf> (accessed 20 September 2017).
- Dumont, B., Ryschaw, J., Duru, M., Benoit, M., Chatellier, V., Delaby, L., Donnars, C., Dupraz, P., Lemaufiel-Lavenant, S., Méda, B., Vollet, D., & Sabatier, R. (2019). Associations among goods, impacts and ecosystem services provided by livestock farming. *Animal*, *13*(8), 1773–1784.
- Ferrante, L., & Fearnside, P. M. (2022). Countries should boycott Brazil over export-driven deforestation. *Nature*, *601*(7893), 318.
- Gill, M., Gibson, J. P., & Lee, M. R. F. (2018). Livestock production evolving to contribute to sustainable societies. *Animal*, *12*(8), 1696–1698.
- Graça, J., Calheiros, M. M., Oliveira, A., & Milfont, T. L. (2018). Why are women less likely to support animal exploitation than men? The mediating roles of social dominance orientation and empathy. *Personality and Individual Differences*, *129*, 66–69.
- Hocquette, É., Liu, J., Ellies-Oury, M. P., Chriki, S., & Hocquette, J. F. (2022). Does the future of meat in France depend on cultured muscle cells? Answers from different consumer segments. *Meat Science*, *188*, Article 108776.
- Hötzel, M. J., & Vandresen, B. (2022). Brazilians' attitudes to meat consumption and production: Present and future challenges to the sustainability of the meat industry. *Meat Science*, *192*, Article 108893.
- Janssen, M., Busch, C., Rödiger, M., & Hamm, U. (2016). Motives of consumers following a vegan diet and their attitudes towards animal agriculture. *Appetite*, *105*, 643–651.
- Kemper, J. A., & Ballantine, P. W. (2020). Targeting the structural environment at multiple social levels for systemic change: The case of climate change and meat consumption. *Journal of Social Marketing*, *10*(1), 38–53.
- Kemper, J. A., & White, S. K. (2021). Young adults' experiences with flexitarianism: The 4Cs. *Appetite*, *160*, Article 105073.
- Komarek, A. M., Dunston, S., Enahoro, D., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Mason-D'Croz, D., ... Willenbockel, D. (2021). Income, consumer preferences, and the future of livestock-derived food demand. *Global Environmental Change*, *70*, Article 102343.
- Krings, V. C., Dhont, K., & Hodson, G. (2022). Food technology neophobia as a psychological barrier to clean meat acceptance. *Food Quality and Preference*, *96*, Article 104409.
- Lai, J., Wang, H. H., Ortega, D. L., & Widmar, N. J. O. (2018). Factoring Chinese consumers' risk perceptions into their willingness to pay for pork safety, environmental stewardship, and animal welfare. *Food Control*, *85*, 423–431.
- Liu, J., Hocquette, É., Ellies-Oury, M. P., Chriki, S., & Hocquette, J. F. (2021). Chinese consumers' attitudes and potential acceptance toward artificial meat. *Foods*, *10*, 353.
- Miassi, Y. E., Dossa, F. K., Zannou, O., Akdemir, Ş., Koca, I., Galanakis, C. M., & Alamri, A. S. (2022). Socio-cultural and economic factors affecting the choice of food diet in West Africa: A two-stage Heckman approach. *Discover Food*, *2*(1), 1–10.

- Mottet, A., & Tempio, G. (2017). Global poultry production: Current state and future outlook and challenges. *World's Poultry Science Journal*, 73(2), 245–256.
- Ndou, S. P., Muchenje, V., & Chimonyo, M. (2011). Animal welfare in multipurpose cattle production Systems and its implications on beef quality. *African Journal of Biotechnology*, 10(7), 1049–1064.
- Newton, P., & Blaustein-Rejto, D. (2021). Social and economic opportunities and challenges of plant-based and cultured meat for rural producers in the US. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, Article 624270.
- Nizam, Q. N. H., & Tahman, S. A. (2019). Animal welfare in Asia: Specific flaws and strengths, future trends and objectives. In S. Hild, & L. Schweitzer (Eds.), *Animal welfare: From science to law* (pp. 109–118). Available online <https://www.fondation-droit-animal.org/proceedings-aw/animal-welfare-in-asia/>.
- Parlasca, M. C., & Qaim, M. (2022). Meat consumption and sustainability. *Annual Review of Resource Economics*, 14, 17–41.
- Pfeiler, T. M., & Egloff, B. (2018). Examining the “veggie” personality: Results from a representative German sample. *Appetite*, 120, 246–255.
- Phillips, C. J., & Molento, C. F. (2020). Animal welfare centres: Are they useful for the improvement of animal welfare? *Animals*, 10(5), 877.
- Phillips, C. J. C., Izmirli, S., Aldavood, S. J., Alonso, M., Choe, B. I., Hanlon, A., ... Rehn, T. (2012). Students' attitudes to animal welfare and rights in Europe and Asia. *Animal Welfare-The UFAW Journal*, 21(1), 87.
- Rodrigues, R. M., Souza, A. D. M., Bezerra, I. N., Pereira, R. A., Yokoo, E. M., & Sichieri, R. (2021). Most consumed foods in Brazil: Evolution between 2008–2009 and 2017–2018. *Revista de Saúde Pública*, 55.
- Rodríguez Escobar, M. I., Cadena, E., Nhu, T. T., Cooreman-Algoed, M., De Smet, S., & Dewulf, J. (2021). Analysis of the cultured meat production system in function of its environmental footprint: Current status, Gaps and Recommendations. *Foods*, 10(12), 2941.
- Salmon, G. R., MacLeod, M., Claxton, J. R., Ciamarra, U. P., Robinson, T., Duncan, A., & Peters, A. R. (2020). Exploring the landscape of livestock ‘facts’. *Global Food Security*, 25, Article 100329.
- Sijpestijn, G. F., Wezel, A., & Chriki, S. (2022). Can agroecology help in meeting our 2050 protein requirements? *Livestock Science*, 256, Article 104822.
- Statista. (2021). *Per capita consumption of meat worldwide, by region 2030*. Statista. URL <https://www.statista.com/statistics/1037429/per-capita-consumption-of-meat-worldwide-by-region/> (accessed on 6 July 2022).
- Su, B., & Martens, P. (2017). Public attitudes toward animals and the influential factors in contemporary China. *Animal Welfare*, 26(2), 239–247.
- Wassenaar, A., Kempen, E., & van Eeden, T. (2019). Exploring south African consumers' attitudes towards game meat—Utilizing a multi-attribute attitude model. *International Journal of Consumer Studies*, 43(5), 437–445.
- Whitnall, T., & Pitts, N. (2019). Global trends in meat consumption. *Agricultural Commodities*, 9(1), 96–99.
- Xu, X., Sharma, P., Shu, S., Lin, T. S., Ciais, P., Tubiello, F. N., ... Jain, A. K. (2021). Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nature Food*, 2(9), 724–732.

Chapitre 2 : Perception de la viande artificielle par des consommateurs issues de pays d'Afrique.



OPEN ACCESS

EDITED BY

Hao hao Wu,
Ocean University of China, China

REVIEWED BY

Nina Drejerska,
Warsaw University of Life Sciences, Poland
Aida Turrini,
Independent Researcher,
Scansano, Italy

*CORRESPONDENCE

Jean-François Hocquette
✉ jean-francois.hocquette@inrae.fr

SPECIALTY SECTION

This article was submitted to
Food Chemistry,
a section of the journal
Frontiers in Cardiovascular Medicine

RECEIVED 19 December 2022

ACCEPTED 23 March 2023

PUBLISHED 14 April 2023

CITATION

Kombolo Ngah M, Chriki S, Ellies-Oury M-P,
Liu J and Hocquette J-F (2023) Consumer
perception of “artificial meat” in the educated
young and urban population of Africa.
Front. Nutr. 10:1127655.
doi: 10.3389/fnut.2023.1127655

COPYRIGHT

© 2023 Kombolo Ngah, Chriki, Ellies-Oury, Liu
and Hocquette. This is an open-access article
distributed under the terms of the [Creative
Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). The
use, distribution or reproduction in other
forums is permitted, provided the original
author(s) and the copyright owner(s) are
credited and that the original publication in this
journal is cited, in accordance with accepted
academic practice. No use, distribution or
reproduction is permitted which does not
comply with these terms.

Consumer perception of “artificial meat” in the educated young and urban population of Africa

Moïse Kombolo Ngah¹, Sghaier Chriki^{1,2}, Marie-Pierre Ellies-Oury^{1,3},
Jingjing Liu¹ and Jean-François Hocquette^{1*}

¹INRAE, Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne, VetAgro Sup, UMR1213, Recherches sur les Herbivores, Saint Genès Champanelle, France, ²Isara, Lyon, France, ³Bordeaux Sciences Agro, Feed & Food Department, Gradignan, France

African’s population is expected to grow especially in cities to reach about 2.5 billion in 2050. This will create an unprecedented boom in the demand for animal products over the coming years which will need to be managed properly. Industry stakeholders worldwide have been touting the potential benefits of “artificial meat” in recent years as a more sustainable way of producing animal protein. “Artificial meat” is therefore moving into the global spotlight and this study aimed to investigate how African meat consumers of the coming generations perceive it, i.e., the urban, more educated and younger consumers. Three surveys were conducted with more than 12,000 respondents in total. The respondents came from 12 different countries (Cameroon, Congo, -DRC Democratic Republic of Congo, Ghana, Ivory Coast, Kenya, Morocco, Nigeria, Senegal South Africa, Tanzania and Tunisia). Respondents in this survey preferred the term “artificial meat”. This term was therefore used throughout the survey. “Artificial meat” proved to be fairly well known in the surveyed countries as about 64% the respondents had already heard of “artificial meat.” Only 8.9% were definitely willing to try “artificial meat” (score of 5 on a scale of 1–5) mostly males between 31 and 50 years of age. Furthermore, 31.2% strongly agreed that “artificial meat” will have a negative impact on the rural life (score of 5 on a scale of 1–5) and 32.9% were not prepared to accept “artificial meat” as a viable alternative in the future but were still prepared to eat meat alternatives. Of all the results, we observed significant differences in responses between respondents’ countries of origin, age and education level with interactions between these factors for willingness to try. For instance, the richest and most educated countries that were surveyed tended to be more willing to try “artificial meat.” A similar pattern was observed for willingness to pay, except that gender had no significant effect and age had only a small effect. One major observation is that a large majority of respondents are not willing to pay more for “artificial meat” than for meat from livestock.

KEYWORDS

consumer survey, cultured meat, cell-based food, food security, willingness to engage, livestock

Introduction

The African population is expected to reach about 2.5 billion people in 2050. About 80% of this increase will occur in cities, with nearly 1.5 billion Africans living in urban areas (1). This

increase in urban population along with increased income is set to increase the demand for animal-sourced food (2–4).

The livestock sector in some African countries is the fastest growing agricultural subsector (5). It contributes not only to food and nutrition security but also to economic growth by providing important foreign exchange through increased trade within and between African countries, as well as with other regions, such as the Middle East (6). Africa's livestock accounts for one third of the world's livestock population (3) and about 40% of agricultural GDP in Africa, ranging from 10 to 80% depending on the country (6).

Unfortunately, African livestock farming systems are less efficient and productive than their counterparts in more developed countries with smallholders being the main suppliers of animal-derived food (6). These smallholders are also far from markets and depend on abattoirs with limited infrastructures, thereby making it difficult to meet the growing demand for meat (7).

Between 2018 and 2020, one African person consumed on average 13 kg of meat per year, with chicken being the most consumed at 5.75 kg *per capita*. By 2030, Africa's meat consumption is expected to increase by 30% and growth in consumption will outpace the expansion of domestic production (7), and the amount of meat consumed is expected to increase to 26 kg of meat in 2050 (6, 8). Consumption patterns across Africa vary significantly; some countries consume as little as 10 kg of meat per person, around half of the continental average. Countries with higher incomes such as South Africa, consume between 60–70 kg of meat per person (9).

In addition to this demographic pressure, livestock farming systems across Africa will have to cope with climate change and develop sustainable methods of production. African livestock production already has a significant impact on the environment (10). More than 70% of agricultural greenhouse gas emissions in Africa comes from the livestock sector, dominated by enteric methane (CH₄) emissions (3).

Furthermore, the most significant environmental impacts and nutritional issues associated with animal-sourced food consumption are predicted to occur in Africa and as well as in other low- and middle-income countries of the World (11). It will therefore be a challenge for Africa to produce meat quantitatively and qualitatively for its population. Consequently, there is a huge opportunity for the private sector due to the continent's swelling dietary needs. There will be a need for the private sector to invest in veterinary services, drugs, vaccines, animal feed and infrastructures. Smallholders, with limited production resources, cannot reach these objectives.

Given this context, and especially with regard to the expected environmental challenge and the growing demand for animal protein in Africa, "artificial meat" appears to be a viable solution as suggested by its proponents. This novel food product makes use of groundbreaking technologies such as tissue culture and bioreactor engineering to increase the production of meat alternatives that may become a threat to the conventional meat industry (12, 13). "Artificial meat" is produced by *in vitro* tissue or cell culture, or by three dimensional (3D) printing of meat (14). "Artificial meat" currently faces its own problems, such as technological barriers, sensory, nutritional, health and safety challenges, in order to be fully accessible to developing food meat markets (15, 16).

"Artificial meat" is a technical revolution, but it could also be considered as a potential economic and societal revolution, which could disrupt the traditional meat sector (17). Consumer acceptance

of this novel product has been studied in many European (18–22), American (23, 24) and Asian countries (25), but little is known about the potential acceptance of "artificial meat" in African countries, despite the world's greatest challenges in terms of meat demand, climate issues and socio-economic challenges as described above.

The aim of this study is therefore to explore the responses of African consumers of the next generations (i.e., mainly urban, more educated and younger consumers) to relevant questions in order to investigate their attitudes, outlook, potential acceptance, and willingness to engage with "artificial meat," and to provide insight into the factors that may lead to the acceptance of "artificial meat" in the general context of Africa.

Materials and methods

Design of the questionnaire

Three surveys were conducted. All surveys adhered entirely to the ESOMAR (European Society for Opinion and Market Research) guideline for ethical online research (ESOMAR, 2011). Indeed, all respondents had to give their explicit informed consent to take part in the survey and their personal data was protected. In addition, respondents' data was collected in an anonymous way with a "do not wish to answer" option and with no personally identifiable information. This research was conducted in accordance with the published guidelines of the countries in which it was performed with, when required, the approval of ethics committees (such as in Brazil: CAAE number: 37924620.5.0000.5404 (23)).

As an introduction to all the surveys, basic information on "artificial meat" was provided with a small text and an illustration to avoid confusion with any other type of "artificial meat," e.g., from plant proteins (Figure 1). In at least one question, different wordings (such as "cell-based meat," "cultured meat," "lab meat," etc) were used for better understanding and to avoid any bias in the answers. In this specific question, respondents were asked for the best wording of this new product.

The three surveys were organized around six sets of questions:

1. **Socio-demographic information:** this involved the collection of information such as gender, age, education level, area of work, net monthly income, meat consumption, and familiarity with "artificial meat" (Supplementary material - Questions 1 to 8).
2. **General questions:** These questions were asked as a preamble regarding the respondents' food purchasing criteria and whether they had ever heard of this product (Supplementary material - Questions 9–10).
3. **Attitude towards societal challenges:** the objective here was to collect information on the respondents' attitude towards the societal challenges facing conventionally produced meat (meat from conventionally raised farm animals) and "cell-based meat," with regard to ethical, environmental, traditional meat industry, and rural life issues (Supplementary material - Questions 11 to 16).
4. **Characteristics of the product.** Questions were related to the perception of healthiness and eating quality of "artificial meat" (Supplementary material—Questions 17–18).

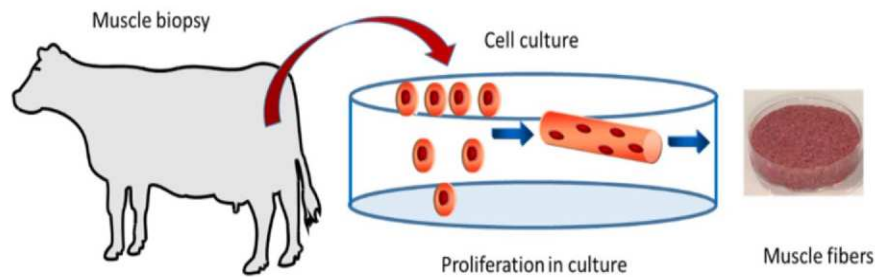


FIGURE 1
Introduction of “artificial meat” provided to respondents adapted from (23).

5. **Potential interests:** these questions aimed to evaluate consumer acceptance of “artificial meat.” They also had the aim to capture personal perceptions of this novel food compared to conventionally produced meat, including a question on how to name this product ([Supplementary material—Questions 19 to 27](#)).
6. **Development strategies:** the respondents were asked about future development strategies for the marketing of “cell-based meat” ([Supplementary material—Questions 28 to 32](#)).

Whereas the third survey included the six groups of questions, the survey 1 included the 4 first groups, and survey 2 the 2 last.

Data collection

Respondents were randomly recruited using the KASI Insight platform. KASI Insight is an African-based consulting firm that conducts surveys for market research. Kasi insight implemented a computer assisted self-interviewing (CASI) process as its main methodology which is conducted at respective connected locations (businesses, community centers, etc.) which offer respondents access to complete the survey on a desktop, without incurring data costs. CASI is a technique for survey data collection in which the respondent uses a computer to complete on-line the survey questionnaire without an interviewer administering it to the respondent. This assumes the respondent can read well (enough) and understand either English or French.

A primary rationale for CASI is that some questions are so sensitive that if researchers hope to obtain an accurate answer, respondents must use a highly confidential method of responding.

The CASI process includes multiple quality controls, including trained interviewers available at the interview sites to assist respondents when they have questions. The CASI process also include: (1) Cross-checking and authentication: All completed surveys are checked and 20% of questionnaires are cross-checked. (2) Verification of data entry: validation and verification include predefined survey rules and matching processes.

Data were collected through monthly surveys. The target population for these surveys was the adult population of major urban cities in each of the participating countries. In most of these countries, this population is representative of the economically active population, and the main decision makers in household purchases. Rural residents were therefore excluded from the surveys.

Survey responses were voluntary. Each interview took an average of 15 to 20 min. Interviews were conducted in English and French. No quotas were imposed on the survey, allowing city residents of all demographics a fair chance to be included in the survey.

The first and second surveys were conducted in the main urban centers of 12 African countries: Cameroon (Yaoundé and Douala), Congo (Brazzaville), DRC Congo (Kinshasa), Ghana (Accra, Labadi, Teshie, Nunua, Kumasi), Ivory Coast (Abidjan, Yopougon, Angre, Abodo, Bouake, Williamsville), Kenya (Nairobi, Mombasa, Nakuru), Morocco (Rabat, Casablanca), Nigeria (Lagos, Abuja, Port harcourt, Abia), Senegal (Dakar), South Africa (Johannesburg, Cape Town), Tanzania (Dar Salaam, Arusha) and Tunisia (Tunis).

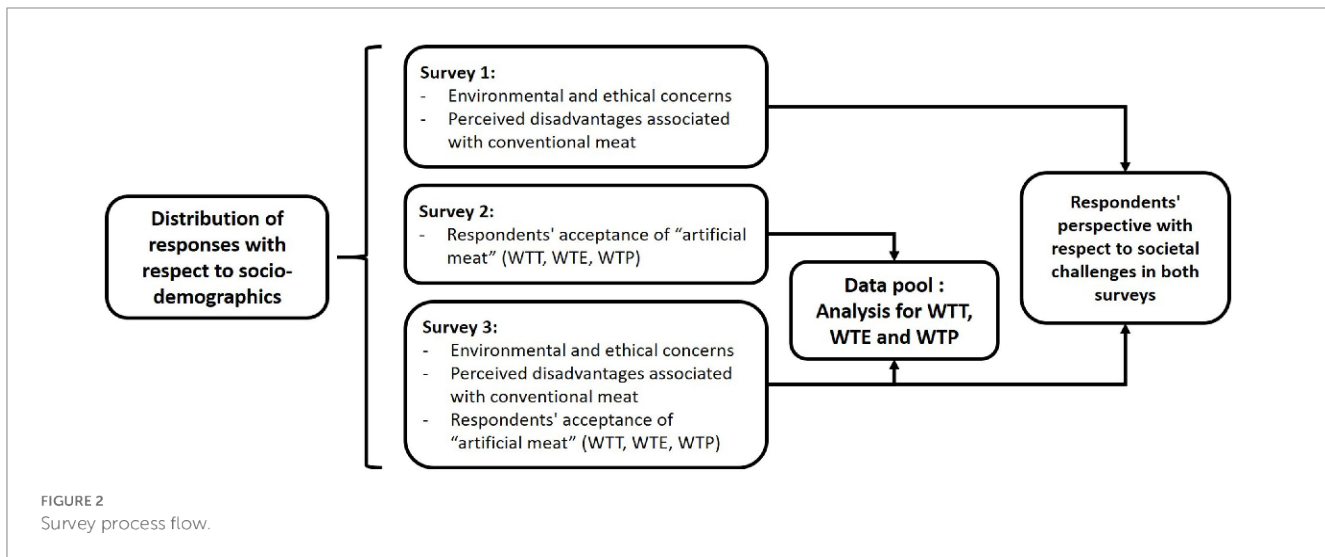
The complete survey process flow is shown in [Figure 2](#). The first survey was constituted of 21 questions. This survey ([Supplementary material—Questions 1 to 19, then 29 and 31](#)) analyzed environmental and ethical concerns of the respondents (global warming, animal welfare, animal suffering, and slaughter) as well as the disadvantages associated with conventional meat as perceived by these respondents (limited agricultural resources and population growth).

The second survey ([Supplementary material—Questions 1 to 7 and 20 to 32, excluding 29](#)) analyzed respondents’ acceptance of “artificial meat” through their willingness to try (WTT), willingness to pay (WTP), and willingness to eat regularly (WTE).

The third survey was a combination on the first 2 surveys which was constituted of 33 questions. This survey analyzed both aspects (societal challenges and respondent acceptance) with fewer respondents ($n=1,111$) from only 5 countries (Cameroon, Ghana, Kenya, Morocco, and South Africa) to represent different parts of Africa (Central, West, East, North, and South, respectively) and with the greatest potential to obtain more responses in a limited time period due to time constraints. The results of the two surveys were compared to assess the replicability of the methodology.

An average sample of 500 people per country was surveyed, targeting men and women over the age of 18. Because the population size of these sampled cities is generally greater than 500,000, the minimum recommended sample size for this population is 377, and we collected between 728 and 1,345 answers per country (for Cameroon, Ghana, Kenya, Morocco and South Africa) after pooling data from the first or second survey on one hand and from the third survey on the other hand in order to explore respondents’ opinions.

Pooling two or more cross-sectional survey data sets (i.e., stacking comparable data sets on top of one another) can serve different



purposes including to increase the sample size in hopes of improving the precision of a point estimate. The latter purpose is especially common when making inferences on a subgroup, or domain, of the target population insufficiently represented by a single survey data set (26). Consequently, answers to questions numbers 25 to 28 related to WTT, WTE and WTP for 5 countries (Cameroun, Ghana, Kenya, Morocco and South Africa) were pooled to be analyzed together. For all other questions, results were compared between surveys without pooling to take into account data from the 12 countries from surveys 1 ad 2.

Statistical analyses

The data were analyzed using R software (Version 4.0.2) (27). For most of the questions, respondents were asked to provide responses on a Likert-scale: strongly disagree (score 1), somewhat disagree (score 2), undecided (score 3), somewhat agree (score 4), and strongly agree (score 5), with the exception of a few qualitative variables which were then coded as quantitative variables to assess the influence of socio-demographic variables on WTT, WTP and WTE. The chi-2 test was used to compare the distribution of results between the two surveys.

WTT was coded quantitatively from “Definitely not”=1 to “Definitely yes”=5 and WTP: from “Much less”=1 to “Much more”=5. For WTE, the question was initially asked with multiple responses and was coded as “1” (for respondents who answered: In restaurants, At home, In prepackaged ready-to-eat meals, I do not want to eat “artificial meat” regularly, Other) and “2” (do not want to eat “artificial meat” regularly).

The initial investigations targeted the relationships between socio-demographic information and variables of willingness by means of ANOVA supplemented with a pairwise comparison between significant groups using Tukey HSD (by the R package “agricolae”). The one-way analysis of variance (ANOVA) was used to highlight any statistically significant differences between the means of the different groups corresponding to the levels of each factor of variation studied. The model was performed with the data collected from the second and

third survey and for 5 different countries (Cameroon, Ghana, Kenya, Morocco and South Africa) with the different socio-demographic factors: $y = \text{Country} + \text{Gender} + \text{Age} + \text{Education} + \text{Income} + \text{Country} \times \text{Gender} + \text{Country} \times \text{Age} + \text{Country} \times \text{Education} + \text{Country} \times \text{Income} + \text{Gender} \times \text{Age} + \text{Gender} \times \text{Education} + \text{Gender} \times \text{Income} + \text{Age} \times \text{Education} + \text{Age} \times \text{Income} + \text{Income} \times \text{Age}$. ANOVA was run a second time with only the significant factors and significant interactions included in the model. Differences were considered significant at a value of $p < 0.05$. Lsmears (Least-Squares Means which are means that are computed based on a linear model such as ANOVA) were calculated in order to detect statistical differences across the different groups (28).

After performing the ANOVA, the effect size was investigated. Effect sizes could be used beyond significance tests (p -values), because they estimate the magnitude of effects, independent from sample size (29). The effect size was evaluated in R software (Version 4.0.2) with the package “sjstats.” The effect size was calculated by eta squared -denoted as η^2 . The eta squared corresponds to the total variability in the dependent variable accounted for by the variation in the independent variable. It is calculated as the ratio of the sum of squares for each group level to the total sum of squares. It can be interpreted as percentage of variance accounted for by a variable (30). The effect sizes are reported in the [Supplementary material](#). Effect sizes varied between 0.01 and 0.02. for the different variables, which is considered to be low to moderate (30) (< 0.01 corresponds to a Small effect size, between 0.01 and 0.06 to a medium effect size and > 0.14 correspond to a large effect size).

In addition, a Principal Component Analysis (PCA) (by the R packages “FactoMineR” and “Factoextra”) was performed with the quantitative data of the third survey for which all responses from the same respondents were available to represent and model multidimensional point cloud surveys, showing whether relationships exist between the variables as previously done with similar data (19). PCA allows for the calculation of new variables, called principal components, which capture the variability in the data. This enables information to be described with fewer variables than originally present. The principal components are linear combinations of the original variables. The first principal

component is the combination of variables that explains the greatest amount of variability in the data. The second and subsequent principal components describe the maximum amount of remaining variability and must be independent (orthogonal) between them and to the first principal component.

Results

The sociodemographic characteristics of the respondents of the three surveys are detailed in [Table 1](#). The result description follows the outline below:

- Comparison of socio demographics data between the 3 surveys (questions 1 to 8).
- Comparison of results between survey 1 (in 12 countries) and survey 3 (in 5 countries) concerning respondents' perspective in relation to societal challenges (questions 11 to 16 in common between surveys 1 and 3).
- Comparison of results between survey 1 (in 12 countries) and survey 3 (in 5 countries) concerning the respondents' potential interest in "artificial meat" (questions 19 to 27).
- Comparison of results between survey 2 (in 12 countries) and survey 3 (in 5 countries) (questions 19 to 31 in common between both surveys) concerning the potential acceptance of "artificial meat" by the respondents. Then, analysis of pooled results of WTT, WTE and WTP from 5 countries in common between surveys 2 and 3 (questions 25 to 28).
- Potential drivers of acceptance of "artificial meat" from data of survey 3 (answers to all questions from respondents of 5 countries).

A summary of the respondents' profile and answers is shown in [Figure 3](#).

Socio-demographic data for all respondents

The first survey had 5,485 respondents, the second survey had 5,528 (the percentages of respondents per country in both surveys varied between 7 and 10%) and the 3rd survey had 1,111 responses (the percentages of respondents per country varied between 19 and 20%). The socio-demographic characteristics of the respondents for all surveys are shown in [Table 1](#).

All surveys had the same structure for gender and age with a majority being males representing 50.3, 52.9 and 58.2% of respondents in surveys 1, 2 and 3, respectively, and respondents between 31 and 50 years of age being the largest group (68.3%, 65%, and 49% respectively).

Most of the respondents were graduates in all surveys (58.7%, 56.6%, and 61.5% respectively) and had a monthly income of less than 1,500 USD (58.5%, 57.5%, and 43.6% respectively) ([Table 1](#)).

The respondents ate meat regularly, several times a week in in surveys 1 and 3 (38% in survey 1 and 38.2% in survey 3) and had heard of "artificial meat" (63.9% in survey 1 and 55.3% in survey 3) (data not shown).

In both surveys, most of the respondents were not scientists, and the majority did not work in the meat sector (54.9% in survey 1 and 50.5% in survey 3) (data not shown).

Respondents' perspective in relation to societal challenges

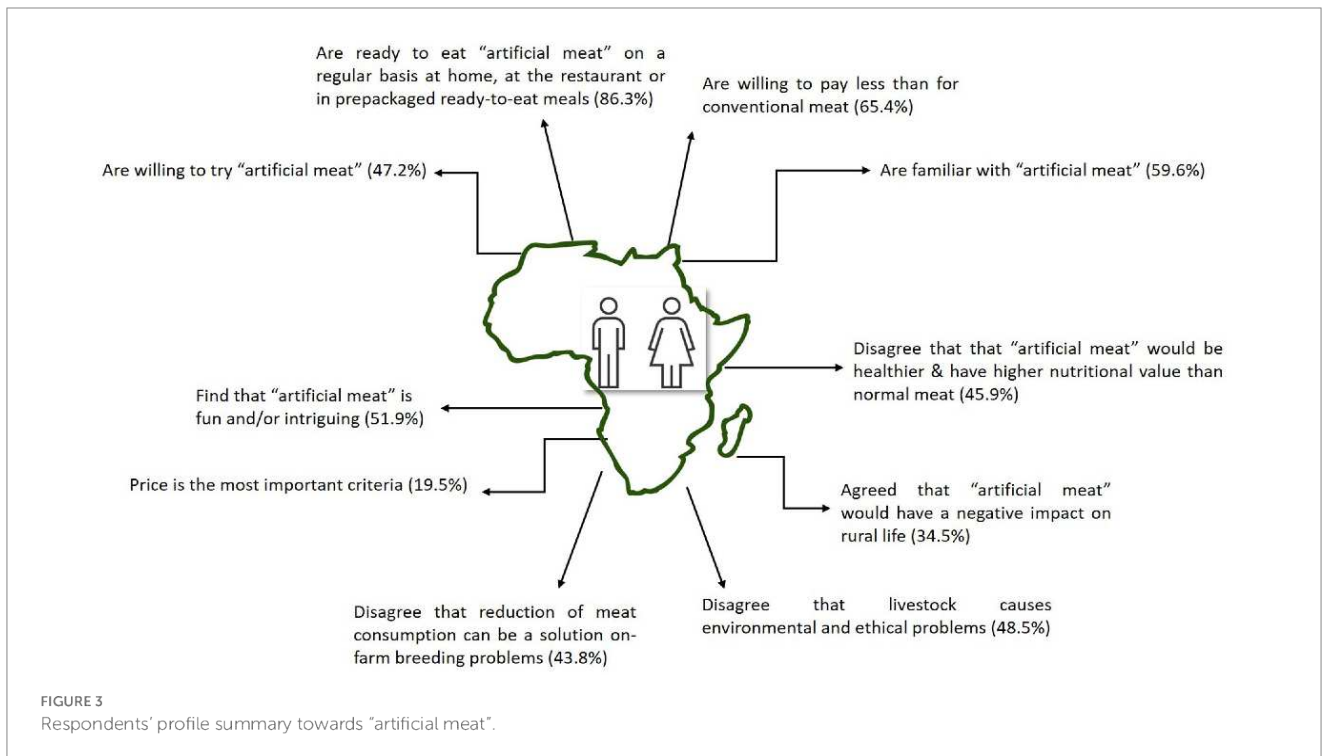
For all questions related to societal challenges ([Table 2](#)), no statistical difference was observed between the results of the two surveys which addressed these issues.

In surveys 1 and 3, most of the respondents disagreed with the idea that livestock can cause environmental problems (43.3% of responses

TABLE 1 Distribution of responses with respect to socio-demographics.

Question	Response option	Survey 1		Survey 2		Survey 3	
		Number of responses	Percentage (%) ^a	Number of responses	Percentage (%) ^a	Number of responses	Percentage (%) ^a
Gender	Female	2,725	49.7	2,602	47.1	464	64,741.8
	Male	2,760	50.3	2,926	52.9	647	58.2
Age	18–30years	1,583	28.9	1,763	31.9	517	46.5
	31–50years	3,745	68.3	3,593	65.0	544	49.0
	>51 years	157	2.8	172	3.1	50	4.5
Education	Primary school	216	4.0	205	3.7	27	2.4
	High school	412	7.5	410	7.4	52	4.7
	Undergraduate	149	2.7	168	3.1	25	2.25
	Technical Training	1,490	27.1	1,615	29.2	324	29.2
	Graduate	3,218	58.7	3,130	56.6	683	61.5
Monthly income	Under USD1,500	3,208	58.5	3,179	57.5	484	43.6
	More than USD1,500	2,277	41.5	2,349	42.5	627	56.4
Total		5,485	100	5,528	100	1,111	100

^aPercentage of people who answered the questionnaire.



were 1 and 2 on a scale of 0–5 point in survey 1 and 50% in survey 3) and ethical problems (48.8% in survey 1 and 52.1% in survey 3).

The respondents in both surveys also disagreed with the reduction of meat consumption as a solution to the problems caused by on-farm breeding (39.3% of responses were 1 or 2 in survey 1 and 48.3% in survey 3). The respondents disagreed on the fact that "artificial meat" would be healthier (36.7% of responses were 1 or 2 on scale of 0–5 in survey 1 and 55.1% in survey 3) and tastier (40.1% of responses were 1 or 2 on a scale of 0–5 in survey 1 or 52.3% in survey 3) than conventional meat. The respondents in both surveys agreed that "artificial meat" would have a negative impact on rural life (42.1% of responses were 4 or 5 in survey 1 and 27% in survey 3).

Some respondents expressed some emotional resistance to "artificial meat" in both surveys (22.9% of responses were 4 or 5 in survey 1 and 14.2% in survey 3) (Table 2).

Potential interest in "artificial meat"

In both surveys, respondents considered price (18.8% in survey 1 and 20.1% in survey 3) as the most important criterion when purchasing meat, followed by meat quality (17.2% in survey 1 and 15.8% in survey 3) (Table 3). Some respondents in both surveys considered "artificial meat" as safe (14.2% in survey 1 and 18.1% in survey 3).

When asked how they perceive "artificial meat," respondents from both surveys followed the same pattern. Of the three options proposed, most consumers found it "fun and/or intriguing" in both surveys with 59.1% in the first survey and 44.7% in the third one. In the first survey, 22.7% found it "promising and/or acceptable" while 18.3% found it "absurd and/or disgusting." In the third survey, the figures were 39.3% and 15.9%, respectively.

The largest proportion of respondents in survey 1 are consumers of both meat and meat alternatives and did not consider artificial meat as a viable meat alternative (they represent 32.9% in Survey 1 and 25.8% in Survey 3), while the largest proportion in survey 2 did not eat meat substitutes and considered "artificial meat" as a viable alternative (they represent 33.4% in survey 3 and 28.8% in survey 1, Table 3).

In both surveys, ethical concerns were the most likely to convince respondents to eat "artificial meat" (13.8% in survey 1 and 17.3% in survey 3), while safety concerns were a major reason why respondents were not willing to eat "artificial meat" (13.9% in survey 1 and 12.3% in Survey 3). In addition, a significant proportion of respondents found "artificial meat" to be unnatural (20% in survey 3 and 12.7% in survey 1, Table 3).

In both surveys, most respondents preferred to consume "artificial meat" at home (25.9% in survey 1 and 30.0% in survey 2), followed by restaurants (23.9% in survey 1 and 29.3% in survey 2) and pre-packaged ready-to-eat meat (19.9% in survey 1 and 23.6% in survey 3, Table 3).

Majority of the respondents preferred the name "artificial meat" (18%) (followed by "Clean Meat": 13.66%; "Lab meat": 13.36%; "Cultured Meat": 13.22%; "Cellular Meat": 11.13%; "In-vitro Meat": 11.59%) and 61% agreed the product could be labelled as meat when commercialized, whereas 39% thought the opposite (data not shown).

Potential acceptance of "artificial meat"

Willingness to try (WTT)

In surveys 2 and 3, many respondents were willing to try "artificial meat." Indeed, in survey 2, 39.2% were willing to try

TABLE 2 Respondents' perspective with respect to societal challenges in both survey 1 and survey 2.

Question		Response (1: completely disagree—5: completely agree)				
		1	2	3	4	5
In your opinion does on-farm breeding cause important environmental issues, e.g., huge water consumption and greenhouse gas emissions?	Survey 1	794 (14.5%)	1,579 (28.8%)	1727 (31.5%)	1,138 (20.7%)	246 (4.5%)
	Survey 2	221 (19.9%)	334 (30.1%)	370 (33.3%)	159 (14.3%)	27 (2.4%)
Do you believe that on-farm breeding can cause important ethical problems (e.g., animal suffering, animal slaughter)?	Survey 1	859 (15.7%)	1813 (33.1%)	1,527 (27.8%)	1,056 (19.3%)	229 (4.2%)
	Survey 2	301 (27.1%)	267 (25%)	376 (33.8%)	147 (13.2%)	20 (1.8%)
In your opinion, can the potential problems of on-farm breeding be dealt with by reducing our meat consumption?	Survey 1	735 (13.4%)	1,420 (25.9%)	1717 (31.3%)	1,314 (24%)	298 (5.4%)
	Survey 2	243 (21.9%)	293 (26.4%)	374 (33.7%)	179 (16.1%)	22 (2%)
Do you believe that if people ate Artificial meat instead of conventional meat, it would improve the welfare of animals and reduce animal suffering?	Survey 1	656 (12%)	1,246 (22.7%)	1790 (32.6%)	1,437 (26.2%)	355 (6.5%)
	Survey 2	252 (22.7%)	276 (24.8%)	383 (34.5%)	180 (16.2%)	20 (1.8%)
Using the following rating scale, do you think that Artificial meat could negatively impact livestock farming and the meat industry (e.g., by reducing the number of jobs available?)	Survey 1	547 (10%)	1,055 (19.2%)	1,599 (29.1%)	1,764 (32.2%)	519 (9.5%)
	Survey 2	239 (21.5%)	270 (24.3%)	343 (30.9%)	205 (18.4%)	54 (4.9%)
Do you think that Artificial meat would have a negative impact on rural life?	Survey 1	503 (9.2%)	1,098 (20%)	1,570 (28.6%)	1713 (31.2%)	600 (10.9%)
	Survey 2	201 (18.1%)	278 (25%)	332 (29.9%)	231 (20.8%)	69 (6.2%)
To what extent do you believe that Artificial meat would be healthier & have higher nutritional value than normal meat?	Survey 1	724 (13.2%)	1,291 (23.5%)	1913 (34.9%)	1,185 (21.6%)	371 (6.8%)
	Survey 2	292 (26.3%)	264 (23.8%)	397 (35.7%)	132 (11.8%)	26 (2.3%)
In your opinion do you believe that Artificial meat is tastier compared to normal meat.	Survey 1	1,032 (18.8%)	1,171 (21.3%)	1,898 (34.6%)	1,095 (20%)	288 (5.2%)
	Survey 2	284 (25.6%)	297 (26.7%)	399 (35.9%)	118 (10.6%)	13 (1.2%)
In your opinion would you say that you have emotional resistance to trying out Artificial meat (e.g., disgust or nervousness)?	Survey 1	548 (9.9%)	1,516 (27.4%)	2,197 (39.7%)	853 (15.4%)	414 (7.5%)
	Survey 2	294 (26.5%)	288 (25.9%)	371 (33.4%)	112 (10.1%)	46 (4.1%)

“artificial meat” (8.9% definitely try and 30.3% probably try), 36.6% were unsure or not yet decided whether they would try “artificial meat” and 24.2% were not willing to try “artificial meat” (14.7% will probably not try, 9.5% will definitely not try). In survey 3, a majority (55.2%) is willing to try “artificial meat” (26.1% will definitely not, 29.1% will probably try) as in the first survey compared to 18.36% who are unwilling to try (4.7% definitely not, 13.7% probably not), with 26.5% of respondents being undecided (Table 3).

In survey 3, WTT was also significantly affected by the perceived impacts of conventional meat on livestock, rural life, the environment, ethics ($p < 0.0001$) and the interaction between the country and the frequency of meat consumption ($p < 0.0001$).

The pooled data for the 5 countries in common between surveys 2 and 3 was analyzed for 5 countries (Cameroun, Ghana, Kenya, Morocco and South Africa). The results showed that WTT differed significantly according to country, age, income and education (Figure 4; Table 1). Interactions were significant between country

TABLE 3 Potential interest in “artificial meat” in both survey 2 and survey 3.

Question	Response options	Survey 1 and 2 (n=11,013)		Survey 3 (n=1,111)	
		Number of responses	Percentages (%)	Number of responses	Percentages (%)
Which of the following would you say are important considerations for you when you go to shop for meat? Which of the following would you say are important considerations for you when you go to shop for meat? (multiple choice question)	Ethics of how the meat was produced, e.g., were the animals allowed to roam freely	923	5.5	491	12.5
	Environmental impact of the food/meat during its production	1,572	9.4	501	12.7
	Price	3,150	18.8	792	20.1
	Quality of the meat (taste, juiciness, tenderness) ...	2,884	17.2	624	15.9
	Appearance of the meat (e.g., its color, freshness)	2,220	13.3	483	12.3
Would you accept Artificial Meat as a viable alternative to normal meat in the future (Just like other meat substitutes like Soy proteins)?	Yes, I already eat meat substitutes or meat alternatives	837	15.3	278	25.1
	Yes, but I do not eat meat substitutes or meat alternatives	1,579	28.8	371	33.4
	No, but I eat meat and/or meat alternatives	1,804	32.9	286	25.7
	No, I do not eat meat substitutes and/or meat alternatives	1,265	23.1	176	15.8
Which of the following reasons would be most likely to persuade you to try Artificial meat? ²	As a solution to feed the ever-growing human population	1,647	12.2	445	14.4
	It has more attractive pricing than conventional meat	1,646	12.2	509	16.4
	Ethics – it improves the wellbeing of animals and reduces animal slaughter	1,861	13.8	535	17.3
	Less risk of Zoonosis (disease that can be transmitted from animals to people, e.g., Foot & mouth disease)	1,630	12.1	462	14.9
	Attractiveness of high-tech technologies	1,371	10.1	330	10.6
	Curiosity	1,584	11.7	260	8.4

(Continued)

TABLE 3 (Continued)

Question	Response options	Survey 1 and 2 (n=11,013)		Survey 3 (n=1,111)	
		Number of responses	Percentages (%)	Number of responses	Percentages (%)
And which of the following would be the most likely reasons why you would not be willing to try Artificial meat? ^a	It is unnatural	1,756	12.7	47	20.0
	It is less tasty/appealing	1,587	11.4	15	6.4
	I am worried about its safety	1,929	13.9	29	12.3
	It is more expensive than normal meat	1,667	12.0	15	6.4
	I am reluctant (feel disgusted/nervous)	1,584	11.4	22	9.4
	It has a negative impact on local farmers	1,546	11.2	22	9.4
	Negative impact on local farmers & their jobs	1,426	10.3	28	11.9
	I do not trust laboratories and artificial meat start-up companies	966	7.0	37	15.7
Which of the following statements would you associate with Artificial meat? ^a	Adequate nutrition	1,241	9.0	468	13.5
	Tasty /tastes similar to real/normal meat	1,527	9.2	497	14.3
	Safety	1,923	14.0	626	18.1
	Less as a solution to feed the ever-growing human population	1,548	11.3	452	13.0
	It is less expensive or has better pricing than conventional meat	1,354	9.9	406	11.7
	It has a smaller environmental footprint	1,267	9.2	327	9.4
	Leads to the reduction of farming	1,161	8.5	264	7.6
	Leads to no farming	1,038	7.6	218	6.3
In which of the following cases would you be most likely to eat Artificial meat regularly?	At the restaurant	1,323	23.9	462	29.3
	At home	1,431	25.9	474	30.0
	In prepackaged ready-to-eat meals (e.g., lasagna...)	1,101	19.9	372	23.6
	I do not want to eat artificial meat regularly	821	14.8	141	8.9
	Other	852	15.4	129	8.2

(Continued)

TABLE 3 (Continued)

Question	Survey 1 and 2 (n=11,013)		Survey 3 (n=1,111)	
	Number of responses	Percentages (%)	Number of responses	Percentages (%)
Now that you have learnt a little bit more about Artificial meat, what do you think about it?	1,257	22.7	437	39.3
	3,262	59	497	44.7
	1,009	18.2	177	15.9
Artificial meat is already available in some countries, when do you think artificial meat will be widely accepted?	1,208	21.8	408	36.7
	2,381	43.0	345	31.0
	1,124	20.3	261	23.5
	815	14.7	97	8.7

*Only major answers are indicated.

and age, country and income, country and education, gender and income and education and income (Table 1).

South Africa came out as the country that was the most willing to try “artificial meat” while Ghana was the least willing to do so (Figure 4).

Those most willing to try were aged between 31 and 50 and had revenue less than \$1,500 (data not shown). Respondents with a technical education were more willing to try (Figure 4).

Willingness to eat (WTE) regularly

Most respondents were willing to eat “artificial meat” on a regular basis (85.3%) in survey 2 as well as in survey 3 (87.22%).

In survey 3, WTE was also significantly affected by the perceived impacts of conventional meat on livestock ($p < 0.0001$), rural life ($p < 0.0001$), the environment ($p < 0.006$), ethics ($p < 0.002$) as well as the frequency of meat consumption ($p < 0.004$).

The pooled data for the 5 countries in common between survey 2 and 3 showed that WTE significantly according to country and age (Figure 5; Table 2). Interactions were significant between country and age, country and gender, country and income, country and education and education and income (Table 2).

Kenya was the most willing to eat “artificial meat” but did not differ significantly from South Africa and Cameroon (Figure 5).

Those most willing to eat were over 51 years of age but did differ significantly from respondents aged 31–50. WTE was higher for males with higher incomes and for females with low incomes (\$3,000–4,000 and \$4,000 or more and \$1,500 or more for females). These 3 groups did not differ significantly. Respondents with a technical education were more willing to try.

Willingness to pay (WTP)

In survey 2, 60.7% of respondents were willing to pay less than for conventional meat (36.4% were willing to pay less and 24.3% were willing to pay much less than for conventional meat) while 12.7% were willing to pay more (8.6% more and 4.1% much more than for conventional meat) and 26.7% were willing to pay the same price as for conventional meat.

The same pattern was observed in survey 3, 70.0% of the respondents were willing to pay less than for conventional meat (36.4% were willing to pay less and 33.6% were willing to pay much less than for conventional meat) while 10.9% were willing to pay more (7.9% more and 3.0% much more than for conventional meat) while 19.1% were willing to pay the same price as for conventional meat.

Pooled results of the two surveys are indicated in Figure 6.

In survey 3, WTP was also significantly affected by the perceived impacts of conventional meat on livestock, rural life, the environment, ethics ($p < 0.0001$) as well as the frequency of meat consumption ($p = 0.004$).

Analyses of the data pool for 5 countries in common between survey 2 and 3 showed that WTP differed significantly according to country and education (Figure 7; Table 3). Interactions were significant between country and age, country and income, and education and income (Table 3).

The country that was the most willing to pay was South Africa and the least willing to pay was Kenya (Figure 7).

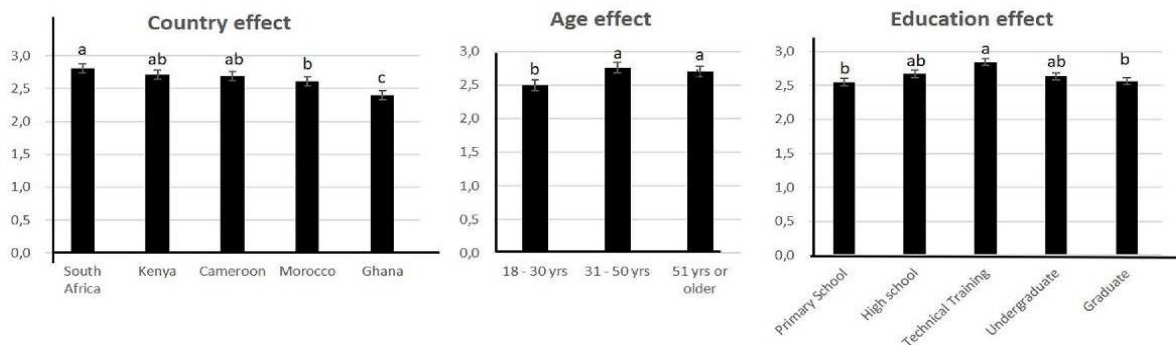


FIGURE 4 Significant factors affecting willingness to try "artificial meat."

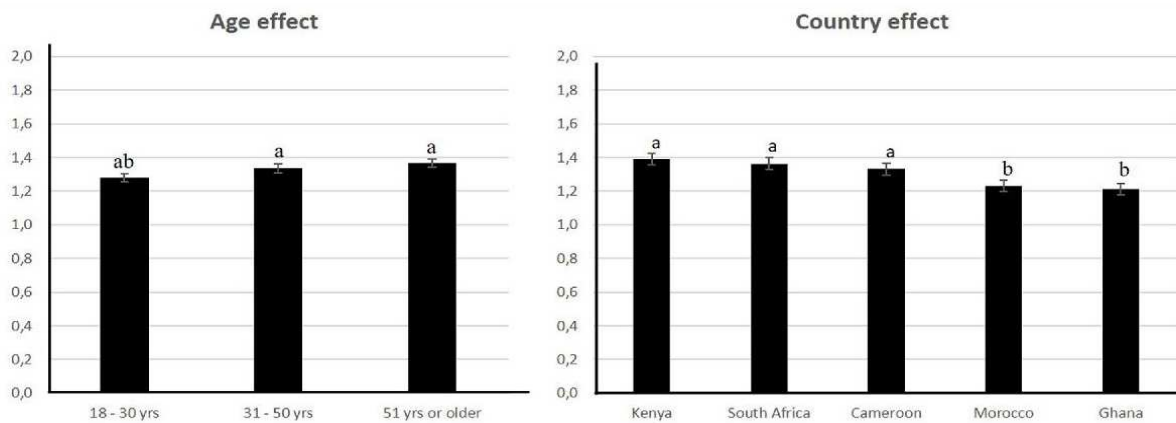


FIGURE 5 Significant factors affecting the willingness to eat "artificial meat."

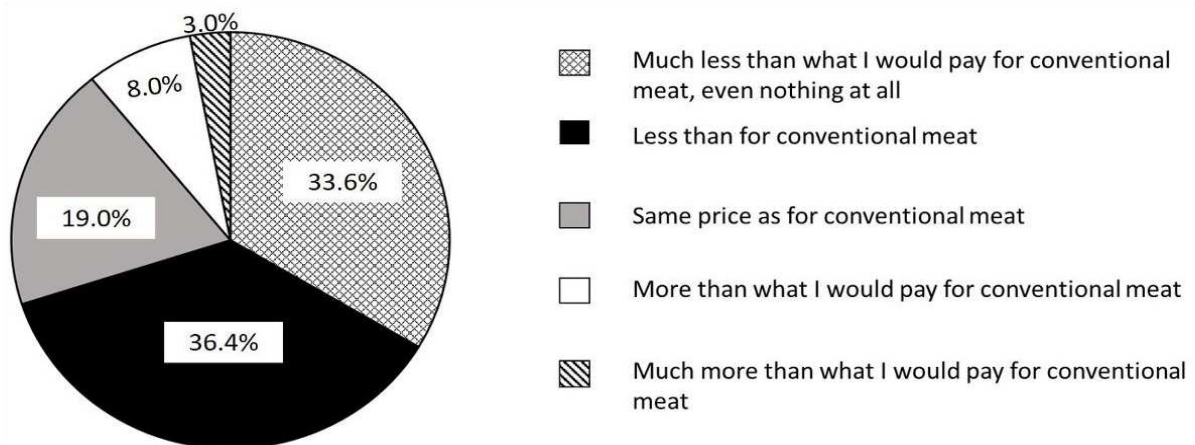


FIGURE 6 Percentages for willingness to pay for "artificial meat".

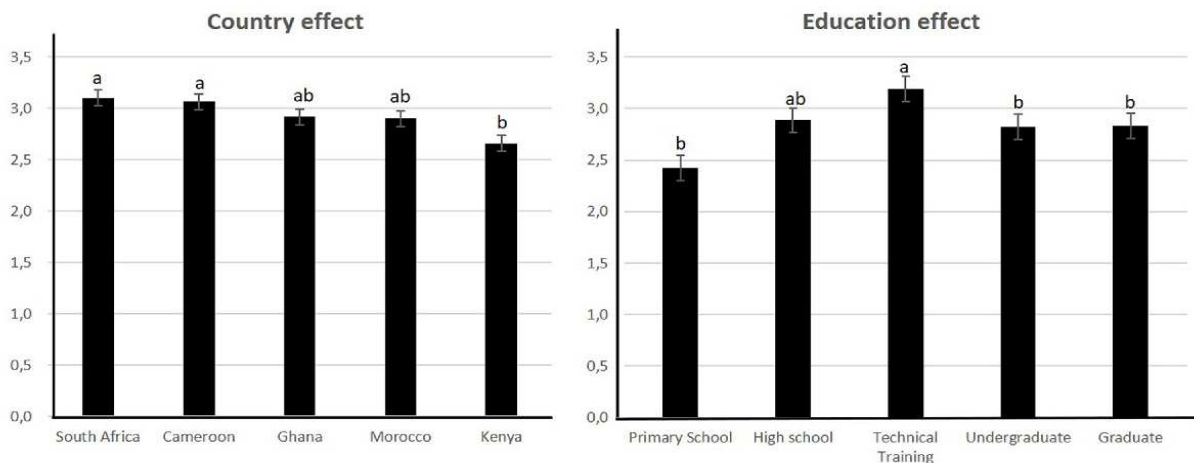


FIGURE 7 Significant factors affecting the willingness to pay for “artificial meat.”

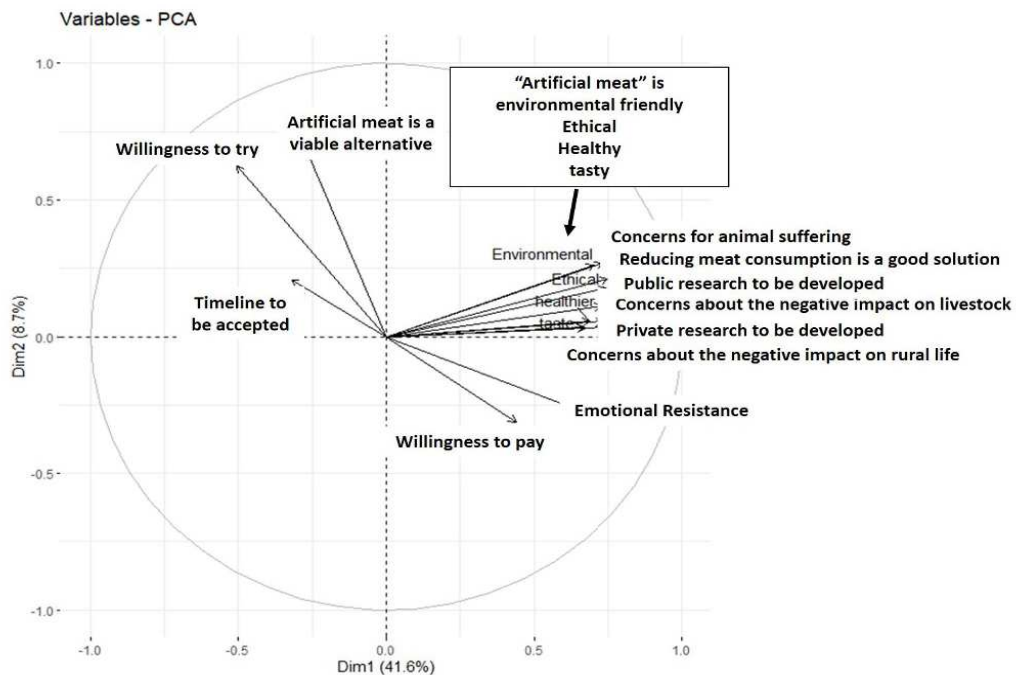


FIGURE 8 Principal Component Analysis of the main quantitative variables studied in survey 3.

Potential drivers of acceptance of “artificial meat”

A PCA was performed to investigate the underlying motives and barriers to acceptance of “artificial meat” by respondents, with all quantitative variables of survey 3 for which all responses from the same respondents were available (Figure 8) (12 questions).

The PCA revealed 2 groups of correlated variables on either side of the vertical axis. WTT was positively correlated with “artificial

meat” perceived as a viable alternative to meat and its perceived timeline for availability. WTP was positively correlated with societal challenges (concerns about the ethics and environmental problems caused by on-farm breeding, animal suffering, impact on rural life and livestock) and negatively correlated with emotional resistance.

In this analysis, WTE was negatively correlated with WTT ($r = -0.40$; $p < 0.001$) but very slightly correlated to WTP ($r = 0.04$; $p < 0.05$). WTT was negatively correlated to WTP ($r = -0.30$; $p < 0.001$). Emotional resistance was negatively correlated with WTT ($r = -0.50$; $p < 0.001$) but positively correlated with WTE and WTP ($r = 0.30$ for both; $p < 0.001$).

Discussion

What factors will affect the acceptance of “artificial meat” across Africa?

The acceptance of “artificial meat” depends on several factors such as age, income and education.

Contrary to other studies which evidenced a gender effect (23–25, 31), in this study, gender did not have an effect on the acceptance (WTE & WTT) of “artificial meat,” as argued by other studies that did not find an association between gender and food neophobia (32–34). This contradiction could be explained by the fact that our survey was not fully representative of the African population in terms of urban and rural populations, with 58% of Sub-Saharan Africa being rural and only about 30% in North Africa (35, 36). In addition, in previous surveys, different interactions of the effect of gender with other effects have been observed, which explains why the effect of gender is not consistent (23, 37).

According to the PCA, WTP could be associated with positive acceptance of “artificial meat.” WTT was negatively correlated with WTP and WTE. This result is counterintuitive as one would expect WTT to be a precursor to WTE. This result may indicate that WTT may have different motives from WTP and WTE. The main motive for WTT would be curiosity (19), while WTP and WTE are motivated by ethics and environmental issues related to livestock, as well as price, as discussed below. This has also been observed in other studies that like in Taiwan where consumers are willing to buy plant-based meat alternatives for sustainable development of the environment despite their high prices. This study concluded that consumers’ perception of green value will affect their attitude toward green products (38, 39). It was also suggested that consumers who are highly concerned about animal welfare and environmental issues are likely to consider livestock meat production as causing more ethical and environmental problems than their counterparts, which may affect negatively their consumption of meat or positively their consumption of meat alternatives (40).

Other factors that have affected African consumers’ perspective on “artificial meat” are also discussed.

Age

Age was the most important factor in our study. Other studies have shown that “artificial meat” is more attractive to younger respondents in France, Brazil and Germany (19, 23, 41). In our study, older respondents (>30 years) were the most willing to accept (WTT & WTE) “artificial meat” but age had no influence on WTP. This is in line with results in China where young respondents had the lowest WTT (25). This is also in line with the Australian survey of the Generation Z (18–24 years of age) who feared betraying Australia as a meat-eating nation (42). In Africa, livestock entrepreneurship is a self-employment option where unemployment rates are still high for younger populations (43). However, these results can be mitigated because our survey did not represent younger respondents very well. Indeed, 40% of the African population is under 15 years of age (44) and this age group was not included in the survey.

Country

Our survey suggests that although there is a general positive outlook on “artificial meat,” the extent of this potential acceptance is

not the same in all countries. This indicates the diversity of African consumers in terms of food behavior, income, gender, age and education, as all of these differ in these countries. In our study, consumers from South Africa were the most willing to try and pay for “artificial meat,” with no difference to Kenyan consumers who were the most willing to eat. In a previous study that surveyed 10 countries, South Africa was shown to have a high level of acceptance of “artificial meat,” second only to Mexico (21). The suggested reason by this study was that South Africa has been influenced from other countries such as UK or the Netherlands. This observation may also be due to the various migrants in the country. Indeed, South Africa has the highest number of migrants in its population, followed by Kenya, Cameroon, Ghana and Morocco (45, 46). The fact that Ghana and Morocco have the least migrant populations could explain why they are the least accepting of “artificial meat.”

These countries with a higher percentage of migrant population are therefore more open to novel foods and will consequently have higher levels of acceptance of “artificial meat.” South Africa differs from a number of other African countries due to the strong influence of European cuisine (21). The migrant population from other countries may differ between South Africa and other African countries. Indeed, African immigration is mostly characterized by movements within the continent (47), with the exception of South Africa which has had a more western migrant population compared to other African countries (21).

Added to this, South Africa is home to the first company to produce “artificial meat” on the African continent and this company has been funded by overseas investors as well as South Africans themselves. Kenya appears to be the country the most willing to eat “artificial meat” due to its forefront position in relation to drought (48).

Otherwise, Kenya is currently losing its livestock due to drought and may perceive “artificial meat” as a source of relief for its meat consumption but is less willing to pay for “artificial meat.” Ghana appears to be less willing to accept “artificial meat.” “Artificial meat” companies must therefore have a country-specific strategy, targeting those with similar demographics and food consumption habits.

Income

Income as well as purchasing power in Africa are increasing, but despite this, respondents are still willing to pay less for “artificial meat” than for meat. In the pooled data, most respondents had a monthly income of more than USD 1,500 (43.56% < USD 1,500 and 53.44% > USD 1,500). The average salary in Africa is approximately USD 758 with great variability between countries (49–51) but the price of beef is much lower than in European countries, which means that purchasing power should be adjusted accordingly. The price of beef in the countries surveyed varies from USD 4 to USD 13 (52). The African Development Bank (AfDB) classification measures the middle class as people living on an income of between USD 2 and 20 per person per day, or USD 60 and USD 600 per month (2011) (53). This difference between countries was also reflected by the interaction effect between income and country in the ANOVA model.

Therefore, with this information, our survey only discriminated between rich and non-rich people. Despite this limitation, this can be considered as an indication that the WTP for “artificial meat” of African countries might be very low and, in any case, lower than for conventional meat.

This could lead to the conclusion that “artificial meat” will not be considered a premium product. A report from the consulting firm McKinsey (54) indicated that “artificial meat” will initially bear a premium price tag, therefore putting it out of reach of some consumers, especially African consumers. Prices are likely to fall as the industry scales up, therefore pushing it on the spectrum of the long term (55). Most respondents consider “artificial meat” will be available in the medium term (6–15 years), as do the French (40.6%) and the Chinese (45.1%) respondents, but different from Brazil where 38.9% of respondents consider that “artificial meat” will be available in the long term (> 15 years).

Education

The literature has shown that education is a predictor of “artificial meat” acceptance since this product is more appealing to more educated consumers (56–58). Those with lower levels of education are more likely to have food neophobia (59). There has been an increase in the education level in Africa (60) but despite this increase, inequalities are still a critical issue (61). On average, only 9% of Africans were indeed enrolled in post-secondary education in 2019 (62) compared to 73% in Europe (62). In the cities of countries studied in this work, these proportions are 14% in Cameroon, 10% in Kenya, 17% in Ghana, 24% South Africa and 41% in Morocco. The respondents of our survey therefore represent only a minority of actual African citizens, as most of them have higher education.

Our survey showed that “artificial meat” is more appealing to respondents with a technical background. The reason for this might be that respondents with a technical background are more open to technological innovations. Our survey did not include non-educated respondents. Some experts believe that meat alternatives will create new job opportunities along the production chain (63–65). Others discussed the possibility of using plant ingredients as culture media instead of bovine serum (64). Some African countries could therefore become a supplier to this industry. On the other hand, these new technologies will require more trained and qualified staff. Education will therefore play a crucial role in ensuring that “artificial meat” is produced on the African continent. Animal farmers, crop-growing farmers and the rural community are indeed not generally highly educated and may suffer income losses and job losses as a result of the transition to more urban meat production, as they may not be qualified (63).

Education also had an interaction effect with income on WTP and WTE. This is because education is more accessible to those with higher incomes, especially in some developing countries.

Acceptance of “artificial meat”

Most of the respondents in Brazil, France, China (19, 23, 25) and Africa (this study) were willing to pay less for “artificial meat” than for conventional meat but the percentage of African citizens was lower compared to the situation in the other countries (71%, 69%, and 87%, respectively, and 65% for Africa).

Overall, our results show that there may be a positive perspective on “artificial meat” in Africa. However, with the same questionnaire and methodology, WTT was lower than for Brazil, France and China (50%, 51%, and 66%, respectively, vs 47.2% on average in Africa) (19, 23, 25) but WTE was much higher (> 80%). This could be due to the fact that African countries found “artificial meat” more fun and/or

intriguing than other countries (35%, 23%, and 49%, respectively, and 52% for Africa) (19, 23, 25). It appears that African consumers are keen to adopt “artificial meat” in their diets, and therefore it makes less sense to simply try it.

Interestingly, African and Chinese consumers show less emotional resistance (18.6 and 16.1%) compared to French and Brazilian respondents (55.5% and 32.4%) (23, 25). This may be explained by the fact that African and Chinese consumers are more open-minded and have more diverse dietary habits, such as eating insects (as in Africa) or plant proteins (as in China).

WTT was negatively correlated with WTP and was not associated with prospects for societal changes. This negative correlation suggests that African consumers who are ready to try “artificial meat” may not be willing to pay a high price for this product.

How can “artificial meat” pave its way in a diverse continent?

Africa is vast and diverse. Consumers do not have the same expectations. “artificial meat” industries must therefore have strategies tailored to each country or at least to the five commonly known subregions: North or Northern Africa, West Africa, Central or Middle Africa, East Africa, and Southern Africa.

Price

Africans consider price as the most important factor when it comes to purchasing meat.

Price is considered to be a common negative factor for “artificial meat” (16). This could lead to consumer reluctance if “artificial meat” prices are high. This is why, in both surveys, respondents were willing to pay less than for conventional meat. In order to gain more mainstream recognition, “artificial meat” must be cheaper and possibly produce high quality cuts at a comparatively lower price, as indicated by (66). In practice, price competitiveness is therefore an important factor to take into consideration for African countries at least. Price does not only pose a problem on the consumption side but also on the production side since production costs are still high (67).

Another important point to be considered is how “artificial meat” will be made available to African consumers. Two scenarios can be hypothesized. The first is based on the idea that “artificial meat” would be imported from developed countries, with the exception of South Africa which has already started to produce “artificial meat.” The second scenario implies that African countries would have to produce “artificial meat” themselves. Both these scenarios raise certain issues. First of all, it might be more expensive to import “artificial meat” because of its current high price and limited production compared to conventional meat. Secondly, it could be more efficient or less expensive for African governments to implement better policies by helping local farmers rather than building new “artificial meat” industries.

African consumers may be willing to try “artificial meat” because they suppose it will be cheaper than conventional meat, since price is the primary driver in purchasing meat. Even though they are less willing to try “artificial meat,” they would be prepared to eat it regularly if the price was affordable. Furthermore, unlike in developed countries, Africans are unsure about the effects of livestock on the environment and ethical issues, which explains why price is by far the most important driver of “artificial meat” acceptance.

Safety

Most African respondents associated “artificial meat” with safety, like Chinese consumers (25). That is, they consider “artificial meat” as a safe product. This is because livestock has been associated with several diseases since in many countries there are no refrigerated facilities to store meat in safe conditions. In Africa, the number of zoonotic disease outbreaks increased between 2012 and 2022 (68). The safety of animal-sourced food is therefore becoming a major concern for local populations and policy makers. However, there are still several uncertainties and limited scientific literature on the safety of “artificial meat” (15, 69).

The emphasis on safety may also stem from the 2014–2016 Ebola outbreak and the global COVID-19 pandemic. This pandemic helped raise awareness of the risk of emerging diseases related to animal exploitation. Africans could therefore perceive “artificial meat” as a way to limit these outbreaks in a context of weak health systems. However, there are still some doubts as to the safety of “artificial meat,” such as the potential addition of chemicals to the culture medium, resulting in a “chemical” meat with potential negative consequences on consumer acceptance (67, 70). Deregulation of cell lines may also occur (as in cancer cells), which may lead to unknown effects on human health (67).

Contributions and limitations of this work and future research

The answers to the questions in any survey are likely to depend on the wording and sequencing of the questions, which may influence the conclusions of the survey. Many studies have also been conducted by “artificial meat” promoters with clear objectives to influence consumers or accelerate marketing. However, our results could still be relevant to providing useful information for understanding the drivers or barriers to “artificial meat” acceptance by African’s rapidly urbanizing citizens. More relevant information could be derived from comparing results obtained with the same experimental design across countries, such as France (19), Brazil (23) and China (25), or across similar social groups (within the same study as in this work). More importantly, relevant studies on “artificial meat” are rare in Africa which makes contextual interpretation difficult.

In addition, there is clearly a strong generational effect, particularly with regard to ethical and environmental issues of livestock production, meat consumption, and therefore the overall perception of meat substitutes, including “artificial meat.” Moreover, young, well-educated people are likely to have a clearer idea of the potential and limits of science. All these facts may explain why older people may reject “artificial meat” less as shown in this work, or more, as shown in Germany and France (41), and in Europe (71). Consequently, targeting young, well-educated people as in this survey may better indicate the trends of “artificial meat” acceptance in the future, while underestimating or overestimating this potential acceptance at present.

Generally speaking, opinion surveys must be interpreted appropriately because to their limited representative character. However, this drawback can be partially offset by the consequent size of the sample and the duplication of our survey, which makes it possible to identify the major factors likely to explain, at least in part, the variability in WTT, WTE and WTP for “artificial meat,” and to analyze different segments of the population.

Finally, due to the importance of implicit attitudes that are difficult to capture, a recent survey illustrated the inadequacy of relying on self-reported measures when seeking to capture consumer

opinions on unfamiliar products such as “artificial meat” (72). However, again, despite these limitations, comparing results obtained with the same experimental design between countries or between similar social groups (within the same study as in this work) is likely to provide useful information.

Conclusion

Meat consumption in Africa is set to increase due to population growth, urbanization and income. This high demand will put pressure on a livestock industry that is not yet efficient in terms of productivity. Despite the small sample sizes of this survey, insights could still be gleaned from the results to get a broad view of the cultured meat perspective in the countries studied. As African countries vary in terms of consumer behavior, culture, tradition and demographics, the potential perception of the challenges facing livestock production and meat consumption is likely to vary accordingly. A strategy must therefore be tailored to each country. Price will be one of the main drivers in acceptance of “artificial meat” by several African countries. Therefore, policy makers, governments and local investors will have to make a choice to direct their financial help towards supporting more efficient meat production in order to meet the increasing demand of meat. Several options could be considered; investing in making livestock production more efficient and sustainable, investing in other animal protein alternatives such as protein from insects which are already widely consumed in many African countries, or investing in the production of meat alternatives such as plant-based meat or “artificial meat.” This choice will be reinforced by Africa’s limited investment capacity compared to richer countries.

Data availability statement

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

Ethics statement

Ethical review and approval was not required for the study on human participants in accordance with the local legislation and institutional requirements. The patients/participants provided their written informed consent to participate in this study.

Author contributions

MK: survey, data analysis and draft writing. SC, M-PE-O, JL and J-FH: survey design. J-FH: supervision. All authors contributed to the article and approved the submitted version.

Acknowledgments

The authors acknowledge the company KASI Insight for their contribution.

Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated

organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

Supplementary material

The Supplementary material for this article can be found online at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2023.1127655/full#supplementary-material>

References

- Latino LR, Pica-Ciamarra U, Wisser D. Africa: the livestock revolution urbanizes. *Glob Food Secur.* (2020) 26:100399. doi: 10.1016/j.gfs.2020.100399
- FAO. *Livestock sector development in Asia and sub-Saharan Africa: a framework for comparative analysis—Africa sustainable livestock 2050 (ASL2050)*. Rome, Italy: FAO (2019). 24 p.
- Balehgn M, Kebreab E, Tolera A, Hunt S, Erickson P, Crane TA, et al. Livestock sustainability research in Africa with a focus on the environment. *Anim Front.* (2021) 11:47–56. doi: 10.1093/af/vfab034
- Falchetta G, Golinucci N, Rocco MV. Environmental and energy implications of meat consumption pathways in sub-Saharan Africa. *Sustainability.* (2021) 13:7075. doi: 10.3390/su13137075
- Moving towards sustainability: the livestock sector and the World Bank*. Washington, DC: World Bank.
- Panel MM. *Meat, milk and more: Policy innovations to shepherd inclusive and sustainable livestock systems in Africa*. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (2020).
- Michele P. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2021–2030* (2021). 15 p.
- Statista. (2022). Africa: per capita consumption of meat by type. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1290503/per-capita-consumption-of-meat-in-africa-by-type/> (Accessed September 26, 2022).
- Ritchie H, Roser M. (2017). Meat and dairy production. Our World Data. Available at: <https://ourworldindata.org/meat-production> (Accessed October 12, 2020).
- Gerber PJ. Food and agriculture Organization of the United Nations. *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (2013). 115 p.
- Mensah DO, Mintah FO, Oteng SA, Lillywhite R, Oyebo O. 'We're meat, so we need to eat meat to be who we are': understanding motivations that increase or reduce meat consumption among emerging adults in the University of Ghana food environment. *Meat Sci.* (2022) 193:108927. doi: 10.1016/j.meatsci.2022.108927
- Bonny SPF, Gardner GE, Pethick DW, Hocquette J-F. What is artificial meat and what does it mean for the future of the meat industry? *J Integr Agric.* (2015) 14:255–63. doi: 10.1016/S2095-3119(14)60888-1
- Ellies-Oury M-P, Chriki S, Hocquette J-F. Chapter six - should and will 'cultured meat' become a reality in our plates? In: J Wu, editor. *Advances in food and nutrition research. Emerging sources and applications of alternative proteins*. Cambridge, MA: Academic Press (2022). 181–212.
- Bonny SPF, Gardner GE, Pethick DW, Hocquette J-F, Bonny SPF, Gardner GE, et al. Artificial meat and the future of the meat industry. *Anim Prod Sci.* (2017) 57:2216–23. doi: 10.1071/AN17307
- Chriki S, Ellies-Oury M-P, Hocquette J-F. Is "cultured meat" a viable alternative to slaughtering animals and a good compromise between animal welfare and human expectations? *Anim Front.* (2022) 12:35–42. doi: 10.1093/af/vfac002
- Zhang L, Hu Y, Badar IH, Xia X, Kong B, Chen Q. Prospects of artificial meat: opportunities and challenges around consumer acceptance. *Trends Food Sci Technol.* (2021) 116:434–44. doi: 10.1016/j.tifs.2021.07.010
- Treich N. Cultured meat: promises and challenges. *Environ Resour Econ.* (2021) 79:33–61. doi: 10.1007/s10640-021-00551-3
- Dupont J, Fiebelkorn F. Attitudes and acceptance of young people toward the consumption of insects and cultured meat in Germany. *Food Qual Prefer.* (2020) 85:103983. doi: 10.1016/j.foodqual.2020.103983
- Hocquette É, Liu J, Ellies-Oury M-P, Chriki S, Hocquette J-F. Does the future of meat in France depend on cultured muscle cells? Answers from different consumer segments. *Meat Sci.* (2022) 188:108776. doi: 10.1016/j.meatsci.2022.108776
- Palmieri N, Perito MA, Lupi C. Consumer acceptance of cultured meat: some hints from Italy. *Br Food J.* (2020) 123:109–23. doi: 10.1108/BJF-02-2020-0092
- Siegrist M, Hartmann C. Perceived naturalness, disgust, trust and food neophobia as predictors of cultured meat acceptance in ten countries. *Appetite.* (2020) 155:104814. doi: 10.1016/j.appet.2020.104814
- Gousset C, Gregorio E, Marais B, Rusalen A, Chriki S, Hocquette J-F, et al. Perception of cultured "meat" by French consumers according to their diet. *Livest Sci.* (2022) 260:104909. doi: 10.1016/j.livsci.2022.104909
- Chriki S, Payet V, Pflanzler SB, Ellies-Oury M-P, Liu J, Hocquette É, et al. Brazilian consumers' attitudes towards so-called "cell-based meat". *Foods.* (2021) 10:2588. doi: 10.3390/foods10112588
- Wilks M, Phillips CJC. Attitudes to in vitro meat: a survey of potential consumers in the United States. *PLoS One.* (2017) 12:e0171904. doi: 10.1371/journal.pone.0171904
- Liu J, Hocquette É, Ellies-Oury M-P, Chriki S, Hocquette J-F. Chinese consumers' attitudes and potential acceptance toward artificial meat. *Foods.* (2021) 10:353. doi: 10.3390/foods10020353
- Lewis T (2017). *Estimation strategies involving pooled survey data*.
- R: the R project for statistical computing. Available at: <https://www.r-project.org/> (Accessed September 28, 2022).
- Lenth R. Least-squares means: the R package lsmeans. *J Stat Softw.* (2016) 69, 1–33. doi: 10.18637/jss.v069.i01
- Lakens D. Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for t-tests and ANOVAs. *Front Psychol.* (2013) 4, 1–12. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00863
- Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2nd ed. Hillsdale, NJ: L. Erlbaum Associates (1988). 567 p.
- Moerbeek H, Casimir G. Gender differences in consumers' acceptance of genetically modified foods. *Int J Consum Stud.* (2005) 29:308–18. doi: 10.1111/j.1470-6431.2005.00441.x
- Demattè ML, Endrizzi I, Gasperi F. Food neophobia and its relation with olfaction. *Front Psychol.* (2014) 5:127. doi: 10.3389/fpsyg.2014.00127
- Jezevska-Zychowicz M, Plichta M, Drywień ME, Hamulka J. Food Neophobia among adults: differences in dietary patterns, food choice motives, and food labels Reading in poles. *Nutrients.* (2021) 13:1590. doi: 10.3390/nu13051590
- Meiselman HL, King SC, Gillette M. The demographics of neophobia in a large commercial US sample. *Food Qual Prefer.* (2010) 21:893–7. doi: 10.1016/j.foodqual.2010.05.009
- Rural population (% of total population)—Middle East & North Africa | data. Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.RUR.TO.TL.ZS?locations=ZQ> (Accessed August 30, 2022)
- Sub-Saharan Africa rural population 1960–2022. Available at: <https://www.macrotrends.net/countries/SSF/sub-saharan-africa/rural-population> (Accessed August 30, 2022)
- Hocquette A, Lambert C, Sinquin C, Peterolf L, Wagner Z, Lebert A, et al. Educated consumers don't believe artificial meat is the solution to the problems with the meat industry. *J Integr Agric.* (2015) 14:273–84. doi: 10.1016/S2095-3119(14)60886-8
- Ma C-C, Chang H-P. The effect of novel and environmentally friendly foods on consumer attitude and behavior: a value-attitude-behavioral model. *Foods.* (2022) 11:2423. doi: 10.3390/foods11162423
- Pimentel D, Pimentel M. Sustainability of meat-based and plant-based diets and the environment. *Am J Clin Nutr.* (2003) 78:660S–3S. doi: 10.1093/ajcn/78.3.660S
- Liu J, Chriki S, Kombolo M, Santinello M, Pflanzler SB, Hocquette É, et al. Consumer perception of the challenges facing livestock production and meat consumption. *Meat Sci.* (2023) 200:109144. doi: 10.1016/j.meatsci.2023.109144

41. Bryant C, van Nek L, Rolland NCM. European markets for cultured meat: a comparison of Germany and France. *Foods*. (2020) 9:1152. doi: 10.3390/foods9091152
42. Bogueva D, Marinova D. Cultured meat and Australia's generation Z. *Front Nutr*. (2020) 7:148. doi: 10.3389/fnut.2020.00148
43. Baah-Boateng W. The youth unemployment challenge in Africa: what are the drivers? *Econ Labour Relat Rev*. (2016) 27:413–31. doi: 10.1177/1035304616645030
44. Statista (2021). Africa: population by age group. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1226211/population-of-africa-by-age-group/> (Accessed August 15, 2022).
45. Africa: Countries with the most immigrants. Statista. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1237618/international-migrants-in-africa-by-country/> (Accessed August 31, 2022).
46. Migrant population in Africa. Available at: [TheGlobalEconomy.com https://www.theglobaleconomy.com/rankings/migrant_population/Africa/](https://www.theglobaleconomy.com/rankings/migrant_population/Africa/) (Accessed August 31, 2022).
47. Cycles T text provides general information S assumes no liability for the information given being complete or correct D to varying update, text SCDM up-to-DDTR in the. Topic: Immigration in Africa. Statista. Available at: <https://www.statista.com/topics/8523/immigration-in-africa/> (Accessed October 11, 2022).
48. Millions face hunger as drought grips Ethiopia, Kenya and Somalia, warns world food Programme | World Food Programme. Available at: <https://www.wfp.org/stories/millions-face-hunger-drought-grips-ethiopia-kenya-and-somalia-warns-world-food-programme> (Accessed August 27, 2022).
49. Average income around the world. Available at: [Worlddata.info https://www.worlddata.info/average-income.php](https://www.worlddata.info/average-income.php) (Accessed October 17, 2022).
50. Countries/Regions. Available at: <https://www.ceicdata.com/en/countries> (Accessed October 17, 2022).
51. Doctor T. (2022). What is the average salary in Africa in 2022? Biz 30. <https://biz30.timedoctor.com/average-salary-in-africa/> (Accessed October 17, 2022).
52. Cameroon—beef—price, June 2022. Available at: [GlobalProductPrices.com. https://www.globalproductprices.com/Cameroon/beef_price/](https://www.globalproductprices.com/Cameroon/beef_price/) (Accessed October 23, 2022).
53. Němečková T, Harmáček J, Schlossarek M. Measuring the middle class in Africa – income versus assets approach. *Afr Spectr*. (2020) 55:3–32. doi: 10.1177/0002039720916087
54. Cultivated meat: Out of the lab, into the frying pan. McKinsey. Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/agriculture/our-insights/cultivated-meat-out-of-the-lab-into-the-frying-pan> (Accessed August 16, 2022).
55. Garrison GL, Biermacher JT, Brorsen BW. How much will large-scale production of cell-cultured meat cost? *J Agric Food Res*. (2022) 10:100358. doi: 10.1016/j.jafr.2022.100358
56. Bryant C, Barnett J. Consumer acceptance of cultured meat: an updated review (2018–2020). *Appl Sci*. (2020) 10:5201. doi: 10.3390/app10155201
57. Gómez-Luciano CA, de Aguiar LK, Vriesekoop F, Urbano B. Consumers' willingness to purchase three alternatives to meat proteins in the United Kingdom, Spain, Brazil and the Dominican Republic. *Food Qual Prefer*. (2019) 78:103732. doi: 10.1016/j.foodqual.2019.103732
58. Mancini MC, Antonioli F. Exploring consumers' attitude towards cultured meat in Italy. *Meat Sci*. (2019) 150:101–10. doi: 10.1016/j.meatsci.2018.12.014
59. van den Heuvel E, Newbury A, Appleton KM. The psychology of nutrition with advancing age: focus on food Neophobia. *Nutrients*. (2019) 11:151. doi: 10.3390/nu11010151
60. Evans DK, Mendez AA. Education in Africa: what are we learning? *J Afr Econ*. (2021) 30:13–54. doi: 10.1093/jae/ejaa009
61. Fomba BK, Talla DNDF, Ningaye P. Institutional quality and education quality in developing countries: effects and transmission channels. *J Knowl Econ*. (2022). doi: 10.1007/s13132-021-00869-9
62. School enrollment, tertiary (% gross) - sub-Saharan Africa | data. Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/SE.TER.ENRR?locations=ZG> (Accessed October 16, 2022).
63. Morais-da-Silva RL, Villar EG, Reis GG, Sanctorum H, Molento CFM. The expected impact of cultivated and plant-based meats on jobs: the views of experts from Brazil, the United States and Europe. *Humanit Soc Sci Commun*. (2022) 9:1–14. doi: 10.1057/s41599-022-01316-z
64. Morais-da-Silva R, Glufke Reis G, Sanctorum H, Molento C. The social impacts of a transition from conventional to cultivated and plant-based meats: evidence from Brazil. *Food Policy*. (2022) 111:102337. doi: 10.1016/j.foodpol.2022.102337
65. Newton P, Blaustein-Rejto D. Social and economic opportunities and challenges of plant-based and cultured meat for rural producers in the US. *Front Sustain Food Syst*. (2021) 5. doi: 10.3389/fsufs.2021.624270
66. O'Keefe L, McLachlan C, Gough C, Mander S, Bows-Larkin A. Consumer responses to a future UK food system. *Br Food J*. (2016) 118:412–28. doi: 10.1108/BFJ-01-2015-0047
67. Chriki S, Hocquette J-F. The myth of cultured meat: a review. *Front Nutr*. (2020) 7:7. doi: 10.3389/fnut.2020.00007
68. World Health Organization. In Africa, 63% jump in diseases spread from animals to people seen in last decade. WHO Reg Off Afr <https://www.afro.who.int/news/africa-63-jump-diseases-spread-animals-people-seen-last-decade> (Accessed September 20, 2022).
69. Ketelings L, Kremers S, de Boer A. The barriers and drivers of a safe market introduction of cultured meat: a qualitative study. *Food Control*. (2021) 130:108299. doi: 10.1016/j.foodcont.2021.108299
70. Mancini MC, Antonioli F. "The future of cultured meat between sustainability expectations and socio-economic challenges." in *Future Foods*. Academic Press (2022). 331–50.
71. Grasso AC, Hung Y, Olthof MR, Verbeke W, Brouwer IA. Older consumers' readiness to accept alternative, more sustainable protein sources in the European Union. *Nutrients*. (2019) 11:E1904. doi: 10.3390/nu11081904
72. Baum CM, Bröring S, Lagerkvist C-J. Information, attitudes, and consumer evaluations of cultivated meat. *Food Qual Prefer*. (2021) 92:104226. doi: 10.1016/j.foodqual.2021.104226

Conclusion

Les résultats obtenus de ces études indiquent que les perceptions des consommateurs concernant la production et la consommation de viande, d'une part, et les critiques sur le secteur de l'élevage, d'autre part, résultent des attentes des différentes populations et des interactions sociales, culturelles, alimentaires et économiques dans différentes régions du monde. Dans ces études, les répondants considèrent le prix et la qualité sensorielle comme les critères les plus importants lors de leurs achats de produits alimentaires, notamment la viande.

L'acceptation de la viande artificielle témoigne de l'évolution des préférences des consommateurs. Avec les changements dans les attitudes et les valeurs des consommateurs, de plus en plus de personnes s'intéressent à des alternatives à la viande conventionnelle, notamment la viande artificielle. Dans cette étude, nous avons exploré les facteurs qui contribuent à l'acceptation de la viande artificielle dans un contexte où la consommation de viande conventionnelle est en pleine croissance notamment dans les pays africains. Il en ressort que les facteurs qui influencent l'acceptation de ce produit sont l'âge, le revenu, le niveau d'éducation et les caractéristiques propres à chaque pays africain. La question du prix est également un aspect essentiel. Les consommateurs africains considèrent le prix comme le facteur le plus important lors de l'achat de viande.

Il est donc important de mettre en lien le prix et la qualité sensorielle, d'examiner les facteurs sous-tendant cette relation et de mieux comprendre les motivations des consommateurs afin d'identifier les leviers qui peuvent favoriser une meilleure acceptation de la viande bovine traditionnelle. En analysant les préférences et les comportements des consommateurs reflétés par leur niveau d'acceptation de la viande artificielle, les acteurs de la filière viande bovine peuvent développer une stratégie plus réfléchie et efficace pour répondre à l'évolution des attentes.

Cette même enquête avec une trentaine de questions a été diffusée en ligne auprès de 4533 consommateurs français (Hocquette et al., 2022), 4929 consommateurs chinois (Liu et al., 2021) et 4471 consommateurs brésiliens (Chriki et al., 2021).

Selon la très grande majorité des répondants (plus de 89% en Afrique, 91% en France, 95% au Brésil et 96% en Chine), le prix de vente de ce produit devrait être inférieur (voire nul pour ceux qui ne veulent pas l'acheter) ou égal à celui de la viande conventionnelle soulignant l'importance du prix pour la très grande majorité des consommateurs.

Selon les pays, 15% (en Chine) à 54% (en France) des sondés (et 15 à 18% en Afrique), considèrent que la « viande de culture » est une idée « absurde et/ou dégoûtante », 27% (en France) à 49% (en Chine)

la trouvent plutôt « intrigante et/ou amusante », contre 19% (en France) à 47% (au Brésil) et 23-39% en Afrique qui la considèrent comme une idée « prometteuse et/ou réalisable ». Ces proportions varient également selon les groupes sociologiques. Contrairement aux femmes chinoises, les femmes françaises et brésiliennes sont davantage favorables à cette biotechnologie en raison d'une plus grande sensibilité aux questions éthiques ou environnementales liées à l'élevage. A l'opposé, les hommes âgés (> 51 ans) sont les plus réticents, surtout quand ils travaillent dans le secteur de la viande. La moitié environ des répondants brésiliens rejettent la dénomination « viande » pour ce produit.

Par ailleurs, une autre enquête en face à face a recueilli le ressenti de 118 consommateurs en fonction de leurs régimes alimentaires. Les consommateurs réguliers de viande sont plus favorables à cette technologie que les végétariens et végétariens qui perçoivent ce produit comme de la viande et ne veulent pas en consommer car d'origine animale (Gousset et al., 2022).

Cette enquête est, à notre connaissance, l'enquête avec l'effectif le plus important qui ait été conduite dans le monde sur cette thématique. De plus, contrairement à certaines enquêtes précédentes, cette étude a été conduite par un collectif de chercheurs appartenant à des organismes de recherche publics sans lien avec les entreprises privées voulant commercialiser cette biotechnologie. Nous concluons donc de cette première partie que les critères les plus importants pour les consommateurs restent le prix et la qualité sensorielle quel que soit le contexte.

D. PREDICTION DE LA QUALITE SENSORIELLE

Introduction

Il est primordial de pouvoir mettre en lien le prix et la qualité sensorielle de la viande bovine pour ne pas décevoir les consommateurs. Afin de pouvoir prédire la qualité de la viande bovine, les systèmes de classements devraient prendre en compte un certain nombre de critères variés au niveau de l'animal, du type d'élevage, ainsi que le type de muscle et même la méthode de cuisson. La prise en compte de chacun de ces éléments peut être complexe.

Dans cette partie, nous avons étudié l'implémentation des systèmes MSA et 3G qui permettent de pouvoir prendre en compte divers critères prédictifs de la qualité gustative de la viande bovine correspondant à différents critères préalablement définis de façon standardisée. Cette étude a été réalisée avec des vaches de réforme de race pure (la race Limousine), ce type de bovins étant à priori exclu du système MSA en Australie.

Nous vous présenterons donc des résultats sous-tendant l'implémentation du système MSA pour la prédiction de la qualité gustative des bovins d'une race pure, ainsi que le potentiel de prédiction du prototype européen du système 3G. De plus, nous avons étendu nos tests au-delà du cadre initial du système MSA en étudiant des vaches de réforme n'ayant pas reçu d'implants hormonaux au lieu de jeunes animaux (bouvillons, génisses) dont la croissance est souvent stimulée par des hormones en Australie. Ces vaches ayant été engraisées en système extensif d'élevages HVN et non pas dans des feedlots comme en Australie. Notre objectif était d'étudier les performances du système MSA dans ces différents contextes, élargissant ainsi notre compréhension de son potentiel.

Notre hypothèse de recherche sur cette partie était que, conformément aux études précédemment menées dans d'autres pays, le système MSA, ainsi que le système 3G en développement au niveau Européen, auront la capacité de prédire la qualité sensorielle de la viande bovine dans un contexte français y compris avec des vaches de réformes de race à viande.

Prédiction de la qualité sensorielle de la race Limousine

(article en préparation)

EVALUATION BY FRENCH CONSUMERS AND PREDICTION OF EATING QUALITY OF LIMOUSIN BEEF

Moïse Kombolo^a, Isabelle Legrand^b, Jingjing Liu^a, Alix Neveu^c, Faustine Noel^d, David Pethick^e, Jean-François Hocquette^a

^aINRAE, Clermont-Ferrand, VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France; ^bInstitut de l'Elevage, Boulevard des Arcades, 87000 Limoges, France; ^cMR3GF International Meat Research 3G Foundation, Smulikowskiego St. 4/217 00-389 Warsaw; ^dInstitut de l'Elevage, 14310 Villers-Bocage, France ; ^eFood Futures Institute, Murdoch University, Perth 6150, Australia

Abstract

This study evaluated the potential of the Meat Standards Australia (MSA) grading system to predict eating quality of beef and therefore consumer satisfaction in the French context. It focuses on evaluating the accuracy of the MSA system and of a European 3G modelling prototype in predicting satisfaction scores for French animals, specifically old Limousin cows initially not considered in the MSA model. The accuracy of overall predictions by the MSA model of four consumer-assigned grades are satisfactory but average (> 0.50) except if we aim to discriminate only two grades (> 74% to predict beef of the best quality). A significant correlation (0.67) of consumer-assigned grades was observed between the MSA and 3G indices. The limited variability in animal types, breeds, cuts, cooking methods, and the small sample size but also the differences in breeds and livestock systems between Australia and France may have contributed to the moderate accuracy of both models and for some discrepancy between model outputs. The 3G index exhibited higher means and maximum values, but lower standard deviations and coefficient of variation compared to the MSA index, suggesting a tendency for higher overall eating quality indication. Both MSA and 3G indices are positively correlated to Eye Surface Area and marbling scores ($P < 0.01$). Interestingly, the 3G index showed different correlations with hump height and ossification scores compared to the MSA model. These findings highlight the need for greater variability and consideration of specific characteristics in developing robust prediction models for beef eating quality for various types of carcasses and different markets.

INTRODUCTION

In order to be more competitive, the beef industry needs to produce meat of consistent and predictable eating quality. This will bring benefits by increasing consumer satisfaction, and ultimately, increased profitability. The eating quality of beef is known to be mostly influenced by both pre- and post-slaughter events with many of the determinants interacting with each other (Devlin et al., 2017; Ferguson et al., 2001). In order to produce beef, of predictable and consistent quality, all these factors therefore have to be considered through a quality assurance system that has as foundation for the consumers. In the French and European contexts, there is still no reliable approach nor quality assurance system to provide beef of consistent quality (Legrand et al., 2013a). Despite this, France is still having the largest cattle herd in Europe and is therefore the largest meat producer and consumer in Europe. French beef operators use the EUROP system (which is compulsory) as the basis for carcass classification and trade but it has been shown that this system has poor relationship with the eating quality of beef (Bonny et al., 2016; Liu et al., 2020b). The only carcass grading system known to have the ability to predict the eating quality of beef is the Meat Standards Australia (MSA) grading scheme (Polkinghorne & Thompson, 2010; Watson, Polkinghorne, et al., 2008). The MSA has been developed in Australia since 1996 and has been tested with positive outcomes in several countries (Bonny et al., 2018). This system is a modelling approach based on a large scale consumer testing with different cuts and cooking methods as well as information of the various animals and their corresponding carcasses (Bonny et al., 2018; Polkinghorne & Thompson, 2010; Watson, Polkinghorne, et al., 2008).

The MSA grading scheme have been tested with various animal populations to date in different countries like New Zealand, Japan, South-Africa, Northern Ireland, USA and some European countries

(Bonny et al., 2018). In 2017, the International Meat Research 3G Foundation (IMR3GF) was established as an international eating quality research platform under the auspices of the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) section on meat. The Foundation has developed a prediction model of beef eating quality (the 3G model) based on the MSA grading scheme. In France, the MSA system has been tested on a batch of commercial breeds (Legrand et al., 2013b) and on specific young crossbred animals (Liu et al., 2023).

On the basis of the previous results obtained, the main goal of this study was to test the accuracy for predicting satisfaction scores of French consumers when using the MSA sensory model and the 3G model for more typical French animals. The aim of this study was therefore to study the relevance of the MSA grading system with older animals (cull cows) of a specific beef continental breed, the Limousin breed. The Limousin breed is the second most important suckling breed constituting around 26% of all the suckling herd in France after the Charolais breed (Griffon et al., 2017).

MATERIAL AND METHODS

1. Animals and trait measurements

A total of 102 Limousin cattle were slaughtered at a commercial house in Limoges. The carcasses were hung using the achilles tendon method. The carcasses were weighed and graded according to the EUROP grid classification system that includes conformation and fat scores. They were also graded by a certified chiller assessor under the auspices of AUS-MEAT and the International Meat Research 3G Foundation. Grading was done for hump height, ossification, marbling, meat and fat colour, rib fat thickness, ultimate pH and muscle temperature (Bonny et al., 2018). The grading was conducted 24h *post-mortem* minimum on *m. longissimus thoracis et lumborum* (LTL) at the 5th rib as carcasses are cut at this position in Europe and at the 10th rib as done in Australia.

2. Muscle sampling

Two muscles were studied; striploin (*m. longissimus dorsi*) and rump (*m. gluteus medius*). These muscles were cut into pieces 24h after slaughter, aged in vacuum bags at 4°C for 10 days and then transferred to -20°C for storage before consumer testing.

3. Consumer testing

The muscles were sliced into 75 x 60 x 25mm steaks. The steaks were grilled on the 75 x 60 mm side on a Silex clamshell grill (Watson et al., 2008) set to 200°C for 2.5 min. Following a first link sample, each consumer received a further six steaks from all experimental designs combined together. The order of product presentation was controlled by a 6x6 Latin square to balance out any potential order, lag or halo effects. Ten consumers tasted each sample as previously described (Legrand et al., 2013).

Consumer tests were performed according to the MSA protocol: untrained consumers scored each muscle for tenderness (tn), juiciness (ju), flavour liking (fl) and overall liking (ov) on a 0 to 100 mm scale. They also assigned a quality rating to each sample: 'unsatisfactory' (2*), 'satisfactory everyday quality' (3*), 'better than everyday quality' (4*) or 'premium quality' (5*). Each steak was served within three separate subgroups of 20 consumers within the base 60 consumers used in any one session. 480 untrained consumers were recruited for this study as previously described (Legrand et al., 2013).

4. Statistical analyses

4.1. Carcass Index

The carcass index score was obtained from both the MSA and the 3G models to compare the predictions by both approaches.

The median of the MSA index obtained from the MSA system was calculated to split the dataset into two distinct groups based on this median value. Values of beef and carcass characteristics were compared between these two groups using the t-test. The groups were considered significantly different with p-values ≤ 0.05 . Additionally, we examined the correlation between the MSA index and each individual sensory trait to explore potential relationships and associations.

4.2. MQ4 scores and Quality classes

A discriminant analyses was used to determine the relationship of the satisfaction grade to the four sensory scores. The Meat Quality 4 score (MQ4) was calculated using the optimum equation to predict the quality class (2*, 3*, 4* or 5*). A linear discriminant analysis was used with the satisfaction grade as the criterion to be predicted by tn, ju, fl and ov. MQ4 scores were only obtained for the MSA system since the 3G protocol is still under construction.

4.3. Comparison of different class boundaries

To predict the quality classes attributed by consumers, we employed distinct class boundaries. These boundaries were obtained from three different sources: our own study, the MSA system, and the study conducted by Legrand et al., 2013b. Subsequently, we calculated the accuracy of each set of class boundaries using a confusion matrix.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Carcass grading and carcass characteristics

The carcass characteristics are shown in Table 1. In brief, on average, all studied cows were old (at least 30 months and on average 125 months, which means 10 years of age).

Table 1 : Carcass characteristics

Carcass characteristics	Mean	Min	Max	SD
Weight (Kg)	410.54	313	628.2	70.25
Ossification	550.50	170	590	103.55
Fat thickness	4.79	0	22.5	4.05
Marbling 10th rib	324.55	135	550	69.85
Marbling 5th rib	320.15	115	690	85.91
Age (months)	124.56	30	215	48.40
Hump height (mm)	66.96	35	90	10.46
pH	5.68	5.43	5.98	0.13

2. Comparison of the MSA Index and the 3G index

The comparison between the index obtained according to the MSA model and the 3G model is shown in Table 2. The carcasses had an average MSA index of 51.44 ranging from 45.47 to 58.52, but a 3G index of 56,07 ranging from 52.83 to 61.17. In Australia, the average MSA index was 57.37 in year 2021-2022 (Meat & Livestock Australia, 2022). However, this commercial index results from a high range of animals with a great variability in key factors influencing grading results such as breed, farming practices etc. The lower index of our animals compared to the higher MSA index in Australia is likely to be explained by different reasons: for instance, our animals are likely to be on average older and less marbled than Australian bovines

For our animals, the 3G index had a standard deviation of 1.48 lower than the MSA index (2.88). The minimum MSA index value was 45.47, while the maximum value was 58.52. On the other hand, the 3G

index was characterised by a higher mean of 56.07 as compared to the MSA index, with a lower variability (2.63) than for the MSA system (5.60).

Both indices were significantly different from each other ($P < 0.05$) and had a coefficient of correlation of 0.67. The positive correlation indicates that as one index tends to indicate higher eating quality, the other index also tends to show a similar trend.

The fact that the 3G index has a higher average and higher maximum value, along with lower standard deviation and coefficient of variation compared to the MSA index (Table 2), suggests that, on average, the 3G index tends to indicate a higher overall eating quality of carcasses than the MSA index. The higher maximum value indicates that the 3G index has the potential to capture carcasses with high eating quality. This may also suggest that the 3G model may reflect more accurately the potential eating quality of beef in Europe since it has been built with data from different European countries unlike the MSA model built with data from Australian cattle.

Additionally, the lower standard deviation and coefficient of variation indicate that there is less variability in the scores provided by the European index compared to the MSA index. This suggests that the 3G index may provide more consistent and precise assessments of eating quality across different carcasses or may be less sensitive to the animal or carcass traits included in the model.

Table 2: Results from the MSA index and the 3G index

	Mean	SD	CV	Min	Max
MSA index	51,44	2,88	5,60	45,47	58,52
3G index	56,07	1,48	2,63	52,83	61,17

2.1. MSA and 3G indices in relation to carcass traits

From the results above, thanks to the comparison between the 3G index and the MSA index for various carcass traits, it can be observed that there are similarities but a few differences in the associations between the two indices and the specific traits.

Indeed, as indicated in Table 3, both indices are strongly correlated with Eye Surface Area, AUSMEAT marbling (5th rib), MSA marbling (5th rib), AUSMEAT marbling (10th rib) and MSA marbling (10th rib). However, the 3G index generally displayed slightly stronger positive correlations with the evaluated traits compared to the MSA index. Notably, the 3G index exhibited stronger correlations with eye surface area, AUSMEAT marbling at the 5th rib, AUSMEAT marbling at the 10th rib, and MSA marbling at the 10th rib compared to the MSA index. In particular, the 3G index showed a significant positive association (0.73) with MSA marbling at the 10th rib, indicating a stronger predictive relationship for this specific trait.

The 3G index was more positively associated to the Hump height (0.13, not significant) and ossification (0.15, not significant) as compared to the MSA index (-0.02, not significant and -0.48, $P < 0.001$ respectively).

The hump height indicates the percentage of *Bos indicus*, which is a tropical breed (Bonny et al., 2018). The tropical breed and ossification have a negative impact on eating quality (Meat & Livestock Australia, 2018a). Our results align with this understanding even the impact on hump height was very low. The observed correlation of -0.02 between the hump height and the European index in the Limousin breed could be influenced by the fact that Limousin cattle do not possess a hump. As a result, the data collected may not have adequately captured the full range of negative impact typically associated with hump height in other breeds. In brief, the absence of a hump in the Limousin breed could contribute to the limited correlation observed in this particular context.

The absence of negative correlation between ossification score and the 3G index means that the relative weight of this factor with our French animals is very low. This can be explained by a low variability in ossification score since 65% our cattle population has a high ossification score (between 400 and 590). Although these are typical French data, the French data represents less than 10% in the European database used for the 3G prototype predictive model (unpublished results).

In brief, we observed that in the 3G index prototype model, which is still under development, the correlations between hump height and ossification score with the European index are positive (0.13 and 0.15) although not significant. This may suggest contrasting relationships between these factors and beef eating quality indicated by the European and the MSA models. However, being not robust, this observation needs further investigation with more data with a greater range and more variability to be confirmed or not.

Table 3: Correlations of carcass traits to MSA and 3G indices

Carcass traits	3G INDEX	MSA INDEX
Hump height	0.13	-0.02
Ossification	0.15	-0.48***
Eye Surface Area	0,64***	0,48**
Total fat	0,27*	0,31*
AUSMEAT marbling 5th rib	0,41***	0,35***
MSA marbling (5th rib)	0,44***	0,34***
AUSMEAT marbling (10th rib)	0,64***	0,39***
MSA marbling (10th rib)	0,73***	0,39***

2.2. MSA and 3G indices in relation to consumer tests

Meat eating quality has generally been described by tenderness, juiciness, flavour and overall liking (Watson et al., 2008b). These four traits were identified as significant factors in assessing the overall experience of consuming meat (Watson, Polkinghorne, et al., 2008).

The MSA index has been established as the sum of 39 predicted eating quality scores of cuts aged for 5 days, based on their most common cooking methods and weighted by the proportions of the individual cut relative to the total weight of all cuts (McGilchrist et al., 2019)

It has been calculated using carcasses hung using the achilles tendon and aged for 5 days *postmortem* (McGilchrist et al., 2019). In our study, carcasses were also hung using the achilles tendon but the carcasses were aged for 10 days

The MSA and the 3G indices only have moderate correlations to sensory traits. These correlations exhibit similar trends and strengths for both the rump and striploin cuts (Table 4). It therefore suggests that as the tenderness, juiciness, flavour liking, overall liking, and level of satisfaction increase, the MSA and 3G indices also tend to improve.

Both indices show stronger correlations with juiciness and the level of satisfaction compared to other sensory attributes, except for Flavour liking, which exhibits a similar correlation to juiciness for the MSA index.

The low correlations could partly be explained by the difference in ageing time between our study (10 days) and the construction method of the MSA index (5 days).

Table 4: Correlations of carcass traits to MSA and 3G indices

	Tenderness	Juiciness	Flavour liking	Overall liking	Level of satisfaction
Correlation to MSA index (striploin)	0.18	0.28	0.28	0.25	0.30
Correlation to 3G index (striploin)	0.19	0.35	0.14	0.12	0.30
Correlation to MSA index (Rump)	0.20	0.25	0.20	0.22	0.32
Correlation to 3G index (Rump)	0.14	0.27	0.21	0.19	0.31

2.3. MSA and 3G indices in relation to cut

The dataset was partitioned into two distinct groups based on the median value of the MSA and 3G indices. The two groups included animals with values below 51.33 for the first group (G1) and values equal to or above 51.33 for the second group (G2). For the 3G index, the 2 groups comprised animals with values below 55.82 for the first group (G1) and values equal to or above 55.82 (G2). Low values of the indices indicate potentially lower levels of eating quality while higher values indicate a potentially higher degree of eating quality.

a) Striploin

When analysing the change in sensory characteristics from Group 1 (G1) to Group 2 (G2), it was observed that only Juiciness showed a significant difference in both groups, as indicated by the MSA and 3G indices ($P < 0.05$). Additionally, there was a significant difference in flavour between the two groups for the MSA index ($P < 0.05$).

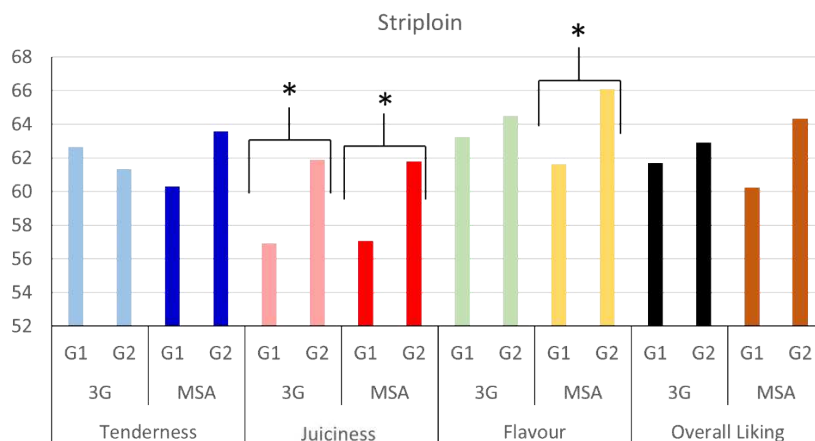


Figure 1: Comparison of the percentage increase in sensory traits for MSA and 3G indices for the striploin

b) Rump

When examining the increase in sensory traits from G1 to G2, a significant increase in tenderness, juiciness, and overall liking was observed for the MSA index. However, in the 3G model, only juiciness showed a significant increase ($p\text{-value} > 0.05$) although absolute values of other traits were higher.

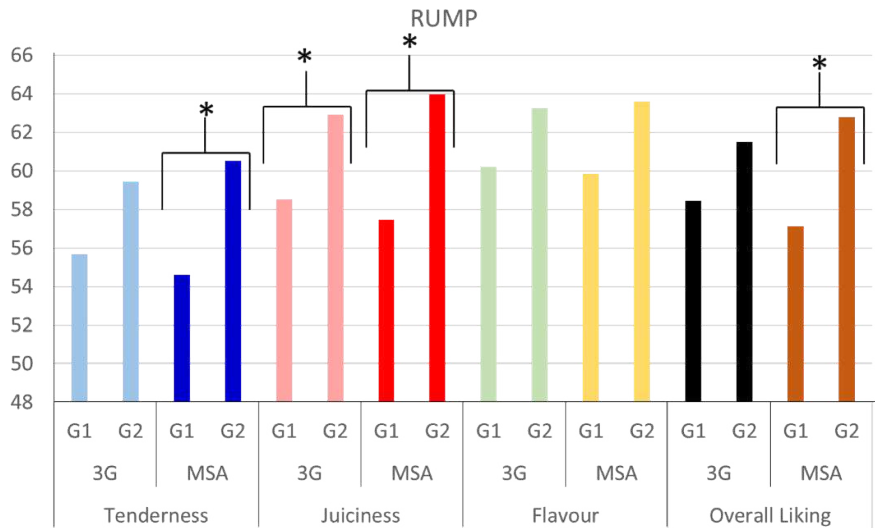


Figure 2: Comparison of the percentage increase in sensory traits for MSA and 3G indices for the Rump

3. Quality trait Weightings

To effectively represent the overall eating quality, it has been suggested to combine these traits into a single score in the MSA grading scheme (Watson, Polkinghorne, et al., 2008)

After analysis, the obtained weightings for the different attributes of the beef were as follows: tenderness with a weight of 0.27, juiciness with a weight of -0.06, flavour liking with a weight of 0.46 and overall liking with a weight of 0.32.

The tenderness weighting of 0.27 indicates that tenderness is considered as a significant factor in evaluating the quality of the beef. It suggests that consumers place a relatively higher emphasis on the tenderness of the meat when assessing its overall desirability.

On the other hand, the juiciness weighting of -0.06 suggests that juiciness is given a relatively lesser importance in the overall grading process. While juiciness still contributes to the eating experience. A negative weighting indicates that it has a minimal impact on the final quality rating.

The flavour liking had the highest weighting of 0.46. Another study (Liu et al., 2020) has also found that flavour liking had the highest contribution to the overall liking in Europe. Similarly as in the study of (Liu et al., 2023), juiciness had a negative weighting. (Legrand et al., 2013b) equally reported juiciness to have the smallest weighting as compared to other sensory traits. As it has been observed previously, juiciness instead had the strongest correlation to MSA and 3G indices. This could be explained by the fact that the indices have as main inputs traits controlled by the processor (Hanging method, days aged, ultimate pH within the acceptable range and loin temperature) ((Meat & Livestock Australia, 2018b) while MQ4 have as main input sensory traits assessed by the consumers (Watson et al., 2008).

Various optimal weights have been obtained in different countries for tenderness (0.18–0.31), juiciness (0.01–0.23), flavour (0.24–0.43) and overall liking (0.24–0.39) (Bonny et al., 2016; Legrand et al., 2013; Polkinghorne et al., 2014; Thompson et al., 2010). Flavour was higher than what has been observed. Juiciness was smaller than what has generally been observed but still higher conducted in France by Liu et al., 2022.

3.1. Class boundaries

The optimal boundaries calculated with our data to discriminate the four quality grades according to the MQ4 scores are 54.08, 62.27 and 76.01 for the 2/3 star, 3/4 star and 4/5 star boundaries, respectively. The boundaries obtained are within the ranges that have previously been published except for the boundary between the 2/3 star [2/3 star (35.9–43.7), 3/4 star (57.5–69.0), 4/5 star

(70.0–83.9)] (Bonny et al., 2016; Legrand et al., 2013b; R. J. Polkinghorne et al., 2011; Thompson et al., 2010)

3.2. Quality trait weightings among different muscles

Quality trait weightings for the different muscles are shown in the figure below. Striploin demonstrates higher scores in most traits except for juiciness. The Striploin generally outperforms the rump in terms of predicted and observed MQ4 suggesting a higher eating quality of this cut. This could be explained by the difference in the positions of the muscles in the carcass and the use of these muscles by the live animal. The striploin is located in the loin region of the animal while the rump is located at the hindquarter of the animal. Generally, muscles located in the locomotion areas, such as the hindquarter tend to be tougher and less tender due to their constant use and development of stronger connective tissue. On the other hand, muscles in less active areas, such as the loin are generally more tender (Listrat et al., 2016; Picard & Gagaoua, 2020). This could therefore why the striploin was perceived as having a higher eating quality.

From these results, it is seen that the predicted MQ4 scores were lower than the observed MQ4 scores for both cuts. This suggests that the prediction model or method used may not accurately capture the true eating quality of the meat, potentially underestimating its quality in relation to the French consumers. Further analysis and improvements in the prediction methodology may be necessary to enhance the accuracy of predicting MQ4 scores for these cuts of meat.

In terms of tenderness, Striploin (61.4) outperforms the rump (57.36), indicating that it is perceived as more tender. However, when it comes to juiciness, rump (60.51) receives a higher score compared to Striploin (58.91). This result was counterintuitive since the striploin is expected to be juicier. Both cuts had similar levels of flavour. In terms of overall liking, the striploin (61.76) is slightly above the rump (59.74). The observed and predicted MQ4 scores are higher for striploin (62.55) compared to rump (59.85), indicating a higher perceived quality for Striploin. However, the muscles were only significantly different from each for tenderness within the same animal (T-test P-value <0.05).

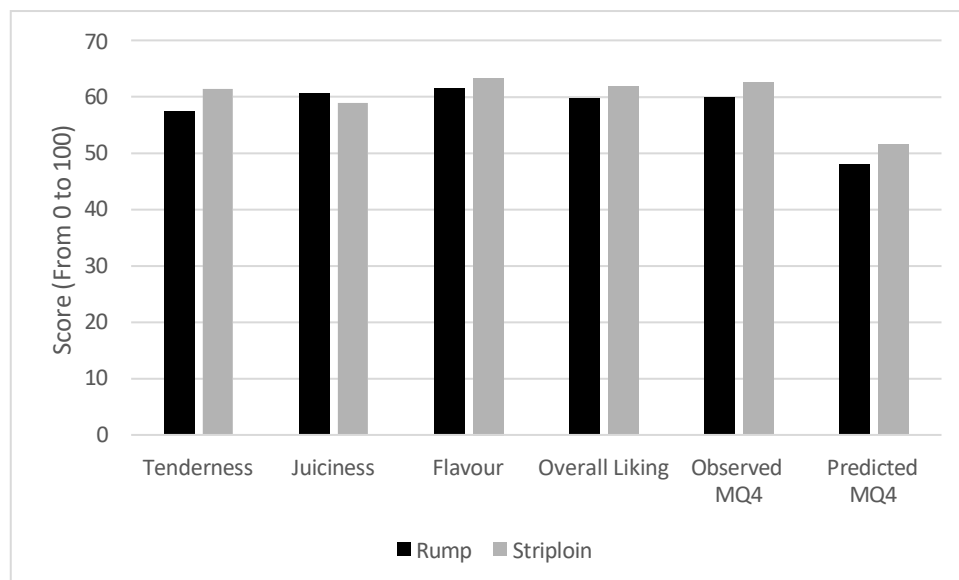


Figure 3: Comparing sensory traits between the striploin and rump

4. Accuracy of the model for each cut

The model had similar levels of accuracy for both muscles (Table 5). These levels of accuracy are lower than what has been reported in other studies in France, Australia, Poland, Japan and South-Korea (Pogorzelski et al., 2020; Polkinghorne et al., 2011). The accuracy reported in these studies ranged between 61 and 68%.

Table 5: Confusion matrix between MQ4-assigned quality grades and consumer assigned quality grades for both the striploin and the rump

STRIPLOIN					
	Actual 2*	Actual 3*	Actual 4*	Actual 5*	Total
Predicted 2*	9	12	0	0	21
Predicted 3*	5	18	3	0	26
Predicted 4*	6	16	23	0	45
Predicted 5*	2	1	5	1	9
Total	22	47	31	1	101
Total correct	9	18	23	1	51
Accuracy (%)	40.91	38.30	74.19	100	50.49
RUMP					
	Actual 2*	Actual 3*	Actual 4*	Actual 5*	Total
Predicted 2*	12	20	0	0	32
Predicted 3*	9	21	0	0	30
Predicted 4*	5	9	19	0	33
Predicted 5*	1	2	4	0	7
Total	27	52	23	0	102
Total correct	12	21	19	0	24
Accuracy (%)	44.44	40.38	82.61	100	50.98

The boundaries obtained from the models in previous studies yielded higher accuracies than the current study (Table 6). This could be explained by the fact that the previous models were constructed with data from animals with a higher variability of cuts, animals and cuts.

Tableau 6: Comparing accuracies for the prediction of consumer quality assigned grades from other models for the striploin and rump

Model	Accuracy for Rump (%)	Accuracy for Striploin (%)
This study	50.98	50.49
MSA	62.74	58.41
Legrand et al., 2013	57.84	52.47

However, if a beef company wishes to discriminate beef samples into two classes only to commercialise the best ones (4* and 5*) as premium beef only, the accuracy to predict these two classes is above 74%.

CONCLUSION

The MSA system and the 3G protocol have respectively been established in Australia and Europe to predict the eating quality of beef. While the 3G protocol is still being developed, the MSA system has been commercially used in Australia for over two decades, drawing on a vast collection of consumer and beef samples. This particular study aimed to evaluate the effectiveness of both the MSA system and the prototype 3G model in predicting the eating quality of Limousin old cattle, which are widely commercialised in France, but excluded from the MSA system in Australia. The results revealed moderate overall predictions of consumer-assigned grades and moderate correlations between the MSA and 3G indices and sensory traits. This moderate accuracy to discriminate beef samples in four

classes can be attributed to the fact that the initial MSA model did not consider cull cows. It can be also explained by the limited variability in animal type, breed, cuts, cooking methods, and fewer consumers compared to previous studies. Consequently, for the development of a robust prediction model for beef eating quality, higher accuracies can be achieved by incorporating greater variabilities in all these aspects, especially when implementing the model at a commercial level where diverse carcasses from various breeds are traded. However, the accuracy to discriminate beef samples in two classes only to commercialise the best quality beef is higher and acceptable on a commercial point of view.

REFERENCES

Bonny, S. P. F., Hocquette, J.-F., Pethick, D. W., Farmer, L. J., Legrand, I., Wierzbicki, J., Allen, P., Polkinghorne, R. J., & Gardner, G. E. (2016). The variation in the eating quality of beef from different sexes and breed classes cannot be completely explained by carcass measurements. *Animal*, 10(6), 987–995. <https://doi.org/10.1017/S175173111500292X>

Bonny, S. P. F., O'Reilly, R. A., Pethick, D. W., Gardner, G. E., Hocquette, J.-F., & Pannier, L. (2018). Update of Meat Standards Australia and the cuts based grading scheme for beef and sheepmeat. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(7), 1641–1654. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61924-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61924-0)

Bonny, S. P. F., Pethick, D. W., Legrand, I., Wierzbicki, J., Allen, P., Farmer, L. J., Polkinghorne, R. J., Hocquette, J.-F., & Gardner, G. E. (2016). European conformation and fat scores have no relationship with eating quality. *Animal*, 10(6), 996–1006. <https://doi.org/10.1017/S1751731115002839>

Devlin, D. J., Gault, N. F. S., Moss, B. W., Tolland, E., Tollerton, J., Farmer, L. J., & Gordon, A. W. (2017). Factors affecting eating quality of beef. *Advances in Animal Biosciences*, 8(s1), s2–s5. <https://doi.org/10.1017/S2040470017001583>

Ferguson, D. M., Bruce, H. L., Thompson, J. M., Egan, A. F., Perry, D., & Shorthose, W. R. (2001). Factors affecting beef palatability — farmgate to chilled carcass. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41(7), 879–891. <https://doi.org/10.1071/ea00022>

Griffon, L., Boulesteix, P., Delpeuch, A., Govignon-Gion, A., Guerrier, J., Leudet, O., Miller, S., Saintilan, R., Venot, E., & Tribout, T. (2017). La sélection génétique des races bovines allaitantes en France : un dispositif et des outils innovants au service des filières viande. *INRAE Productions Animales*, 30(2), 2. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2017.30.2.2237>

Legrand, I., Hocquette, J.-F., Polkinghorne, R. J., & Pethick, D. W. (2013a). Prediction of beef eating quality in France using the Meat Standards Australia system. *Animal*, 7(3), 524–529. <https://doi.org/10.1017/S1751731112001553>

Legrand, I., Hocquette, J.-F., Polkinghorne, R. J., & Pethick, D. W. (2013b). Prediction of beef eating quality in France using the Meat Standards Australia system. *Animal*, 7(3), 524–529. <https://doi.org/10.1017/S1751731112001553>

Listrat, A., Lebret, B., Louveau, I., Astruc, T., Bonnet, M., Lefaucheur, L., Picard, B., & Bugeon, J. (2016). How Muscle Structure and Composition Influence Meat and Flesh Quality. *The Scientific World Journal*, 2016, e3182746. <https://doi.org/10.1155/2016/3182746>

Liu, J., Chriki, S., Ellies-Oury, M.-P., Legrand, I., Pogorzelski, G., Wierzbicki, J., Farmer, L., Troy, D., Polkinghorne, R., & Hocquette, J.-F. (2020). European conformation and fat scores of bovine carcasses are not good indicators of marbling. *Meat Science*, 170, 108233. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108233>

Liu, J., Ellies-Oury, M.-P., Chriki, S., Legrand, I., Pogorzelski, G., Wierzbicki, J., Farmer, L., Troy, D., Polkinghorne, R., & Hocquette, J.-F. (2020). Contributions of tenderness, juiciness and flavor liking to

overall liking of beef in Europe. *Meat Science*, 168, 108190. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108190>

Liu, J., Pannier, L., Ellies-Oury, M.-P., Legrand, I., Noel, F., Sepchat, B., Prache, S., Pethick, D., & Hocquette, J.-F. (2023). French consumer evaluation of eating quality of Angus x Salers beef: Effects of muscle cut, muscle slicing and ageing. *Meat Science*, 197, 109079. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.109079>

McGilchrist, P., Polkinghorne, R. J., Ball, A. J., & Thompson, J. M. (2019). The Meat Standards Australia Index indicates beef carcass quality. *Animal*, 13(8), 1750–1757. <https://doi.org/10.1017/S1751731118003713>

Meat & Livestock Australia. (2018a). Meat Standards Australia beef information kit. https://www.mla.com.au/globalassets/mla-corporate/marketing-beef-and-lamb/documents/meat-standards-australia/msa-beef-tt_full-info-kit-lr.pdf

Meat & Livestock Australia. (2018b). Using the MSA Index to optimise beef eating quality. https://www.mla.com.au/globalassets/mla-corporate/marketing-beef-and-lamb/documents/meat-standards-australia/msa18-beef-tt_using-the-msa-index-to-optimise-beef-eating-quality-lr_updated.pdf

Meat & Livestock Australia. (2022). 2021–2022 Meat Standards Annual outcome Report. https://www.mla.com.au/globalassets/mla-corporate/marketing-beef-and-lamb/documents/meat-standards-australia/cic_107266_mla-annual-outcomes-report_03-web.pdf

Picard, B., & Gagaoua, M. (2020). Muscle Fiber Properties in Cattle and Their Relationships with Meat Qualities: An Overview. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(22), 6021–6039. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02086>

Pogorzelski, G., Woźniak, K., Polkinghorne, R., Póltorak, A., & Wierzbicka, A. (2020). Polish consumer categorisation of grilled beef at 6 mm and 25 mm thickness into quality grades, based on Meat Standards Australia methodology. *Meat Science*, 161, 107953. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107953>

Polkinghorne, R. J., Nishimura, T., Neath, K. E., & Watson, R. (2011). Japanese consumer categorisation of beef into quality grades, based on Meat Standards Australia methodology. *Animal Science Journal*, 82(2), 325–333. <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2010.00825.x>

Polkinghorne, R. J., & Thompson, J. M. (2010). Meat standards and grading. *Meat Science*, 86(1), 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.010>

Thompson, J., Polkinghorne, R., Gee, A., Motiang, D., Strydom, P., Mashau, M., Ng'ambi, J., Dekock, R., & Burrow, H. (2010). Beef palatability in the Republic of South Africa: implications for niche-marketing strategies. ACIAR. <https://www.aciar.gov.au/publication/technical-publications/beef-palatability-republic-south-africa-implications-niche-marketing-strategies>

Watson, R., Polkinghorne, R., & Thompson, J. M. (2008). Development of the Meat Standards Australia (MSA) prediction model for beef palatability. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(11), 1368. <https://doi.org/10.1071/EA07184>

Conclusion

La méthodologie MSA a eu comme stratégie de standardiser les méthodes de classement des carcasses et d'estimation de la qualité sensorielle (tendreté, flaveur, jutosité, appréciation globale) pour construire des jeux de données interoperables et compatibles entre eux. C'est la fusion de ces jeux de données qui a permis de construire une immense base de données au niveau national en Australie en combinant l'ensemble des jeux de données obtenus pour différents élevages ou abattoirs et différentes races ou région d'origine. C'est à partir de cette base contenant une diversité de données qu'un modèle mathématique de prédiction de la qualité sensorielle de la viande bovine a pu être construit (le modèle MSA). Dans le cas spécifique des vaches limousines issues des élevages HVN étudiés, les performances modérées de prédiction du modèle MSA s'expliquent au moins en partie par différents facteurs : les différences de type d'élevage entre la France et l'Australie, la spécificité des élevages HVN et/ou l'absence d'animaux âgés dans la base de données australienne ayant conduit au modèle MSA.

Le modèle 3G a suivi la même démarche en combinant des jeux de données d'origines européennes diverses acquises selon le même protocole standardisé mais avec peu de données françaises notamment de vaches de réforme. C'est également une raison pouvant expliquer la performance modérée du modèle 3G.

Toutefois, les deux modèles (MSA, 3G) apparaissent comme des outils prometteurs pour mieux prédire la qualité sensorielle de la viande bovine y compris pour le cheptel bovin français. Ainsi, le choix de considérer uniquement deux classes de qualité permet d'avoir de meilleures prédictions. La qualité de ces modèles de prédiction est susceptible d'être accrue avec des données plus nombreuses d'origine variée en termes d'animaux et de pays.

Cependant, il est important de noter que les modèles MSA et 3G reposent sur des évaluations visuelles des caractéristiques de la carcasse. L'utilisation de mesures instrumentales présente le potentiel d'améliorer la qualité des évaluations en les rendant plus objectives.

E. PREDICTION DU PERSILLE MSA PAR DES METHODES OBJECTIVES

Introduction

Le système MSA prend en compte plusieurs points de contrôle critique pour évaluer la qualité gustative de la viande bovine, notamment le niveau de persillé. Le persillé a une influence sur la tendreté, la flaveur et la jutosité de la viande bovine. En France, il a été recommandé d'introduire le persillé dans le système de classification de la viande bovine. Cependant, le système MSA repose sur l'évaluation visuelle des carcasses, ce qui nécessite la présence de classificateurs formés et accrédités dans chaque abattoir, ce qui peut être coûteux et contraignant.

Pour surmonter ces défis, différentes méthodologies ont été développées tel que l'analyse d'images ou en encore la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) pour effectuer des mesures rapides, non invasives et économiques pour prédire la qualité gustative de la viande bovine. Par exemple, la SPIR a été largement étudiée et utilisée dans l'industrie alimentaire pour évaluer la teneur en gras, en humidité et en protéines de la viande, ainsi que pour prédire la tendreté et la teneur en gras intramusculaire de la viande bovine, porcine et ovine. Le développement récent d'appareils portables a permis de vulgariser ce type de technologies les rendant plus accessibles. Les outils portables ont pour avantage de pouvoir être utilisés directement sur la chaîne de production. De plus, de nombreuses recherches ont porté sur l'identification de marqueurs génétiques associés au persillé de la viande afin d'identifier les animaux susceptibles de déposer le plus de persillé.

D'une façon générale, c'est une perspective des concepteurs du système MSA de pouvoir incorporer dans ce système des marqueurs génétiques et des mesures par des méthodes instrumentales afin d'améliorer la prédiction du modèle.

L'objectif de cette étude était d'explorer l'utilisation de différents outils portables dans un abattoir pour prédire les scores de persillé de la viande bovine et d'identifier des marqueurs génétiques potentiels pour la prédiction du persillé.

Notre hypothèse de recherche était que l'intégration de marqueurs génétiques, associée à l'utilisation de la spectroscopie infrarouge proche (SPIR) et de caméras comme techniques d'analyse permettra d'améliorer la prédiction du persillé. Les outils instrumentaux pourront être pertinents pour réduire les coûts et la dépendance aux classificateurs formés, tout en maintenant des niveaux élevés de précision et de fiabilité pour répondre aux exigences du système MSA.



Across countries implementation of handheld near-infrared spectrometer for the *on-line* prediction of beef marbling in slaughterhouse

Moïse Kombolo-Ngah^{a,1}, Arianna Goi^{b,*}, Matteo Santinello^b, Nicola Rampado^b, Stefka Atanassova^c, Jingjing Liu^a, Pascal Faure^d, Laure Thoumy^e, Alix Neveu^f, Donato Andueza^a, Massimo De Marchi^b, Jean-François Hocquette^a

^a INRAE, Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne, VetAgro Sup, UMR1213, Recherches sur les Herbivores, 63122 Saint Genès Champanelle, France

^b Department of Agronomy, Food, Natural Resources, Animals and Environment (DAFNAE), University of Padova, Viale dell'Università 16, 35020 Legnaro, PD, Italy

^c Department of Agrarian Engineering, Faculty of Agriculture, Trakia University, 6000 Stara Zagora, Bulgaria

^d INRAE, Herbiopôle, Theix 63122, France

^e IDELE, Boulevard des Arcades, 87000 Limoges, France

^f IMR3GF International Meat Research 3G Foundation, Smulikowskiego St. 4/217, 00-389 Warsaw, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:

MSA
Beef
NIRS
Meat quality
Longissimus thoracis
Marbling

ABSTRACT

Only few studies have used Near-Infrared (NIR) spectroscopy to assess meat quality traits directly in the chiller. The aim of this study was therefore to investigate the ability of a handheld NIR spectrometer to predict marbling scores on intact meat muscles in the chiller. A total of 829 animals from 2 slaughterhouses in France and Italy were involved. Marbling was assessed according to the 3G (Global Grading Guaranteed) protocol using 2 different scores. NIR measurements were collected by performing 5 scans at different points of the *Longissimus thoracis*. An average MSA marbling score of 330–340 was obtained in the two countries. The prediction models provided a R^2 in external validation between 0.46 and 0.59 and a standard error of prediction between 83.1 and 105.5. Results did provide a moderate prediction of the marbling scores but can be useful in the European industry context to predict classes of MSA marbling.

1. Introduction

Beef production and consumption have a number of benefits on human health, food security, socioeconomic well-being of rural communities, and gastronomic pleasure of consumers (Hocquette et al., 2018). Despite all these, the beef production system faces a number of challenges due to the high variability of its palatability and a lack of a guarantee system for eating quality (Chriki et al., 2013; Legrand, Hocquette, Polkinghorne, & Pethick, 2013). As a result of these challenges, the Meat Standards Australia (MSA) grading scheme has been developed as an useful tool to assess beef palatability in commercial conditions from the 1990s onwards (Watson, Polkinghorne, & Thompson, 2008). The MSA grading system has become more popular and recognized by many countries as a pertinent innovation to predict beef eating quality (Bonny et al., 2018). The MSA system has investigated a set of critical control points to assess beef palatability through extensive consumer testing protocols which include factors as sex, carcass hanging method,

cooking method and fat depth etc. (Bonny et al., 2018). The MSA protocol is set to be adapted to the European context through the 3G (Global Graded Grading) protocol that uses the same control points. Among these control points, one of the most important components is marbling.

Marbling is usually seen as intramuscular deposit of fat within the muscle and it is assessed between the 5th and the 13th rib of the carcass according to the MSA and 3G protocols (Meat, Livestock, Australia & Meat Standards, Australia, 2001). In France and in Italy, it is measured at the 5th rib instead of the 10th rib in Australia (Liu et al., 2021). Marbling plays a great role in beef palatability as it has a positive relationship with flavor, tenderness, and juiciness even though its effect on these is not very clear (Calkins & Hodgen, 2007; Chriki et al., 2013; Guillemin et al., 2009). The French national food conference recently recommended the meat sector, represented by INTERBEV, to introduce marbling in the French beef grading scheme (États Généraux de l'Alimentation EGA, 2018). Actually, the MSA grading scheme is highly human-led with trained graders evaluating carcasses for different traits

* Corresponding author.

E-mail address: arianna.goi@unipd.it (A. Goi).

¹ Moïse Kombolo Ngah and Arianna Goi contributed equally to this work.

<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109169>

Received 10 September 2022; Received in revised form 14 March 2023; Accepted 16 March 2023

Available online 20 March 2023

0309-1740/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

(such as marbling). The MSA system therefore requires a grader in each slaughterhouse with the accreditation being expensive and requiring frequent trainings. It is therefore relevant to move towards a faster and more economic method which allows assessment on several slaughterhouses even in the absence of MSA accredited personnel. Indeed, the beef industry needs to look for the most effective and the less constraining methods to assess the quality of their product.

Near-infrared spectroscopy (NIRS) is a rapid, non-invasive, cost-effective, and environmentally friendly analytical technique which permits to obtain a complete picture of the organic composition of the analyzed matrix using an electromagnetic radiation in a known wavelength range (Van Kempen, 2001). Its principle is based on the absorption of the radiation which spans the wavelength range between 750 nm and 2500 nm by different chemical bonds (O—H, C—H, N—H, and S—H) in organic matter (Pasquini, 2003). When recorded, the light absorbed produces a spectrum which includes information related to chemical and physical properties of molecules of the sample and therefore information on sample composition (Prieto, Pawluczyk, Russell Dugan, & Aalhus, 2017). It has largely been studied and used in food industry as a rapid and convenient tool for the evaluation of quality (Fan, Liao, & Cheng, 2018), to assess fat, moisture, and protein content in ground beef (Su et al., 2014), as well as to predict tenderness and intramuscular fat in beef, pork and lamb (Fan et al., 2018; Prieto et al., 2014; Ripoll, Albertí, Panea, Olleta, & Sañudo, 2008). Near-infrared spectroscopy presents drawbacks due to its dependence on a reference method, its low sensitivity to minor constituents, limited transfer of calibration between different instruments and complicated spectral data (Büning-Pfaue, 2003; Givens, Boever, & Deaville, 1997). In addition, the spectral data analyses often require time-consuming and laborious calibration procedures along with the complexity of the choice of data treatment (Büning-Pfaue, 2003). It is therefore a challenge to tackle these drawbacks for its effective usage by building a strong calibration model constructed with data from on-line process to better reflect industrial variability. However, the recent development and diffusion of portable handheld devices has facilitated the application of this technology on a large scale, with rapid acquisition of spectra and avoiding the need for complex sampling protocols and transport of samples to a laboratory (Goi, Hocquette, Pellattiero, & De Marchi, 2022; Kademi, Ulusoy, & Hecer, 2018). Moreover, handheld spectrometers are very cheap, web-based with online storage, and thus easy to use in different slaughterhouses. Among NIRS' advantages, it allows simultaneous assessment of several traits, and it is suitable for on-line application within a processing plant without requiring sample preparation (Dixit et al., 2017). Indeed, NIRS shows to be a practical and low-cost solution easy to implement. A lot of studies have investigated the use of NIRS on ground samples of meat compared to intact samples where there are still a few of them dedicated to marbling. However, even less studies have investigated the application of NIRS technology to predict beef marbling traits in the slaughterhouse.

The purpose of this study was to investigate the use of a pocket-sized handheld near-infrared spectrometer in the slaughterhouse to predict marbling scores as they have been shown to have a relationship with eating quality and to discriminate animals according to their marbling class (Meat, and Livestock Australia, Meat Standards Australia, 2018).

2. Materials and methods

2.1. Experimental design

The study involved a total of 829 beef carcasses selected for their variability in terms of breed, age and weight to depict part of the intrinsic commercial variability on beef carcasses. They were provided by 2 commercial slaughterhouses located in Italy and France. From these animals, 400 carcasses were young Charolais bulls and heifers from different Italian fattening farms who have been processed in Italy (AZoVe, Cittadella PD). Four-hundred-twenty-nine carcasses were

obtained from animals reared and processed in France (CV Plainemaison-Beauvallet, Limoges), among them there were 277 Limousin cows or heifers and 152 animals randomly selected to increase variability in animal type and breed (Charolais, Holstein, Aubrac, crossed).

2.2. Marbling measurement

All the processed carcasses were assessed after 24 h of *post-mortem* chilling in a refrigerated room with an average temperature between 0 and 4 °C. Marbling was assessed according to specifications of the ABCAS Reference Standards (Meat, Livestock, Australia & Meat Standards, Australia, 2001) and a benchmark for the measurement of the main quality characteristics of the bovine carcasses adopted by the UNECE Bovine Language standards through 2 scores (AUS-MEAT and MSA marbling scores). The chiller assessment standards are adapted for European cattle and consumers through extensive collaborative research in Europe with data being stored and utilized through the IMR3GF. The AUS-MEAT marbling score reflects the amount of marbling with score ranging from 0 to 9 in increments of one. The MSA marbling provides a more precise scale (from 100 to 1190 in increments of 10) indicating the amount, the size, the fineness, and the distribution of fat inclusions in muscles. The AUS-MEAT and the MSA marbling scores were assessed at the 5th rib of the carcass as described by (Liu et al., 2021). The assessment was done by two 3G chiller assessors (one for Italy and one for France) accredited by the International Research Meat 3G Foundation. They followed the same training session and have been always updated according to ABCAS (Australian Beef Chiller Assessment System) standards, to reduce the technical variability of their evaluations. The rib eye was exposed to air for at least 20 min up to 3 h after cutting, allowing the meat to bloom before the MSA marbling assessment carried out using a visual standard. Blooming refers to the color change due to oxygenation of myoglobin that occurs when a meat surface is exposed to oxygen (Jacob, 2020). The grading is done with visual standard cards (provided by ABCAS) to assess AUS-MEAT and MSA scores.

2.3. Near-infrared spectroscopy measurements

Spectra were recorded using the SCiO™ molecular sensor (Consumer Physics Inc., Tel Aviv, Israel), a handheld web-based wireless spectrometer that operates in reflectance mode in the NIR region between 740 and 1070 nm (13,514 and 9346 cm⁻¹) of wavelength at intervals of 1 nm (13 cm⁻¹) which is the default mode of the spectrometer. The size of the area analyzed by the sensor is 1 mm². The instrument was calibrated every day before starting the spectra collection, then five scans per sample were taken in 5 different positions on the surface of *Longissimus thoracis* muscle by applying an adapter to the scanning head in order to maintain a fixed distance from the sample of 1 cm over the surface and avoid any external light source. The average time to scan each animal was roughly 1 min. An internet connection was needed for the scans to be saved. The two 3G chiller assessors followed the same approach choosing each position according to the dimension of the rib eye to be representative of the entire surface. Reflectance values were collected through the SCiO™ online application ("The Lab") (Consumer Physics Inc., Tel-Aviv, Israel), converted to absorbance as log(1/reflectance) and each final spectrum to be used for the development of prediction models was then calculated as the average of the 5 scans.

2.4. Chemometrics analysis

Chemometric analysis was performed to obtain the prediction models for MSA and AUS-MEAT marbling scores using spectral and reference data. Several processes have been used to develop these models. The first process used WinISI 4 software (Infrasoft International, Port Matilda, PA, USA) where the calibrations were developed through modified partial least square (mPLS) regression analysis. The second process used the Pirouette 4.5 software (Infometrix, Inc., Woodinville,

WA, USA) where calibrations were developed with a classical PLS regression analysis. Both processes used spectral information as independent variables, and correlated with the corresponding reference values to predict MSA marbling and AUS-MEAT scores. With the first process using the WinISI 4 software, the scores were predicted for the French and Italian datasets individually; then, the Italian and French datasets were also merged to get a wider variability. However the results from the merged dataset must be interpreted with caution since differences could arise from carcass graders, instruments or slaughterhouses conditions as in the study performed by Fowler, Wheeler, Morris, Mortimer, and Hopkins (2021) and Stewart et al. (2021).

Firstly, spectral outliers were eliminated using the Mahalanobis distance ($Global H > 3.0$). Then, different scatter corrections such as detrending (D), standard normal variate (SNV), and multiplicative scatter correction (MSC) were applied to the raw spectra as pre-treatment to reduce noise effect and variability due to the scatter (De Marchi, Costa, Goi, Penasa, & Manuelian, 2019). Afterwards, each of these pre-processing techniques was combined with derivative mathematical treatments: 0,0,1,1; 1,4,4,1; 1,8,8,1; and 2,10,10,1. Here, the first digit represents the number of the derivative, the second represents the gap over which the derivative is calculated, the third is the number of data points in the first smoothing and the fourth is the number of data points in the second smoothing (Shenk and Westerhaus, 1991). After the mPLS regression analysis, 2 rounds of outliers' elimination were performed, and the critical T-statistic value was set to ± 2.5 standard error to define chemical outliers. Two rounds of outlier elimination was the best compromise to keep sample variability. Fernández-Cabanás, Polvillo, Rodríguez-Acuña, Botella, and Horcada (2011) also used two rounds of outlier removal and stated that, according to their previous works, these consistent anomalies can be detected for different products with the first two runs. Hence, when predicted values were greater than ± 2.5 standard error from the reference values, the sample was removed from the dataset to be used for the final calibration.

The prediction models were tested within and across countries performing both a 15-fold cross-validation and an external validation. For the former, the dataset of each country individually and the merged dataset were split into 15 equal groups with similar mean and standard deviation, one part was used to validate the model created using the remaining groups and this process was repeated until each group was used as validation set once. For the latter, the division into calibration and validation set was done in 2 ways: (i) the full French, Italian, and merged datasets were randomly divided, ensuring a similar mean and standard deviation for both MSA and AUS-MEAT scores, in a subset of 64% of samples to produce a prediction equation to be tested on the remaining 34% of samples; (ii) each country was used alternatively as calibration and test set for the other, i.e. French dataset was used to create the model to be tested on the Italian dataset and vice versa.

With the second process using Pirouette 4.5 (Infometrix, Inc., Woodinville, WA, USA), the samples were also divided into calibration and validation sets. Two-third of the samples were selected randomly and used as calibration data set. The sample with the largest MSA value was included in the calibration set and the rest of the samples were used as validation data set.

Orthogonal signal correction (OSC) factor was used during the development of the regression equations and this preprocessing technique is used to remove information unrelated to the target variables based on constrained principal component analysis. Orthogonal signal correction has been shown to provide better results when compared to traditional signal correction as well as with those of no pre-processing (Wold, Antti, Lindgren, & Öhman, 1998).

Different spectral data transformed were tested – smoothing, first and second derivatives. The number of PLS factors in the equations was determined by leave-one-out cross validation. The leave-one-out cross-validation procedure works by omitting one observation, recalculating the equation using the remaining data, and then predicting the omitted observation. This routine is repeated until each observation in the data

set is used once as validation data.

Thus, for both processes, the best model was assessed according to the optimal number of latent variables (LV) chosen based on the lowest root mean square error, the bias, the coefficient of determination of calibration (R_c^2), of cross-validation (R_{CV}^2), and of external validation (R_{EXT}^2), the standard error of calibration (SE_C), of cross validation (SE_{CV}), and of external validation (SE_P), and the residual predictive deviation of cross-validation (RPD_{CV}) and of external validation (RPD_{EXT}), calculated as the ratio between the standard deviation (SD) of the validation dataset and SE_{CV} and SE_P , respectively. Hence, we had one goodness-of-fit statistics output for each approach (i.e. within country and across countries). The normality of the residuals for the predicted models was assessed and a *t*-test was performed to determine whether the bias differed statistically from zero.

2.5. Discriminant analysis

In addition, another approach conducted was to apply a partial least square discriminant analysis (PLS-DA) on 2 datasets. The first dataset was made of 677 samples, of which the sex of the animal was known. The second dataset was made of all of the 829 samples, with unknown information about breed and sex of the animals. The NIR data were analyzed according to their spectrum after segregating the carcasses in 3 MSA marbling homogeneous classes (low, medium, high) according to their frequencies.

Using the first dataset, each class was created within sex and breed to avoid their effect on the MSA score, obtaining classes containing about 33% of samples. In the second dataset, the classes were created by taking the average of the thresholds for Limousine and Charolais classes.

Discriminant analysis on AUS-MEAT could not provide satisfactory results and were therefore not shown. Subsequently, meat samples were randomly split into a training and a validation set to build the model in absence of the validation set and therefore obtain a prediction which is independent of the model optimization (Westerhuis et al., 2008). Calibration set created from the first dataset included 166, 172, and 170 samples with low, medium, and high MSA marbling value, respectively. Then 54, 57, and 58 samples belonging to low, medium, and high class respectively were assigned to the validation set. On the other hand, 231, 189, and 202 samples from the second dataset, with low, medium, and high MSA marbling value respectively were used for calibration set; the validation set was created with 63, 67, and 77 samples belonging to low, medium, and high class, respectively. The calculated thresholds for each MSA class created within breed and sex were reported in Table 1.

Using SAS software v. 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA), the

Table 1
Thresholds of MSA marbling classes according to the category of animals.

Dataset	Charolais			Limousin		
	Low	Medium	High	Low	Medium	High
1						
MSA Class						
Male	$MSA \leq 270$	$270 < MSA \leq 340$	$MSA > 340$			
Female	$MSA \leq 310$	$310 < MSA \leq 370$	$MSA > 370$	$MSA \leq 290$	$290 < MSA \leq 370$	$MSA > 370$
2 ^a	All animals					
MSA Class	Low	Medium	High			
	$MSA \leq 290$	$290 < MSA \leq 360$	$MSA > 360$			

^a Dataset 2 includes data from all animals without considering any information about breed and sex

elimination of spectral outliers on the training set was performed using the Mahalanobis distance and the parameters of the PLS-DA model were optimized using leave-one-out cross-validation on the training dataset. The process was repeated until the addition of more components to the model did not produce a decrease in the cross-validation error rate. The PLS algorithm was followed by the adoption of the DISCRIM procedure using the PLS score as predictors to classify samples of the validation set. The confusion table which describes the classification performance of the discrimination model was then evaluated with three outcomes: sensitivity, specificity, and overall accuracy for each class.

$$Sensitivity (\%) = \frac{TP}{TP + FN} \times 100$$

$$Specificity (\%) = \frac{TN}{FP + TN} \times 100$$

$$Accuracy (\%) = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100$$

where FP, FN, TP and TN, are the number of false positives, false negatives, true positives and true negatives, predicted in external validation, respectively.

Sensitivity and specificity are used to calculate the true rates, in fact the sensitivity is the model ability to correctly associate the sample to the real class to which it belongs, whereas specificity is the ability to correctly identify which class the sample does not belong to (Almeida, Fidelis, Barata, & Poppi, 2013). Accuracy is the overall proportion of samples correctly classified. The overall accuracy of the confusion matrix was also assessed with receiver operating characteristic (ROC) curves where AUC-ROC corresponds to the area under a ROC curve and a single value measures the overall performance of a binary classifier (Hanley & McNeil, 1982). It ranges from 0.5 to 1 where the lowest value

represents a random classifier and the maximum value represents a perfect classifier (Hanley & McNeil, 1982). Three AUC-ROC curves were measured to evaluate the ability of the model to discriminate between the different classes and this was done for both models. The two PLS-DA were then compared to see which one provides the best results. The quality of the PLS-DA models was evaluated with the following parameters (R^2 and Q^2) representing the explained variance and the predictive capability of the model, respectively. R^2X and R^2Y represent the fraction of variance of the X and Y matrix, respectively. Q^2Y represents the predictive accuracy of the model, with the cumulative (cum) values of R^2X , R^2Y and Q^2Y equating to ~ 1 indicating an effective model (Kong et al., 2015). Permutation tests were performed with SIMCA 17.0 (Sartorius, 2020) on the validation set. Hundred permutations were done for each model and to reduce the risk of overfitting. Plots showing the correlation coefficients between the original Y and the permuted Y versus the R^2Y and Q^2 were obtained.

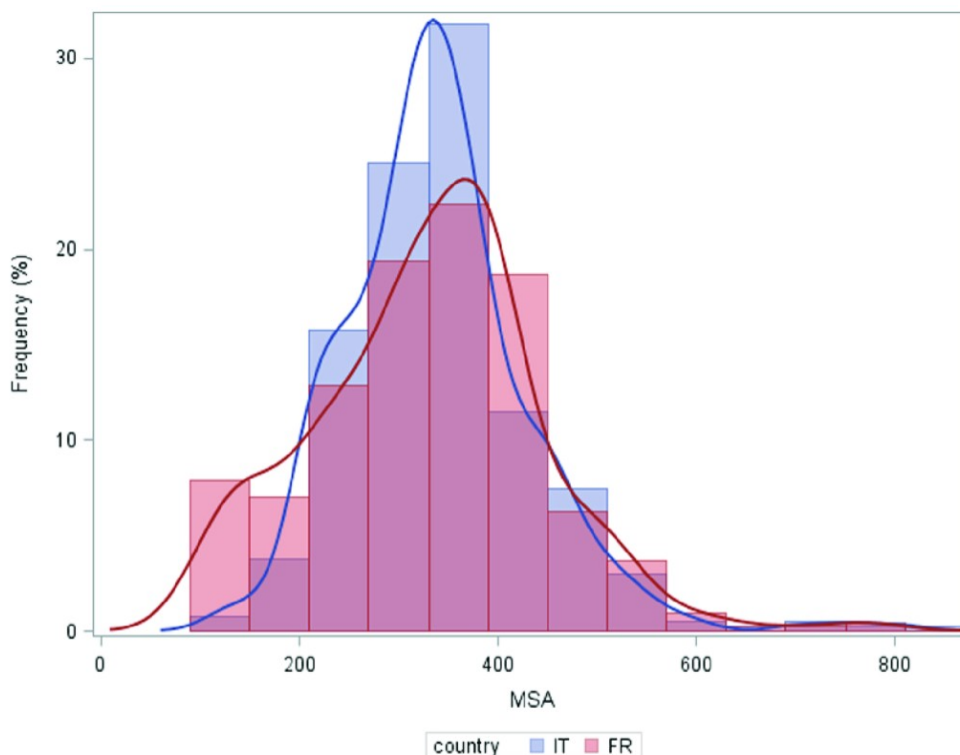
The fitted regression lines were displayed, connecting the observed Q^2 to the centroid of permuted Q^2 cluster. The model is considered valid if all Q^2 values from the permuted data set to the left are lower than the Q^2 value on the actual data set to the right and if the regression line has a negative value of intercept on the y-axis.

3. Results

3.1. Marbling measurement and near-infrared spectra

The distribution of MSA and AUS-MEAT scores within country and relative descriptive statistics are shown in Figs. 1 and 2. French data showed a slighter lower mean but a greater coefficient of variation (CV) than Italian ones (Fig. 1). Fig. 2 shows samples from each country grouped by classes of AUS-MEAT, specifically class 0, 1, 2 and > 2.

The average raw absorbance spectrum for French and Italian



Country	n	Mean	SD	Minimum	Maximum	CV
France	429	330.42	114.41	100.00	780.00	34.63
Italy	400	339.40	93.45	120.00	810.00	27.53

Fig. 1. Distribution of MSA marbling scores and descriptive statistics within country.

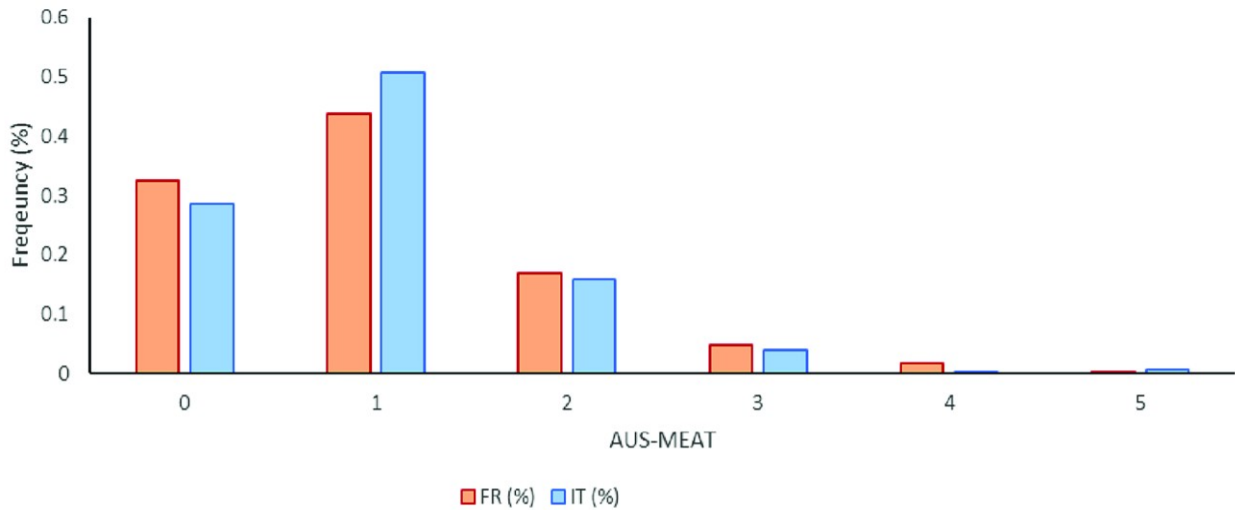


Fig. 2. Distribution of AUS-MEAT marbling scores within country.

carcasses are depicted in Fig. 3, showing the same trend of the curves with a narrow peak observed at 762 nm ($13,123.36 \text{ cm}^{-1}$) and a wider one around 984 nm ($10,162.60 \text{ cm}^{-1}$), but a difference in absorbance. The total Italian (a) and French (b) spectra colored according to the level of marbling are shown in Fig. 4.

3.2. Near-infrared spectroscopy prediction models

Statistics of the best prediction for each country and for the 2 datasets merged are shown in Table 2 with the first process using WinISI 4 and Table 3 with the second process using Pirouette 4.5.

With the first process using WinISI 4, the model was developed using a 15-fold cross-validation. No scatter correction was applied for MSA and AUS-MEAT scores except for the prediction of the latter in the French dataset, where SNV was used. Latent variables ranged from 5 to 7 for MSA and from 7 to 9 for AUS-MEAT. Overall, the equations for MSA marbling were developed by applying a first derivative, over a gap of four data points for the individual countries and 8 data points for the merged dataset. On the other hand, the best models for AUS-MEAT were obtained without calculating derivative for the French and Italian dataset but using the first order of derivatization applied over a gap of 8 data points for the complete dataset with both countries merged. The outliers detected were $< 11.2\%$ for all the cases. The best prediction model for MSA scores was obtained using data from France ($R_{CV}^2 = 0.58$, $RPD = 1.69$), whereas the best one for AUS-MEAT scores was developed

using Italian samples ($R_{CV}^2 = 0.47$, $RPD = 1.33$).

The external validation performed within and across countries confirmed the results obtained from the cross-validation (Table 4). The best R_{CV}^2 and R_{Ext}^2 for MSA marbling were reached using the French dataset but overall, final prediction accuracies did not really differ between countries nor using the merged dataset. Low prediction accuracy ($R_{Ext}^2 < 0.3$) was obtained for AUS-MEAT scores when performing external validation using all the datasets, therefore results were not reported in the table and no other calibrations were developed for the AUS-MEAT parameter. Lastly, when external validation was carried out across countries, the LV used for the development of MSA model were 5 for France and 7 for Italy and the results differed significantly. In particular, the Italian data allowed the development of the best prediction model ($RPD_{Ext} = 1.14$) once used as calibration set and then the equation has been validated on the French dataset. The linear regression of MSA marbling reference versus predicted values when performing the external validation within country is shown in Fig. 5. Residual of prediction equations were normally distributed, and bias did not differ statistically from zero.

With the second process using Pirouette 4.5, the spectra from both countries were pre-processed by using a first derivative. Both datasets provided similar R_{CV}^2 (0.59 for France and 0.58 for Italy). Detailed results are shown in Table 3. These results are similar from the results of the first process.

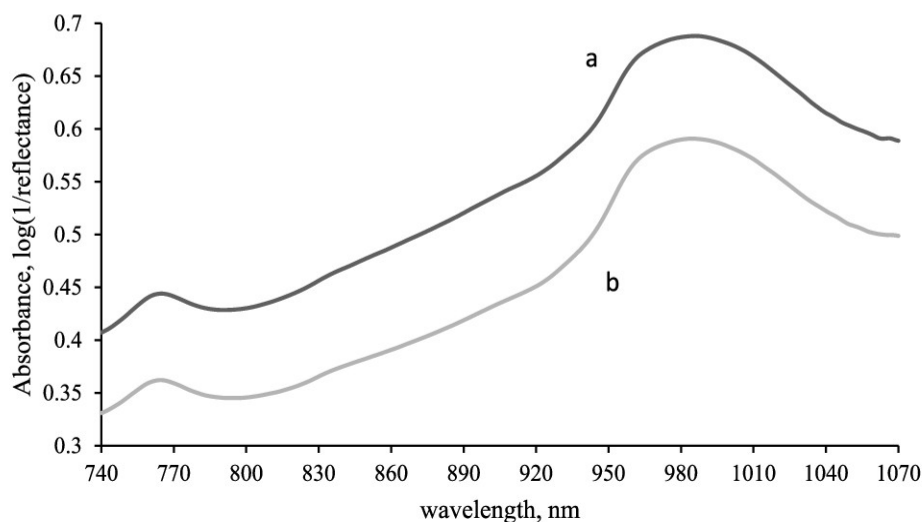


Fig. 3. Average raw NIR spectra of French (a) and Italian (b) datasets.

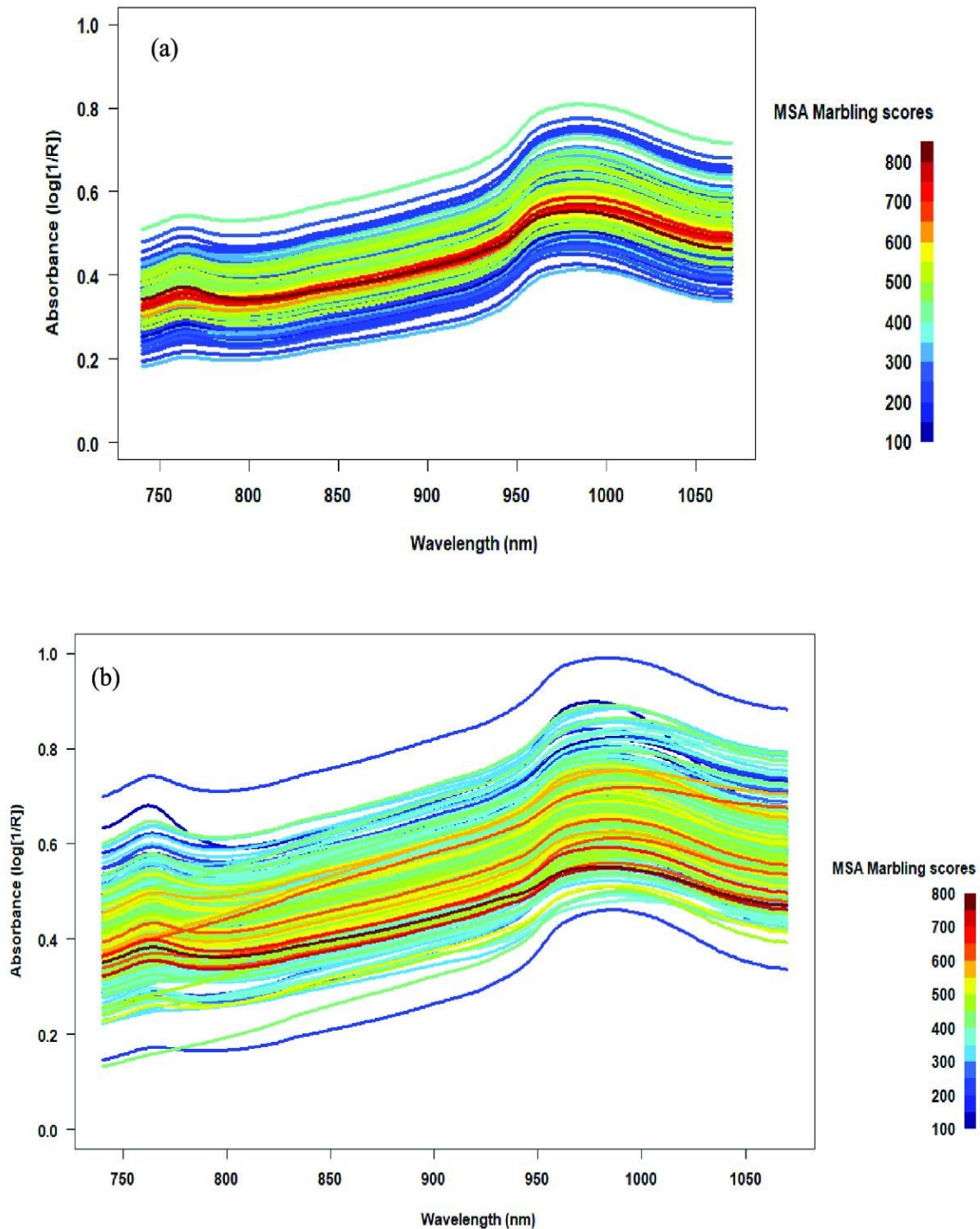


Fig. 4. Raw NIR spectra of (a) Italian samples and (b) French samples, colored according to the MSA marbling score.

3.3. MSA marbling classes discrimination

Tables 5 and 6 show the results obtained from the PLS-DA models for the validation set created selecting randomly 25% of the samples in both datasets. Similar results were obtained for both datasets using 11 LV. The greatest sensitivity was reached for samples correctly predicted to have low MSA scores (72.2% in the dataset with known sex and breed [Table 5] and 66.7% in the dataset with random sex and breed [Table 6]). Lower sensitivity was obtained for samples belonging to medium (52.6% in first dataset [Table 5] and 52.2% in the second dataset [Table 6]) and high MSA classes (58.6% in the first dataset [Table 5] and 63.6% in the second dataset [Table 6]). On the other hand, specificity ranged from 74.4% to 83.1% for all the classes. The confusion

matrix for both datasets had an overall accuracy of 61%.

The AUC-ROC curves for both datasets also provided similar results. The AUC values for the prediction for the low and high classes were above 0.8 in both datasets. Results for the AUC values are shown in Fig. 7. The prediction for the medium classes had values above 0.5 in both datasets but <0.8 (Fig. 7).

The permuted R^2 and Q^2 for the low and high classes were lower than the original values on the right (Fig. 8(a); Fig. 8(c) respectively). This suggests that the model fitting was valid, and this was unlikely to be built randomly. The permuted R^2 and Q^2 for the medium classes had similar values to the original showing that the prediction for the medium class could be built randomly (Fig. 8(b)).

Table 2

Fitting statistics of modified partial least squares regression models (mPLS) in 15-fold cross-validation for MSA marbling score and AUS-MEAT score within and across countries, developed using near-infrared reflectance spectroscopy on beef *Longissimus thoracis*.

Trait	Country	Scatter correction ^a	MT ^b	n ^c	outliers	LV ^d	SE _C ^e	R _C ^{2f}	SE _{CV} ^g	R _{CV} ^{2h}	RPD _{Ext} ⁱ
MSA	Italy	None ^{j,k}	1,4,4,1	400	19	7	54.49	0.57	57.92	0.51	1.61
	France	None	1,4,4,1	429	48	5	66.05	0.60	67.84	0.58	1.69
	Italy + France	None	1,8,8,1	829	78	7	64.46	0.56	65.64	0.54	1.59
AUS-MEAT	Italy	None	0,0,1,1	400	20	8	0.55	0.50	0.57	0.47	1.33
	France	SNV ^k	0,0,1,1	173	19	9	0.62	0.48	0.69	0.36	1.02
	Italy + France	None	1,8,8,1	573	61	7	0.57	0.47	0.58	0.44	1.27

^a Scatter correction = pre-processing technique to reduce noise.

^b MT = mathematical treatment (first digit indicates the derivative treatment).

^c n = total number of samples.

^d LV = optimal number of latent variables.

^e SE_C = standard error of calibration.

^f R_C² = coefficient of determination of calibration.

^g SE_{CV} = standard error of cross-validation.

^h R_{CV}² = coefficient of determination of cross-validation.

ⁱ RPD = ratio of performance to deviation.

^j none = no correction.

^k SNV = standard normal variate.

Table 3

Statistics for PLS models for prediction of meat MSA marbling with Pirouette 4.5.

Trait	Country	Scatter correction ^a	MT ^b	n ^c	outliers	LV ^d	SE _C ^e	R _C ^{2f}	SE _{CV} ^g	R _{CV} ^{2h}
MSA	Italy	OSC	1D	400	4	4	56.76	0.51	54.09	0.58
	France	OSC	1D	429	0	9	76.15	0.53	70.71	0.59

^a Scatter correction = pre-processing technique to reduce noise.

^b MT = mathematical treatment (first digit indicates the derivative treatment).

^c n = total number of samples.

^d LV = optimal number of latent variables.

^e SE_C = standard error of calibration.

^f R_C² = coefficient of determination of calibration.

^g SE_{CV} = standard error of cross-validation.

^h R_{CV}² = coefficient of determination of cross-validation.

Table 4

Fitting statistics of modified partial least square regression models using external validation for MSA marbling within and across countries.

		Within countries								
		Calibration set (66%)			Validation set (34%)					
Trait	Country	LV ^a	SE _{CV} ^b	R _{CV} ^{2c}	Bias	Slope	SE _p ^d	R _{Ext} ^{2e}	RPD _{Ext} ^f	
MSA	Italy	7	57.27	0.51	10.64	0.97	72.37	0.46	1.34	
	France	10	65.96	0.60	-2.65	0.88	83.1	0.46	1.36	
	Italy + France	10	64.49	0.57	-4.72	0.96	79.89	0.44	1.23	
Across countries										
MSA	France	5	67.84	0.58	Italy	78.5	0.86	105.47	0.44	0.89
	Italy	7	57.92	0.51	France	-26.44	0.89	100.11	0.29	1.14

^a LV = optimal number of latent variables.

^b SE_{CV} = standard error of cross-validation.

^c R_{CV}² = coefficient of determination of cross-validation.

^d SE_p = standard error of external validation.

^e R_{Ext}² = coefficient of determination of external validation.

^f RPD_{Ext} = ratio of performance to deviation in external validation.

4. Discussion

The objective of this study was to develop NIRS prediction models for MSA and AUS-MEAT marbling scores with spectra collected using a portable and handheld NIR spectrometer. The spectra were collected in the slaughterhouse and validated within and across two countries mainly for the two major French beef breeds (Limousine and Charolais). It was ensured that the variability among the instruments used in the two countries did not make the comparison flawed since NIR

spectrometers often require standardization methods (Bouveresse & Massart, 1996; Shenk & Westerhaus, 1991). We therefore carried out the measurements on the same carcasses with the same SCiO instruments. Inter and intra instrument variability was negligible and therefore we concluded that the instruments perform similarly.

The spectra were collected in reflectance mode and then recorded as absorbance, which is calculated as $\log_{10}(1/\text{Reflectance})$. In the literature, NIR reflectance spectroscopy showed a higher accuracy in predicting fat content using both benchtop (Alomar, Gallo, Castañeda, &

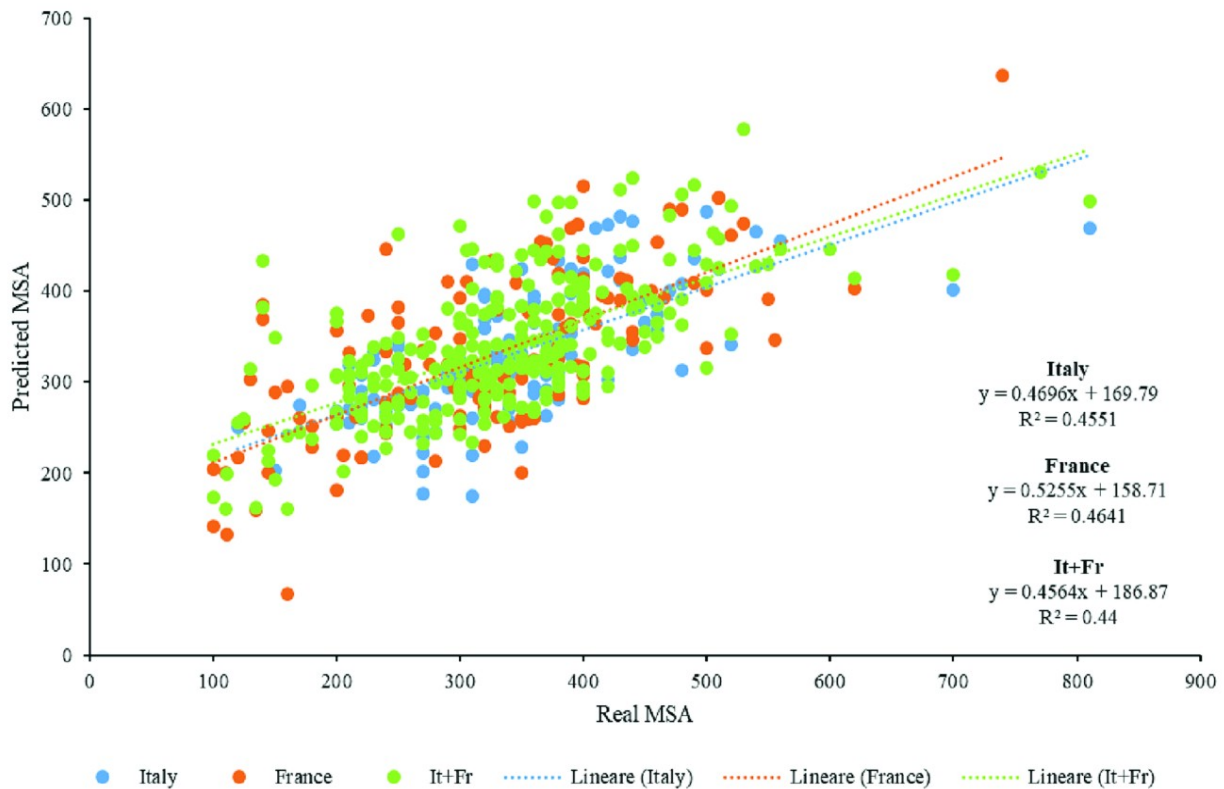


Fig. 5. Real vs. Predicted MSA marbling score values when performing external validation within country (data from Table 3).

Table 5

Confusion matrix for MSA marbling classes with Model performance using samples with known information of animal sex and breed.

MSA class	Low (predicted)	Medium (predicted)	High (predicted)	Total
Low (Actual)	39	13	2	54
Medium (Actual)	15	30	12	57
High (Actual)	7	17	34	58
Model performance, %				
Sensitivity	72.2	52.6	58.6	
Specificity	74.4	70.9	83.1	
Overall Accuracy		61		

Table 6

Confusion matrix for MSA marbling with samples of different animals without any information of breed and sex.

MSA class	Low (predicted)	Medium (predicted)	High (predicted)	Total
Low (Actual)	42	18	3	63
Medium (Actual)	21	35	11	67
High (Actual)	3	25	49	77
Model performance, %				
Sensitivity	66.7	52.2	63.6	
Specificity	77.8	67.9	84.6	
Overall Accuracy		60.9		

Fuchslocher, 2003; Ripoll et al., 2008) and handheld (Goi, Hocquette, Pellattiero, & De Marchi, 2022) devices in beef and also in other species (Dixit et al., 2017).

This study had a relatively large sample size of 829 animals compared to other studies mostly ranging between 30 and 150 (Prevolnik, Candek-Potokar, & Skorjanc, 2011). A large sample size accounting for high variance for the predicted traits is crucial to develop robust models.

4.1. Near-infrared spectra and prediction models

4.1.1. Spectra specificities

The average NIR spectra reported in Fig. 3 ranges between 740 and 1070 nm, which corresponds to the Herschel region. According to Beć, Grabska, and Huck (2020) and Schrieve, Melish, and Ullman (1991) this spectral region is characterized by a narrow range, a low to moderate chemical specificity, a low sensitivity, an overlapping contributions in the spectra, and by difficulties in spectral interpretation. Beć et al. (2020) stated that meat includes a certain number of chromophores that are oxymyoglobin, water, fat, and protein which have an absorption band in the NIR region. In our study, the VIP profile indicated the important regions of the spectra, considering 1 as a threshold for MSA values (Fig. 6). VIP scores indicate the importance of each variable in the projection used in a PLS (Banerjee et al., 2013) model and is often used for variable selection. The most important parts of the spectra were: 740–772 nm, 826–843 nm, 862–867 nm, 918–948 nm, 963–969 nm, and 1054–1070 nm. The peak observed at 762 nm ($13,123.36\text{ cm}^{-1}$) is assumed to be related to OH third overtone or produced by the oxidation of myoglobin or deoxymyoglobin as stated by Cozzolino and Murray (2002), while according to Allen, Hall, Dhillon, Owen, and Beard (2012) the band nearby 970 nm ($10,309.28\text{ cm}^{-1}$) nm is related with OH second overtone associated to the water content in the samples. The absorption peak at 920 nm ($10,869.57\text{ cm}^{-1}$) has been associated with the 2nd overtone of the stretching vibrational mode of the C–H bond (Wilson, Nadeau, Jaworski, Tromberg, & Durkin, 2015). Lipids and water consist

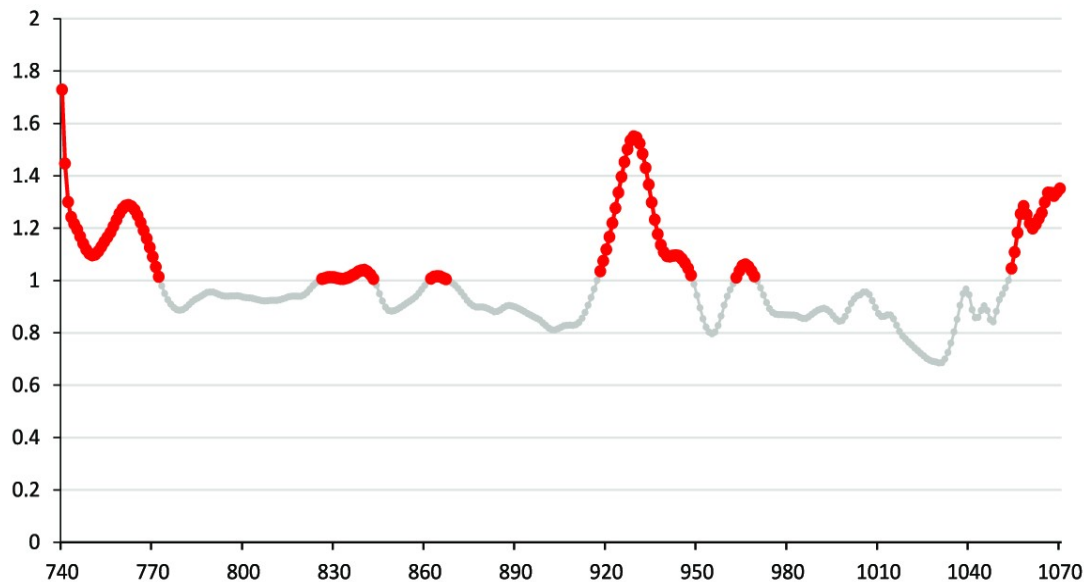


Fig. 6. Variable Importance in the Projection (VIP) profile of the selected Partial Least Square Regression (PLSR) model predicting MSA marbling scores. X axis : Wavelength (nm) Y axis : Variable Importance in the projection.

of several overlapping peaks as a result of C–H bond vibrations within the different structural groups (single bond CH₃, >CH₂, triple bond CH and >CH (aromatic)) of the lipid molecules (Jansen, Wu, van der Steen, & van Soest, 2014). Therefore, our data will be mostly influenced by the level of oxidation of myoglobin and water content of each carcasses as demonstrated by Wold et al. (2022). It has been shown that the concentration of myoglobin as well as its level oxygenation in meat has a strong impact on the NIR spectra and can give deviations in the estimated marbling scores (Wold et al., 2022). This impact of myoglobin oxidation should therefore be considered for the industrial implementation of NIR spectrometer.

4.1.2. Model validation

With the first process, when performing the MSA calibration, the deleted outliers ranged between 4.8 and 11.2% and 5 LV were used for the French dataset which was slightly lower than that used to obtain the best model for the Italian and the merged dataset (Table 2).

With the second process, 9 LV were used for French dataset and 4 LV for Italy, while 4 outliers were removed from the Italian dataset and no outlier from the French one.

In order to validate the model, the interpretation of R_{CV}^2 was based on the work by Karoui et al. (2006). This study reported that a prediction model with R_{CV}^2 between 0.66 and 0.81 could give an approximate quantitative estimation of the reference value, a R_{CV}^2 between 0.82 and 0.90 could give a good estimation, and above 0.91 could give an excellent estimation. With the first process and when performing cross-validation, samples from France provided the greatest accuracy with both processes. However, these samples had the highest SE_{CV} . This higher SE_{CV} could be explained by the fact that samples from France included animals from different sexes and breeds. The Italian samples had the lowest SE_{CV} since the animals all had the same characteristics. Sample uniformity can therefore help to reduce SE_{CV} .

The interpretation of RPD was based on the criteria established by Williams (2014) who indicated that prediction model with an RPD below 1.9 is not recommended to be used, an RPD between 2.5 and 2.9 could be applied for screening, an RPD above 3.0 could be adequate for quality control, and a RPD above 4.0 could be adequate for any application. This parameter provides a metric of model validity which is more objective since it is a non-dimensional statistic. When performing cross-validation, RPD value was at most 1.69. Thus, we can observe that the prediction models for MSA marbling provided better results than for AUS-MEAT marbling which had RPD of <1.4 in all datasets. When

considering the RPD for MSA marbling, no difference was detected between the Italian and the merged dataset.

When performing the external validation within country (Table 4), R_{Ext}^2 was slightly lower than using cross-validation as expected, and all the datasets achieved an almost equal value between them as reported in Fig. 5. The same occurred with the RPD. When performing the validation across countries, the more accurate model when considering the R_{Ext}^2 was developed using the French dataset and validated on the Italian one, however due to the greater SE_P it resulted being unsatisfactory with reference to RPD_{Ext} . Furthermore, the small variation among the samples (standard deviation of 0.15) most likely decreased the predictive performance and robustness of the calibration model, generating a low R^2 .

Overall, according to the criteria of estimation of goodness of the models, similar results were obtained from both processes. OSC did provide better results as discussed by Wold et al., 1998. These models cannot be considered good enough to be applied in place of marbling evaluation by graders. Nevertheless, low or moderate phenotypic correlations between the reference and its prediction may not reflect the genetic association that exists between them (Costa, Visentin, De Marchi, Cassandro, & Penasa, 2019). Moreover, studies on dairy cows have demonstrated that infrared predictions could be weakly associated with the measured trait at either phenotypic and genetic level, but still their association can be considered good for selection purposes (Benedet, Costa, De Marchi, & Penasa, 2020; Costa et al., 2021). Therefore, although the prediction accuracy is not sufficient for a punctual determination, the prediction can be used as a proxy of the real target trait and be used to discriminate between low and high values of MSA as well as for genetic purposes.

For a chiller assessor to gain/retain ABCAS accreditation, he must be able to classify correctly 70% of carcasses within ± 50 marbling units from the reference score and 100% between 100 units of the reference score (Rosenvold, 2012). From this prediction model, we therefore investigated what percentage of the data was correctly predicted in the range ± 50 . According to our results, only about 50% of marbling scores were correctly predicted within ± 50 units and 83.4% within ± 100 . Therefore, SCiO spectrometer cannot be accredited for the assessment of marbling based on the current prediction model.

4.2. Technical limitations

As shown by different studies, the efficiency of prediction on meat

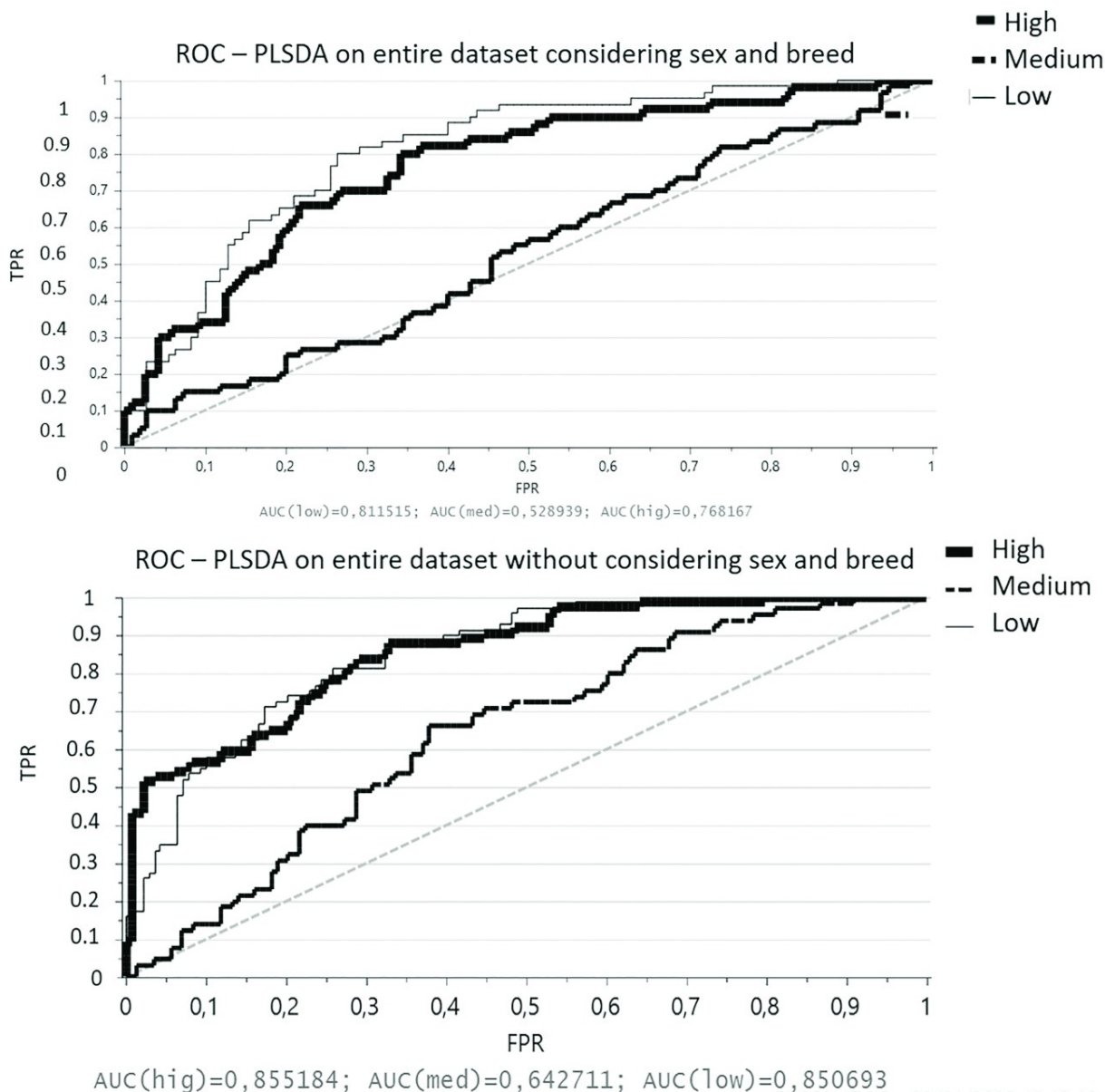


Fig. 7. ROC curves for the prediction for each class (a) considering sex and breed (b) without considering sex and breed. TPR = True positive rate, FPR = False Positive rate.

depends on the state of the sample, whether minced or intact. Better predictions are made with minced samples due to a more homogeneous mixture (Barlocco, Vadell, Ballesteros, Galiotta, & Cozzolino, 2006; Prevolnik, Candek-Potokar, & Škorjanc, 2004). On intact sample, the NIR signal is therefore affected by the heterogeneity of the sampling site (Przybylski & Hopkins, 2015). Homogenization gives better results because fiber arrangement has been destroyed and randomized thereby averaging the effect of scattering but this is a strong limitation for on-line applications (Tøgersen, Arnesen, Nilsen, & Hildrum, 2003). Intact muscles, on the other hand, can act as optical fibers that conduct light along their lengths and reduce reflectance (Przybylski & Hopkins, 2015). This can therefore explain why our prediction models could not give totally satisfactory results since the spectra were collected on intact samples. If the contribution of muscle heterogeneity to the variability in NIR predictions was known, it would be possible to estimate how much of this variation in predictions is due to other factors and how much NIR needs to be enhanced to improve its accuracy. As it was reported by Rosenvold (2012), when collecting the spectra, even whether efforts are done to adjust the probe in order to capture as much signal from the fat

as possible, it is inevitable that information will be captured from other tissues. We experienced the same situation when collecting spectra with SCiO spectrometer where we eventually had some absorbance on the muscle and not on the intramuscular fat. This can therefore increase noise and decrease predictivity.

Furthermore, MSA marbling AUS-MEAT scores (considered as the reference value) are visual parameters with technical variability, and this introduces additional error into the model of prediction despite its positive correlation with intramuscular fat levels obtained in the lab (Frank et al., 2016). The different pre-processing methods used to reduce the effect of heterogeneity cannot increase NIR sensitivity.

The NIR sensitivity could be enhanced by increasing the number of scan replication (Rødbotten, Nilsen, & Hildrum, 2000; Rosenvold, 2012). For this reason, we collected 5 scans per carcass despite NIR measurement was done on the production chain, which is fast and cannot be slowed down. Rosenvold (2012) could reach the targeted standard (70% in the range ± 50) with 40 scans. This will unfortunately increase the time of scanning for each carcass and limit online application since, in practice, the number of scans could not be increased

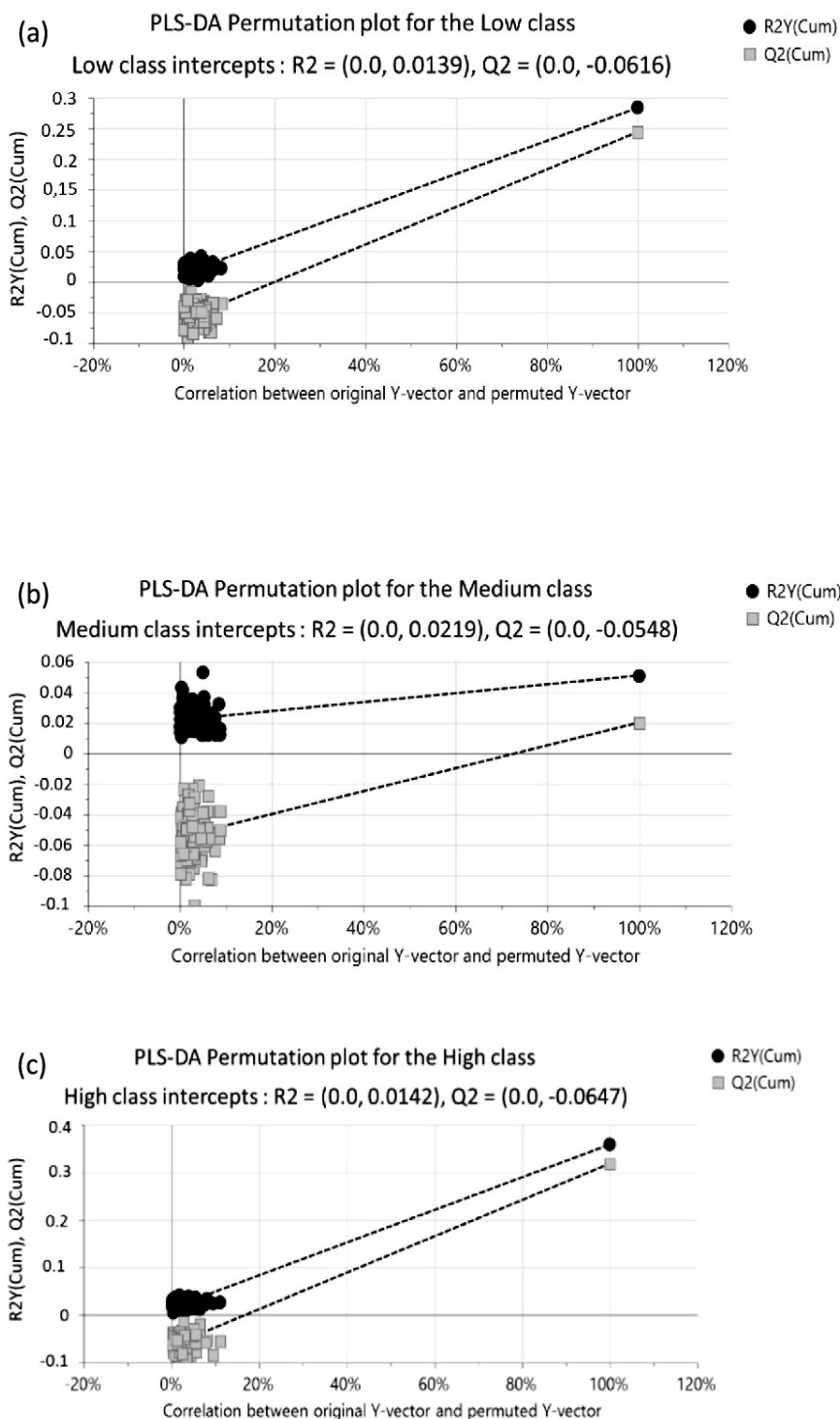


Fig. 8. Permutation plots for the (a) low, (b) medium, and (c) high class.

indefinitely. When collecting the spectra, we used a stand-off to avoid the meat touching the probe glass window and limit interference with the surrounding light. This stand-off could be removed to increase sensitivity and this could increase the signal captured from the sample (Rady, Fischer, Reeves, Logan, & James Watson, 2020). However, if this approach was proven as useful, it might require more frequent cleaning of the probe window (Rosenvold, 2012).

Near-infrared models lacked robustness and did not give completely satisfactory predictions when used on a new batch. Also, a similar type of sensor (900–1700 nm) could not give satisfactory results as shown in a study by Coombs, Fajardo, and González (2021). We should also

consider that industrial conditions are exposed to fluctuations in humidity and temperature (Przybylski & Hopkins, 2015). One solution could be the use of fiber optic probes. Better results could be achieved by acquiring adding spatial information to spectral information as Hyppectral imaging does. Hyperspectral imaging integrates spectroscopy and computer vision techniques and this provided better results to predict marbling score for the Japanese standard classification (Velásquez, Cruz-Tirado, Siche, & Quevedo, 2017). Other types of statistical approaches may be suggested in order to increase accuracy, such as neural networks (Prevolnik et al., 2011), decision tree (Velásquez et al., 2017) and a model updating method based on just-in-time learning (Zhang

et al., 2022).

4.3. MSA class prediction

Beef industry does not need to accurately predict marbling score but it rather aims to ensure good eating quality of beef to the consumer, thus reaching a minimum level of marbling accordingly. In other words, classifying carcasses in low-, medium- and high- marbling groups could be sufficient from a commercial point of view. Previous studies have demonstrated that the intramuscular fat deposition, and therefore marbling, are influenced by a wider range of factors, such as breed, sex, age, and diet (Nguyen, Nguyen, & Malau-Aduli, 2021; Park et al., 2018). Differences were found in the accuracies of prediction of fatty acids for Aberdeen Angus and cross bred Limousine (Prieto et al., 2011). One reason could be the differences in the adipocyte size between breeds that can influence the NIR spectra collected. These results therefore suggest the use of specific prediction equations for individual breeds and sexes (Prieto et al., 2011).

From the confusion matrix, the predictability for the low marbling levels is generally higher. Therefore, marbling scores lower than 270 are better predicted for both sexes and breeds. This is quite close to our average MSA values considering the range of ± 50 . The overall accuracy of the confusion matrix was 61%, meaning that 61% of all the carcasses were correctly classified. However, with this approach, we still could not reach the targeted range for MSA accreditation of carcass graders (70% of well classified samples within ± 50).

The interpretation for the AUC-ROC curves was done based on a previous study done by (Yang & Berdine, 2017). It was suggested that a value of AUC = 0.5 allows no discrimination, AUC value between 0.5 and 0.6 gives a poor discrimination, AUC value between 0.6 and 0.7 gives an acceptable discrimination, AUC value between 0.7 and 0.8 gives an excellent discrimination and AUC value >0.9 gives an outstanding discrimination. From this, we can conclude that our model could predict the low and high class given that the AUC values were above 0.8 for both models.

As the two PLS-DA models with or without the inclusion of data related to animal breed and sex provided similar results, our study suggests that the prediction of MSA classes could be done independently of sex and breed information with a large dataset. Results could be improved by having more animals in each class.

5. Conclusion

The measurement of carcass quality traits in the chiller can be laborious since commercial slaughterhouses need to acquire chiller assessors, finance the acquisition and retention of the accreditation for assessors. This process can be expensive for small or large scale slaughterhouses. Therefore, in order to maximize economic benefits and increase grading accuracy as well as reliability, NIRS can offer a viable solution. This study was performed on a large sample size to evaluate if the spectra obtained from a handheld NIR spectrometer could help to predict MSA and AUS-MEAT marbling scores. Different procedures were applied using different software in order to develop the best models. The chemometrics procedures could not provide completely satisfactory results for prediction of individual scores for both measured traits, preventing the predicted values from being used as a substitute for the official evaluation of marbling by accredited operators. The PLS-DA model could predict extreme classes (low and high). In the context of this study, carcasses with a marbling score higher than 370 were considered high. This value can relatively be low compared to the whole MSA marbling scale which has a maximum value of 1190. This is because Australian breeds (especially English native breeds) have more intramuscular fat than European breeds. Our results are therefore more adapted to the European context. Better results can be achieved by performing the analysis on a dataset with large variability in each class. Moreover, there could be a genetic association between infrared

predicted and reference traits which might be sufficient for selection purposes and it is worth noting that this device allows the reading of a sample rapidly, obtaining a very high number of phenotypes in many slaughterhouses when compared to the activity that the few official graders present in Europe can perform. The investigations in this study therefore led to the conclusion that, hand held spectrometers can be suitable to predict classes of marbling rather than individual marbling scores. For meat companies that wish to use such small, simple, and cheap NIR devices with narrow spectral range, further calibrations should be performed on a wide variety of animals and marbling levels, taking into account technical variability for both carcass graders and slaughtering conditions including constraints in commercial slaughterhouses.

Ethics statement

Ethical review and approval were not required for the animal study because Data from animals was used from commercial slaughterhouses at Limoges, France and Padova, Italy according to normal rules.

CRedit authorship contribution statement

Moïse Kombolo-Ngah: Formal analysis, Data curation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Arianna Goi:** Formal analysis, Data curation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Matteo Santinello:** Formal analysis, Writing – original draft. **Nicola Rampado:** Methodology, Validation, Data curation. **Stefka Atanassova:** Methodology, Formal analysis. **Jingjing Liu:** Methodology, Validation, Data curation. **Pascal Faure:** Methodology, Validation, Data curation. **Laure Thoumy:** Methodology, Validation, Data curation. **Alix Neveu:** Methodology, Validation. **Donato Andueza:** Methodology, Formal analysis. **Massimo De Marchi:** Methodology, Validation, Funding acquisition, Project administration, Supervision. **Jean-François Hocquette:** Methodology, Validation, Funding acquisition, Project administration, Supervision.

Declaration of Competing Interest

None.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgements

AZoVe (Cittadella, Italy), and Plainemaison Beauvallet (Limoges, France) are gratefully acknowledged for the provision of carcasses for sampling. This work was supported by the SustaIn4Food project (funded by Veneto region, Italy) and the INTAQT project that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement N°101000250

References

- Allen, T. J., Hall, A., Dhillon, A. P., Owen, J. S., & Beard, P. C. (2012). Spectroscopic photoacoustic imaging of lipid-rich plaques in the human aorta in the 740 to 1400 nm wavelength range. *Journal of Biomedical Optics*, 17(6), Article 061209. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.17.6.061209>
- Almeida, M. R., Fidelis, C. H. V., Barata, L. E. S., & Poppi, R. J. (2013). Classification of Amazonian rosewood essential oil by Raman spectroscopy and PLS-DA with reliability estimation. *Talanta*, 117, 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.09.025>
- Alomar, D., Gallo, C., Castañeda, M., & Fuchslocher, R. (2003). Chemical and discriminant analysis of bovine meat by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Meat Science*, 63(4), 441–450.
- Banerjee, P., Ghosh, S., Dutta, M., Subramani, E., Khalpada, J., Roy Choudhury, S., ... Chaudhury, K. (2013). Identification of key contributory factors responsible for

- vascular dysfunction in idiopathic recurrent spontaneous miscarriage. *PLoS One*, 8 (11), Article e80940. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080940>
- Barlocco, N., Vadell, A., Ballesteros, F., Galletta, G., & Cozzolino, D. (2006). Predicting intramuscular fat, moisture and Warner-Bratzler shear force in pork muscle using near infrared reflectance spectroscopy. *Animal Science*, 82, 111–116. <https://doi.org/10.1079/ASC20055>
- Beć, K., Grabska, J., & Huck, C. (2020). Near-infrared spectroscopy in bio-applications. *Molecules*, 25, 2948. <https://doi.org/10.3390/molecules25122948>
- Benedet, A., Costa, A., De Marchi, M., & Penasa, M. (2020). Heritability estimates of predicted blood β -hydroxybutyrate and nonesterified fatty acids and relationships with milk traits in early-lactation Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 103(7), 6354–6363. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17916>
- Bonny, S. P. F., O'Reilly, R. A., Pethick, D. W., Gardner, G. E., Hocquette, J.-F., & Pannier, L. (2018). Update of meat standards Australia and the cuts based grading scheme for beef and sheepmeat. *Journal of Integrative Agriculture*, 17, 1641–1654. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61924-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61924-0)
- Bouveresse, E., & Massart, D. L. (1996). Standardisation of near-infrared spectrometric instruments: A review. *Vibrational Spectroscopy*, 11(1), 3–15. [https://doi.org/10.1016/0924-2031\(95\)00555-0](https://doi.org/10.1016/0924-2031(95)00555-0)
- Büning-Pfaue, H. (2003). Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 82, 107–115. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00583-6](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00583-6), 2nd International Workshop on Water in Foods.
- Calkins, C. R., & Hodgen, J. M. (2007). A fresh look at meat flavor. *Meat Science*, 77, 63–80. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.04.016>, 53rd International Congress of Meat Science and Technology (53rd ICoMST).
- Chriki, S., Renand, G., Picard, B., Micol, D., Journaux, L., & Hocquette, J. F. (2013). Meta-analysis of the relationships between beef tenderness and muscle characteristics. *Livestock Science*, 155, 424–434. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.04.009>
- Coombs, C. E. O., Fajardo, M., & González, L. A. (2021). Comparison of smartphone and lab-grade NIR spectrometers to measure chemical composition of lamb and beef. *Animal Production Science*, 61(16), 1723–1733. <https://doi.org/10.1017/AN21069>
- Costa, A., Franzoi, M., Visentin, G., Goi, A., De Marchi, M., & Penasa, M. (2021). The concentrations of immunoglobulins in bovine colostrum determined by the gold standard method are genetically correlated with their near-infrared prediction. *Genetics, Selection, Evolution*, 53, 87. <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00681-8>
- Costa, A., Visentin, G., De Marchi, M., Cassandro, M., & Penasa, M. (2019). Genetic relationships of lactose and freezing point with minerals and coagulation traits predicted from milk mid-infrared spectra in Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 102(8), 7217–7225. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15378>
- Cozzolino, D., & Murray, I. (2002). Effect of sample presentation and animal muscle species on the analysis of meat by near infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 10(1), 37–44. <https://doi.org/10.1255/jnirs.319>
- De Marchi, M., Costa, A., Goi, A., Penasa, M., & Manuelli, C. L. (2019). Novel applications of infrared technologies in dairy industry. *Advanced Technologies*, 8(2), 92–98. <https://doi.org/10.5937/savteh1902092d>
- Dixit, Y., Casado-Gavaldà, M. P., Cama-Moncuñil, R., Cama-Moncuñil, X., Markiewicz-Keszycska, M., Cullen, P. J., & Sullivan, C. (2017). Developments and challenges in online NIR spectroscopy for meat processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16, 1172–1187. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12295>
- Etats Généraux de l'Alimentation EGA. (2018). <https://agriculture.gouv.fr/alimagri-les-etats-generaux-de-l'alimentation> (accessed 6.15.22).
- Fan, Y., Liao, Y., & Cheng, F. (2018). Predicting of intramuscular fat content in pork using near infrared spectroscopy and multivariate analysis. *International Journal of Food Properties*, 21, 1180–1189. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1460606>
- Fernández-Cabanás, V. M., Polvillo, O., Rodríguez-Acuña, R., Botella, B., & Horcada, A. (2011). Rapid determination of the fatty acid profile in pork dry-cured sausages by NIR spectroscopy. *Food Chemistry*, 124(1), 373–378. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.031>
- Fowler, S. M., Wheeler, D., Morris, S., Mortimer, S. I., & Hopkins, D. L. (2021). Partial least squares and machine learning for the prediction of intramuscular fat content of lamb loin. *Meat Science*, 177, Article 108505. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108505>
- Frank, D., Ball, A., Hughes, J., Krishnamurthy, R., Piyasiri, U., Stark, J., ... Warner, R. (2016). Sensory and flavor chemistry characteristics of Australian beef: Influence of intramuscular fat, feed, and breed. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(21), 4299–4311. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00160>
- Givens, D. I., Boever, J. L. D., & Deaville, E. R. (1997). The principles, practices and some future applications of near infrared spectroscopy for predicting the nutritive value of foods for animals and humans. *Nutrition Research Reviews*, 10, 83–114. <https://doi.org/10.1079/NRR19970006>
- Goi, A., Hocquette, J. F., Pellattiero, E., & De Marchi, M. (2022). Handheld near-infrared spectrometer allows on-line prediction of beef quality traits. *Meat Science*, 184, Article 108694. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108694>
- Guillemin, N., Cassar-Malek, I., Hocquette, J. F., Jurie, C., Micol, D., Lustrat, A., Leveziel, H., Renand, G., & Picard, B. (2009). La maîtrise de la tendreté de la viande bovine : identification de marqueurs biologiques. *INRAE Productions Animales*, 22, 331–344. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2009.22.4.3358>
- Hanley, J. A., & McNeil, B. J. (1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143(1), 29–36. <https://doi.org/10.1148/radiology.143.1.7063747>
- Hocquette, J.-F., Ellies-Oury, M.-P., Lherm, M., Pineau, C., Deblitz, C., & Farmer, L. (2018). Current situation and future prospects for beef production in Europe — A review. *Asian-Australas. Journal of Animal Science*, 31, 1017–1035. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0196>
- Jacob, R. (2020). Implications of the variation in bloom properties of red meat: A review. *Meat Science*, 162, Article 108040. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108040>
- Jansen, K., Wu, M., van der Steen, & van Soest, G. (2014). Photoacoustic imaging of human coronary atherosclerosis in two spectral bands. *Photoacoustics*, 2(1), 12–20.
- Kademi, H. I., Ulusoy, B. H., & Hecker, C. (2018). Applications of miniaturized and portable near infrared spectroscopy (NIRS) for inspection and control of meat and meat products. *Food Reviews International*, 35(3), 201–220. <https://doi.org/10.1080/87559129.2018.1514624>
- Karoui, R., Mouazen, A. M., Dufour, É., Pillonel, L., Picque, D., Bosset, J.-O., & De Baerdemaeker, J. (2006). Mid-infrared spectrometry: A tool for the determination of chemical parameters in Emmentaler cheeses produced during winter. *Le Lait*, 86, 83–97. <https://doi.org/10.1051/lait:2005040>
- Kong, X., Yang, X., Zhou, J., Chen, S., Li, X., Jian, F., Deng, P., & Li, W. (2015). Analysis of plasma metabolic biomarkers in the development of 4-nitroquinoline-1-oxide-induced oral carcinogenesis in rats. *Oncology Letters*, 9(1), 283. <https://doi.org/10.3892/ol.2014.2619>
- Legrand, I., Hocquette, J.-F., Polkinghorne, R. J., & Pethick, D. W. (2013). Prediction of beef eating quality in France using the meat standards Australia system. *Animal*, 7, 524–529. <https://doi.org/10.1017/S1751731112001553>
- Liu, J., Pogorzelski, G., Neveu, A., Legrand, I., Pethick, D., Ellies-Oury, M. P., & Hocquette, J. F. (2021). Are Marbling and the Prediction of Beef Eating Quality Affected by Different Grading Sites? *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 611153. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.611153>
- Meat & Livestock Australia, Meat Standards Australia. (2018). *Meat standards Australia information kit*. North Sydney: Meat & Livestock Australia.
- Meat, Livestock, Australia, & Meat Standards, Australia. (2001). *Meat Standards Australia information kit*. Meat & Livestock Australia.
- Nguyen, D. V., Nguyen, O. C., & Malau-Aduli, A. E. O. (2021). Main regulatory factors of marbling level in beef cattle. *Veterinary and Animal Science*, 14, 100219.
- Park, S. J., Beak, S.-H., Jung, D. J. S., Kim, S. Y., Jeong, I. H., Piao, M. Y., ... Baik, M. (2018). Genetic, management, and nutritional factors affecting intramuscular fat deposition in beef cattle — A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(7), 1043–1061.
- Pasquini, C. (2003). Near infrared spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 14(2), 198–219. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532003000200006>
- Prevolnik, M., Čandek-Potokar, M., & Škorjanc, D. (2004). Ability of NIR spectroscopy to predict meat chemical composition and quality - a review. *Czech Journal of Animal Science*, 49, 500–515. <https://doi.org/10.17221/4337-CJAS>
- Prevolnik, M., Čandek-Potokar, M., & Škorjanc, D. (2011). Ability of NIR spectroscopy to predict meat chemical composition and quality – a review. *Czech Journal of Animal Science*, 49, 500–510. <https://doi.org/10.17221/4337-CJAS>
- Prieto, N., López-Campos, O., Aalhus, J. L., Dugan, M. E. R., Juárez, M., & Uttaro, B. (2014). Use of near infrared spectroscopy for estimating meat chemical composition, quality traits and fatty acid content from cattle fed sunflower or flaxseed. *Meat Science*, 98(2), 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.005>
- Prieto, N., Pawluczuk, O., Russell Dugan, M. E., & Aalhus, J. L. (2017). A review of the principles and applications of near-infrared spectroscopy to characterize meat, fat, and meat products. *Applied Spectroscopy*, 71(7), 1403–1426. <https://doi.org/10.1177/0003702817709299>
- 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 crossbred Limousin and Aberdeen Angus beef cattle using near infrared reflectance spectroscopy. *Animal*, 5 (1), 155–165.
- Przybylski, P. W., & Hopkins, P. D. (Eds.). (2015). *Meat quality: Genetic and environmental factors* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19250>
- Rady, A., Fischer, J., Reeves, S., Logan, B., & James Watson, N. (2020). The effect of light intensity, sensor height, and spectral pre-processing methods when using NIR spectroscopy to identify different allergen-containing powdered foods. *Sensors*, 20 (1), 1. <https://doi.org/10.3390/s20010230>
- Ripoll, G., Albertí, P., Panea, B., Olleta, J. L., & Sañudo, C. (2008). Near-infrared reflectance spectroscopy for predicting chemical, instrumental and sensory quality of beef. *Meat Science*, 80, 697–702. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.03.009>
- Rødboten, R., Nilsen, B. N., & Hildrum, K. I. (2000). Prediction of beef quality attributes from early post mortem near infrared reflectance spectra. *Food Chemistry*, 69, 427–436. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00059-5)
- Rosenvold, K. (2012). Accreditation of VISNIR spectroscopy to support MSA grading of beef. In *Published By Meat and Livestock Australia limited locked bag 991 North Sydney NSW 2059 23*.
- Schrieve, G. D., Melish, G. G., & Ullman, A. H. (1991). The Herschel-Infrared—A useful part of the spectrum. *Applied Spectroscopy*, 45, 711–713. <https://doi.org/10.1366/0003702914336903>
- Shenk, J. S., & Westerhaus, M. O. (1991). New standardization and calibration procedures for Nirs analytical systems. *Crop Science*, 31(6). <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100060064x>
- SIMCA® - Multivariate Data Analysis Software. (2020). Sartorius. <https://www.sartorius.com/en/products/process-analytical-technology/data-analytics-software/mvda-software/simca>.
- Stewart, S. M., Lauridsen, T., Toft, H., Pethick, D. W., Gardner, G. E., McGilchrist, P., & Christensen, M. (2021). Objective grading of eye muscle area, intramuscular fat and marbling in Australian beef and lamb. *Meat Science*, 181, Article 108358. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108358>
- Su, H., Sha, K., Zhang, L., Zhang, Q., Xu, Y., Zhang, R., ... Sun, B. (2014). Development of near infrared reflectance spectroscopy to predict chemical composition with a wide range of variability in beef. *Meat Science*, 98(2), 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.12.019>

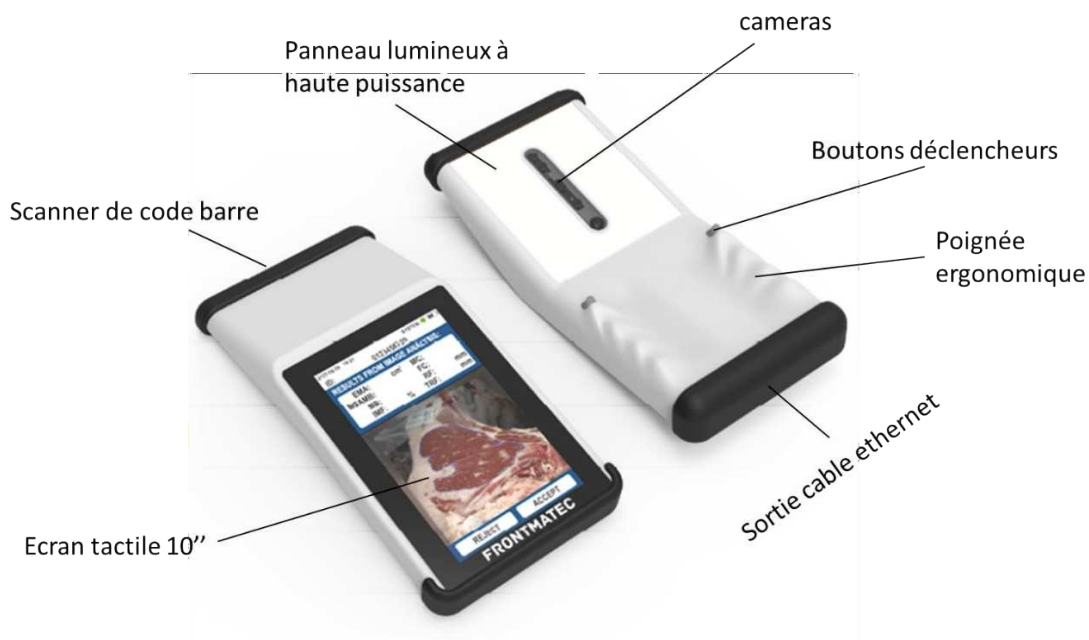
- Tøgersen, G., Arnesen, J. F., Nilsen, B. N., & Hildrum, K. I. (2003). On-line prediction of chemical composition of semi-frozen ground beef by non-invasive NIR spectroscopy. *Meat Science*, 63, 515–523. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00113-4)
- Van Kempen, T. (2001). Infrared technology in animal production. *World's Poultry Science Journal*, 57, 29–48. <https://doi.org/10.1079/WPS20010004>
- Velásquez, L., Cruz-Tirado, J. P., Siche, R., & Quevedo, R. (2017). An application based on the decision tree to classify the marbling of beef by hyperspectral imaging. *Meat Science*, 133, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.06.002>
- Watson, R., Polkinghorne, R., & Thompson, J. M. (2008). Development of the meat standards Australia (MSA) prediction model for beef palatability. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48, 1368. <https://doi.org/10.1071/EA07184>
- Westerhuis, J. A., Hoefsloot, H. C. J., Smit, S., Vis, D. J., Smilde, A. K., van Velzen, ... van Dorsten, F. A. (2008). Assessment of PLSDA cross validation. *Metabolomics*, 4(1), 81–89.
- Williams, P. (2014). The RPD statistic: A tutorial note. *NIR News*, 25, 22–26. <https://doi.org/10.1255/nirn.1419>
- Wilson, R., Nadeau, K., Jaworski, F., Tromberg, B., & Durkin, A. (2015). Review of short-wave infrared spectroscopy and imaging methods for biological tissue characterization. *Journal of Biomedical Optics*, 20, 30901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.20.3.030901>
- Wold, J. P., Solberg, L. E., Gaarder, M.Ø., Carlehøg, M., Sanden, K. W., & Rødbotten, R. (2022). In-line estimation of fat marbling in whole beef striploins (longissimus lumborum) by NIR hyperspectral imaging. A closer look at the role of myoglobin. *Foods*, 11(9), 9. <https://doi.org/10.3390/foods11091219>
- Wold, S., Antti, H., Lindgren, F., & Öhman, J. (1998). Orthogonal signal correction of near-infrared spectra. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 44(1), 175–185. [https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(98\)00109-9](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(98)00109-9)
- Yang, S., & Berdine, G. (2017). The receiver operating characteristic (ROC) curve. *The Southwest Respiratory and Critical Care Chronicles*, 5(19), 19. <https://doi.org/10.12746/swrccc.v5i19.391>
- Zhang, F., Kang, T., Sun, J., Wang, J., Zhao, W., Gao, S., ... Ma, Q. (2022). Improving TVB-N prediction in pork using portable spectroscopy with just-in-time learning model updating method. *Meat Science*, 188, Article 108801. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108801>

Chapitre 2 : Prédiction du persillé par acquisition d'images

Au cours de cette thèse, j'ai pu utiliser différents outils pour la mesure du persillé avec comme référence la mesure selon le système MSA. De plus, j'ai eu la chance de collaborer avec une entreprise privée qui développe une caméra pour l'évaluation des carcasses par acquisition d'images. Dans les sections suivantes, je présente cette caméra et son utilisation pour l'évaluation du persillé.

1. Camera Q-FOM™

La caméra Q-FOM™ est une caméra d'une marque danoise, FRONTMATEC qui a été conçue pour l'évaluation rapide, facile et intuitive de différents paramètres au niveau de la noix d'entrecôte, que ce soit en chambre froide ou aux postes de classement. Cette caméra est dotée d'un scanner de codes-barres 1D/2D intégré, d'un viseur de caméra et de poignées munies de boutons physiques à portée de main. Plus de 200 carcasses par heure peuvent être classées pour le persillé, la surface de la noix, la couleur, ainsi que l'épaisseur de gras selon la méthodologie MSA. Son écran tactile peut être utilisé pour une saisie manuelle des mesures du pH, de la température, de l'ossification, etc. Avec la connectivité Bluetooth, certains types de pH-mètres ou de thermomètres peuvent être connectés à la caméra pour un enregistrement automatique de ces paramètres.



1.1. Flux et enregistrement des données

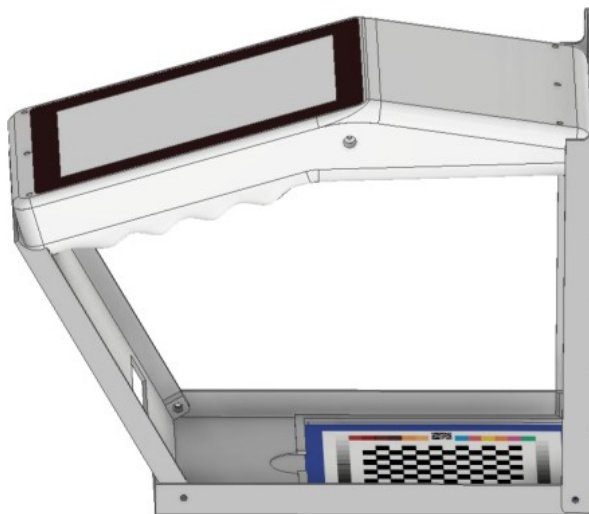
La caméra Q-FOM™ Beef est équipée à la fois d'une connectivité Wi-Fi et Ethernet. Les options au sein de la caméra peuvent permettre d'avoir une liste complète des identifiants et des données des carcasses prêtes à être classées provenant de l'abattoir vers la caméra. Inversement, les images

acquises des entrecôtes classées, les résultats des classements et les identifiants des animaux peuvent être automatiquement renvoyés des caméras vers le système de production.

1.2. Autonomie

La caméra Q-FOM™ Beef est alimentée pendant son fonctionnement par un câble Ethernet (aux postes de classement) ou par les batteries internes qui ont été rechargées avant l'opération par l'alimentation via Ethernet. Pour une capacité de batterie supplémentaire, une batterie externe est également disponible.

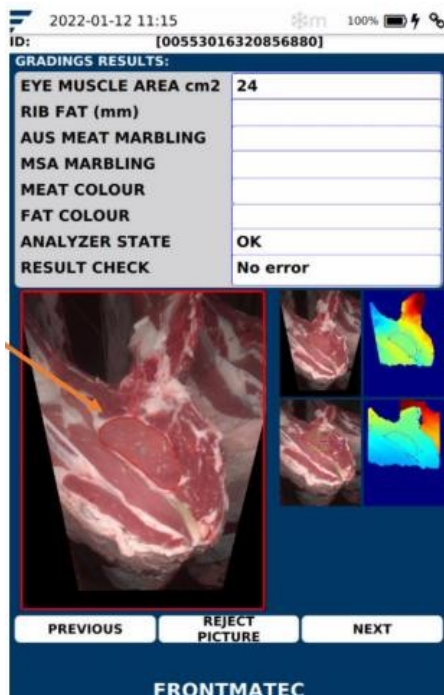
1.3. Mode opératoire



- Avant chaque acquisition, une calibration doit être faite en début et en fin de journée d'acquisitions.
- L'objectif est de valider la géométrie et la couleur et vérifier que l'appareil est prêt pour utilisation.
- La calibration est valable pendant 24 heures.



- Il est possible de faire le choix de l'opérateur
- Après avoir fait ce choix, la gâchette droite est appuyée pour activer le scanner de code barre
- Si le code barre est validé, il est possible de procéder à l'acquisition d'images

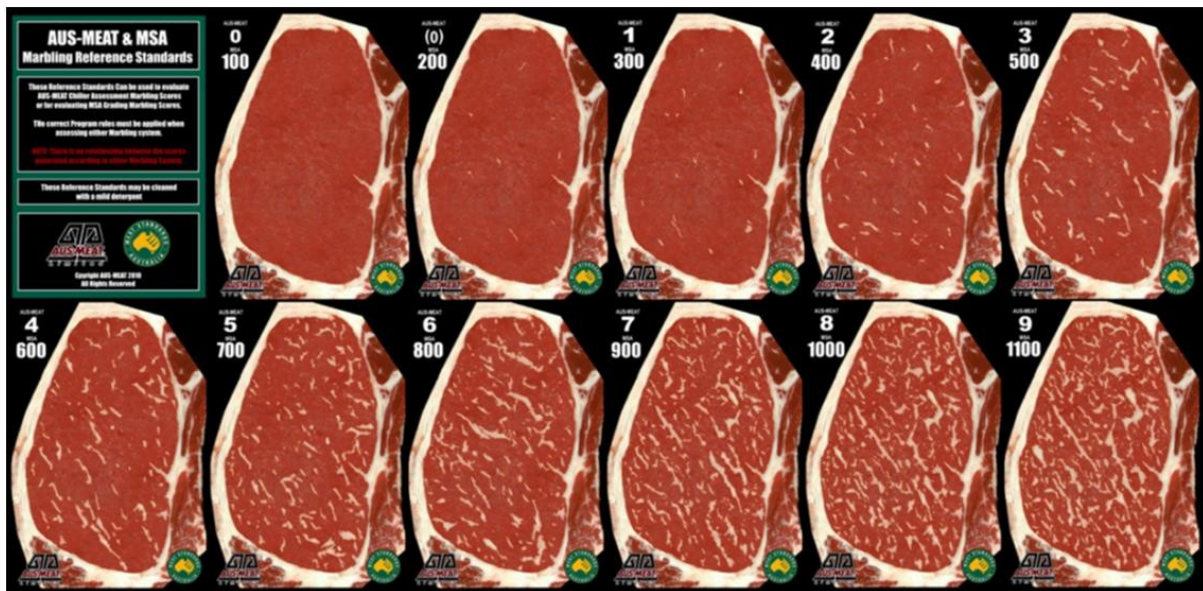


- Lors de l'acquisition de l'image, un trapèze s'affiche lorsque le mode de capture d'image est activé :
 - Trapèze vert = la distance et l'angle par rapport à la surface de coupe sont corrects
 - Trapèze rouge = la distance et l'angle ne sont pas corrects et l'image peut être rejetée.
- Lors de l'acquisition de l'image, la caméra doit être maintenue fixe pour ne pas avoir des images floues.
- Après l'acquisition, il faut vérifier que toutes les zones d'intérêt sont visibles
- Il faut également évaluer le contour de la zone segmentée du faux-filet et évaluer la carte de profondeur de la zone segmentée

Au cours de cette thèse, la caméra portable Q-FOM™ Beef a été utilisée afin d'évaluer ses performances pour prédire les scores de persillé MSA entre la 5^{ème} et la 6^{ème} côte.

MATERIEL ET METHODES

Les scores de persillé MSA ont été déterminés visuellement à l'aide d'une grille sur une échelle de 100 à 1190. Deux évaluateurs formés à la méthode MSA ont participé à cette étude, dont l'un était un classificateur expert.



Un total de 285 carcasses a été évalué dans la chambre froide par ces 2 classificateurs. Ensuite, 779 images des mêmes carcasses ont été acquises avec la caméra Q-FOM Beef (soit entre 2 et 3 images par carcasse).

Pour être accrédité en Australie, les exigences sont que ≥ 49 % des échantillons doivent être dans une plage de 50 points de score de persillé MSA par rapport à l'évaluateur expert, ≥ 79 % des échantillons doivent être dans une plage de 100 points de score de persillé MSA par rapport à l'évaluateur expert et ≥ 97 % doivent être dans une plage de 200 points de score de persillé MSA par rapport à l'évaluateur expert.

RESULTATS

Le R^2 de prédiction entre les scores de l'évaluateur expert et du deuxième évaluateur était de 0,78 avec un RMSE de 47,9 points de persillé MSA. La comparaison entre les évaluateurs dans cette étude a montré que 75,9 % étaient dans une plage de 50 points de score de persillé MSA par rapport à l'évaluateur expert, 97,1 % étaient dans une plage de 100 points de score de persillé MSA et 100 % étaient dans une plage de 200 points de score de persillé MSA. Cela indique que les évaluateurs ont obtenu des résultats acceptables en termes de répétabilité lors de la comparaison de leurs scores d'évaluation.

Dans une première analyse avec les 285 carcasses, un modèle a été développé en utilisant les scores de persillé MSA provenant du classificateur expert comme référence pour les 779 images capturées. Ce modèle a un R^2 de prédiction de 0,75 et un RMSEP (Root mean Square Error of Prediction – Racine Carrée de l'Erreur Moyenne de Prédiction) de 44,9 points de score de persillé MSA.

Dans une deuxième analyse, un sous-ensemble (N = 124) des 285 carcasses a également été évalué à l'écran par l'évaluateur expert. Le R^2 de prédiction entre les scores de persillé MSA en chambre froide et à l'écran était de 0,78 avec un RMSE de 48,7. La comparaison entre les évaluations en chambre

froide et à l'écran a montré que 79,8 % étaient dans une plage de 50 points de score de persillé MSA, 96,8 % étaient dans une plage de 100 points de score de persillé MSA et 100 % étaient dans une plage de 200 points de score de persillé MSA. Cela suggère que l'évaluation à l'écran serait une méthode acceptable à utiliser pour le développement d'un modèle d'étalonnage du persillé, bien que des investigations supplémentaires seraient nécessaires pour vérifier l'exactitude de cette hypothèse.

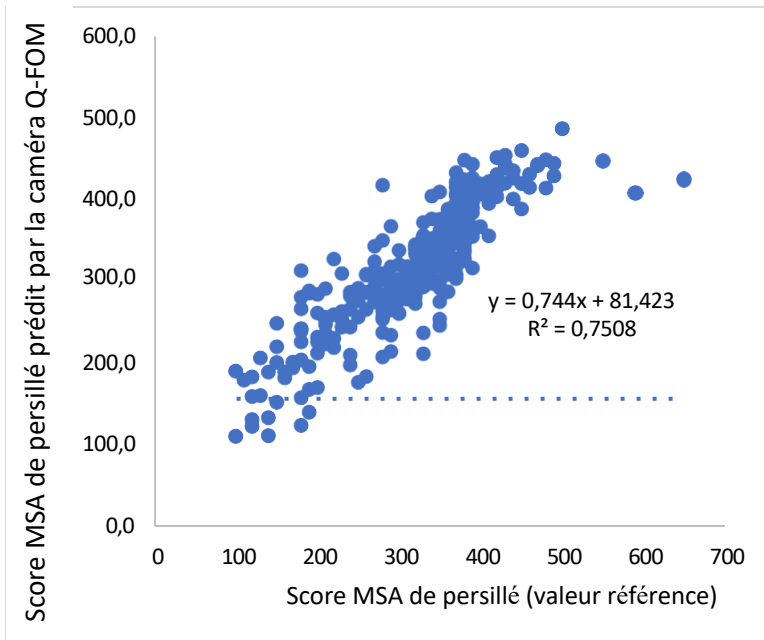


Figure 1 : Corrélation entre les scores de persillé mesurés par le classificateur de référence et les scores de persillé prédits par la caméra Q-FOM™

DISCUSSION ET COMPARAISON DES DEUX OUTILS DE MESURE

Le spectromètre portable SCiO et la caméra Q-FOM™ ont le potentiel de prédire les scores de persillé selon la méthode MSA sur la noix de côte de l'animal. Le principe de mesure est différent pour chaque outil (analyse d'image pour la caméra Q-FOM™ et spectrométrie infrarouge pour le SCiO) et chaque outil possède des fonctionnalités distinctes qui se traduisent par des avantages ou des faiblesses spécifiques (Tableau 9).

La caméra Q-FOM™ a une forte autonomie grâce à sa batterie tandis que le SCiO a une très faible autonomie et doit impérativement être utilisé avec un accumulateur de charge. Au début d'une journée de mesure, si chacun des outils a une batterie pleine, le premier outil à se décharger sera le SCiO. La caméra Q-FOM™ possède également une batterie externe même si celle-ci est toutefois bien plus volumineuse qu'un accumulateur de charge classique.

Le SCiO est plus convivial et facile à utiliser que la caméra Q-FOM™. Il permet une saisie directe de l'identification de l'animal via l'application. L'identification des animaux dans le cas de la caméra Q-FOM™ se fait par la lecture du code QR.

La caméra Q-FOM™ présente un niveau plus élevé de complexité lors de la prise en main car effectuer une lecture prend plus de temps, notamment en ce qui concerne la calibration, la lecture du code QR, la saisie des informations de l'utilisateur effectuant la mesure, et la validation de l'image. Toutes ces étapes sont néanmoins importantes. Tous ces éléments conduisent à considérer que la prise en main est plus facile pour le SCiO et plus faible pour la caméra Q-FOM™.

Les différences d'encombrement pour les appareils (plus élevé pour la caméra Q-FOM™ et plus faible pour le SCiO) conduisent également à une utilisation plus facile du SCiO sur la chaîne de production.

Lorsqu'une image de la surface de la noix est acquise, le persillé peut être évalué sur l'entièreté de la noix avec une caméra tandis que dans le cas d'un spectromètre portable comme le SCiO notamment, le persillé est évalué à différents points de la noix et une moyenne est obtenue à partir de ces points d'acquisitions. Ceci pourrait constituer une perte d'information et ainsi rendre les prédictions moins représentatives. Pour les mêmes raisons, la répétabilité de la caméra Q-FOM™ est plus élevée.

L'utilisation de la spectrométrie proche infrarouge sur des échantillons de viande intacte est influencée par la nature même de l'échantillon. En raison de sa nature hétérogène, des interférences peuvent survenir en raison de la dispersion de la lumière. Ces interférences confèrent au SCiO le potentiel de fournir des informations sur les taux de protéines, de pigments ou de minéraux par exemple. De plus, lors de l'acquisition d'images, des reflets de lumière peuvent également être présents. Les images acquises par caméra ne sont pas influencées par les conditions environnementales telles que la température ou le niveau d'humidité. Dans les conditions de faible éclairage, la caméra Q-FOM™ dispose de lampes LED et d'un filtre polarisant intégré.

L'acquisition d'images avec la caméra Q-FOM™ est plus longue en raison d'un nombre d'étapes plus élevé (calibration de l'outil avant l'acquisition, choix initial de l'opérateur de la caméra, acquisition de l'image et validation de l'image). L'acquisition d'image pour la caméra Q-FOM™ doit être faite avec un angle adapté. L'utilisation du SCiO est plus rapide car après la calibration initiale, elle ne nécessite que l'identification des animaux et l'acquisition des spectres qui se fait en quelques millisecondes.

La caméra Q-FOM™ est basée sur une technologie plus avancée et pourrait nécessiter l'implication d'experts pour la maintenance. Par ailleurs, dans le cas du SCiO, les performances de la source de lumière sont susceptibles de diminuer au fil du temps, ce qui lui confère une durabilité plus faible dans le temps.

Comme expliqué plus haut, même si nous n'avons pas pu tester cette fonctionnalité, la caméra Q-FOM™ peut être connectée à d'autres appareils (pHmètre ou thermomètre) facilitant la combinaison des informations contrairement au SCiO qui n'est conçu que pour effectuer une seule mesure.

Il y a une différence notable de prix entre ces appareils. La caméra Q-FOM™ est la plus coûteuse, avec un prix d'environ plusieurs dizaines de milliers d'euros, tandis que le SCiO est dans la gamme de quelques centaines d'euros.

Tableau 1 : Avantages et faiblesses relatifs des deux outils de mesure de persillé (Basé sur les évaluations de 3 utilisateurs) : + : peu avantageux ; ++ : avantageux ; +++ : Très avantageux

Critères / Appareil	Q-FOM™	SCiO
Autonomie	++	+
Facilité de prise en Main	+	+++
Utilisation directement sur la chaîne de production	+	+++
Identification des animaux	+++	++
Représentativité et répétabilité des résultats	+++	+
Maîtrise des interférences	+++	+
Rapidité de mesure	+	+++
Facilité de maintenance	+	++
Durabilité dans le temps	+++	+
Utilisation avec d'autres appareils	+++	+
Accessibilité en termes de prix	+	++
Performance du modèle (R ² de validation)	0.75*	0.46-0.59*

*Dans des conditions expérimentales différentes

Chapitre 3 : Marqueurs génétiques

MATÉRIEL ET MÉTHODES :

1. Sélection des marqueurs génétiques :

Dans le cadre de cette étude, la première étape consista en la sélection minutieuse de marqueurs génétiques pertinents. Un ensemble initial de 443 marqueurs a été compilé à partir de diverses sources, notamment cinq publications antérieures de recherche et les résultats obtenus dans le cadre du projet européen BovReg. L'objectif premier de cette sélection était de rassembler un ensemble de marqueurs appropriés pour les futures études portant sur le persillé. Les marqueurs sélectionnés ont été rajoutés sur une nouvelle puce de génotypage (puce EuroGMD v4).

	Nombre de marqueurs	Taux d'assignation	Monomorphe	MAF	GWAS
Bedhane	16	0	3	0	13
BovReg	257	25	69	22	141
LealGut	179	15	42	11	111
Saatchi	3	0	0	0	3
Srikanth	4	0	0	0	4
Wang	15	1	6	2	6
Total	443	41	120	35	259

2. Filtrage des marqueurs :

Cependant, il a fallu effectuer un filtrage pour identifier les marqueurs qui présentaient une corrélation significative avec les phénotypes liés au persillé à la 5^e et 10^e côte. Plusieurs critères de filtrage ont été appliqués à ces 443 marqueurs afin de ne conserver que les plus pertinents pour les analyses ultérieures.

- Taux d'assignation (Call Rate) $\geq 80\%$: Ce premier critère exigeait que les marqueurs aient un taux d'assignation d'au moins 80%. En d'autres termes, ils devaient être correctement génotypés pour au moins 80% des individus de l'échantillon. Cette condition garantissait la fiabilité des données génétiques utilisées dans l'étude.
- Fréquence de l'allèle mineur (MAF) $\geq 1\%$: Le deuxième critère exigeait que la fréquence de l'allèle mineur soit d'au moins 1% parmi les animaux de l'échantillon. Cette condition visait à s'assurer que les marqueurs sélectionnés étaient présents à une fréquence minimale parmi les individus étudiés, ce qui était essentiel pour obtenir des résultats significatifs.

- Filtrage des marqueurs monomorphes : ceci constitue une étape de filtrage des données pour exclure les marqueurs génétiques qui ne montrent aucune variation au sein de la population étudiée.

3. Identification des marqueurs significatifs :

Après l'application de ces filtres, seuls 259 des 443 marqueurs initiaux ont satisfait aux critères de sélection. Ces 259 marqueurs ont ensuite été utilisés pour des analyses d'association approfondies pour évaluer leur corrélation avec le persillé évalué selon la méthode MSA.

RESULTATS

Seuls 17 des 259 marqueurs ont montré une association statistiquement significative avec au moins l'un des phénotypes liés au persillé, avec un seuil de *P*-value inférieur à 5%.

Résultats des analyses d'association

Marqueur	Distance	A1	A2	Persillé AUSMEAT 5 ^e côte	Persillé AUSMEAT 10 ^e côte	Persillé MSA 5 ^e côte	Persillé MSA 10 ^e côte
MAR01		G	A	0,0558556	0,028646	0,0787916	0,0290565
MAR02	20	G	A	0,0558556	0,028646	0,0787916	0,0290565
MAR03	5	A	G	0,0558556	0,028646	0,0787916	0,0290565
MAR04	19	A	G	0,0558556	0,028646	0,0787916	0,0290565
MAR05		G	A	0,152183	0,038214	0,405702	0,103787
MAR06		C	G	0,40895	0,087618	0,387781	0,0108817
MAR07	31478926	A	G	0,0367904	0,053011	0,17584	0,0404501
MAR08	13789769	C	G	0,0094474	0,303021	0,003378	0,402703
MAR09		G	A	0,0293872	0,505838	0,0346186	0,992129
MAR10		A	G	0,10319	0,171152	0,0335785	0,273511
MAR11	48204	A	G	0,0688273	0,267634	0,0393519	0,122189
MAR12	651760	C	A	0,0219253	0,976432	0,108662	0,17248
MAR13	4004378	A	G	0,39929	0,076709	0,421823	0,0187689
MAR14	166	G	A	0,39929	0,076709	0,421823	0,0187689
MAR15		T	A	0,147866	0,065109	0,203905	0,0056357
MAR16		A	G	0,378477	0,017507	0,98765	0,08114
MAR17		G	A	0,636259	0,185962	0,790192	0,0495201

Les marqueurs significatifs sont répartis sur plusieurs chromosomes, notamment les BTA 3, 6, 7, 11, 12, 15, 20, et 26. Parmi ces marqueurs, dix des dix-sept sont situés dans des régions introniques de gènes codant pour des protéines, ce qui signifie qu'ils ne modifient pas directement la séquence des protéines, mais ils peuvent avoir un impact sur leur régulation. Six sont situés dans des régions intergéniques, ce qui suggère la possibilité d'une régulation à distance de gènes voisins. Cependant, un

marqueur spécifique sur le BTA 20 (MAR16) a été identifié comme ayant une conséquence plus significative, entraînant une modification de la séquence protéique et potentiellement de la fonction de la protéine correspondante.

Les gènes associés à ces marqueurs sont listés dans le tableau ci-dessous :

Gene stable ID	BTA	Gene start (bp)	Gene end (bp)	Strand	Gene description	Gene name	Gene type
ENSBTAG00000000634	3	116959554	117005443	1	melanophilin	<i>MLPH</i>	protein_coding
ENSBTAG00000046413	6	30780273	31540156	-1	glutamate ionotropic receptor delta type subunit 2	<i>GRID2</i>	protein_coding
ENSBTAG00000019140	7	59323453	59399497	1	serine peptidase inhibitor Kazal type 5	<i>SPINK5</i>	protein_coding
ENSBTAG00000009017	11	95513842	95538735	-1	nuclear receptor subfamily 5 group A member 1	<i>NR5A1</i>	protein_coding
ENSBTAG00000017032	12	23297835	23449177	-1	FRAS1 related extracellular matrix 2	<i>FREM2</i>	protein_coding
ENSBTAG00000032782	15	37342401	37482577	-1	INSC spindle orientation adaptor protein	<i>INSC</i>	protein_coding
ENSBTAG00000019595	20	35967736	36272653	-1	EGF like, fibronectin type III and laminin G domains	<i>EGFLAM</i>	protein_coding

DISCUSSION

Les résultats de cette étude révèlent des associations significatives, bien que de très faible magnitude. Cette faible significativité peut être attribuée à la taille limitée de l'échantillon, comprenant moins de 500 individus.

Les résultats préliminaires de cette analyse ont confirmé certaines associations précédemment identifiées, notamment celle du variant missense dans le gène *EGFLAM* avec le persillé évalué à la 10^e côte. (*P*-value de 0,017). Il est important de noter que ce variant avait déjà été observé dans une étude précédente menée par Srikanth et al. (2020) sur la race Hanwoo, où il avait obtenu une *P*-value significative de 1,08E-05.

De manière intéressante, le marqueur le plus significatif était associé au gène *EGFLAM* (EGF-like fibronectin and laminin G). Ce marqueur est un marqueur missense. Ce dernier SNP G/A change un acide aminé Asp753Asn (exon 17) du gène *EGFLAM*. Le gène *EGFLAM* et le gras intramusculaire avait précédemment été mise en évidence chez le porc dans une étude menée par Meadus et al. en (2018). Cette découverte renforce la pertinence de nos résultats et suggère des mécanismes génétiques similaires chez différentes espèces animales.

CONCLUSION

En conclusion, cette étude a exploré le potentiel d'incorporer des marqueurs génétiques dans le système de classification de viande bovine MSA pour améliorer la prédiction de la qualité de la viande, en mettant particulièrement l'accent sur le persillé. Malgré cette limitation à un seul critère considéré, les résultats préliminaires de notre analyse ont confirmé plusieurs associations précédemment identifiées, notamment celle du variant missense dans le gène *EGFLAM* avec l'évaluation du persillé à la 10^e côte. Cela ouvre la voie à des recherches futures visant à affiner le système MSA en intégrant davantage de données génétiques pour une évaluation plus précise du persillé de la viande bovine.

Conclusion

En conclusion, les résultats de nos travaux soutiennent au moins partiellement l'hypothèse selon laquelle l'utilisation d'outils portables comme technique d'analyse pour prédire la note de persillé de la viande bovine peut potentiellement réduire les coûts et la dépendance aux classificateurs humains dont les mesures sont moins objectives, et ainsi augmenter la répétabilité des données par rapport au système MSA tel qu'utilisé actuellement.

Parmi les outils utilisés, la caméra Q-FOM se distingue par son autonomie élevée, sa facilité d'identification des animaux grâce à un scanner de code barre, sa possibilité d'être interopérable avec le système d'information au sein de l'entreprise, sa possibilité d'être connectée à d'autres outils et ses bonnes performances techniques, ce qui en fait un choix idéal pour une utilisation efficace et pratique malgré son prix élevé.

Le SCiO, quant à lui, se distingue par sa facilité d'utilisation sur la chaîne de production mais ses performances sont inférieures en termes d'autonomie et de durabilité dans le temps par rapport à la caméra Q-FOM™ et aussi en termes de performances techniques (représentativité, répétabilité, fiabilité de la prédiction).

Par ailleurs, un marqueur génétique a pu être identifié avec un effet potentiellement significatif donnant ainsi des pistes d'incorporation des gènes liés à la qualité au sein d'un système de prédiction de la viande bovine.

Il est important de souligner que l'objectif des professionnels de la viande bovine intéressés par le persillé est d'avoir des mesures qui soient à la fois faciles à acquérir (en termes de temps et de coût) et répétables ou, à minima, plus répétables et plus fiables que celles obtenues par des classificateurs humains. Ces outils de mesure constituent donc un moyen prometteur d'améliorer l'efficacité et la précision de l'évaluation du persillé, et donc de réduire la subjectivité ou la variabilité liées aux évaluations manuelles. Cependant, des améliorations sont encore nécessaires pour atteindre une répétabilité élevée et une bonne fiabilité des résultats pour répondre pleinement aux besoins de la filière. Des recherches continues dans ce domaine seront donc essentielles pour renforcer davantage la validité et l'applicabilité de ces outils de mesure dans la filière viande bovine. Toutefois, dans le cas d'approches simples comme par exemple sélectionner les viandes les plus persillées (au-delà d'un seuil défini à l'avance), les deux outils instrumentaux étudiés peuvent potentiellement répondre à la demande comme cela a été clairement démontré pour le SCiO.

F. IMPLEMENTATION DE LA METHODOLOGIE DE PREDICTION

Introduction

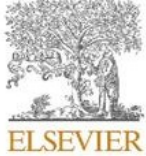
Les données acquises sur les différents critères de qualité peuvent parfois être hétérogènes rendant ainsi les bases de données difficilement interopérables. De plus ceci rendrait l'accréditation des différents outils de mesures difficile si les termes liés à la qualité ne sont pas définis de la même manière. Ceci pourrait donc ralentir l'implémentation d'une méthodologie standardisée à l'échelle internationale comme c'est le souhait de la Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-ONU). La filière bovine doit donc faire face à un enjeu important, celui d'avoir un consensus de définitions sur les critères à mesurer, et utiliser ces critères pour pouvoir prédire la qualité gustative de la viande bovine.

Cet enjeu entre également dans les objectifs généraux de la science ouverte qui vise à rendre les travaux de recherches et les bases de données facilement accessibles. C'est donc dans ce cadre de l'approche de la "Science ouverte" que notre objectif a été de développer un thésaurus de la viande sur la base du dictionnaire de la viande préalablement publié par l'Académie de la Viande. Ce thésaurus fournira des termes et des définitions précises spécifiques au secteur de la viande en français et en anglais, et permettre de rendre ces termes librement accessibles à la communauté professionnelle et scientifique de la viande. Un thésaurus est une liste organisée de concepts obéissant à des règles terminologiques et liés entre eux par des relations sémantiques (hiérarchiques, associatives ou d'équivalence).

Nous présentons dans cette partie notre approche pour la construction et la publication en ligne du Thésaurus de la viande grâce à un travail collaboratif entre des spécialistes de l'ingénierie des connaissances et des données d'une part, et des spécialistes de la science et de la technologie de la viande d'autre part. L'hypothèse que nous avons posée pour cette partie est que l'utilisation d'un thésaurus de la viande en ligne, regroupant des définitions standardisées et harmonisées des critères de mesure de la qualité, facilitera l'interopérabilité des bases de données hétérogènes générées par les méthodes instrumentales basées sur des capteurs. Cela permettra d'améliorer la cohérence des approches de biologie prédictive et d'optimiser l'analyse des grandes quantités de données de manière efficace et fiable.

Construction du thésaurus de la viande

Meat Science 192 (2022) 108849



Contents lists available at ScienceDirect

Meat Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/meatsci



A new semantic resource responding to the principles of Open Science: The meat thesaurus as an IT tool for dialogue between sector actors

Moïse Kombolo Ngah^a, Jérémy Yon^b, François Landrieu^c, Brigitte Richon^c, Sophie Aubin^b, Jean-François Hocquette^{a,*}

^a INRAE, Université Clermont Auvergne, VetAgro Sup, UMRH, 63122, Saint-Genès-Champanelle, France

^b INRAE, DipSO, 42 rue Georges Morel, 49070 Beaucozoué, France

^c Académie de la Viande, 207 rue de Bercy, 75012 Paris, France

ARTICLE INFO

Keywords:
Meat
Dictionary
Thesaurus
Ontology

ABSTRACT

Nowadays, it is important to make the results of scientific research accessible in a simple and understandable way according to the Open Science policy. This movement uses tools to enhance findability and interoperability of data. This paper describes the transformation of the meat dictionary published by the French Meat Academy as a book into a machine actionable and freely accessible terminological resource based on the SKOS standard format. This thesaurus contains 1567 concepts describing the meat production chain. This work was carried out by experts in semantic web, meat biology and meat vocabulary. This thesaurus can be used to index articles, journals and datasets, thus facilitating consultation; it can also be used to facilitate interoperability of the indexed datasets and provide contextual definitions for building ontologies, i.e. formal descriptions of knowledge for reasoning on data. The thesaurus can be useful to enrich other vocabularies with new knowledge, such as French specificities in terms of meat cuts or definitions.

1. Introduction

Around the world, meat industries have become highly diversified with new products and technologies. Despite a decline in consumption in Europe, World meat production continues to grow globally, driven by increased population (Hocquette & Chatellier, 2011). These changes have brought a wide variety of products and manufacturing processes for which it has become necessary to have definitions that are as clear as possible (Seman et al., 2018) and regularly updated. Indeed, some terms used in the sector remain ambiguous and their usage may also vary between countries or between scientists, consumers, journalists or industrial actors (Seman et al., 2018). This lack of consensus on shared definitions can have an impact on research work, particularly for predictive biology approaches (Hocquette et al., 2020). The need for clear definition is also essential for commercial trade, and particularly for international trade where local source or purchase descriptions may differ widely. The word meat is itself the subject of controversy with the appearance of meat substitutes, notably “cultured meat”, which some prefer to call “muscle fibres” or “cultured muscle” (Chriki & Hocquette, 2020).

Various resources have therefore been created with the aim of clarifying the vocabulary of the field. For instance, the UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) provides standardised descriptions of cuts from different butchery animals (www.uncece.org/trade/wp7/Meat-Standards) for international meat trade. The Encyclopedia of Meat Sciences (Dikeman & Devine, 2014), designed by an international team of experts, covers various important aspects such as animal husbandry, physiology, slaughter, meat preparation, packaging, welfare, food safety and many others. In France, Georges Chaudieu (Chaudieu, 1970) and Eric Glatre (Glatre, 2008) developed the first meat dictionaries and then the French Meat Academy published the Meat dictionary in 2012 (Dictionnaire de la viande, 2012). The latter contains clear and concise definitions of the names of cuts, professional butchery terms (including utensils), breeds of livestock, as well as technical or peripheral terms, applicable to livestock: cattle, veal, lamb, pork, poultry and game. It also lists the terms relating to the taste and texture of meat, as well as an inventory of some French and international dishes traditionally made with meat. Finally, it contains terms specific to the meat trade as well as French specificities of meat such as cuts and organisations of the sector. It contains 1357 entries, it is available as a

* Corresponding author.

E-mail address: jean-francois.hocquette@inrae.fr (J.-F. Hocquette).

<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108849>

Received 16 February 2022; Received in revised form 7 May 2022; Accepted 11 May 2022

Available online 20 May 2022

0309-1740/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

book in French and English and also includes some terms in Spanish. Its most recent version was edited in 2019. Although they are well-known references, these dictionaries have been published in paper form and are therefore limited to human reading. The widespread use of digital approaches in research as well as in industry is creating new needs that require the use of semantic resources at the heart of information systems.

In the current context of Open Science development, with its challenges related to knowledge transfer and innovation, it is more necessary than ever to have terminological repositories that facilitate:

- 1) collaboration between disciplinary and linguistic communities,
- 2) the discovery of information and data from various sources,
- 3) the development of methods and tools for decision support based on the integration of heterogeneous data and domain knowledge. To achieve objectives 2) and 3), these repositories must be available in formats that can be used by a software.

The research communities in agriculture, food and environment are particularly active in the creation and provision of these semantic resources as evidenced by the study conducted by the Agrisemantics working group in the framework of the “Research Data Alliance” (Aubin, Caracciolo, & Zervas, 2017). These scientific communities are now also part of the FAIR approach; a set of principles broken down into actions that make data easier to find, more accessible, more interoperable and therefore more easily re-used (Wilkinson et al., 2016). One of the FAIR principles puts vocabularies as a cornerstone centre of the approach: “I2: Data and metadata use vocabularies that respect the FAIR principles”, I2 being the second principle supporting data interoperability, that is, the ability for a software to exchange and process data with heterogeneous representations as they originate from several information systems. A number of vocabularies for agriculture and food are thus accessible from public portals, including Agroportal (Jonquet et al., 2018) where the Meat thesaurus is exposed. This type of portal facilitates the discovery of existing ontologies and thesauri, the reuse of which helps to harmonise the definitions given to the objects handled by each community.

Among resources publicly available for the agri-food domain, we found the physical and chemical characteristics of beef and pork muscles (<https://bovine.unl.edu/> and <https://porcine.unl.edu/>) and generalist thesauri such as the FAO’s Agrovoc (<http://www.fao.org/agrovoc/fr>) or the National Agricultural Library Thesaurus (<https://agclass.nal.usda.gov/>) (Welcome to the Thesaurus and Glossary, 2022). Another interesting resource is the Languag thesaurus (<https://www.languag.org>), which provides a standardised language to describe food, in particular to classify food products for information retrieval (Languag.TM, 2022). The FoodOn ontology (Dooley et al., 2018), derived from Languag provides a more formal representation of Languag, which allows reasoning to be constructed (FoodOn, 2022). During our research, we were unable to identify a semantic resource that was both precise enough and covering completely our specific needs and that was easily reusable for the meat sector. In the field of meat, let us mention the work of (Pizzuti, Mirabelli, Grasso, & Paldino, 2017; Pizzuti, Mirabelli, Sanz-Bobi, & Gómez-González, 2014) which focused on the construction of ontologies within the framework of the FTTO (Food Track and Trace Ontology) project to represent traceability in the meat industry without, however, making the result accessible and reusable.

In line with the “Open Science” approach, our aim is to convert the

Dictionary of the French Meat Academy, which provides us with terms and precise definitions specific to the meat sector in French and English, into a thesaurus to make these terms and concepts freely available to the professional and scientific meat community. A thesaurus is an “organised authority list of descriptors and non-descriptors that obey their own terminological rules and are linked together by semantic relationships (hierarchical, associative, or equivalence). This list is used to translate concepts expressed in natural language into an unambiguous artificial language” (AFNOR 1981 <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-z47100/regles-detablissement-des-thesaurus-monolingues/fa015919/14806>). The thesaurus is a resource accessible to human readers, with a logical structure and textual definitions. By choosing to represent it using the standard SKOS (Simple Knowledge Organisation System) schema, and to associate rich metadata and identifiers with it, we also make it usable by various computer applications carrying out the indexing of documents, datasets, content annotation, or the display of definitions in context.

In this article, we present our approach to the construction and on-line publication of the Meat Thesaurus through collaborative work between specialists in knowledge and data engineering on one hand and meat science and technology on the other hand.

2. Material and methods

The transformation of the dictionary from its documentary form to a structured thesaurus was carried out in three phases:

- 1) analysis of the data leading to the choice of the standard for representing the information contained in the thesaurus, that is, the SKOS model,
- 2) transformation of the data, carried out semi-automatically, and,
- 3) intellectual and manual work on organising the concepts within the hierarchies.

2.1. Choice of the SKOS model

The creation of the Meat Thesaurus is based on the terms of the Meat Dictionary by the French Meat Academy. The source data file provided was made of two Word documents, including one for French, with 1357 entries and inserts. The inserts were not kept in the resulting thesaurus. The content for English was integrated in a second phase of the project, after the transformation and organisation of the data for French, as the English version was not available at the beginning. Similar though simpler procedures were used for English. In this paper, we will focus on the processing for data in French.

The structure for describing an entry in the source file for French is pretty regular (Fig. 1), which allows some automation of the process, although this is made difficult by the presence of a large number of optional elements. On the first line, the term is followed by its grammatical characteristics (its nature, gender and number) and a definition as in the example shown in Fig. 2. Some entries have one or more synonyms, notes, or a reference to one or more other entries indicated by the mention “Voir” (See). Except from the grammatical information, term properties are prefixes with the “I” (pipe) character. Synonymy is indicated heterogeneously either using the fields “Synonym” or “See” or as part of the definition or the “To got further” information.

```

term (required) nature.gender.number (optional) | definition (optional)
| Pour aller plus loin : (optional)
| Synonyme : (optional)
| Notes : (optional)
| Voir : name (optional, several possible values separated by commas or full stops)
    
```

Fig. 1. Structure of a dictionary entry (Pour aller plus loin = To go further =; Synonyme = Synonym; Notes = Notes; Voir = See).

emboucheur n.m. | Éleveur ou marchand qui pratique l'engraissement du bétail à l'herbe sur des pâtures.
I Synonyme : herbager.
I Voir : Embouche.

Fig. 2. Example of a dictionary entry from the file source in French: "emboucheur" (grass finisher).

Grass finisher/ Emboucheur
 n.
 Livestock producer or trader who fattens livestock on grass in pastures.
See: Grass Finishing.

Fig. 3. Example of a dictionary entry from the file source in English: grass finisher. The equivalent term in French is indicated and preceded by the / character.

Considering the English version of the dictionary, the useful information to retrieve are the English term, its correspondancy in French, its definition and reference to other entries (« See » information) as shown in Fig. 3.

Considering the source data structure and the community practices, we chose the SKOS (Simple Knowledge Organisation System) model, a W3C standard (<https://www.w3.org/>) used to represent simple knowledge organisation systems, typically thesauri (World Wide Web Consortium (W3C), 2022). We will see that choosing a concept-centered representation of the data implies some difficulties when working with a term-centered source (dictionary). The SKOS model is based on RDF (Resource Description Framework), a framework for describing structured data as a graph made of assertions of the form [Subject - Predicate - Object] as shown in Fig. 4.

A unique identifier called a URI is used to reference each concept. The URI is a global identifier, that is, unique throughout the web space. When published, requesting the URI will allow to display or retrieve information on a concept. This identifier is composed of a unique prefix for the thesaurus (here <http://opendata.inrae.fr/ThViande/>) and a unique suffix for each resource described (for example C1 for concept 1).

A partial representation of the SKOS model is shown in Fig. 5. The central object of the model is the concept (*skos:Concept*) which can be seen as a unit of thought corresponding to a type of real-world object (e.g. the notion of "herd") or to an abstract entity (e.g. the notion of "meat quality"). It is designated by a preferred term (*skos:prefLabel*) in one or more languages and possibly alternative terms (*skos:altLabel*). The *skos:definition* property is used to add a textual definition to the concept. Unspecified relationships between two concepts can be encoded in the *skos:related* relation, which is equivalent to "see also" like between the concepts "grass finisher" and "grass finishing" in our example. The whole thesaurus is a *skos:ConceptScheme*, where concepts are organised in a hierarchy using the relationships *skos:narrower* and *skos:broader*. For example, [livestock producer] *skos:narrower* [grass finisher] means that "grass finisher" is a specific concept of "livestock producer". This hierarchical structuring did not exist in the dictionary and was built with the experts as discussed in section 3.

2.2. Conversion of the dictionary from its textual form into a structured and formalized resource

The work for the conversion of the dictionary into the thesaurus includes the recovery and formalisation of data (the two first elements in Fig. 6) which precedes the structuring phase (the third element).

Much of the retrieval and transformation work was done semi-automatically and required the following:

- An expertise in using regular expressions that we applied in a simple text editor (Notepad++) in order to isolate the dictionary entries from each other (1 per line) and to organise their respective information in a tabular format;
- OpenRefine, a free software for data cleaning and transformation. It allowed us to identify and massively correct some encoding errors, and to refine the information segmentation of each entry. Finally, the RDF extension of OpenRefine was used to transform the data from a tabulated format to the standardised SKOS representation in RDF/XML. Openrefine allows the definition of a mapping procedure from table cells to RDF predicates.

The data was finally uploaded into *Webstudio*, a vocabulary editor providing an ergonomic interface for experts to curate and organise the concepts into a hierarchy.

2.3. Concept curation and organisation

This part of the work was entirely manual and consisted in moving from a term-centered (dictionary) to a concept-centred (thesaurus) representation, and in proposing a thematic organisation. This task required in-depth knowledge of the field, which was provided by four experts, two from the French Meat Academy and two from INRAE (French National Research Institute for Agriculture, Food and Environment). The experts from the French Meat Academy provided knowledge on cuts, cooking, trades and specificities of the sector as well as on the different breeds of meat animals. The INRAE experts provided knowledge on muscle biology. About 32 meetings of 2 h each were held for this work. In some cases, the experts relied on other knowledge sources such

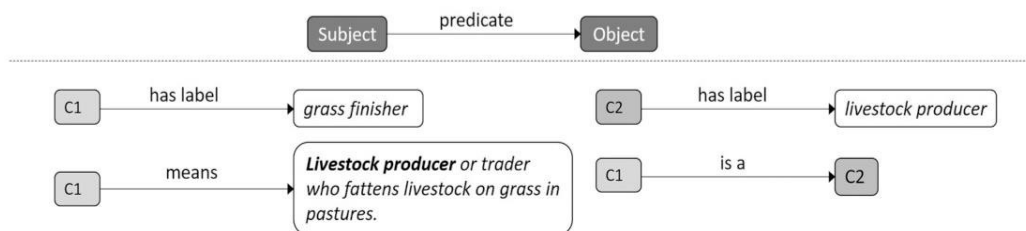


Fig. 4. Examples of information representation in the form [Subject - Predicate - Object] or RDF triplets.

Excerpt from the meat thesaurus

- o meat professions
 - o livestock producer
 - o breeder
 - o **grass finisher**
 - o fattener
 - o breeder
- o élevage
 - o cattle breeding
 - o pail
 - o cowboy
 - o **grass finishing**

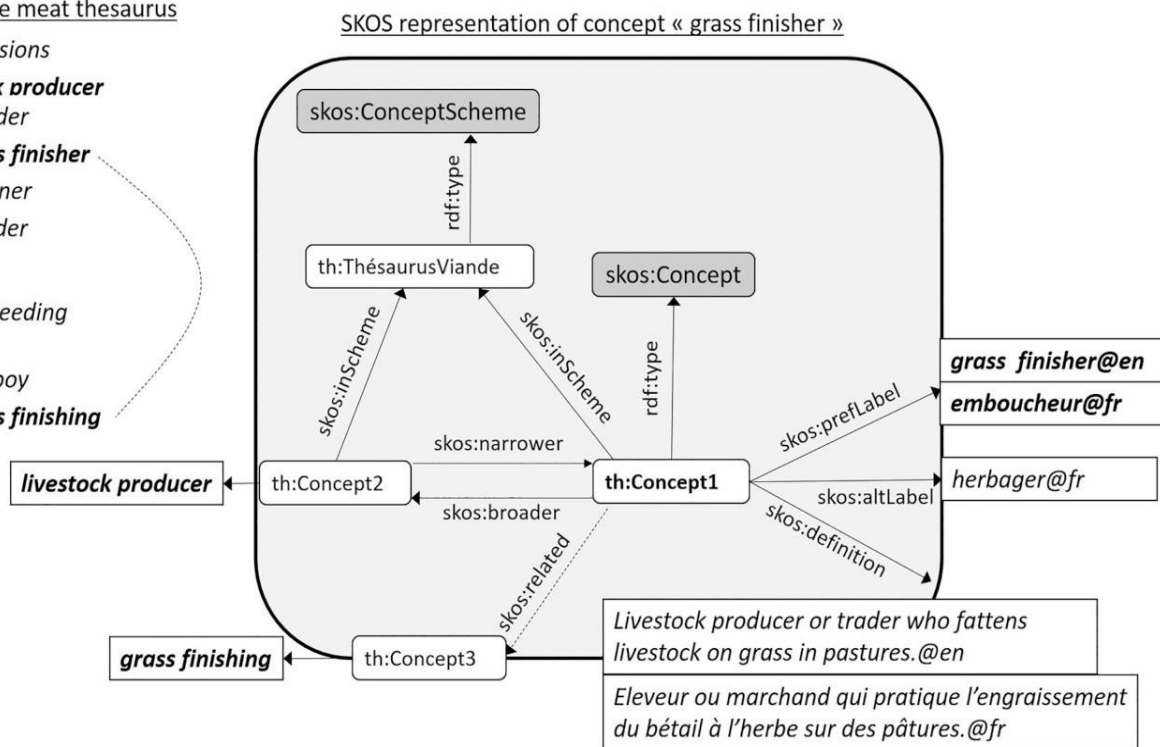


Fig. 5. Thesaurus data model based on SKOS.

from a dictionary...

...to a thesaurus

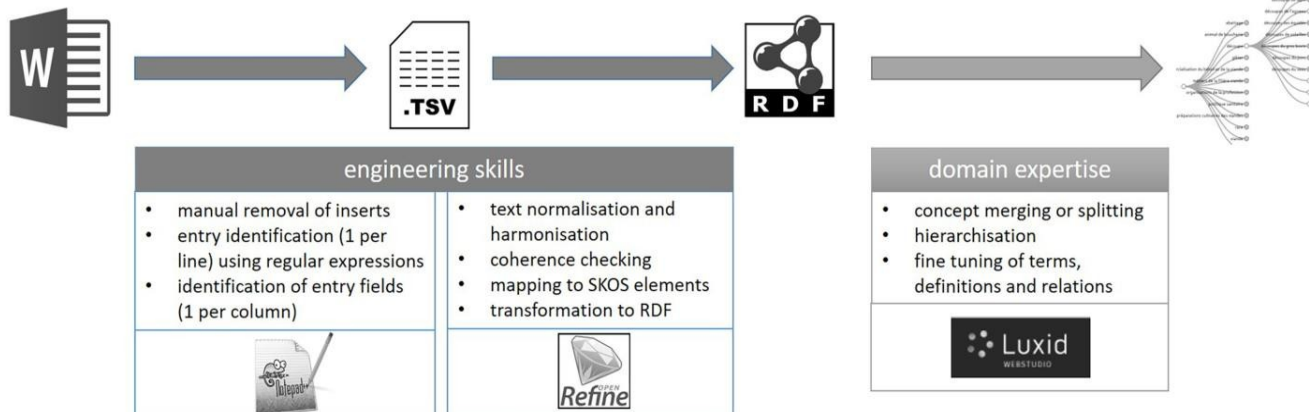


Fig. 6. Thesaurus construction process.

as the AHOL ontology (Salaun, Yon, Le Bail, & Reichstadt, 2020) or the Animal Science Dictionary by CIRAD (Meyer, 2022).

When transforming the Meat dictionary into the Meat thesaurus, a major challenge was to either properly group terms into classes of synonyms, i.e. concepts, or on the opposite, split dictionary entries into unequivocal notions. Grouping terms into concepts was facilitated by either the “Voir” (See) information on entries with no definition or explicit mentions of synonymy in the definition as shown in Fig. 7. In some cases, like “cabri”, experts had to select relevant parts of both definitions and merge into a single concept, e.g. “chèvre”.

Conversely, and in order to meet the meaning univocity constraint on SKOS concepts,¹ some dictionary entries had to be split into several concepts and their definition modified accordingly. This is the case for “protein”, the definition of which contained terms and definitions for various types of proteins. Concepts were created for each type of protein with its own definition.

Other concepts have been introduced to meet the needs of a meaningful hierarchy and to ensure a certain consistency within the thesaurus. In particular, the first level concepts (called “top concept” in SKOS) had to be generic enough to constitute thematic categories such

¹ Know more about SKOS constraints: <https://www.w3.org/2004/02/skos/core/guide/2004-11-25.html#secappii>



Fig. 7. Two examples of means to indicate synonymy in the Meat dictionary.

as “breed” or “meat professions”. The ontologies AHOL - Animal Health Ontology for Livestock (<https://www.atol-ontology.com/en/a-ahol/>) (Ahol, 2022) and ATOL - Animal Trait Ontology for Livestock (Le Bail et al., 2014) provided some concepts initially absent from the meat dictionary.

For this first version of the thesaurus, we chose not to introduce poly-hierarchy, an organisation in which a concept can have several generics. While this choice makes the classification work more difficult (because a non-obvious decision has to be made in case of difficult choice), it also makes it more precise (because the best location has to be found). In order to organise the concepts in a hierarchical way, the experts relied on the generic terms already defined or mobilised their own expertise. In most of the cases where a concept could be located at several places in the hierarchy, the more generic solution was chosen. For instance, the branch “butchery animal” was chosen to encompass all animals slaughtered for their meat. A small number of cases were treated differently. For instance, “quarter” could be considered as a specific of “cutting” or of “half-carcass”. In this case, it was decided that it was more relevant to insert this concept under “half-carcass” in order to make its semantics more explicit.

This work was completed by the revision of some definitions more adapted in the context of the thesaurus, or that did not comply with definition writing good practices (Vézina, Darras, Bédard, & Lapointe-

Giguère, 2009). Following the hierarchisation, some *skos:related* (“See”) relations present in the paper dictionary were removed in order to comply with the SKOS model that does not allow associative relations between concepts already in a hierarchical relation, i.e. belonging to the same branch of the thesaurus.

During this expertise work, some concepts were finally discarded from the thesaurus, like “VOF” (“Viande Ovine Française”), “VBF” (“Viande Bovine Française”) and “VPF” (“Viande Porcine Française”), keeping only official labels.

3. Results

The result of this work is a bilingual thesaurus with terms and definitions in French and English, which is made publicly available for reuse in the following link: <http://agroportal.lirmm.fr/ontologies/MEAT-T>. The Meat Thesaurus consists of 1519 concepts organised into 12 branches (or 1st level concepts) which are:

- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| - breed | - livestock production |
| - butchery animal | - meat |
| - culinary preparation of meats | - meat market |
| - cutting | - meat professions |
| - game | - professional organisations |
| - health policy | - slaughtering |

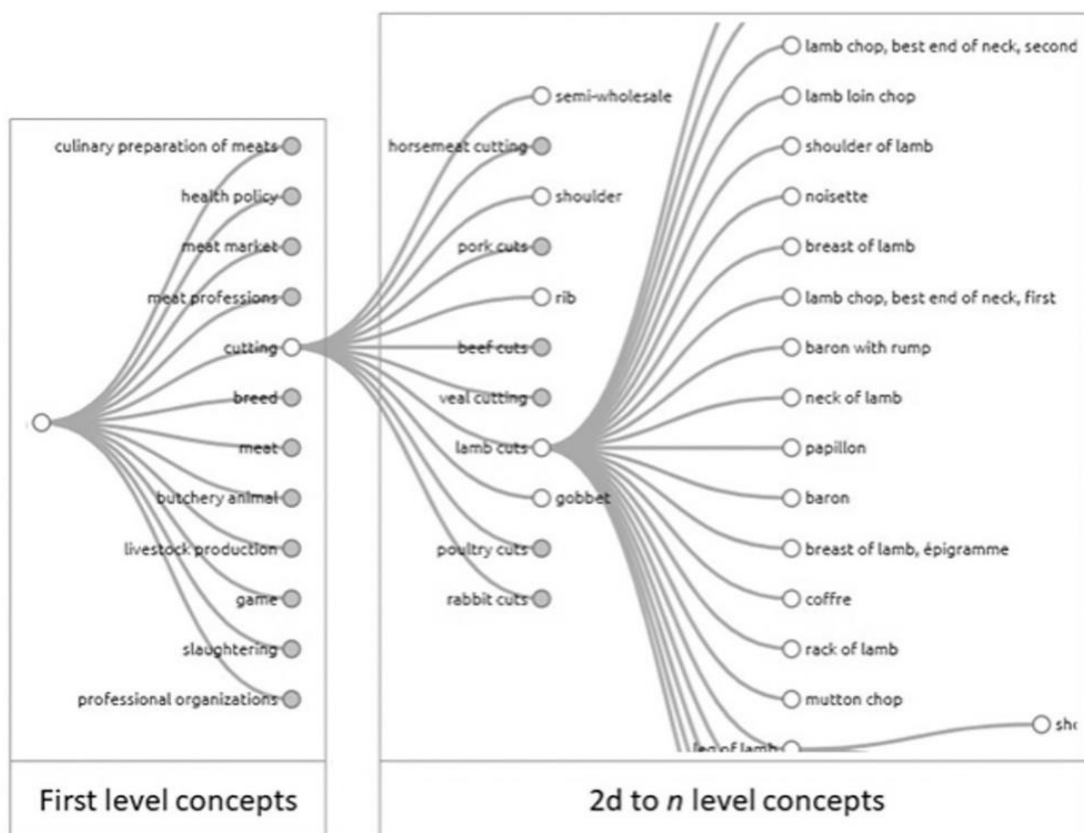


Fig. 8. Declination of the “cutting” concept.

Each branch is divided in more specific sub-branches as shown in Fig. 8, which allows navigating from generic to specific concepts.

3.1. A thesaurus covering the main areas of the meat industry

We present the first-level concepts in alphabetical order:

- “breed” includes the notions of hardy breed, standards as well as the different breeds of cattle, goats, horses, sheep and pigs.
- “butchery animals” includes animals that are slaughtered for meat consumption. The animals are divided into their major families which are cattle, goats, asses, horses, sheep, pigs and poultry. “Other animals for slaughter” lists animals whose meat is edible but not commonly consumed, such as ostriches, bison and peacocks;
- “culinary preparation of meat” includes concepts that describe meat-based preparations, preparations in which meat is an essential ingredient or some sauces. The second level concepts are: tableware, charcuterie, salting, cooking, sauce, charcuterie-salting and culinary preparations based on beef, game, pork, tripe products, veal, ovine meat, poultry, multi-meat.
- “cutting” describes all cuts for poultry, large cattle, lamb, equines, pork, rabbit and veal, in the French context. It also defines in a general way the cuts common to several animals such as the rib, the half-calf, the shoulder and the gobelet. The rationale for this choice was to consider cuts at the butcher end rather than muscle names as considered by scientists but the linkage between the two approaches remains to be developed.
- “game” includes all animals that are hunted for their meat and are not animals for slaughter, such as pheasants, kangaroos, hares, wild ducks and wood pigeons;
- “health policy” covers 7 second-level concepts including HACCP, diseases, veterinary inspection and traceability, which are themselves broken down into more specific concepts.
- “livestock production” includes both generic livestock farming practices (e.g. “zootechnics” or “animal welfare”) and practices specific to a type of livestock farming, for example “barn” (in “cattle breeding”) or “shepherd” (in “sheep-goat breeding”);
- “meat”; this is the core subject in this thesaurus. This branch covers the different types of meat such as beef, game, poultry, sheep and pigs. It also provides definitions of white and red meat and other notions such as packaging, preservation, processing of muscle into meat, meat industry and meat quality (which includes safety, sensory analysis, nutritional value, and official quality signs as well as beef grading at the consumer end).
- “meat market” describes the commercial exchanges within the meat sector, considering the French particularities. It contains 3 second-level concepts: wholesale meat market, livestock market and transport.
- “meat professions” includes all types of occupations in the sector as well as training and distinctions.
- “professional organisations” presents the different organisations divided into four categories: commercialisation-industry, distribution, interprofession, production.
- “slaughtering” contains the actions carried out in the slaughterhouse (stunning, killing, throat cutting, dehairing, evisceration, etc.), the tools used (plucking, hide, trocar, splitting, etc.), ritual slaughter (halal and kosher), concepts relating to the carcass (carcass yield, meat yield, atlas, fifth quarter, trapping, etc.) and carcass grading;

The Meat Thesaurus is therefore a resource that covers a wide range of concepts in the meat sector. The thematic organisation offers a navigation path that facilitates its discovery and use. The integration of definitions from the French Meat academy dictionary makes it a reliable source of knowledge that is representative of French practices. This can

be extended to other global practices to provide connection and accurate relationships across global practices.

3.2. A FAIR resource

In order to allow its reuse by third parties, the Meat Thesaurus is made freely available to the community on a public portal, Agroportal, and in an open format. It is part of the FAIR approach where a set of principles provide a framework to ensure that a digital resource can be reused by third parties (humans and machines). Solutions proposed by the DipSO INRAE Open Vocabularies service have been combined to ensure that the meat thesaurus complies as far as possible with FAIR principles.

The analysis proposed in Table 1 was carried out in the framework of the ANR FooSIN project (<https://foosin.fr/>) and the questionnaire developed by the RDA SHARC working group (David et al., 2020).

Since this evaluation, the FooSIN project has contributed to a new service on Agroportal which computes and displays the FAIRness score of each resource it hosts. The methodology and criteria are explained by Amdouni and Jonquet (2021). The service provides score explanation and tips to improve the findability, accessibility, interoperability and reusability, which will guide us in enhancing the content, documentation and metadata of the Meat Thesaurus.

4. Discussion

Having performant information retrieval systems is important in any field including in the meat sector. A thesaurus provides a precise and controlled vocabulary which serves coordinating indexing and information retrieval (Clarke, 2017). Unfortunately, many terminological resources in the meat sector are either in paper format, in PDF or in tabulated format and, consequently, are not suitable. For example, the UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) provides standardised descriptions of cuts for different butchery animals for the

Table 1
: Description of the FAIR objectives.

FAIR objectives	Solutions to meet the FAIR principles
Findable	<ul style="list-style-type: none"> • The thesaurus is uniquely and globally identified by a DOI (Digital Object Identifier) which links it to its metadata accessible on Data INRAE (https://data.inrae.fr/). The DOI also provides a mean to precisely cite the thesaurus; • The long-term preservation of DOI and URI identifiers are guaranteed by Data Cite and INRAE respectively; • The thesaurus is referenced in Data INRAE and displayed on Agroportal (http://agroportal.lirmm.fr/), its metadata and content are indexed by Internet search engines;
Accessible	<ul style="list-style-type: none"> • The thesaurus is downloadable from Agroportal in various open formats (SKOS/XML, RDF/XML and CSV); • The description and content of the thesaurus are accessible via web services or API (http://data.agroportal.lirmm.fr/); • The description of a concept is always accessible on the web to either humans or machines simply by calling its URI (the dereferencing service is provided by the DipSO INRAE); • Accessibility is based on an institutional service operated by the DipSO.
Interoperable	<ul style="list-style-type: none"> • The content of the thesaurus is represented using the W3C SKOS standard, in RDF. A CSV version is also available; • Its metadata is represented using elements from standard schemas that can be interpreted by many information systems and search engines and are widely adopted by the community;
Reusable	<ul style="list-style-type: none"> • The thesaurus is displayable and usable using free and open source tools such as VocBench or Skosmos; • The conformity of the thesaurus with the SKOS model has been tested with the Skos Play tester (Sparna, https://skos-play.sparna.fr/skos-testing-tool/) which is based on the qSKOS rules (https://github.com/cmader/qSKOS/wiki/Quality-Issues); • The editorial choices and intentions of the authors are explained in this article

European Union (www.unece.org/trade/wp7/Meat-Standards) which is potential useful for meat trade but it is only available in PDF format (Meat, 2022). In addition, the University of Nebraska-Lincoln provides the physical and chemical characteristics of beef and pork muscles (<http://bovine.unl.edu/>; <https://porcine.unl.edu/>). Nevertheless, this resource is only limited to cuts and not the meat sector as a whole. A digital tool with the possibility of doing linkages will therefore be of great benefit to integrate trade-based or cut-based standards with more specific scientific and more generalised industry terms.

The meat thesaurus is presented as a useful resource respecting the FAIR principles of open science for indexing specific databases in the meat sector including contextual and national characteristics and for information retrieval from these databases. This will also help to provide a semantic base for the construction of a meat quality ontology that will be further discussed.

4.1. Indexing databases

The meat thesaurus can be classically used in bibliographic databases to index journal articles, books or any document on meat, its processing, trade and related disciplines.

Technological advances over the last decades have dramatically increased the rate of collecting scientific information and data (Hughes, Bao, Hu, Honavar, & Reecy, 2008). This has led to a proliferation of large biological databases that manipulate concepts like units, scales, or laboratory methods (Chriki et al., 2013) that are defined in different ways, or not defined at all. This is a huge limitation for meta-analysis and modelling approaches (Hocquette et al., 2012). It is therefore advantageous for researchers to use already defined concepts and add keywords to the metadata when feeding databases. This will also help in the reusability and interoperability of research databases. According to ISO 25964-1 (International Organisation for Standardization 2011, Clause 4.1), a thesaurus has as prime function to support information retrieval by guiding the choice of terms for data indexing and information searching. This will enable an indexer and a searcher to choose the same term for the same concept. A thesaurus gives a unified and formalized representation of information in the information retrieval system, reflecting paradigmatic relations between terms. It is an effective tool for thematic retrieval as it provides search precision on specific subjects.

As an example, in 2002, the National Agricultural Library Thesaurus (NALT) was established to select controlled vocabulary terms for subjects indexing in databases such as AGRICOLA or PubAg (<https://agclass.nal.usda.gov/>). With the emergence of repositories and catalogues for other research products like data, software, and protocols, it has become crucial to use reference concepts to be able to query them in an efficient manner. Yet, thematic wide vocabularies like Agrovoc or NALT are generally not suited to precisely describe data, which often requires finer grained or specific vocabularies for a given scientific field.

Some experts who participated in this work are members of the International Meat Research 3G Foundation (<https://imr3g.org/>). The main aim of this foundation is to strengthen the link between the different actors in the beef sector (farmers, producers, slaughterhouses, wholesalers and retailers). To achieve this, the foundation is establishing an international database with a large number of consumers' scores related to beef palatability and related animal, carcass, cut and muscle data. These scores are obtained according to standard protocols of the most advanced beef grading system: The Meat Standards Australia methodology (MSA). This system has been undergoing development since the 1990s, always with the same protocols to record the most powerful determinants of beef eating quality on a large scale first in Australia and then across countries such as France, Ireland, Poland, South-Africa, South Korea or USA (Hocquette et al., 2020, Bonny et al., 2018). Using the MSA standard methodology already contributes to the strategy of the International Meat Research 3G Foundation but is not sufficient to achieve data interoperability and reusability at scale. These

international collaborations emphasised the desirability of establishing common standards, description and protocols for data collection and physical collection of cuts, fabrication of consumer samples and untrained consumer testing protocols and control software to ensure data were fully compatible and able to be aggregated. As a result, agreed descriptive terms and protocols reflecting global data have been endorsed for use in conjunction with the UNECE Bovine Language allowing free universal use in conjunction with IMR3GF accredited assessment training and providing the ability to develop 3G consumer prediction models from appropriate pooled data. To go in that direction, the Meat Research 3G Foundation will ensure that the future database will allow its users to work using a shared language. The main objective of publishing the meat thesaurus was to provide a semantic base specific to meat quality that would sustain the future database.

Beyond its use in this database, the meat thesaurus is made available and thus expected to be adopted by the meat supply chain actors who need accurate definitions of specific concepts. Thanks to the access services provided by Agroportal, it can be incorporated directly in digital applications used by agricultural and consumer devices connected to the Internet. Such applications could then benefit from a standard food vocabulary with a global scope also including regional specificities, French ones in our case. Parts of the meat thesaurus can also be integrated into or mapped with other semantic resources. For instance, the Chinese Agricultural Thesaurus was mapped to AGROVOC to allow users to access the vast repositories of Chinese agricultural knowledge, previously inaccessible to non-Chinese speakers, by allowing them to use vocabulary in languages with which they are familiar as an entry point to the indexed resources (Liang & Sini, 2006).

To summarise, the meat thesaurus described here, freely accessible and following the open science principles is likely to be a useful resource for indexing specific databases in the meat sector. This thesaurus has the potential to include regional characteristics such as those of the French meat production up to now. On the other hand, its genericity and its detailed description of the meat sector make it potentially useful at the international level, especially in the area of meat quality.

4.2. Using the thesaurus to build an ontology

Scientific research on meat eating quality has to answer complex problems, which can require working on heterogeneous data sometimes coming from various sources. One of the main obstacles to data integration is the variability with which producers name the objects studied, variables, units of measurement, etc. Integrating domain knowledge encoded in an ontology to data processes can be a solution to facilitate data integration and reason on these data. An ontology provides formal descriptions of domain knowledge and allows reasoning on data while a thesaurus focuses on how to name things and organises them thematically.

The authors are interested in developing an ontology dedicated to predict meat quality. Meat quality can be defined as a set of properties that together identify what we appreciate about meat when we purchase it, eat it, or select it for use as a raw material for processing into meat products (Purslow, 2017). Traditionally, meat quality traits are grouped in two sets: intrinsic and extrinsic traits. The intrinsic traits are those associated with the product itself which include appearance, colour, water-holding capacity, and odour, nutritional value (fatty acid composition, iron and vitamin contents, etc), sensory perception (tenderness, flavour, juiciness). Other traditional quality factors normally expressed as freshness or wholesomeness, or safety in terms of lack of pathogens, parasites, infections agents, or toxins are also major intrinsic quality traits. The extrinsic quality traits are related to the way meat is produced and therefore include issues related to the well-being of meat animals and the sustainability of production systems in terms of environmental and economic performances. Starting from the Meat Thesaurus will facilitate the construction of the ontology as it largely covers the notions that are directly or indirectly associated to meat

quality. These notions can be found within the meat thesaurus under the following main concepts:

- nutritional values of meat	- health policy
- sensory analysis	- veterinary inspection
- conservation	- livestock production

Ontological classes can be derived from these concepts by adding formal properties and relations as well as logical rules. In order to predict quality, i.e. to infer the level of quality as “unsatisfactory”, “Good everyday quality”, “better than everyday quality” and “premium quality”, the ontology will have to include formal definitions and specific rules, i.e. classes, for the animal type, the name of the cuts and the cooking method. For example, a butcher may want to predict the level of quality of a beef cut, or individual muscle portions, e.g. the sirloin from a famous beef breed. He may also want to know what type of cooking method will be the best to maximise eating quality in order to provide the best advice to consumers. Concepts of the ontology like the breed of the animal, the results of veterinary inspection obtained from the farmer, the meat colour and marbling assessment (the ontology can give precision on the assessment method) can be used. Finally using this information, the ontology can provide recommendations for the cooking method and help to provide a potential level of quality.

Deriving ontologies from thesauri has been proven. Indeed, previous examples in which thesauri have helped in the establishment of ontologies do exist. For example, the FoodOn ontology was constructed using, among others, the Languag thesaurus which was published in 2017 (Møller & Ireland, 2018). This work was carried out by a consortium to build a comprehensive open source ontology, consisting of hierarchies of terms that cover raw foods, process conditions for packaging, cooking and preservation, and a variety of product type schemes under which food products can be classified. The description of each food is based on descriptive qualities, its components as well as the associated processes. Other thesauri, including AGROVOC and the Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts Thesaurus (ASFA) have also been converted into ontologies in the same way, in order to improve their expressiveness and take advantage of the tools made available by the semantic web community (Lauser et al., 2008).

The future ontology will not only benefit from the Meat thesaurus but also from semantic resources including ontologies and thesauri developed by other communities and shared in repositories like Agroportal that offer facilities for reusing them. For example, when we search for the definition of marbling (a key quality trait of beef) in AgroPortal, we have access to several definitions considering different specificities of different regions of the World as shown in Table 2 For each class of the future ontology, this feature will allow to pick-up the definition and terms most suited to our needs. For instance, for the measurement of marbling, the definitions from ICAR or USDA differ and might not be relevant to some users like French users for example. The thesaurus will therefore enable users to access locally relevant definitions and provide clarity on how definitions compare across systems.

To summarise, addressing complex biological problems in meat science may be helped by using ontologies, which provide formal descriptions of domain knowledge and allows reasoning on data. The Meat Thesaurus provides names and definitions for concepts within the meat sector and organises them thematically. Among other uses, it is likely to help building a powerful ontology for the meat sector in combination with other existing resources in the same field.

5. Conclusion

Terminological, syntactic and semantic discrepancies between data sources need to be overcome so that it will be possible for researchers to have transparent access to different disparate data sources, and possibly integrate them to produce new knowledge. There is thus a growing awareness of the need for ontologies in life science. There is also a need

Table 2

Results of the query with the word “marbling” on AgroPortal.

Source	Definition
ATOL	Any measurable or observable characteristic of the degree of infiltration of intramuscular fat
ICAR ICAR Recording Guidelines May 2014	Marbling can be defined as the flecks of fat in the lean. Marbling is usually evaluated visually in the rib-eye muscle, which is exposed between the 12 th and 13 th ribs. Intramuscular fat (marbling) is the intermingling or dispersion of fat within the lean
MSA www.mla.com.au	It is the last fat to be deposited and the first to be utilised by the animal as an energy source; marbling is the fat that is deposited between muscle fibres. Marbling is assessed from the 5th to 13th rib on the carcass and seen as intramuscular deposits of fat within the muscle. The term marbling refers to the small flecks of fat scattered throughout the muscle
USDA www.meat.tamu.edu	Marbling (intramuscular fat) is the intermingling or dispersion of fat within the lean. Graders evaluate the amount and distribution of marbling in the ribeye muscle at the cut surface after the carcass has been ribbed between the 12th and 13th ribs. The types and amounts of fat in the muscle the intermingling of fat deposits in muscle.
JMGA (beef marbling standards) www.jmga.or.jp	The amount and distribution of intramuscular fat. Marbling is flecks or thin strips of fat in beef
CBGA www.beefgradingagency.ca	Marbling is the fine white flecks of fat running through the lean meat. The amount of marbling in the rib eye defines the minimum standard for the top-quality grades Amount, size and distribution of intramuscular fat deposits in the Longissimus muscles of a livestock carcass that have been exposed by knife-ribbing
Sistema Brasileiro de Classificação de Carcaças de bovinos www.uel.br	This assessment of the quantity and of the intramuscular fat distribution is made visually in the muscle Longissimus dorsi, between the 12th and 13th ribs. For the classification of marbling, photographic standards produced by the USDA

to share a wealth of knowledge among different researchers and research or professional groups. As a result, a growing number of biological ontologies are being built in life science as information management is of paramount importance. Unfortunately, very few resources could be associated with this initiative in the field of meat. We propose a new resource as a thesaurus specific to the meat sector to fill this gap. As shown in this article, transforming textual content to a structured, machine actionable and organised resource requires time and specific competencies. To avoid data loss and expensive post-processing, it is important to adopt a FAIR-by design approach when developing dictionaries or any other terminological or semantic resource. This means to, right from the beginning of a project, adopt tools allowing data structuring, even a simple spreadsheet, and whenever possible including features for standard representation, modification tracking, and quality check (section 5 of Aubin et al., 2017 presents some of the most used tools in the agricultural community working with semantic resources). Making semantic resources easily findable and accessible is also a key for reducing duplicated efforts and costs, enhance reusability and thus allow better semantic interoperability of data in the domain.

The meat thesaurus described here represents all aspects of the meat supply chain from production to consumption and this has many advantages for all those wishing to use it, in particular professionals, consumers and researchers. It not only provides precise definitions of the different concepts specific of the meat sector, but also highlights

relationships between them through categories and hierarchical and explicit associated links. This will contribute to a better knowledge of the sector, its organisations, its products, its policies, etc. The advantage of this thesaurus is that it can also be used to index databases and bibliographic resources.

This thesaurus covers various aspects of meat: meat-producing animals, slaughter and cutting, marketing, culinary preparations and consumption. The users of this thesaurus may therefore have different profiles: professionals of the sector, researchers, journalists, students or simple consumers who wish to better know the specificities of the meat sector, in particular in the French context. This thesaurus does exist in English while retaining the specificities of the French meat industry and having the potential to incorporate other regional specificities. In addition, the thesaurus will further be expanded into different languages. It has also the potential to be regularly updated. Indeed, it could happen that the thesaurus does not cover all the requirements of any database which may contain additional variables not defined yet or defined in a different way. In this case, it will be possible to request additions or modifications of concepts in the thesaurus.

In combination with other existing and freely available resources in the meat sector, this thesaurus will also serve as the basis for an ontology through specification of different classes that will be more formal and more precise. The meat ontology will make it possible to deepen a particular aspect of meat, such as its quality and will also enable reasoning for computers for a more automatic use. This is in line with the strategy of international initiatives such as the aims of the International Meat Research 3G Foundation. This is also in agreement with the open science policy promoted for instance in EU-funded research projects.

Funding

This project was partly funded by the French Meat Academy on one hand and the ANR project FoodSIN (number ANR-19-DATA-0019-01) on the other hand.

Meat Thesaurus Access: <http://agroportal.lirmm.fr/ontologies/MEAT-T>

CRediT authorship contribution statement

Moise Kombolo Ngah: Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Software, Visualization, Writing – original draft. **Jérémy Yon:** Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Software, Writing – review & editing. **François Landrieu:** Data curation, Formal analysis, Investigation, Writing – review & editing. **Brigitte Richon:** Data curation, Formal analysis, Investigation, Writing – review & editing. **Sophie Aubin:** Conceptualization, Funding acquisition, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Validation, Writing – review & editing. **Jean-François Hocquette:** Conceptualization, Funding acquisition, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Validation, Writing – review & editing.

Declaration of Competing Interest

None.

Acknowledgments

The authors thank all members of the French Meat Academy for their work which provided definitions for all concepts in the original Meat dictionary.

References

- Ahol. (2022). Livestock ontologies. <https://www.atol-ontology.com/en/a-ahol/> (accessed 1.27.21).
- Amdouni, E., & Jonquet, C. (2021). FAIR or FAIRer? An integrated quantitative FAIRness assessment grid for semantic resources and ontologies. In *MTSR 2021 - 15th international conference on metadata and semantics research, Nov 2021, Madrid, Spain*. In press, (10.13140/RG.2.2.23265.84321). (lirmm-03208544v3).
- Aubin, S., Caracciolo, C., & Zervas, P. (2017). *Landscaping the use of semantics to enhance the interoperability of agricultural data*. RDA Agrisemantics Working Group. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3697332>.
- Bonny, S. P. F., Hocquette, J.-F., Pethick, D. W., Legrand, I., Wierzbicki, J., Allen, P., Farmer, L. J., Polkinghorne, R. J., & Gardner, G. E. (2018). Review: The variability of the eating quality of beef can be reduced by predicting consumer satisfaction. *Animal*, 12, 2434–2442. <https://doi.org/10.1017/S1751731118000605>
- Chaudieu, G. (1970). In J. Peyronnet (Ed.), *Le petit dictionnaire de boucherie et de boucherie-charcuterie* (p. 1970), 193 p.
- Chriki, S., & Hocquette, J. F. (2020). The Myth of Cultured Meat: A Review. *Frontiers in Nutrition*, 7, Article 7. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00007>
- Chriki, S., Picard, B., Faulconnier, Y., Micol, D., Brun, J.-P., Reichstadt, M., ... Hocquette, J.-F. (2013). A data warehouse of muscle characteristics and beef quality in France and a demonstration of potential applications. *Italian Journal of Animal Science*, 12, Article e41. <https://doi.org/10.4081/ijas.2013.e41>
- Clarke, S. D. (2017). Thesaurus (for information retrieval). URL <https://www.isko.org/cyclo/thesaurus> (accessed 2.3.22).
- David, R., Mabille, L., Specht, A., Stryeck, S., Thomsen, M., Yahia, M., Jonquet, C., Dollé, L., Jacob, D., Bailo, D., Bravo, H., Gachet, S., Gunderman, H., Hollebecq, J.-E., Ioannidis, V., Le Bras, Y., Lerigoleur, E., Cambon-Thomsen, A., & Community, S. (2020). *Templates for FAIRness evaluation criteria - RDA-SHARC ig*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3922069>
- Dictionnaire de la viande. (2012). *Académie de la viande (France)*. Publisher, Autres voix. ISBN, 2918237086, 9782918237082.
- Dikeman, M., & Devine, C. (2014). In *Encyclopedia of meat sciences* (2nd ed.). Amsterdam: Elsevier.
- Dooley, D. M., Griffiths, E. J., Gosal, G. S., Buttigieg, P. L., Hoehndorf, R., Lange, M. C., ... Hsiao, W. W. L. (2018). FoodOn: A harmonized food ontology to increase global food traceability, quality control and data integration. *NPJ Science of Food*, 2, 23. <https://doi.org/10.1038/s41538-018-0032-6>
- FoodOn. (2022). Summary | LIRMM AgroPortal [WWW Document]. URL <http://agroportal.lirmm.fr/ontologies/FOODON> (accessed 6.22.21).
- Glatre, E. (2008). *Dictionnaire de la viande*. Clichy: BPI.
- Hocquette, J.-F., Capel, C., David, V., Guéméné, D., Bidanel, J., Ponsart, C., ... Peyraud, J.-L. (2012). Objectives and applications of phenotyping network set-up for livestock. *Animal Science Journal*, 83, 517–528. <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2012.01015.x>
- Hocquette, J.-F., & Chatellier, V. (2011). Prospects for the European beef sector over the next 30 years. *Animal Frontiers*, 1, 20–28. <https://doi.org/10.2527/af.2011-0014>. <https://imr3g.org/>. URL (accessed 6.19.21).
- Hocquette, J. F., Ellies-Oury, M. P., Legrand, I., Pethick, D., Gardner, G., Wierzbicki, J., & Polkinghorne, R. (2020). Research in Beef Tenderness and Palatability in the Era of Big Data. *Meat and Muscle Biology*, 4(2), 1–13. <https://doi.org/10.22175/mmb.9488>
- Hughes, L. M., Bao, J., Hu, Z.-L., Honavar, V., & Reecy, J. M. (2008). Animal trait ontology: The importance and usefulness of a unified trait vocabulary for animal species. *Journal of Animal Science*, 86, 1485–1491. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-0930>
- Jonquet, C., Toulet, A., Arnaud, E., Aubin, S., Dzalé Yeumo, E., Emonet, V., Graybeal, J., Laporte, M.-A., Musen, M. A., Pesce, V., & Larmande, P. (2018). AgroPortal: A vocabulary and ontology repository for agronomy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 144, 126–143. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.012>
- Langual.TM. (2022). An international framework for food description - Thesaurus 2014 [WWW Document]. URL https://www.langual.org/langual_thesaurus.asp?termid=C0120&haschildren=False&owner=C0173&openstr=00000_A0361_A0356_C0116_C0164_C0127_C0173 (accessed 5.10.21).
- Lauser, B., Johannsen, G., Caracciolo, C., Keizer, J., van Hage, W. R., & Mayr, P. (2008). *Comparing human and automatic thesaurus mapping approaches in the agricultural domain* (p. 10).
- Le Bail, P. Y., Bugeon, J., Dameron, O., Fatet, A., Golik, W., Hocquette, J.-F., ... Chemineau, P. (2014). A controlled vocabulary for livestock phenotyping: the ATOL ontology. *INRA Productions Animales*, 27, 195–208.
- Liang, A. C., & Sini, M. (2006). Mapping AGROVOC and the Chinese agricultural thesaurus: Definitions, tools, procedures. *New Review of Hypermedia and Multimedia*, 12, 51–62. <https://doi.org/10.1080/13614560600774396>
- Meat. (2022). UNECE [WWW document]. URL <https://unece.org/trade/wp7/Meat-Standards> (accessed 2.6.22).
- Meyer, C. (2022). Dictionnaire des Sciences Animales. [On line]. Montpellier, France, Cirad [date of access 19/01/2022]. URL: <http://dico-sciences-animales.cirad.fr/>.
- Møller, A., & Ireland, J. (2018). *LanguaLTM 2017 - Multilingual Thesaurus* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13274.64964>

- Pizzuti, T., Mirabelli, G., Grasso, G., & Paldino, G. (2017). MESCO (MEat Supply Chain Ontology): An ontology for supporting traceability in the meat supply chain. *Food Control*, 72, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.038>
- Pizzuti, T., Mirabelli, G., Sanz-Bobi, M. A., & Gómez-Gonzalés, F. (2014). Food Track & Trace ontology for helping the food traceability control. *Journal of Food Engineering*, 120, 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.07.017>
- Purslow, P. (2017). *New aspects of meat quality* (1st ed.) URL <https://www.elsevier.com/books/new-aspects-of-meat-quality/purslow/978-0-08-100593-4> (accessed 1.27.22).
- Salaun, M.-C., Yon, J., Le Bail, P.-Y., & Reichstadt, M. (2020). *Animal health ontology for livestock*. <https://doi.org/10.15454/KKZ3TS> (accessed 5.26.21).
- Seman, D. L., Boler, D. D., Carr, C. C., Dikeman, M. E., Owens, C. M., Keeton, J. T., ... Powell, T. H. (2018). Meat science lexicon. *Meat and Muscle Biology*, 2, 1. <https://doi.org/10.22175/mmb2017.12.0059>
- Vézina, R., Darras, X., Bédard, J., & Lapointe-Giguère, M. (2009). *La rédaction de définitions terminologiques*. Québec: Office québécois de la langue française.
- Welcome to the Thesaurus and Glossary. (2022). NAL agricultural thesaurus and glossary. URL <https://agclass.nal.usda.gov/> (accessed 6.20.21a).
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., ... Mons, B. (2016). The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3, Article 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- World Wide Web Consortium (W3C). (2022). <https://www.w3.org/> (accessed 6.20.21).

Conclusion

L'utilisation d'un thésaurus de la viande en ligne regroupant des définitions standardisées et harmonisées des critères de qualité, offre une solution prometteuse pour surmonter les divergences terminologiques, syntaxiques et sémantiques entre les différentes sources de données. Ce thésaurus peut permettre aux chercheurs d'avoir un accès transparent à des données disparates et de les intégrer de manière cohérente pour générer de nouvelles connaissances. Actuellement, les nombreux outils terminologiques disponibles sont souvent limités et inadaptés, ce qui nuit à l'interopérabilité des bases de données hétérogènes générées par exemple par des méthodes instrumentales (tels que des capteurs). En proposant un outil numérique capable d'établir des liens entre diverses bases de données dans le secteur de la viande, ce thésaurus peut faciliter l'intégration des normes commerciales avec des termes scientifiques plus spécifiques et des termes industriels plus usités. Avec une indexation coordonnée et une recherche d'informations précises, les chercheurs pourraient optimiser l'analyse de grandes quantités de données, améliorant ainsi les approches de biologie prédictive. Arriver à ce stade serait pertinent pour construire des modèles en prenant en compte le maximum de critères et avec une plus grande variabilité de données.

G. DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION

1. Attentes des consommateurs au regard des systèmes de prédiction de la qualité de la viande bovine

La baisse de la consommation de la viande qui impacte la filière bovine peut s'expliquer par plusieurs facteurs tel que le prix élevé, la variabilité de la qualité sensorielle, le manque de respect du bien-être animal ou encore les inquiétudes sur la santé ou l'environnement (Ellies-Oury et al., 2019; Fayet, 2022). Pouvoir maîtriser la et prédire la qualité sensorielle de la viande constitue donc un enjeu majeur pour la rentabilité et la pérennité de la filière bovine. La qualité sensorielle de la viande bovine est très variable, ce qui empêche les consommateurs d'identifier de manière fiable un niveau de qualité satisfaisant répondant à leurs attentes. Au moment de l'achat, ils se basent principalement sur le prix, l'origine, l'apparence et la présence de gras visible pour évaluer la qualité de la viande (Santos et al., 2021). Par ailleurs, les consommateurs ne bénéficient plus d'une connaissance suffisante des différents morceaux et de leurs caractéristiques pour les cuisiner correctement après les avoir achetés (Ellies-Oury & Hocquette, 2018). Les consommateurs sont donc demandeurs d'un système qui pourrait, de manière fiable et rapide, prédire la qualité sensorielle de la viande (Verbeke et al., 2010).

C'est pour cette raison qu'en 2014 l'étiquetage des viandes de bœuf, de veau et d'ovins en rayons libre-service a été simplifié (Ellies-Oury & Hocquette, 2018). Les morceaux sont désormais classés avec une notation de 1 à 3 étoiles, la catégorie 3 étant potentiellement la plus tendre. Ce potentiel de qualité est estimé à dire d'experts (Ellies-Oury & Hocquette, 2018). Cependant, une étude menée par Ellies-Oury (2018) révèle que 70% des consommateurs n'ont pas remarqué l'existence du nouvel étiquetage, même s'ils considèrent que ce système représente une avancée majeure qui mérite d'être davantage développée (Fayet, 2022). En effet, 88% des sondés seraient intéressés par un tel système. Le système d'étoiles répond donc aux attentes des consommateurs en mettant en avant le rôle essentiel du morceau pour la détermination de la qualité sensorielle.

La limite de cette méthode est qu'elle ne prend pas en compte les facteurs autres que le type de morceau associé à une méthode de préparation recommandée qui contribuent à la qualité sensorielle de la viande bovine notamment l'âge ou la race de l'animal, ou encore la durée de maturation, etc. Ma thèse propose donc une évolution de ce système vers un système comparable au système MSA qui permettrait d'identifier les meilleures combinaisons entre le type d'animal, le muscle, la durée de maturation et le mode de cuisson. Ceci est la démarche de la fondation « International Meat Research 3G Foundation » (IMR3GF). C'est une fondation à but non lucratif qui a pour objectif de soutenir la recherche internationale sur l'évaluation et la prédiction de la qualité sensorielle de la viande bovine,

basée sur la méthode MSA. Elle est soutenue par la Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-ONU) et rend compte à la section viande de cette commission (UNECE, 2016). Les données obtenues lors de ces travaux ont permis de contribuer à la base de données internationale que cette fondation construit dans l'optique du développement du modèle de prédiction appelé « Modèle 3G ». Elle constitue donc une plateforme de recherche collaborative internationale et de soutien informatif et technologique pour les industriels ainsi que pour les scientifiques et les consommateurs. Les travaux de cette thèse ont donc permis, entre autres, d'évaluer le prototype du modèle que cette fondation a développé.

Un système qualité prédictif tel que le MSA ou le protocole 3G offre donc aux consommateurs la possibilité de bénéficier de prix plus satisfaisants tout en garantissant une assurance au niveau sensoriel. Le système MSA évalue la qualité de la viande bovine en se basant sur des critères spécifiques tels que la tendreté, la flaveur et la jutosité. En identifiant les morceaux de viande de haute qualité, le système permet aux consommateurs d'obtenir une viande plus savoureuse et agréable à déguster mais à un prix légèrement supérieur, ce qui est justifié au regard de la satisfaction gustative plus élevée. Ainsi, les consommateurs qui recherchent une expérience gustative supérieure génèrent une valeur ajoutée pour les produits certifiés MSA.

2. Performance du modèle de prédiction

La base de données construite durant cette thèse était constituée de données provenant de vaches limousines issues d'élevages à Haute Valeur Naturelle. Nous avons mesuré des critères bien spécifiques sur la carcasse de ces animaux selon le système MSA tel que l'ossification, le persillé, la surface de la noix, la hauteur de bosse, le pH ou encore l'épaisseur de gras. Chacun de ces critères a une influence sur la qualité sensorielle de la viande bovine (Bonny et al., 2018). Après ces mesures, deux muscles à savoir le faux filet (*longissimus dorsi*) et le rumsteck (*gluteus medius*), ont été prélevés pour effectuer des tests consommateurs avec des consommateurs naïfs. Les deux muscles étaient significativement différents pour chaque animal en fonction de la tendreté et n'étaient pas significativement différents l'un de l'autre en termes de flaveur et jutosité.

Les consommateurs ont évalué ces deux muscles en fonction de leur tendreté, jutosité, flaveur et appréciation globale sur une échelle de 0 à 100. Ces consommateurs ont également attribué des classes de satisfaction allant de 2 à 5 pour chaque morceau testé. Ces scores de tendreté, jutosité, flaveur et appréciation globale ont été combinés en un seul score appelé MQ4 s'étalant également sur une échelle de 0 à 100. Ensuite, afin de prédire les classes de satisfaction attribuée par les

consommateurs, les poids relatifs optimaux de chaque critère évalué par les consommateurs ont été déterminés. Les poids relatifs de chacun de ces critères étaient 0,27 pour la tendreté, -0,06 pour la jutosité, 0,46 pour la flaveur, 0,32 pour l'appréciation globale. Ces poids relatifs peuvent varier en fonction des pays (Liu et al., 2023). Il est donc important de déterminer les poids relatifs propres à un contexte donné. Les poids relatifs actuellement utilisés dans le système MSA sont 0,3 pour la tendreté, la flaveur et l'appréciation globale et 0,1 pour la jutosité (Thompson et al., 2010). Conformément au modèle MSA, le poids de la jutosité dans le score MQ4 obtenu dans le cadre de cette thèse était aussi le plus bas relativement aux autres critères. Cependant, la valeur de ce poids relatif était plus basse que ce qui a été observé dans d'autres études faites avec des consommateurs français dans lesquelles le poids était compris entre 0,01 et 0,04 (Legrand et al., 2013a, 2017). Néanmoins, cette valeur se rapproche davantage de l'étude de Liu et al., (2023) dans laquelle le poids relatif de la jutosité était de -0,05. Dans cette dernière étude, les animaux testés étaient issus d'un croisement Angus-Salers. Le faible poids de la jutosité ne signifie pas que ce critère est sans importance mais plutôt qu'il a peu de significativité due à sa haute corrélation avec les autres critères (Liu et al., 2023). Le critère ayant le poids le plus élevé était la flaveur. Ce résultat concorde avec les résultats obtenus dans l'étude de Liu et al., 2020 dans lequel la flaveur aurait gagné de plus en plus d'importance au fil des années due aux améliorations qui ont progressivement été faites sur la tendreté. De plus, les vaches étant principalement nourries à l'herbe conformément aux exigences des élevages HVN, elles ont le potentiel d'avoir un niveau de flaveur bien spécifique (Daley et al., 2010).

Afin de prédire les classes de satisfaction attribuée par les consommateurs, des seuils optimaux ont été obtenus pour faire une discrimination entre chaque classe. Les seuils obtenus dans le cadre de ces travaux sont dans la gamme observée dans d'autres études à l'exception de la discrimination entre la classe 2 et 3 qui avait une valeur nettement plus élevée. Les seuils obtenus dans les autres études sont : 35,9 à 43,7 entre les classes 2/3 ; 57,5 à 69,0 entre les classes 3/4; 70,0 à 83,9 entre les classes 4/5 (Bonny et al., 2016; Legrand et al., 2013a; Polkinghorne et al., 2011; Smith et al., 2008; Thompson et al., 2010). La différence observée dans les seuils entre les classes 2/3 entre nos travaux et d'autres travaux pourrait être attribuable au fait que notre lot d'échantillons provient d'un type d'élevage spécifique.

Les caractéristiques propres à cet élevage, telles que la génétique des animaux, leur alimentation, leurs conditions d'élevage ou d'autres facteurs environnementaux, pourraient influencer la perception de satisfaction des consommateurs et donc les seuils obtenus dans cette étude.

Ces observations peuvent indiquer que les résultats obtenus sont spécifiques à cette population d'animaux. Il est possible que les vaches Limousines provenant d'élevages HVN aient des

caractéristiques uniques qui les distinguent des autres animaux étudiés dans les autres études. Il serait donc possible de faire une étude comparative entre types d'élevages. Ce type d'animaux pourrait apporter une variabilité supplémentaire dans la base de données construite au niveau Européen afin de consolider le modèle de prédiction 3G qui deviendrait, de fait, plus adapté à la diversité des bovins élevés en Europe.

3. Apport d'un système de prédiction de la qualité sensorielle de la viande bovine

La baisse de la consommation de la viande bovine a pu être ralentie en Australie grâce au système MSA (Legrand et al., 2017). Le système a permis non seulement de ralentir cette baisse mais aussi d'accroître la rentabilité de la filière bovine au sein du pays (Neveu et al., 2019). Au cours de la période 2020-2021, le programme MSA a généré une valeur ajoutée supplémentaire estimée à 204 millions de dollars pour les producteurs de viande bovine MSA, soit une augmentation significative par rapport aux 157 millions de dollars de plus-value estimés en 2020-2021 (Meat & Livestock Australia, 2022). Un tel système aurait donc également la capacité de renforcer et d'accroître la rentabilité de la filière bovine en France. Les bovins classés MSA représentent toujours plus de la moitié de l'abattage national de bovins adultes, atteignant un nouveau record de 55 % en 2021-2022, contre 53 % en 2020-2021. Plus de 3,25 millions de bovins ont été classés MSA par le biais de 39 transformateurs de viande bovine australiens en 2021-2022 (Meat & Livestock Australia, 2022). Ceci démontre donc un intérêt par les producteurs et les transformateurs de ce système non seulement en Australie mais aussi en Europe car chacune de ses parties prenantes y trouve un intérêt.

S'agissant des éleveurs :

- Ceci permettrait aux éleveurs européens de ne plus être rémunérés seulement sur la conformation et l'état d'engraissement de leurs animaux mais également sur un potentiel de qualité sensorielle qu'offrent les indices MSA ou 3G. Ceci leur permettra d'avoir une valeur ajoutée sur leur produit augmentant ainsi leur marge et donc leur revenu. Ainsi, par exemple, l'entreprise Beauvallet situé à Limoges a développé une marque premium de viande bovine appelé « Or rouge » en utilisant les principes du système MSA. Tout éleveur dont la carcasse est classée « Or rouge » reçoit une rémunération supplémentaire.
- Le système de prédiction pourrait donc aider les éleveurs à sélectionner les animaux qui ont un potentiel de production de viande de qualité supérieure grâce au score de l'indice MSA ou de l'indice 3G. En Australie, le MLA a développé l'application « myMSA » qui est un portail en ligne permettant aux éleveurs d'accéder facilement aux données de classement de leurs carcasses.

Le portail offre également une gamme d'outils de retour d'information et de comparaison. En 2021-2022 plus de 2500 éleveurs ont fait usage de ce portail (Meat & Livestock Australia, 2022). Grâce à myMSA, les producteurs ont donc un accès rapide et pratique à toutes les informations nécessaires pour évaluer et améliorer les performances de qualité sensorielle de leur production, ce qui contribue à une plus grande transparence de la filière.

S'agissant des transformateurs :

- Le système de prédiction pourrait aider les transformateurs à optimiser la découpe de la viande en fonction de la qualité sensorielle de chaque carcasse selon la prédiction des scores MQ4. Les abatteurs pourraient ainsi proposer des morceaux de viande correspondant aux attentes des consommateurs
- Le système de prédiction pourrait aider les transformateurs à réduire les pertes en identifiant les carcasses et les découpes qui ont une qualité sensorielle inférieure à la moyenne. Les transformateurs pourraient ainsi ajuster leur offre pour éviter de proposer des produits de qualité inférieure.
- Le système de prédiction pourrait aider les transformateurs à certifier la qualité sensorielle de la viande qu'ils proposent. En Australie, plus de 190 marques de viandes bovines font usage du système MSA (Meat & Livestock Australia, 2022). Les transformateurs peuvent ainsi répondre aux attentes des consommateurs en proposant des produits de qualité supérieure, tout en se différenciant de leurs concurrents. Ceci est également l'objectif des SIQO qui ont été mis en place en France comme moyen de mieux valoriser et d'apporter une meilleure image de la viande bovine (Lebret & Picard, 2015). Les différentes marques sous SIQO pourraient donc utiliser cette méthodologie pour mieux étayer voire consolider la qualité gustative supérieure de leurs produits. Le système MSA repose sur plus de 1,3 million de tests gustatifs réalisés par plus de 200 000 consommateurs provenant de 13 pays, et prend en compte les facteurs qui influencent la qualité sensorielle de la ferme à l'assiette (Meat & Livestock Australia, 2022).

Plusieurs professionnels de la filière seraient également favorables à la mise en place d'un tel système en France (Fayet, 2022). Même si les professionnels de la filière reconnaissent la pertinence d'un tel système, ils considèrent que les freins principaux de sa mise en place concernent l'organisation, le coût de mise en place et la stratégie de la filière (Fayet, 2022). Afin que la mise en place d'un tel système de prédiction soit la moins contraignante et la plus rapide possible, les mesures instrumentales seraient un moyen adéquat. Les mesures instrumentales permettraient d'éviter de passer par la formation d'un grand nombre de classificateurs qui pourrait être chronophage et coûteux en termes d'accès aux carcasses. Il serait donc judicieux d'implémenter un tel modèle directement avec des

mesures objectives ou instrumentales. La caméra Q-FOM™ a été conçue dans cet esprit pour mesurer notamment le persillé. Si le choix a été fait sur le persillé, cela est dû à la corrélation qu'il a avec la qualité sensorielle de la viande bovine.

4. Importance du persille sur la qualité sensorielle de la viande bovine

INTERBEV a élaboré en 2017 un plan de filière dans le cadre des Etats généraux de l'Alimentation dont l'objectif est d'améliorer la qualité sensorielle de la viande bovine (Interbev, 2017). En 2022 l'interprofession a validé une grille visuelle de mesure de persillé en 6 classes (notées de 1 à 6). Des travaux faits en France et à l'étranger ont montré qu'à l'aveugle, les consommateurs préfèrent les viandes persillées aux viandes maigres (Normand, 2017; O'Quinn et al., 2012). Cependant, le gras intramusculaire influence positivement la tendreté en ayant un effet « lubrifiant » lors de la mastication. Il améliore aussi la jutosité et la flaveur (Choi et al., 2019; Harper, 2003).

Le gras intramusculaire désigne la quantité de lipides présente dans le muscle et exclut les dépôts lipidiques environnants, intermusculaires et sous-cutanés. Le persillé est la partie visible du gras intramusculaire et est utilisé comme indicateur du niveau de gras intramusculaire et de la qualité sensorielle de la viande dans les systèmes de classement de la viande au Japon, aux États-Unis et en Australie (Polkinghorne et Thompson 2010). Le taux de gras intramusculaire est une mesure objective résultant de l'analyse chimique du tissu musculaire effectuée en laboratoire, tandis que le persillé est une mesure moins répétable effectuée par un classificateur humain à l'aide d'une grille au cours du traitement commercial d'une carcasse. Le persillé peut expliquer environ 75% de la variation du gras intramusculaire et est utilisé comme un "proxy" pratique du gras intramusculaire dans le cadre commercial (Ferguson, 2004). Les systèmes de classification qui évaluent le persillé apportent une plus-value aux carcasses qui ont un niveau de persillé plus élevé. L'importance du persillé vient donc de son influence positive sur la qualité sensorielle.

5. Mesures instrumentales des critères de la qualité sensorielle

Les mesures instrumentales offrent une objectivité et une précision supérieures par rapport aux évaluations sensorielles faites de manière visuelle (Delgado-Pando et al., 2021). Cela permet d'obtenir des données plus fiables et reproductibles, facilitant ainsi la comparaison et l'évaluation de la qualité

de la viande. Dans notre étude nous avons utilisé les mesures instrumentales pour prédire le niveau de persillé selon la grille MSA.

En intégrant ces mesures instrumentales directement sur la chaîne de production, il est possible de réaliser un contrôle qualité en temps réel. Cela permet d'identifier rapidement les écarts de qualité et de prendre des mesures correctives pour améliorer la production et minimiser les pertes. L'utilisation d'outils qui peuvent être utilisés directement sur la chaîne de production offre une plus grande efficacité et permet de gagner du temps, évitant ainsi les retards ou les perturbations dans le processus de production.

Les mesures instrumentales peuvent également contribuer à l'innovation et à l'amélioration continue de la qualité de la viande bovine. En identifiant les caractéristiques spécifiques qui influencent la qualité, les producteurs peuvent ajuster leurs pratiques d'élevage, de nutrition et de gestion pour optimiser ces critères. Cela peut conduire à une viande de meilleure qualité, répondant aux attentes des consommateurs et renforçant ainsi la compétitivité de la filière viande bovine.

Les spectromètres portables ont pour avantage de pouvoir être utilisés directement sur la chaîne de production (Teixeira dos Santos et al. 2013 ; Dixit et al. 2020). A l'heure actuelle, il n'existe pas encore de spectromètre portable accrédité pour effectuer des mesures de manière routinière sur la chaîne de production. De plus, le niveau de précision avec des spectromètres portables est généralement plus bas en raison de la gamme de longueurs d'onde plus courte (700-1700 nm) par rapport aux spectromètres de laboratoire qui incluent les spectres visibles et qui vont plus loin dans le proche infrarouge (350-2500 nm). Ces spectromètres de laboratoire ont pu donner des prédictions avec un niveau de précision prometteur (Cozzolino et Murray 2002 ; Prieto et al. 2011 ; Pullanagari et al. 2015).

Diverses recherches ont déjà exploré des critères supplémentaires pour élargir la portée du MSA et améliorer ses prédictions (Bonny et al., 2018). Parmi ces critères, les données génétiques jouent un rôle essentiel. Les marqueurs génétiques permettent d'identifier des gènes et des variants spécifiques influençant des caractéristiques de qualité de la viande, telles que le persillé. En associant ces marqueurs aux caractéristiques des animaux, il devient possible d'estimer la qualité de leur viande dès la phase d'élevage. Cette intégration des données génétiques dans le système MSA renforcerait la précision de la prédiction de la qualité sensorielle. Elle prendrait ainsi en compte des facteurs génétiques individuels, en plus des éléments environnementaux et nutritionnels, ce qui rendrait les évaluations plus précises et plus informatives pour l'ensemble de la filière, des producteurs aux consommateurs.

6. Rôle des systèmes d'information dans la prédiction de la qualité sensorielle

Les systèmes d'information concernent la saisie, le stockage, l'analyse et la récupération des données (McMeekin et al., 2006). Ils peuvent soutenir la prise de décision, la coordination, le contrôle, l'analyse et la visualisation des données. Ils peuvent être construits pour stocker et gérer des vocabulaires contrôlés tels que des thésaurus et des ontologies. Un système d'information qui intègre ces deux composantes peut aider à améliorer la qualité et la précision des informations stockées et récupérées. Il peut également permettre une recherche plus efficace, interopérabilité entre différents systèmes d'informations, une compréhension commune du domaine et une prise de décision plus éclairée.

Enfin d'explicitier le vocabulaire utilisé dans le domaine de la viande, différentes ressources ont été élaborées tel que l'Encyclopedia of Meat Sciences (Dikeman & Devine, 2014) ou encore le dictionnaire de la viande développé par l'académie de la viande en 2012. Ces ressources contiennent des définitions sur les différentes découpes, les termes de boucher etc. La recherche collaborative apporte souvent une disparité dans la collecte de données avec une variété de formats, de fréquence de collecte et un volume croissant. Ceci se rapporte de nos jours à « l'internet des objets » et au *big data*. Afin de promouvoir le transfert de connaissance et des données, il devient nécessaire de disposer de référentiels terminologiques. Même si les moteurs de recherche sont devenus plus performants au fil des années, il devient néanmoins nécessaire de recourir à des outils spécialisés pour gagner en temps et en pertinence.

Un thésaurus est une « liste d'autorité organisée de descripteurs (termes préférentiels ou recommandés) et de non-descripteurs (synonymes) obéissant à des règles terminologiques propres et reliés entre eux par des relations sémantiques (hiérarchiques, associatives, ou d'équivalence). Cette liste sert à traduire en un langage artificiel dépourvu d'ambiguïté des notions exprimées en langage naturel » (AFNOR, 1981). Un thésaurus structuré et normalisé facilite l'accès et la recherche d'informations. Son rôle est de hiérarchiser les termes afin de permettre un accès facile, une harmonisation pour contrôler le vocabulaire, une reformulation pour élargir ou focaliser la recherche (Gheorghita, 2014).

Le thésaurus peut également permettre l'indexation de documents dans une banque de donnée bibliographique (Bennaghmouch, 1985; Gheorghita, 2014). Le Hellenic Food Thesaurus (HelTH) a été initié en 2018 par l'Université Agricole d'Athènes. Ce thésaurus collecte toutes les données

nutritionnelles et qualitatives fournies sur les étiquettes des produits alimentaires de marque (Katidi et al., 2021). Il comprend des informations sur la composition nutritionnelle des aliments, qui sont extraites à partir des étiquettes alimentaires des produits disponibles en boutiques ou en GMS en Grèce. Elle comprend également les données relatives à toute allégation nutritionnelle et/ou de santé figurant sur l'emballage, ainsi que les informations relatives à toute autre allégation de qualité figurant sur l'emballage (environnementale, logo, origine, etc.) ainsi que des déclarations nutritionnelles vérifiées par des chercheurs indépendants et conservées dans la base de données. Elle contient des données sur plus de quatre mille produits. Il a par exemple été utilisé pour faire une investigation sur le Nutri-Score en Grèce (Vlassopoulos et al., 2022).

En utilisant le thésaurus, les experts de la filière viande peuvent décrire de manière cohérente les caractéristiques sensorielles, physiques et chimiques de la viande. Cela permet une meilleure compréhension et communication entre les acteurs de la chaîne d'approvisionnement, des producteurs aux consommateurs. Il devient donc possible de créer des modèles prédictifs basés sur des caractéristiques spécifiques avec des définitions normées.

7. La prédiction de la qualité de la qualité sensorielle comme stratégie face aux alternatifs à la viande

La production de viande reçoit aujourd'hui des critiques sans précédent. Ces critiques favorisent le développement du marché des substituts de viande. Ces substituts commencent à se confondre avec la viande par leurs dénominations et tentent de mimer les aliments fabriqués à partir de viande en termes d'aspect, de texture et de goût (Ismail et al., 2020).

L'agriculture cellulaire consiste à fabriquer des produits agricoles à partir de cultures cellulaires. Celles-ci se distinguent donc des autres protéines alternatives par la recherche de versions « biologiquement équivalentes » aux produits animaux (Mattick, 2018). Le principe est de reproduire le procédé biologique de l'animal conduisant à la synthèse de cet aliment. Partant de ce fait, l'aliment devrait donc se rapprocher de son équivalent naturel car produit de la même façon.

La « viande artificielle » ou « in vitro » (Shapiro, 2018 ; Kadim et al., 2015 ; Moritz et al., 2015 ; Post, 2012) est présentée par de nombreuses start-ups comme une alternative pour des consommateurs écoresponsables ou qui ne souhaitent plus consommer des animaux morts sans toutefois supprimer la viande de leur régime alimentaire.

Face à cette popularité grandissante de la viande de culture, la viande issue de l'élevage pourrait perdre des parts de marché et voire sa rentabilité chuter davantage. La viande de culture, par sa

méthode de production standardisée pourrait fournir une qualité sensorielle faiblement variable. La viande issue de l'élevage quant à elle pourrait se différencier sur sa qualité sensorielle et ce sera donc un avantage si une méthode de prédiction permet de diminuer la variabilité de cette qualité sensorielle.

8. Perspectives de cette étude

- Construction d'une ontologie

Le thésaurus de la viande peut être utilisé pour construire l'ontologie de la viande bovine. Une ontologie est une représentation formelle et structurée hiérarchiquement, d'un ensemble d'objets et des relations de ces objets. Elle peut être utilisée pour organiser, structurer et partager les connaissances dans un domaine donné, en fournissant une base commune de compréhension et de communication. Avec une ontologie, il est possible de définir et de représenter formellement les caractéristiques, les relations et les mesures de qualité de la viande. Cela permettrait de créer une structure de connaissances cohérente et unifiée, qui peut être utilisée pour la prédiction de la qualité de la viande.

- Amélioration du modèle de prédiction

Dans le but d'améliorer la précision de notre modèle de prédiction au sein de la race limousine, il serait pertinent de mener une étude approfondie en incluant une plus grande variété de muscles. En effet, en élargissant l'échantillon de muscles étudiés, nous pourrions réellement capturer la diversité des caractéristiques sensorielles de la viande. Cela nous permettrait de mieux comprendre comment différents muscles contribuent à la qualité sensorielle et d'identifier les facteurs clés influençant cette qualité. De plus, une approche plus exhaustive nous permettrait d'obtenir des données plus fiables et représentatives, renforçant ainsi la validité de notre modèle prédictif. Une telle étude contribuerait à enrichir notre compréhension de la relation entre les caractéristiques des muscles et la qualité sensorielle, offrant des perspectives précieuses pour l'amélioration de la production de viande bovine de la race limousine. D'autres études pourront également prendre en compte la variabilité venant des classificateurs.

- Amélioration des mesures instrumentales

Comme dit précédemment, accroître la variabilité des échantillons pour améliorer la précision des mesures instrumentales est une démarche à poursuivre.

Une autre question qui se pose est la mesure de référence que l'on cherche à prédire avec ces outils. Utiliser comme mesure de référence le persillé visible à l'œil nu présente des inconvénients car cette mesure n'est pas suffisamment précise. Une approche prometteuse consisterait donc à utiliser le pourcentage de gras intramusculaire comme mesure de référence car il s'agit d'une mesure plus précise. Cette mesure permettrait de prendre en compte directement une composante intrinsèque de la qualité sensorielle de la viande. Cependant, il convient de noter que l'utilisation de cette référence peut présenter certains inconvénients, notamment en termes de temps et de coûts. En effet, l'évaluation précise du pourcentage de gras intramusculaire nécessite des techniques plus complexes et des analyses plus approfondies uniquement réalisables dans les laboratoires de recherche, ces mesures étant coûteuses, invasives et consommatrices de temps. Cependant, malgré ces contraintes, l'incorporation du pourcentage de gras intramusculaire comme valeur de référence pourrait fournir une mesure plus objective que l'évaluation visuelle du persillé faite sur une grille. Il serait donc intéressant de poursuivre des études visant à évaluer l'efficacité et la faisabilité de cette approche, en prenant en compte à la fois ses avantages et ses limitations.

- Les résultats obtenus sur les travaux génétiques indiquent clairement que des analyses plus approfondies sont nécessaires. L'utilisation de 60 000 marqueurs SNPs pour des analyses GWAS supplémentaires sur la totalité des phénotypes évalués par la méthode MSA permettrait d'explorer plus en détail les relations génétiques liées à la qualité sensorielle de la viande bovine.

- Le développement d'outils comme la caméra Q-FOM™ doit se poursuivre pour l'adapter à une utilisation en routine dans un contexte industriel. De plus, ce type d'outil pourra être utilisable à l'avenir pour évaluer le persillé de la viande bovine et donc pour faire du phénotypage massif et sélectionner les animaux de demain ou pour trier les carcasses en fonction des circuits commerciaux.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de cette thèse était de prédire la qualité sensorielle de la viande bovine provenant de vaches issues de race bovine Limousine. Les travaux réalisés ont permis tout d'abord de mettre en évidence la disparité existante entre les différents termes utilisés pour décrire cette qualité sensorielle. Afin de remédier à cette situation, nous avons proposé une solution en créant un thésaurus de la viande à partir du dictionnaire de l'académie de la viande, qui standardise ces termes et facilite ainsi la collaboration entre les différents acteurs de la filière et l'interopérabilité des bases de données. Ensuite, nous avons testé le modèle MSA et le prototype 3G pour prédire le niveau de satisfaction des consommateurs naïfs, car ces derniers reflètent mieux les attentes des consommateurs. La viande utilisée dans cette étude provenait d'élevages à haute valeur naturelle, caractérisés par un faible niveau d'intrants et un élevage à l'herbe. La performance de ces deux systèmes a été évaluée en fonction des indices MSA et 3G, qui sont des indicateurs de qualité sensorielle pour toute la carcasse. Les résultats ont montré que les deux indices présentaient des corrélations similaires, mais modérées, avec les critères de qualité tels que la tendreté, la jutosité, la flaveur et l'appréciation globale. Ces résultats suggèrent que le protocole 3G pourrait avoir des performances au moins similaires au système MSA. Dans le système MSA, ces quatre critères ont été combinés en un seul score, appelé le score MQ4, qui permet de prédire le niveau de satisfaction des consommateurs, au niveau de chaque muscle. Ce niveau de satisfaction est établi sur un nombre croissant d'étoiles (2 à 5 étoiles). Les résultats de prédiction obtenus pour chaque muscle dans cette étude étaient légèrement inférieurs à ceux observés dans la littérature, ce qui pourrait être attribué au type d'animal étudié (des vaches âgées), à la faible variabilité du type d'animal et au faible nombre de muscles étudiés.

La classification des carcasses étant faite en abattoir de manière visuelle, nous avons évalué différents outils technologiques pour mesurer ces critères de manière plus objective. Les données issues de la caméra Q-FOM™ étaient précises et les mieux corrélées aux valeurs de persillé données par les classificateurs. Nous proposons que pour l'implémentation d'un tel système, il serait plus judicieux de passer par des mesures plus objectives et prioriser les outils qui peuvent facilement être utilisés directement sur la chaîne de production pour mesurer plusieurs critères de manière simultanée. Pouvoir maîtriser et prédire la qualité gustative permettra à la filière viande bovine de mieux fidéliser ses consommateurs, de mieux rémunérer ses producteurs et de consolider sa part de marché face au nombre grandissant de substituts de viande

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. (1981). *Règles d'établissement des thésaurus monolingues*. <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-z47100/regles-detablissement-des-thesaurus-monolingues/fa015919/14806>
- Altmann, B. A., Trinks, A., & Mörlein, D. (2023). Consumer preferences for the color of unprocessed animal foods. *Journal of Food Science*, 88(3), 909–925. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16485>
- Astruc, T. (2014). MUSCLE FIBER TYPES AND MEAT QUALITY. In M. Dikeman & C. Devine (Eds.), *Encyclopedia of Meat Sciences (Second Edition)* (pp. 442–448). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384731-7.00185-9>
- Avilés, C., Martínez, A. L., Domenech, V., & Peña, F. (2015). Effect of feeding system and breed on growth performance, and carcass and meat quality traits in two continental beef breeds. *Meat Science*, 107, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.04.016>
- Adzitey, F. and Nurul, H. (2011) Pale Soft Exudative (PSE) and Dark Firm Dry (DFD) Meats: Causes and Measures to Reduce These Incidences—A Mini Review. *International Food Research Journal*, 18, No. 1.
- Bedhane *et al.* (2019). Genome-wide association study of meat quality traits in Hanwoo beef cattle using imputed whole-genome sequence data. *Front. Genet.* 10:1235. doi:10.3389/fgene.2019.01235.
- Beef Market Size, Growth & Trends | Forecast Report [2029]*. (n.d.). Retrieved January 4, 2023, from <https://www.fortunebusinessinsights.com/beef-market-106640>
- Bennaghmouch, M. K. (1985). *Conception assistée par ordinateur de système de gestion de base de données documentaires à thésaurus évolutif* [These de doctorat, Paris 9]. <https://www.theses.fr/1985PA090012>
- Berri, C., Picard, B., Leuret, B., Andueza, D., Lefèvre, F., Le Bihan-Duval, E., Beauclercq, S., Chartrin, P., Vautier, A., Legrand, I., & Hocquette, J.-F. (2019). Predicting the Quality of Meat: Myth or Reality? *Foods*, 8(10), 10. <https://doi.org/10.3390/foods8100436>
- Bhat, Z. F., Morton, J. D., Mason, S. L., & Bekhit, A. E.-D. A. (2018). Role of calpain system in meat tenderness: A review. *Food Science and Human Wellness*, 7(3), 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2018.08.002>
- Bonfatti, V., Albera, A., & Carnier, P. (2013). Genetic associations between daily BW gain and live fleshiness of station-tested young bulls and carcass and meat quality traits of commercial intact males in Piemontese cattle. *Journal of Animal Science*, 91(5), 2057–2066. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5386>
- Bonny, S. P. F., Hocquette, J.-F., Pethick, D. W., Farmer, L. J., Legrand, I., Wierzbicki, J., Allen, P., Polkinghorne, R. J., & Gardner, G. E. (2016). The variation in the eating quality of beef from different sexes and breed classes cannot be completely explained by carcass measurements. *Animal*, 10(6), 987–995. <https://doi.org/10.1017/S175173111500292X>
- Bonny, S. P. F., O'Reilly, R. A., Pethick, D. W., Gardner, G. E., Hocquette, J.-F., & Pannier, L. (2018). Update of Meat Standards Australia and the cuts based grading scheme for beef and sheepmeat. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(7), 1641–1654. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61924-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61924-0)
- Bonny, S. P. F., Pethick, D. W., Legrand, I., Wierzbicki, J., Allen, P., Farmer, L. J., Polkinghorne, R. J., Hocquette, J.-F., & Gardner, G. E. (2016). European conformation and fat scores have no relationship with eating quality. *Animal*, 10(6), 996–1006. <https://doi.org/10.1017/S1751731115002839>
- Brecic, R., Mesic, Z., Cerjak, M., 2017. Importance of intrinsic and extrinsic quality food characteristics by different consumer segments. *Br. Food J.* 119, 845–862. <https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2016-0284>
- Bureš, D., & Bartoň, L. (2018). Performance, carcass traits and meat quality of Aberdeen Angus, Gascon, Holstein and Fleckvieh finishing bulls. *Livestock Science*, 214, 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.06.017>

- Carcass Beef Grades and Standards | Agricultural Marketing Service.* (n.d.). Retrieved September 23, 2021, from <https://www.ams.usda.gov/grades-standards/carcass-beef-grades-and-standards>
- Cassagnol, V. (2018). *Facteurs déterminant la qualité sensorielle de la viande bovine : quelle importance de la race ? VPC-2018-34-1-5.*
<https://www.viandesetproduitscarnes.fr/index.php/en/904-facteurs-determinant-la-qualite-sensorielle-de-la-viande-bovine-quelle-importance-de-la-race>
- Chatellier, V., Perrot, C., Beguin, E., Moraine, M., & Veysset, P. (2021). Compétitivité et emplois à la production dans les secteurs bovins français. *INRAE Productions Animales*, 33(4), 261–282. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.4.4609>
- Chingala, G., Raffrenato, E., Dzama, K., Hoffman, L. C., & Mapiye, C. (2017). Towards a regional beef carcass classification system for Southern Africa. *South African Journal of Animal Science*, 47(4), 408. <https://doi.org/10.4314/sajas.v47i4.1>
- Choi, Y. M., Garcia, L. G., & Lee, K. (2019). Correlations of Sensory Quality Characteristics with Intramuscular Fat Content and Bundle Characteristics in Bovine Longissimus Thoracis Muscle. *Food Science of Animal Resources*, 39(2), 197–208. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2019.e15>
- Choi, Y. M., & Kim, B. C. (2009). Muscle fiber characteristics, myofibrillar protein isoforms, and meat quality. *Livestock Science*, 122(2), 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.08.015>
- Chriki, S., Payet, V., Pflanzner, S. B., Ellies-Oury, M.-P., Liu, J., Hocquette, É., Rezende-de-Souza, J. H., & Hocquette, J.-F. (2021). Brazilian Consumers' Attitudes towards So-Called "Cell-Based Meat." *Foods*, 10(11), 2588. <https://doi.org/10.3390/foods10112588>
- Cicia, G., & Colantuoni, F. (2010). Willingness to Pay for Traceable Meat Attributes: A Meta-analysis. *International Journal on Food System Dynamics*, 01(3). <https://econpapers.repec.org/article/agsijofsd/97028.htm>
- Clinquart, A., Ellies-Oury, M. P., Hocquette, J. F., Guillier, L., Santé-Lhoutellier, V., & Prache, S. (2022). Review: On-farm and processing factors affecting bovine carcass and meat quality. *Animal*, 16, 100426. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100426>
- Coles, C. A., Wadeson, J., Knight, M. I., Cafe, L. M., Johns, W. H., White, J. D., Greenwood, P. L., & McDonagh, M. B. (2014). A disintegrin and metalloprotease-12 is type I myofiber specific in *Bos taurus* and *Bos indicus* cattle. *Journal of Animal Science*, 92(4), 1473–1483. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7069>
- Conanec, A., Campo, M., Richardson, I., Ertbjerg, P., Failla, S., Panea, B., Chavent, M., Saracco, J., Williams, J. L., Ellies-Oury, M.-P., & Hocquette, J.-F. (2021). Has breed any effect on beef sensory quality? *Livestock Science*, 250, 104548. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104548>
- Coombs, C. E. O., Fajardo, M., & González, L. A. (2021). Comparison of smartphone and lab-grade NIR spectrometers to measure the chemical composition of lamb and beef. *Animal Production Science*, 61(16), 1723-1733. <https://doi.org/10.1071/AN21069>.
- Daley, C. A., Abbott, A., Doyle, P. S., Nader, G. A., & Larson, S. (2010). A review of fatty acid profiles and antioxidant content in grass-fed and grain-fed beef. *Nutrition Journal*, 9, 10. <https://doi.org/10.1186/1475-2891-9-10>
- Dashmaa Dashdorj, Touseef Amna, & Inho Hwang. (2015). Influence of specific taste-active components on meat flavor as affected by intrinsic and extrinsic factors: an overview. *European Food Research & Technology*, 241(2), 157–171. <https://doi.org/10.1007/s00217-015-2449-3>
- Delgado-Pando, G., Allen, P., Troy, D. J., & McDonnell, C. K. (2021). Objective carcass measurement technologies: Latest developments and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 771–782. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.016>
- Devlin, D. J., Gault, N. F. S., Moss, B. W., Tolland, E., Tollerton, J., Farmer, L. J., & Gordon, A. W. (2017). Factors affecting eating quality of beef. *Advances in Animal Biosciences*, 8(s1), s2–s5. <https://doi.org/10.1017/S2040470017001583>
- Dikeman, M., & Devine, C. (Eds.). (2014). *Encyclopedia of meat sciences* (2. ed). Elsevier.
- Dixit, Y., Casado-Gavaldà, M. P., Cama-Moncunill, R., Cama-Moncunill, X., Markiewicz-Keszycka, M., Cullen, P. J., & Sullivan, C. (2017). Developments and Challenges in Online NIR Spectroscopy

- for Meat Processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(6), 1172–1187. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12295>
- Dubost, A. (2012). *Propriétés structurales et biochimiques du tissu conjonctif intramusculaire et tendreté de la viande bovine* [These de doctorat, Clermont-Ferrand 2]. <https://www.theses.fr/2012CLF22284>
- Duckett, S. K., Neel, J. P. S., Fontenot, J. P., & Clapham, W. M. (2009). Effects of winter stocker growth rate and finishing system on: III. Tissue proximate, fatty acid, vitamin, and cholesterol content. *Journal of Animal Science*, 87(9), 2961–2970. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-1850>
- Ellies-Oury, M.-P., & Hocquette, J.-F. (2018). *La chaîne de laviande bovine: production, transformation, valorisation et consommation*.
- Ellies-Oury, M.-P., Lee, A., Jacob, H., & Hocquette, J.-F. (2019). Meat consumption – what French consumers feel about the quality of beef? *Italian Journal of Animal Science*, 18(1), 646–656. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2018.1551072>
- ELSIK, C. G., TELLAM, R. L., & WORLEY, K. C. (2009). The Genome Sequence of Taurine Cattle : A Window to Ruminant Biology and Evolution. *The Genome Sequence of Taurine Cattle : A Window to Ruminant Biology and Evolution*, 324(5926), 522–528.
- Ensembl. (2018). *Bos_taurus - Ensembl genome browser* 109. https://www.ensembl.org/Bos_taurus/Info/Annotation
- Evrat-Georgel, C. (2008). *Sensory evaluation of beef eating quality in France and UK at two cooking temperatures*. https://www.agrireseau.net/bovinsboucherie/documents/pdf_CR_170832028%5B1%5D.pdf
- Fayet, T. (2022). Les outils de prédiction de la qualité à l'épreuve des professionnels français. *Viandes et Produits Carnés*, VPC-2022-3842. <https://www.viandesetproduitscarnes.com/index.php/fr/1237-les-outils-de-prediction-de-la-qualite-a-l-epreuve-des-professionnels-francais>
- Ferguson, D. (2004). Objective on-line assessment of marbling: A brief review. *Australian Journal of Experimental Agriculture - AUST J EXP AGR*, 44. <https://doi.org/10.1071/EA02161>
- Ferguson, D. M., Bruce, H. L., Thompson, J. M., Egan, A. F., Perry, D., & Shorthose, W. R. (2001). Factors affecting beef palatability — farmgate to chilled carcass. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41(7), 879–891. <https://doi.org/10.1071/ea00022>
- Font-i-Furnols, M. (2023). Meat Consumption, Sustainability and Alternatives: An Overview of Motives and Barriers. *Foods*, 12(11), 11. <https://doi.org/10.3390/foods12112144>
- Geay, Y., Bauchart, D., Hocquette, J.-F., & Culioli, J. (2001). Effect of nutritional factors on biochemical, structural and metabolic characteristics of muscles in ruminants, consequences on dietetic value and sensorial qualities of meat. *Reproduction Nutrition Development*, 41(1), 1–26. <https://doi.org/10.1051/rnd:2001108>
- Gheorghita, I. (2014). *Construction automatique de hiérarchies sémantiques à partir du Trésor de la Langue Française informatisé (TLFi) : application à l'indexation et la recherche d'images* [These de doctorat, Université de Lorraine]. <https://www.theses.fr/2014LORR0281>
- Gotoh, T., Takahashi, H., Nishimura, T., Kuchida, K., & Mannen, H. (2014). Meat produced by Japanese Black cattle and Wagyu. *Animal Frontiers*, 4(4), 46–54. <https://doi.org/10.2527/af.2014-0033>
- Gousset, C., Gregorio, E., Marais, B., Rusalen, A., Chriki, S., Hocquette, J.-F., & Ellies-Oury, M.-P. (2022). Perception of cultured “meat” by French consumers according to their diet. *Livestock Science*, 260, 104909. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104909>
- Griffon, L., Boulesteix, P., Delpeuch, A., Govignon-Gion, A., Guerrier, J., Leudet, O., Miller, S., Saintilan, R., Venot, E., & Tribout, T. (2017). La sélection génétique des races bovines allaitantes en France : un dispositif et des outils innovants au service des filières viande. *INRAE Productions Animales*, 30(2), 2. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2017.30.2.2237>
- Gruffat, D., Picard, B. B., Bauchart, D., & Micol, D. D. (2015). *La viande bovine: les principales qualités recherchées*.

- Grunert, K. G., Bredahl, L., & Brunsø, K. (2004). Consumer perception of meat quality and implications for product development in the meat sector-a review. *Meat Science*, *66*(2), 259–272. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(03\)00130-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(03)00130-X)
- Harper, G.S. (2003). *Biological determinants of intramuscular fat deposition in beef cattle: Current mechanistic knowledge and sources of variation* | *Meat & Livestock Australia*. MLA Corporate. <https://www.mla.com.au/research-and-development/reports/2003/biological-determinants-of-intramuscular-fat-deposition-in-beef-cattle-current-mechanistic-knowledge-and-sources-of-variation/>
- Hocquette, É., Liu, J., Ellies-Oury, M.-P., Chriki, S., & Hocquette, J.-F. (2022). Does the future of meat in France depend on cultured muscle cells? Answers from different consumer segments. *Meat Science*, *188*, 108776. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108776>.
- Hocquette, J. F., Ortigues-Marty, I., Pethick, D., Herpin, P., & Fernandez, X. (1998). Nutritional and hormonal regulation of energy metabolism in skeletal muscles of meat-producing animals. *Livestock Production Science*, *56*(2), 115–143. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(98\)00187-0](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(98)00187-0).
- Hocquette, J.-F., & Chatellier, V. (2011). Prospects for the European beef sector over the next 30 years. *Animal Frontiers*, *1*(2), 20–28. <https://doi.org/10.2527/af.2011-0014>
- Hocquette, J.-F., Ellies-Oury, M.-P., Legrand, I., Pethick, D., Gardner, G., Wierzbicki, J., & Polkinghorne, R. J. (2020). Research in Beef Tenderness and Palatability in the Era of Big Data. *Meat and Muscle Biology*, *4*(2), 2. <https://doi.org/10.22175/mmb.9488>
- Hopkins, D. L., Stanley, D. F., Martin, L. C., Toohey, E. S., Gilmour, A. R., Hopkins, D. L., Stanley, D. F., Martin, L. C., Toohey, E. S., & Gilmour, A. R. (2007). Genotype and age effects on sheep meat production 3. Meat quality. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *47*(10), 1155–1164. <https://doi.org/10.1071/EA06299>
- INAO. (2021a). *Appellation d'origine protégée/contrôlée (AOP/AOC)*. INAO. <https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQQ/Appellation-d-origine-protegee-controlee-AOP-AOC>
- INAO. (2021b). *Indication géographique protégée*. INAO. <https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQQ/Indication-geographique-protegee>
- INAO. (2021c). *Label Rouge*. INAO. <https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQQ/Label-Rouge>
- INAO. (2022). *Informations économiques*. INAO. <https://www.inao.gouv.fr/Publications/Donnees-et-cartes/Informations-economiques>
- Interbev. (2017). *PLAN DE LA FILIERE VIANDE BOVINE FRANCAISE*.
- Interbev. (2022). *ACCORD INTERPROFESSIONNEL RELATIF A L'EVALUATION DU PERSILLE SUR LES CARCASSES DE BOVINS AGES DE 8 MOIS OU PLUS (étendu)*. Interbev. <https://www.interbev.fr/ressource/accord-interprofessionnel-relatif-a-levaluation-du-persille-sur-les-carcasses-de-bovins-ages-de-8-mois-ou-plus/>
- Interbev, & Idele. (2023). *Recueil des connaissances sur la qualité des viandes bovines*. <https://www.interbev.fr/wp-content/uploads/2023/01/recueil-des-connaissances-sur-la-qualite-des-viandes-bovines.pdf>
- Jackman, P., Sun, D.-W., Du, C.-J., Allen, P., & Downey, G. (2008). Prediction of beef eating quality from colour, marbling and wavelet texture features. *Meat Science*, *80*(4), 1273–1281. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.06.001>
- Janssen, J., Cammack, K., Legako, J., Cox, R., Grubbs, J. K., Underwood, K., Hansen, J., Kruse, C., & Blair, A. (2021). Influence of Grain- and Grass-Finishing Systems on Carcass Characteristics, Meat Quality, Nutritional Composition, and Consumer Sensory Attributes of Bison. *Foods*, *10*(5), 5. <https://doi.org/10.3390/foods10051060>
- Ji, J.-R., & Takahashi, K. (2006). Changes in concentration of sarcoplasmic free calcium during post-mortem ageing of meat. *Meat Science*, *73*(3), 395–403. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.09.010>
- Kaneko, G. (2021). Impact of Pre-Mortem Factors on Meat Quality: An Update. *Foods*, *10*(11), 2749. <https://doi.org/10.3390/foods10112749>

- Kim, Y. H. B., Stuart, A., Black, C., & Rosenvold, K. (2012). Effect of lamb age and retail packaging types on the quality of long-term chilled lamb loins. *Meat Science*, *90*(4), 962–966. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.11.040>
- Kim, Y. H. B., Warner, R. D., Rosenvold, K., Kim, Y. H. B., Warner, R. D., & Rosenvold, K. (2014). Influence of high pre-rigor temperature and fast pH fall on muscle proteins and meat quality: a review. *Animal Production Science*, *54*(4), 375–395. <https://doi.org/10.1071/AN13329>
- Kopuzlu, S., Esenbuga, N., Onenc, A., Macit, M., Yanar, M., Yuksel, S., Ozluturk, A., & Unlu, N. (2018). Effects of slaughter age and muscle type on meat quality characteristics of Eastern Anatolian Red bulls. *Archives Animal Breeding*, *61*(4), 497–504. <https://doi.org/10.5194/aab-61-497-2018>
- Label Rouge : tout savoir sur ce signe OFFICIEL de qualité.* (n.d.). oriGIn. Retrieved July 16, 2023, from <https://www.originfood.info/label-rouge/>
- Leal-Gutiérrez et al. (2020). Whole genome sequence data provides novel insights into the genetic architecture of meat quality traits in beef. *Front. Genet.* *4*(11):538640. doi:10.3389/fgene.2020.538640.
- Lebret, B., & Picard, B. (2015). Les principales composantes de la qualité des carcasses et des viandes dans les différentes espèces animales. *INRAE Productions Animales*, *28*(2), 2. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2015.28.2.3013>
- Lebret, B., Prache, s, Berri, C., Lefèvre, F., Bauchart, D., Picard, B., Corraze, G., Médale, F., Justine, F., & Alami-Durante, H. (2015). Meat quality: Influence of animals' characteristics and rearing conditions. *Productions Animales -Paris- Institut National de La Recherche Agronomique-*, *28*, 151–168.
- Legifrance, LOI n° 2018-938 du 30 octobre 2018 pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et alimentaire et une alimentation saine, durable et accessible à tous, 2018-938 (2018).
- Legrand, I., Hocquette, J.-F., Polkinghorne, R. J., & Pethick, D. W. (2013a). Prediction of beef eating quality in France using the Meat Standards Australia system. *Animal*, *7*(3), 524–529. <https://doi.org/10.1017/S1751731112001553>
- Legrand, I., Hocquette, J.-F., Polkinghorne, R. J., & Pethick, D. W. (2013b). Prediction of beef eating quality in France using the Meat Standards Australia system. *Animal*, *7*(3), 524–529. <https://doi.org/10.1017/S1751731112001553>
- Legrand, I., Hocquette, J.-F., Polkinghorne, R. J., & Wierzbicki, J. (2017). *Comment prédire la qualité de la viande bovine en Europe en s'inspirant du système australien MSA ?* <https://doi.org/10.15454/1.5137775572495574E12>
- Li, Y., Willer, C., Sanna, S., & Abecasis, G. (2009). Genotype Imputation. *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, *10*, 387–406. <https://doi.org/10.1146/annurev.genom.9.081307.164242>
- Listrat, A., Lebret, B., Louveau, I., Astruc, T., Bonnet, M., Lefaucheur, L., Picard, B., & Bugeon, J. (2016). How Muscle Structure and Composition Influence Meat and Flesh Quality. *The Scientific World Journal*, *2016*, e3182746. <https://doi.org/10.1155/2016/3182746>
- Liu, J., Chriki, S., Ellies-Oury, M.-P., Legrand, I., Pogorzelski, G., Wierzbicki, J., Farmer, L., Troy, D., Polkinghorne, R., & Hocquette, J.-F. (2020a). European conformation and fat scores of bovine carcasses are not good indicators of marbling. *Meat Science*, *170*, 108233. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108233>
- Liu, J., Chriki, S., Ellies-Oury, M.-P., Legrand, I., Pogorzelski, G., Wierzbicki, J., Farmer, L., Troy, D., Polkinghorne, R., & Hocquette, J.-F. (2020b). European conformation and fat scores of bovine carcasses are not good indicators of marbling. *Meat Science*, *170*, 108233. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108233>
- Liu, J., Ellies-Oury, M.-P., Chriki, S., Legrand, I., Pogorzelski, G., Wierzbicki, J., Farmer, L., Troy, D., Polkinghorne, R., & Hocquette, J.-F. (2020). Contributions of tenderness, juiciness and flavor liking to overall liking of beef in Europe. *Meat Science*, *168*, 108190. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108190>
- Liu, J., Hocquette, É., Ellies-Oury, M.-P., Chriki, S., & Hocquette, J.-F. (2021). Chinese Consumers'

- Attitudes and Potential Acceptance toward Artificial Meat. *Foods*, 10(2), 2. <https://doi.org/10.3390/foods10020353>
- Liu, J., Pannier, L., Ellies-Oury, M.-P., Legrand, I., Noel, F., Sepchat, B., Prache, S., Pethick, D., & Hocquette, J.-F. (2023). French consumer evaluation of eating quality of Angus x Salers beef: Effects of muscle cut, muscle slicing and ageing. *Meat Science*, 197, 109079. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.109079>
- Maltin, C., Balcerzak, D., Tilley, R., & Delday, M. (2003). Determinants of meat quality: tenderness. *Proceedings of the Nutrition Society*, 62(2), 337–347. <https://doi.org/10.1079/PNS2003248>
- Marette, S. (2021). Les perceptions des consommateurs et l'avenir de la consommation de viande. *Viande et Produits Carnés, VPC-2021-3734*. https://viandesetproduitscarnes.com/phocodownload/vpc_vol_37/Vol_3734_Perceptions-consommateurs.pdf
- Martin, F. J., Amode, M. R., Aneja, A., Austine-Orimoloye, O., Azov, A. G., Barnes, I., Becker, A., Bennett, R., Berry, A., Bhai, J., Bhurji, S. K., Bignell, A., Boddu, S., Branco Lins, P. R., Brooks, L., Ramaraju, S. B., Charkhchi, M., Cockburn, A., Da Rin Fiorretto, L., ... Flicek, P. (2023). Ensembl 2023. *Nucleic Acids Research*, 51(D1), D933–D941. <https://doi.org/10.1093/nar/gkac958>
- MASA. (2018). *alim'agri : les États généraux de l'alimentation*. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. <https://agriculture.gouv.fr/alimagri-les-etats-generaux-de-lalimentation>
- Matukumalli, L. K., Lawley, C. T., Schnabel, R. D., Taylor, J. F., Allan, M. F., Heaton, M. P., O'Connell, J., Moore, S. S., Smith, T. P. L., Sonstegard, T. S., & Van Tassell, C. P. (2009). Development and characterization of a high density SNP genotyping assay for cattle. *PLoS One*, 4(4), e5350. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005350>
- McGilchrist, P., Polkinghorne, R. J., Ball, A. J., & Thompson, J. M. (2019). The Meat Standards Australia Index indicates beef carcass quality. *Animal*, 13(8), 1750–1757. <https://doi.org/10.1017/S1751731118003713>
- McMeekin, T. A., Baranyi, J., Bowman, J., Dalgaard, P., Kirk, M., Ross, T., Schmid, S., & Zwietering, M. H. (2006). Information systems in food safety management. *International Journal of Food Microbiology*, 112(3), 181–194. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.048>
- Meat & Livestock Australia. (2018a). *Meat Standards Australia beef information kit*. https://www.mla.com.au/globalassets/mla-corporate/marketing-beef-and-lamb/documents/meat-standards-australia/msa-beef-tt_full-info-kit-lr.pdf
- Meat & Livestock Australia. (2018b). *Using the MSA Index to optimise beef eating quality*. https://www.mla.com.au/globalassets/mla-corporate/marketing-beef-and-lamb/documents/meat-standards-australia/msa18-beef-tt_using-the-msa-index-to-optimise-beef-eating-quality-lr_updated.pdf
- Meat & Livestock Australia. (2022). *2021–2022 Meat Standards Annual outcome Report*. https://www.mla.com.au/globalassets/mla-corporate/marketing-beef-and-lamb/documents/meat-standards-australia/cic_107266_mla-annual-outcomes-report_03-web.pdf
- Meadus et al. (2018). Identification of marbling gene loci in commercial pigs in Canadian herds. *Agriculture* 8(8):122. doi.org/10.3390/agriculture8080122.
- Meurens, M., & Yan, S. H. (2006). Applications of Vibrational Spectroscopy in Brewing. In *Handbook of Vibrational Spectroscopy*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470027320.s6502>
- Micol, D., Jurie, C., & Hocquette, J.-F. (2010). *Chapitre 13. Qualités sensorielles de la viande bovine. Impacts des facteurs d'élevage ?*. Dans « *Muscle et viande de ruminant* ». D. Bauchart & B. Picard (coordinateurs). Editions Quae, collections synthèses, pp. 165-174.
- Monin, G. (1991). Facteurs biologiques des qualités de la viande bovine. *INRAE Productions Animales*, 4(2), 151–160. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.1991.4.2.4327>
- Monteils, V., Sibra, C., Ellies-Oury, M.-P., Botreau, R., De la Torre, A., & Laurent, C. (2017). A set of indicators to better characterize beef carcasses at the slaughterhouse level in addition to the EUROP system. *Livestock Science*, 202, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.05.017>

- Neveu, A., Strachan, S., Pethick, D., Legrand, I., & Hocquette, J.-F. (2019). *Synthèse des rapports 2017 et 2018 du « Meat Livestock Australia » concernant le pilotage de la qualité sensorielle de la viande bovine en Australie*. VPC-2019-35-1-4.
- Nishimura, T. (2010). The role of intramuscular connective tissue in meat texture. *Animal Science Journal = Nihon Chikusan Gakkaiho*, 81(1), 21–27. <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2009.00696.x>
- Normand, J. (2018). *En France, quelles pistes pour enrayer la baisse de consommation de viande bovine ? Colloque Interbev Regards croisés sur la stratégie de reprise de la consommation de viande bovine Vérone - Vendredi 2 février 2018*
- O'Quinn, T. G., Brooks, J. C., Polkinghorne, R. J., Garmyn, A. J., Johnson, B. J., Starkey, J. D., Rathmann, R. J., & Miller, M. F. (2012). Consumer assessment of beef strip loin steaks of varying fat levels. *Journal of Animal Science*, 90(2), 626–634. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4282>
- oriGIn. (2018a). *AOP en France : tout connaître du précieux LABEL*. oriGIn. <https://www.originfood.info/aop-france/>
- oriGIn. (2018b). *IGP en France : on vous dit tout du label OFFICIEL*. oriGIn. <https://www.originfood.info/igp-france/>
- Ouali, A., & Talmant, A. (1990). Calpains and calpastatin distribution in bovine, porcine and ovine skeletal muscles. *Meat Science*, 28(4), 331–348. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(90\)90047-A](https://doi.org/10.1016/0309-1740(90)90047-A)
- Oury, M. P., Picard, B., Istasse, L., Micol, D., & Dumont, R. (2007). Mode de conduite en élevage et tendreté de la viande bovine. *INRAE Productions Animales*, 20(4), 4. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2007.20.4.3468>
- Owens, R., & Purser, E. (2021, July 15). *Grain-Fed vs Grass-Fed Beef- What's the Difference?* <https://union.ces.ncsu.edu/2021/07/809396/>
- Park, J., Song, S., Cheng, H., Im, C., Jung, E.-Y., Moon, S. S., Choi, J., Hur, S. J., Joo, S.-T., & Kim, G.-D. (2022). Comparison of Meat Quality and Muscle Fiber Characteristics between Porcine Skeletal Muscles with Different Architectures. *Food Science of Animal Resources*, 42(5), 874–888. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2022.e40>
- Picard, B., & Gagaoua, M. (2020). Muscle Fiber Properties in Cattle and Their Relationships with Meat Qualities: An Overview. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(22), 6021–6039. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02086>
- Picard, B., Gagaoua, M., Micol, D., Cassar-Malek, I., Hocquette, J.-F., & Terlouw, C. E. M. (2014). Inverse Relationships between Biomarkers and Beef Tenderness According to Contractile and Metabolic Properties of the Muscle. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(40), 9808–9818. <https://doi.org/10.1021/jf501528s>
- Pogorzelski, G., Woźniak, K., Polkinghorne, R., Póltorak, A., & Wierzbicka, A. (2020). Polish consumer categorisation of grilled beef at 6 mm and 25 mm thickness into quality grades, based on Meat Standards Australia methodology. *Meat Science*, 161, 107953. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107953>
- Polkinghorne, R. J., Nishimura, T., Neath, K. E., & Watson, R. (2011). Japanese consumer categorisation of beef into quality grades, based on Meat Standards Australia methodology. *Animal Science Journal*, 82(2), 325–333. <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2010.00825.x>
- Polkinghorne, R. J., & Thompson, J. M. (2010). Meat standards and grading. *Meat Science*, 86(1), 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.010>
- Polkinghorne, R., Watson, R., Thompson, J. M., & Pethick, D. W. (2008). Current usage and future development of the Meat Standards Australia (MSA) grading system. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(11), 1459. <https://doi.org/10.1071/EA07175>
- Prevolnik, M., Čandek-Potokar, M., & Škorjanc, D. (2004). Ability of NIR spectroscopy to predict meat chemical composition and quality - a review. *Czech Journal of Animal Science*, 49(11), 500–510.
- Prieto, N., Navajas, E. A., Richardson, R. I., Ross, D. W., Hyslop, J. J., Simm, G., & Roehe, R. (2010). Predicting beef cuts composition, fatty acids and meat quality characteristics by spiral computed

- tomography. *Meat Science*, 86(3), 770–779. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.06.020>
- Prieto, N., Roehe, R., Lavín, P., Batten, G., & Andrés, S. (2009). Application of near infrared reflectance spectroscopy to predict meat and meat products quality: A review. *Meat Science*, 83(2), 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.04.016>
- Purslow, P. P. (2005). Intramuscular connective tissue and its role in meat quality. *Meat Science*, 70(3), 435–447. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.06.028>
- Saatchi *et al.* (2014). Large-effect pleiotropic or closely linked QTL segregate within and across ten US cattle breeds. *BMC Genomics* 15(1):442. doi:10.1186/1471-2164-15-442.
- Santos, D., Monteiro, M. J., Voss, H.-P., Komora, N., Teixeira, P., & Pintado, M. (2021). The most important attributes of beef sensory quality and production variables that can affect it: A review. *Livestock Science*, 250, 104573. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104573>
- Smith, G., Tatum, J., & Belk, K. (2008). International perspective: Characterisation of United States Department of Agriculture and Meat Standards Australia systems for assessing beef quality. *Australian Journal of Experimental Agriculture - AUST J EXP AGR*, 48. <https://doi.org/10.1071/EA08198>
- Solagro. (2014). *L'agriculture à « haute valeur naturelle » en France métropolitaine - Un indicateur pour le suivi de la biodiversité et l'évaluation de la politique de développement rural*. https://agriculture.gouv.fr/sites/default/files/documents/pdf/12-08_Agriculture-HVN-France_2014-09_Rapport-principal_version-web_cle4ecc69.pdf
- Soulat, J., Sibra, C., Picard, B., & Monteils, V. (2022). Quelles pratiques d'élevage pour piloter la qualité des carcasses et de la viande au cours de la vie des génisses ? *INRAE Productions Animales*, 35(3), 3. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2022.35.3.7173>
- Srikanth *et al.* (2020). A gene-set enrichment and protein-protein interaction network-based GWAS with regulatory SNPs identifies candidate genes and pathways associated with carcass traits in Hanwoo cattle. *Genes* 11(3):316. doi:10.3390/genes11030316.
- Terlouw, C. (2015). *Stress reactivity, stress at slaughter and meat quality*. *Meat Quality, Genetic and Environmental Factors*, CRC Press, 528 p., 2015, *Chemical and Functional Properties of Food Components Series*, 9781482220315.
- Thompson, J., Polkinghorne, R., Gee, A., Motiang, D., Strydom, P., Mashau, M., Ng'ambi, J., Dekock, R., & Burrow, H. (2010). *Beef palatability in the Republic of South Africa: implications for niche-marketing strategies*. ACIAR. <https://www.aciar.gov.au/publication/technical-publications/beef-palatability-republic-south-africa-implications-niche-marketing-strategies>
- Tomasevic, I., Djekic, I., Font-i-Furnols, M., Terjung, N., & Lorenzo, J. M. (2021). Recent advances in meat color research. *Current Opinion in Food Science*, 41, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.02.012>
- Uffelmann, E., Huang, Q. Q., Munung, N. S., de Vries, J., Okada, Y., Martin, A. R., Martin, H. C., Lappalainen, T., & Posthuma, D. (2021). Genome-wide association studies. *Nature Reviews Methods Primers*, 1(1), 1–21. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00056-9>
- UNECE. (2016). *Meat | UNECE*. <https://unece.org/trade/wp7/Meat-Standards>
- USDA. (2017). *United States Standards for Grades of Carcass Beef*. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/CarcassBeefStandard.pdf>
- Venkata Reddy, B., Sivakumar, A. S., Jeong, D. W., Woo, Y.-B., Park, S.-J., Lee, S.-Y., Byun, J.-Y., Kim, C.-H., Cho, S.-H., & Hwang, I. (2015). Beef quality traits of heifer in comparison with steer, bull and cow at various feeding environments. *Animal Science Journal*, 86(1), 1–16. <https://doi.org/10.1111/asj.12266>
- Verbeke, W., Pérez-Cueto, F. J. A., Barcellos, M. D. de, Krystallis, A., & Grunert, K. G. (2010). European citizen and consumer attitudes and preferences regarding beef and pork. *Meat Science*, 84(2), 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.05.001>
- Wang *et al.* (2020). Genetic architecture of quantitative traits in beef cattle revealed by genome wide association studies of imputed whole genome sequence variants: II: carcass merit traits. *BMC Genomics* 21(1):38. doi:10.1186/s12864-019-6273-1.
- Watson, R., Gee, A., Polkinghorne, R., & Porter, M. (2008). Consumer assessment of eating quality - development of protocols for Meat Standards Australia (MSA) testing. *Australian Journal of*

- Experimental Agriculture*, 48(11), 1360. <https://doi.org/10.1071/EA07176>
- Watson, R., Polkinghorne, R., & Thompson, J. M. (2008). Development of the Meat Standards Australia (MSA) prediction model for beef palatability. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(11), 1368. <https://doi.org/10.1071/EA07184>
- Webb, E. (2015). Description of carcass classification goals and the current situation in South Africa. *South African Journal of Animal Science*, 45(3), 229–233. <https://doi.org/10.4314/sajas.v45i3.1>
- Wright, S. A., Ramos, P., Johnson, D. D., Scheffler, J. M., Elzo, M. A., Mateescu, R. G., Bass, A. L., Carr, C. C., & Scheffler, T. L. (2018). Brahman genetics influence muscle fiber properties, protein degradation, and tenderness in an Angus-Brahman multibreed herd. *Meat Science*, 135, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.09.006>

ANNEXES

A - CLASSIFICATION DES CARCASSES SELON LE SYSTEME MSA ET ACCREDITATION POUR DEVENIR CLASSIFICATEUR

1. Classification des carcasses selon le système MSA

L'évaluation des carcasses a été par 2 classificateurs certifié AUS-MEAT. Toutes les évaluations ont été effectuées conformément aux normes établies par AUS-MEAT (AUS-MEAT, 2010). Les directives techniques et l'assurance qualité émises par AUS-MEAT sont indiquées ci-dessous.

AUSTRALIAN BEEF CARCASE EVALUATION

Chiller Assessment Language

Chiller Assessment was developed to enable AUS-MEAT accredited Enterprises to assess, grade or class carcasses using a uniform set of standards under controlled conditions. Chiller Assessment provides a means of describing meat characteristics and of classifying product prior to packaging. These characteristics include the colour of meat and fat, the amount of marbling, eye muscle area, the rib fat and the maturity of the carcase.

Assessments are made by qualified assessors and results are allocated to the carcase and provide a means of (carcase) selection according to individual contract specifications.

The AUS-MEAT Chiller Assessment Language is only available to AUS-MEAT accredited Enterprises, their clients and suppliers.



MARBLING



Marbling is the fat that is deposited between muscle fibres of the M. longissimus dorsi muscle. Marbling is assessed and scored against the AUS-MEAT / MSA Marbling reference standards.

The AUS-MEAT Marbling system provides an indication of the amount of marbling in beef. The MSA marbling system provides an additional indication of distribution and piece size.

Marbling is an assessment of the chilled carcass and scored by comparing the proportion of marble fat to meat at the surface of the assessment site which lies within the M. longissimus dorsi boundary.

Marbling may be assessed at any ribbing site from 5th-13th rib. The rib at which the measurement was performed must be nominated in company records.

RIB FAT MEASUREMENT

SUBCUTANEOUS

Subcutaneous Rib Fat measurement is a measurement in millimetres of the thickness of subcutaneous fat at a specified rib.



TOTAL

Total Rib Fat measurement is a measurement in millimetres of the thickness of subcutaneous fat and intermuscular fat at the specified rib.

CARCASE MATURITY

Maturity is an estimation of the development of a beef carcass determined by the degree of ossification of the dorsal spinous processes of the vertebrae, the fusing of the vertebrae, and the shape and colour of the rib bones.



Maturity images depict MSA Standards

EYE MUSCLE AREA (EMA)

EMA is the area of the surface of the M. longissimus dorsi at the ribbing site and is calculated in square centimetres. EMA may be measured at the 10th, 11th, 12th or 13th rib.

EMA is measured manually using a plastic grid.



How to become a competent Chiller Assessor

To pass this course and become a competent chiller assessor – you must meet certain criteria. These are divided into a practical component and a theory component. Below are the assessments you are required to complete

(i) Chiller assessment theory assessment (70%)

There will be an open book multiple choice assessment that may cover any of the learning outcomes detailed in this course. The time frame for this exam is 1 hour.

(ii) Chiller assessment technique assessment (100%)

You will be practically assessed on your time at the course for all practical techniques required by a competent chiller assessor.

(iii) Achieve the AUS-MEAT Chiller Assessment correlation standard

Provided all the above have been successfully completed and to commence chiller assessment you must obtain the Chiller Assessment correlation standard. This is done by completing the necessary correlations using the OsCap™ correlation program back on your plant. You must then continue to maintain your currency for each of the required assessments on an 8-weekly cycle.

When is a participant deemed competent?

A participant is deemed competent at Chiller Assessment if they can correlate 10 runs on the OsCap™ system with 80% success. However, runs 9 & 10 have to be correct. This is for Marbling, Meat Colour and Fat Colour. There must be 2 successive runs using the OsCap™ system for Maturity, Rib fat Total Rib fat and Eye Muscle Area. The participant must at all times use the correct techniques when assessing product.

Non-competent

A participant is deemed non-competent if:

They are unable to demonstrate correlation accuracy using the OsCap™ system. A participant who fails to use the correct techniques will be deemed non-competent. A participant who fails the theory criteria will be deemed non-competent.

Onsite Practice Correlation and Program (OsCap™)

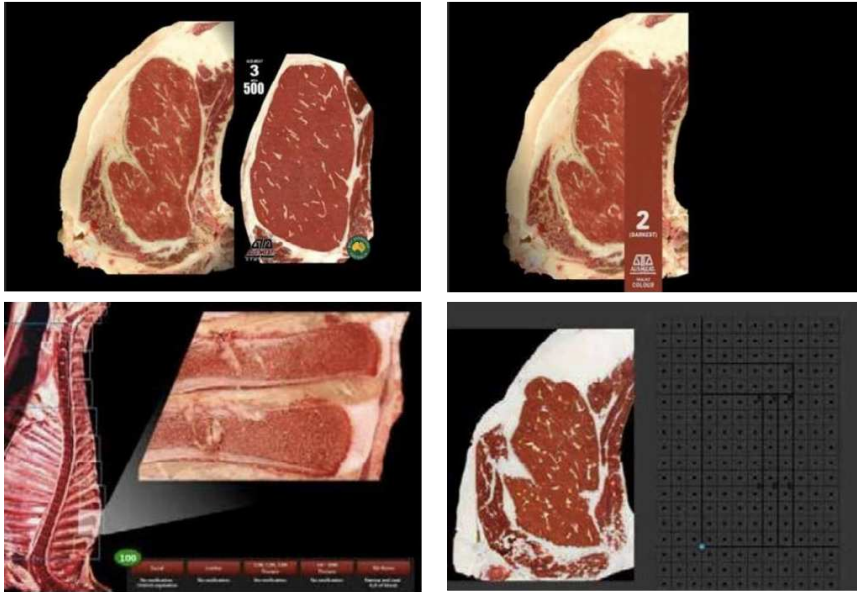
What is OsCap?



The AUS-MEAT Chiller Assessment program is underpinned by an Approved Quality System independently audited by AUS-MEAT. The integrity of the Chiller Assessment program is based upon;

- Training, qualification and currency status of Chiller Assessors and MSA Graders
- Correct use of the Chiller Assessment language and procedures for assessment;
- Maintenance and correct use of Chiller Assessment equipment;
- A regular cycle of Chiller Assessment Correlations. OsCap is the worlds first objective system for training and correlating for AUS-MEAT Chiller Assessors and MSA Graders.

The OsCap provides a flexible and effective method for training, on plant correlations and the continuous option to practice.



OsCap provides correlation and practice for:

- Chiller Assessment
- High Marbling Endorsement (for Assessors who grade Marbling above score 6)
- Maturity (ossification)
- Subcutaneous Rib Fat
- Total Rib Fat
- Eye Muscle Area
- MSA Marbling
- Hump Height
- Fat Distribution and Hide puller damage

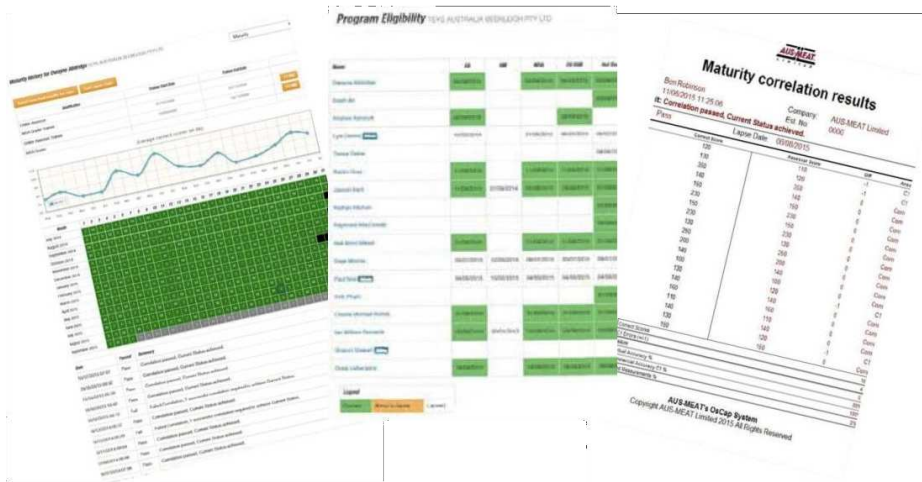


OsCap also includes a practice mode that can be used for in house training purposes such as prior to attending a Chiller Assessment training course or simply to allow the Assessor to tune more closely to the standard, and in practice mode the system provides instant feedback for the Assessor, so that the correct scores are reinforced.

OsCap™ also has a reporting system that will automatically provide records of correlations for Enterprise Quality Assurance systems.

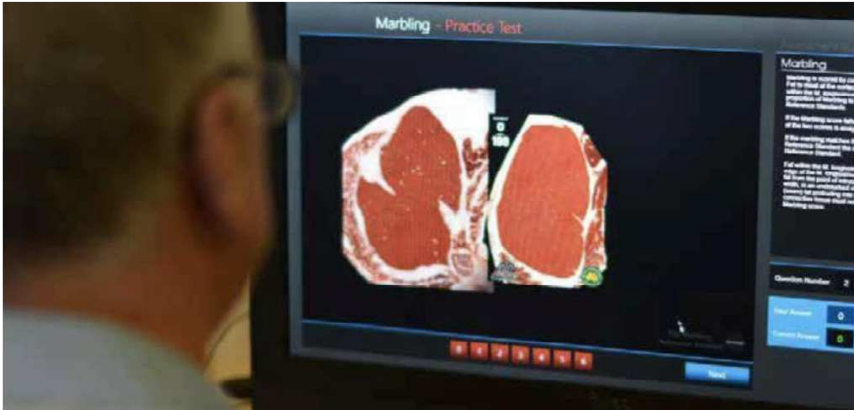
The introduction of OsCap as the method of correlation positions Australia as having the only beef carcass assessment system which is correlated against an objective computer calculated standard.

OsCap™ has been developed in a co-operative approach with Meat Standards Australia and the correlation system incorporates standards and assessment criteria for the MSA grading.



OsCap™ correlation requirements

Marbling, Meat Colour, Veal Colour and Fat Colour



AUS-MEAT Marbling, Meat Colour, Veal Colour and Fat Colour

(a) Actual Accuracy

There must be agreement between the standard and the person being assessed on 70% of the sample.

For example, agreement must be reached on at least 14 out of 20 assessments in the sample.

(b) Commercial Accuracy

1. Where the Standard and the person being assessed vary, there must not be more than 10% of assessments that show a (commercial) variance of more than ± 1 score.
2. No assessment may vary by more than ± 3 scores.

For example, in a 20 carcass sample, 14 assessments must be the same, 4 may vary by ± 1 score, and the remaining 2 assessments may vary by ± 2 or ± 3 .

Definitions of scores

Actual Accuracy is a score which is the same as the correct score.

Commercial Accuracy (C1) is a score which is ± 1 from the correct score.

Commercial Variance (C2/3) is a score which is ± 2 or ± 3 from the correct score.

Failed Measurement is a score which is more than ± 3 from the correct score.

It is important that you analyse the data accurately during the course as this information will be used to assess your progress. The trainer will be checking your data sheets after each run.



MSA Marbling

(a) The variation between the assessment and the standard must not vary by more than one (1) score step on more than 30% of the sample.

One (1) score step is defined as ± 50 of the Standard.

(b) No assessment may vary by more than three (3) score steps.

Three (3) score steps is defined as ± 110

For example, in a 20 carcass sample, 14 assessments must be within one (1) score step (± 50). The remaining 6 must be within two (2) score steps (± 100)

AUS-MEAT Carcase Maturity Chart

Score	Approx. Age in Months	Sacral Vertebral Characteristics		Lumbar Vertebral Spinous Process (S.P.) Characteristics	11th-13th Thoracic Spinous Processes (S.P.) Characteristics	1st-10th Thoracic Vertebral Spinous Process (S.P.) Characteristics	Rib Bone Characteristics
		Capping Characteristics	Vertebra Characteristics				
100	9	No Ossification of cartilage.	1) Distinct separation of vertebra. 2) Red, soft.	No Ossification Red, soft.	No Ossification Red, soft.	No Ossification Very red chine. Soft	Narrow & oval. Lot of blood.
110	10	Cartilage capping has started. 10%-20%	Distinct separation of vertebra.	No Ossification	No Ossification	No Ossification Red chine.	Slightly narrow. Slightly oval. Lot of blood.
120	13	Cartilage capping 30%-40%	Vertebral gaps starting.	No Ossification	No Ossification	No Ossification Red chine.	Slightly wide. Slightly flat. Lot of blood.
130	15	Advanced capping 50%-70%	Vertebral gaps closing, some separation still visible.	No Ossification	No Ossification	No Ossification Red chine.	Slightly wide. Slightly flat. Moderate blood.
140	18	Advanced capping 80%-90%	Vertebral gaps closing, some separation still visible.	No Ossification or minor spots of Ossification in one or 2 S.P.	No Ossification	No Ossification	Slightly wide. Slightly flat. Moderate blood.
150	20	Capping completed but some cartilage visible.	Vertebral gaps closing, some separation still visible.	No Ossification or minor spots of Ossification in some S.P.	No Ossification	No Ossification	Slightly wide. Slightly flat. Moderate amount of blood.
160	22	Capping completed but small amounts of cartilage visible.	Vertebral gaps closing, some separation still visible.	10%-20% Ossification in some S.P.	No Ossification	No Ossification	Slightly wide. Slightly flat. Moderate amount of blood.
170	24	Capping completed. Almost complete fusing.	Vertebra almost totally fused.	30%-40% Ossification	No Ossification	No Ossification	Slightly wide. Slightly flat. Small amount of blood.
180	27	Capping completed. Almost complete fusing.	Vertebra almost totally fused.	50%-70% Ossification in all S.P.	No Ossification or minor spots of Ossification in 1 or 2 S.P.	No Ossification	Slightly wide. Slightly flat. Small amount of blood.
190	29	Capping completed.	Vertebra almost totally fused.	80%-90% Ossification in all S.P.	Less than 25% Ossification in all 3 S.P., or 100% in any 1 S.P.	No Ossification	Slightly wide. Slightly flat. Small amount of blood.
200	30	Complete fusing.	Vertebra fused.	Almost complete Ossification.	>25% Ossification in all 3 S.P., or 100% in any 1 S.P.	Minor Ossification. Slightly red chine.	Slightly wide. Moderately flat. Traces of blood.
230	34	Complete fusing	Vertebra fused.	Almost complete Ossification.	30%-40% Ossification in all 3 S.P., or 100% in any 1 S.P.	Minor Ossification in some of the first 6 thoracic vertebrae. 10-20% in 7th - 10th	Slightly wide. Moderately flat. Traces of blood.
250	36	Complete fusing.	Vertebra fused.	Almost complete to complete Ossification.	>50% Ossification in all 3 S.P., or 100% in any 1 S.P.	10%-20% Ossification in some of the first 6 thoracic S.P. 30%-50% in 7th-10th S.P.	Moderately wide. Moderately flat. Traces of blood.
280	40	Complete fusing.	Vertebra fused.	Complete Ossification.	>70% Ossification in all 3 S.P., or 100% in any 1 S.P.	>30% in the 1st - 10th vertebrae.	Moderately wide. Moderately flat. Traces of blood.
300	42	Complete fusing.	Vertebra fused.	Complete Ossification.	80%-90% Ossification in all 3 S.P., or 100% in any 1 S.P.	> 30% Ossification in some of the first 6 thoracic vertebrae. 50%-70% in 7th-10th S.P.	Moderately wide. Moderately flat. Traces of blood.
350	57	Complete fusing. White.	Vertebra fused.	Complete Ossification.	Almost complete to complete Ossification.	40%-80% Ossification involving all S.P.	Wide & flat. No blood.
400	72	Complete fusing. White, extremely hard.	Vertebra fused.	Complete Ossification. White, hard.	Complete Ossification. Outlines barely visible.	Almost complete Ossification. Outline plainly visible.	Wide & flat. No blood.
500	96	Complete fusing. White, extremely hard.	Vertebra fused.	Complete Ossification. White, extremely hard.	Complete Ossification. White, extremely hard.	Complete Ossification. Outlines barely visible. White, hard.	Wide & flat. No blood.
590		Complete fusing.	Vertebra fused.	Complete Ossification.	Complete Ossification.	Complete Ossification, white chine	Wide & flat. No blood.

OsCap™ correlation requirements

Maturity, Eye Muscle Area, Subcutaneous and Total Rib Fat



Maturity

- a) The variation between the assessment and the standard must not vary on more than 30% of the sample.
- b) No assessment may vary by more than two (2) score steps. A score step is defined by the standards.

For example, 14 out of the 20 carcasses must be the same as the standard; and the remaining 6 carcasses must be within one (1) score step as defined by the standard.

Eye Muscle Area

- (a) The variation between the standard and the person being assessed must not be more than ± 4 square centimetres per carcass on more than 10% of the sample.
- (b) No assessment may vary by more than ± 8 square centimetres

For example,

on a 10 carcass sample, only one assessment may vary by up to ± 8 square centimetres.

Subcutaneous and Total Rib Fat measurement

- (a) The measurement variation between the standard and the person being assessed must not exceed:
 1. ± 1 mm for all measurements up to and including 5mm;
 2. ± 2 mm for all measurements over 5mm and up to and including 10mm
 3. ± 3 mm for all measurements over 10mm

OsCap™ correlation requirements

Hump Height & Fat Distribution and Hide Puller Damage

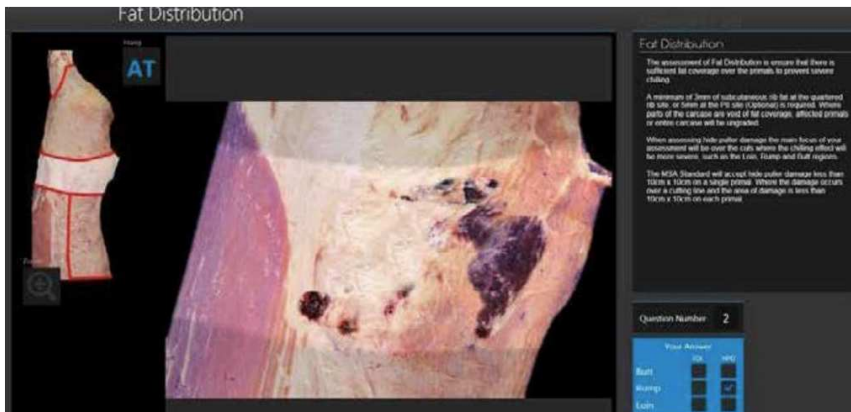


Hump Height

The variation between the assessment and the standard must not vary by more than one (1) score step.

a) A score step is defined as ± 10 millimeters (mm) of the standard.

For example, all carcasses used in the sample must be within 10mm of the standard.



Fat Distribution and Hide puller Damage

There must be no variation between the assessment and the standard.

2. Tests consommateurs

Les protocoles pour les tests consommateurs ont été précédemment publiés (Watson et al., 2008) et sont indiqués ci-dessous.

10.1071/EA07176_AC

©CSIRO 2008

Accessory Publication: Aust. J. Experimental Agric., 2008, 48(11), 1360-1367

Accessory Publication: MSA sensory testing protocols

Detailed work instructions for product collection, sensory sample preparation, cooking and sensory evaluation are presented by Gee *et al.* (2005). These should be adopted as the primary reference for running taste panels. The following summary describes key elements of the protocol for each cooking method to provide an understanding of the process.

Sensory design aspects

Each of the cooking methods described employs common design elements in relation to sensory testing. In MSA experiments prior to 2004 grills were tested utilising a 180 member taste panel with panellists organised in nine sessions of 20 consumers, arranged as three sessions of 20 on three nights of a week. As steaks from a common sample could be cooked on demand this design arrangement worked well and allowed a 5 steak sample to be spread across 5 sessions.

To facilitate automation of operating procedures via software and to apply common sensory design criteria a standard taste panel of 60 consumers testing 36 test samples after 6 first position standard link starter samples was adopted for all cooking methods. The grill design was changed to the 60 consumer format from 2004. The 36 test samples incorporate 6 samples from each of 6 products selected to ensure an eating quality range. In planning any taste panel (pick) the objective is to have minimum eating quality variance between samples within each product and maximum variance between products.

Every consumer is served one sample from each product following the starter link for a total of seven evaluations. While cooking and serving procedures vary to accommodate the particular equipment and characteristics of each method the underlying sensory design is common to all. 10 consumers, treated operationally as five pairs, evaluate each sample tested. The first position link is selected for an expected mid range quality position. Each of the 6 links are served to 5 numerically adjacent pairs. Therefore consumers 1 to 10 eat a common first position product as do 11 to 20 etc.

For the subsequent test samples the 60 consumers are regarded as 5 discreet groups of 12 (six pairs), similar to the original grill protocol of 5 groups of 20. Every sample is tested by 10 consumers (5 pairs). Each pair is allocated from a different subset of 12 (or 20 under the previous grill design) in contrast to the link product. A 6×6 Latin

square design of the form below is used to allocate products to each consumer pair with products allocated in the order designated by column.

1	2	3	4	5	6
2	4	1	6	3	5
3	1	5	2	6	4
4	6	2	5	1	3
5	3	6	1	4	2
6	5	4	3	2	1

Therefore, consumer pair one is served a sample of product 1, followed by products 2, 3, 4, 5 and 6 whereas consumer pair two receive products in the order 2, 4, 1, 6, 3, 5 and so on. A new Latin square is commenced for each sub group of 12 consumers. The 5 individual portions (steaks, roast slices, stir-fry strips etc) of each sample are allocated to 5 different order positions as they are dispersed across the 5 subsets of 12 consumers. The net effect is that every sample is tested in 5 of 6 possible different presentational positions by 5 consumer pairs from 5 sub groups.

As there are 6 Latin squares and 6 products, samples from every product occur an equal number of times (6) in each presentational position and before and after each other product. This provides a balance for frequency, order and carryover effects. The 5 pairs who test any one sample are not combined again for any other sample.

Specialist software was developed to control design aspects and collate data from experiments. The software assists in balanced design of product collections and produces unique identification for samples produced. Samples are inventoried together with all available data in a common database. When a taste panel is to be conducted software routines provide for selection of the 36 samples plus links to be tested. The software then allocates each sample according to the design principles

above and produces all associated paper work, plate labels etc. Sensory results are decoded and added to the database by other routines.

Grilling

Sample preparation

The dissected muscle was denuded of all fat and epimysium and a block measuring 75 × 25 × 150 (mm) prepared. If the muscle was large enough to allow multiple locations position within muscle was recorded. Commencing at the anterior, or proximal end of the block five 25mm thick steaks were cut across the grain, using a cutting guide. Each steak was individually wrapped in plastic, placed in a plastic pouch which had been pre-labelled with a unique reference number (EQSRef), a set number used for product storage and other data. Steaks were placed in the pouches in order, thereby retaining a record of their original position in the primal, the pouches vacuum packed and then frozen at the designated days ageing for storage at –18°C.

Picking

MSA software allocated a steak to a pair of consumers and presentational order using the procedures described in sensory design. The software also produced a printed sheet with EQSref numbers for the 10 steaks within each round printed in position for the 7 rounds. The frozen sample pouches were opened and the 5 individual frozen steaks from each sample laid out on the pre numbered acetate sheets. When all 10 steaks were in position, each sheet and the frozen steaks was placed in another pouch, vacuum packed and stored at –18°C.

Thawing

When required for a taste panel, the 7 frozen round sheets were thawed at 2°–5°C for 24 hours prior to tasting and transported chilled (< 5°C) to the testing site. The bags were opened 1 hour before cooking and the numbered sheet and 10 steaks transferred to a tray for loading onto the griller. Temperature immediately pre-cooking was < 10°C.

Cooking

Steaks were cooked on a Silex clam shell grill unit, set at 220–230°C with the lid set to position #3 or #4 to achieve a 20 to 25 mm gap, the weight set to position 8 and a top plate ratio of 2.75 to ensure even cooking. The griller was switched on 45 minutes prior to cooking and a set of sacrificed starter steaks used to commence the cooking cycle and stabilise temperature recovery. All cooking operations were conducted with reference to a timing schedule to control cooking and serving sequence. Steaks were placed on the Silex in the same order as on the acetate sheet to maintain sample identification. After cooking, steaks were transferred to a cutting board in the same order. Steaks were held for 2 minutes before halving and placing on pre-numbered serving plates. A cross check was conducted by an independent observer confirming the pre printed EQSRef number on the plates matched the round sheet identification. A further check was conducted by confirming a pre-printed label identification on each consumer score sheet against the plate sticker at the point of serving.

3. Préparation des découpes avant et après cuisson

Striploin

Raw muscle



Raw muscle cuts



Cooked muscle cut

7.5 x 6 x 2.5 cm

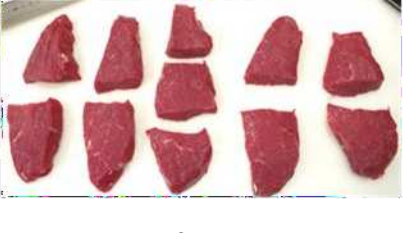


Rump

Raw muscle



Raw muscle cuts



B - ENQUETE SUR LA PERCEPTION DES CONSOMMATEURS



* Required Information

Thank you for agreeing to take part in our survey to understand more about the Artificial meat. Please be assured that, all the information you share will be treated as strictly confidential.
Please read each question carefully and provide the answer that you feel most accurately describes your situation.

Thank you for your participation!

*Merci d'avoir accepté de participer à notre enquête visant à mieux comprendre la viande artificielle. Soyez assuré que toutes les informations que vous nous communiquerez seront traitées de manière strictement confidentielle.
Veuillez lire attentivement chaque question et fournir la réponse qui, selon vous, décrit le mieux votre situation.*

Nous vous remercions de votre participation !

* 1. D1. Gender

Sexe

(Select one option)

Male / Homme

Female / Femme

* 3. D3. Please select the age group you fall under

Veuillez sélectionner le groupe d'âge auquel vous appartenez (Select one option)

18 - 30yrs / 18 - 30 ans

31 - 50yrs/ 31 - 50ans

51 yrs or older/ 51 ans ou plus

* 4. D4. What's your highest level of education?

Quelle est votre niveau d'éducation?

(Select one option)

- Primary School / Ecole primaire
- High school, no diploma / BEPC
- High school diploma / Baccalauréat
- Trade/technical/vocational training / Diplome technique
- Bachelor's degree / Licence
- Master's degree / Maitrise (DEA)
- Doctorate degree / Doctorat
- Currently studying at tertiary level e.g. University/ Étudie actuellement au niveau tertiaire, par ex. Université
- Professional Qualification e.g. CIMA / Qualification professionnelle (ex. CFA)

* **5. D5. What religion do you belong to or identify with the most?**

À quelle religion appartenez-vous ou vous identifiez-vous le plus ? (Select one option)

- Traditional African religion (e.g. includes ancestral worship)/ Religion africaine traditionnelle (par exemple, comprend le culte ancestral)
- Hindu/ hindou
- Jewish/ juif
- Muslim/ musulman
- Catholic Christian / Chrétien catholique
- Other Christians e.g. Methodist, Baptist, Pentecostal denominations) /D'autres chrétiens, par ex. dénominations méthodiste, baptiste, pentecôtiste)
- I am not religious / je ne suis pas religieux
- (Other religions) _____

* **6. D6.** Please make sure you select your country of your residence **ONLY** to continue

*Veillez vous assurer de sélectionner **UNIQUEMENT** votre pays de résidence pour continuer*

(Select one option)

- Ghana
- Kenya
- Cameroon
- Morocco
- South Africa

NOTE : IF ANSWER TO Q6 is
Ghana Go to Page No. 8
Kenya Go to Page No. 7
Cameroon Go to Page No. 10
Morocco Go to Page No. 11
South Africa Go to Page No. 9

* **7. 6. Which of these describes your personal monthly income? Please tick the one option that most applies to you (Select one option)**

- Under KES165,000
- Between KES165,001 to KES200,000
- Between KES200,001 to KES275,000
- Between KES275,001 to KES330,000
- Between KES330,001 to KES440,000
- More than KES440,000

NOTE : IF ANSWER TO Q7 is
Under KES165,000 Go to Page No. 12
Between KES165,001 to KES200,000 Go to Page No. 12
Between KES200,001 to KES275,000 Go to Page No. 12
Between KES275,001 to KES330,000 Go to Page No. 12
Between KES330,001 to KES440,000 Go to Page No. 12
More than KES440,000 Go to Page No. 8

* **8. 6. Which of these describes your personal monthly income?. Please tick the one option that most applies to you (Select one option)**

- Under GHS9,000
- Between GHS9,001 to GHS12,000
- Between GHS12,001 to GHS15,000
- Between GHS15,001 to GHS18,000
- Between GHS18,001 to GHS24,200
- More than GHS24,200

NOTE : IF ANSWER TO Q8 is
Under GHS9,000 Go to Page No. 12
Between GHS9,001 to GHS12,000 Go to Page No. 12
Between GHS12,001 to GHS15,000 Go to Page No. 12
Between GHS15,001 to GHS18,000 Go to Page No. 12
Between GHS18,001 to GHS24,200 Go to Page No. 12
More than GHS24,200 Go to Page No. 12

* **9. 6. Which of these describes your personal monthly income?. Please tick the one option that most applies to you (Select one option)**

- Under R22,500
- Between R22,501 to R30,000
- Between R30,001 to R37,500
- Between R37,501 to R45,000
- Between R45,001 to R60,000
- More than R60,000

NOTE : IF ANSWER TO Q9 is
Under R22,500 Go to Page No. 12
Between R22,501 to R30,000 Go to Page No. 12
Between R30,001 to R37,500 Go to Page No. 12
Between R37,501 to R45,000 Go to Page No. 12
Between R45,001 to R60,000 Go to Page No. 12
More than R60,000 Go to Page No. 12

* **10. 6. Lequel de ces énoncés décrit votre revenu mensuel personnel? Veuillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous (Select one option)**

- Moins que XAF835,000
- Entre XAF835,001 à XAF1,115,000
- Entre XAF1,115,001 à XAF1,400,000
- Entre XAF1, 400,001 à XAF1,700,000
- Entre XAF1, 700,001 à XAF2,230,000
- Plus de XAF2,230,000

NOTE : IF ANSWER TO Q10 is
Moins que XAF835,000 Go to Page No. 39
Entre XAF835,001 à XAF1,115,000 Go to Page No. 39
Entre XAF1,115,001 à XAF1,400,000 Go to Page No. 39
Entre XAF1, 400,001 à XAF1,700,000 Go to Page No. 39
Entre XAF1, 700,001 à XAF2,230,000 Go to Page No. 39
Plus de XAF2,230,000 Go to Page No. 39

* **11. 6.** Lequel de ces énoncés décrit votre revenu mensuel personnel?. *Veillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous (Select one option)*

- Moins que MAD 13,500
- Entre MAD 13,501 à MAD 17,900
- Entre MAD 17,901 à MAD 22,500
- Entre MAD 22,501 à MAD 27,000
- Entre MAD 27,001 à MAD 36,000
- Plus de MAD 36,000

NOTE : IF ANSWER TO Q11 is

Moins que MAD 13,500 Go to Page No. 39

Entre MAD 13,501 à MAD 17,900 Go to Page No. 39

Entre MAD 17,901 à MAD 22,500 Go to Page No. 39

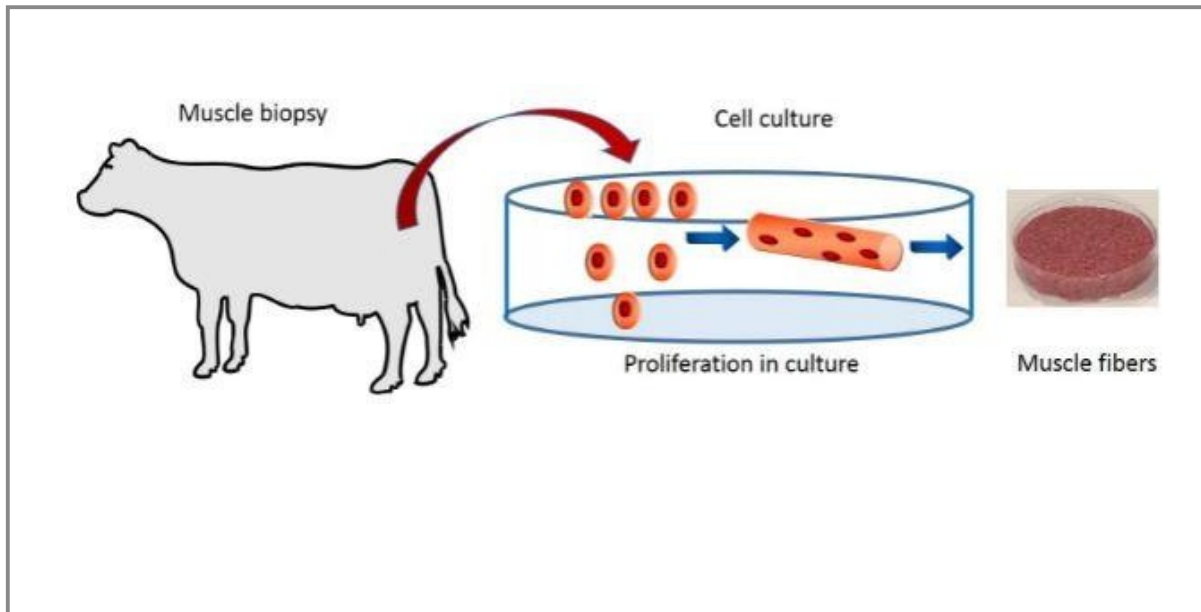
Entre MAD 22,501 à MAD 27,000 Go to Page No. 39

Entre MAD 27,001 à MAD 36,000 Go to Page No. 39

Plus de MAD 36,000 Go to Page No. 39

Artificial meat, is also known as in vitro meat, cultured meat, lab meat, clean meat, or synthetic meat. It is lab-grown meat, where the “meat” is grown outside the animal’s body, using stem cells from the animal muscles (refer to the picture below). So it allows us to get meat without having to slaughter cows or other animals. There is a lot of interest in artificial meat as it can help solve world hunger by providing food for the growing human population. It will also help solve the increasing environmental concerns (e.g. global warming) and other ethical problems because it improves the lives of animals due to less slaughtering. For these reasons Scientific research is devoted to developing artificial meat as a viable source of meat for the future.

This research study is being conducted by French researchers from INRAE (Theix, 63), ISARA (Lyon, 69) and Bordeaux Sciences-Agro (Bordeaux, 33). The purpose of this survey is to understand how ordinary people like yourself feel about this new biotechnology and to find out what your preferences and concerns are. This is an interesting subject, and it should not take more than 15 minutes for you to complete. If you have any questions, you can write to the research team at 'futurecellmeat@gmail.com'.



* **12. 7. How are you involved in the Meat sector? Please tick the one option that most applies to you (Select one option)**

- I am a scientist, who works in the meat sector
- I am a scientist, who works outside the meat sector
- I am not a scientist, and I work in the meat sector
- I am not a scientist, and I do not work in the meat sector

* **13. 8. How often do you eat meat? Please tick the one option that most applies to you (Select one option)**

- I never eat meat –I am vegetarian or vegan
- I rarely eat meat – once a week or less
- I regularly eat meat – several times a week
- I eat meat daily - or within each meal

* **14. 9.** Before today, had you ever heard about Artificial Meat? *Please tick the one option that most applies to you (Select one option)*

Yes

No

* **15. 10. Which of the following would you say are important considerations for you when you go to shop for meat? Please tick ALL the options that most applies to you**

- Ethics of how the meat was produced, e.g. were the animals allowed to roam freely
- Environmental impact of the food/meat during its production
- Price
- Quality of the meat (taste, juiciness, tenderness) ...
- Appearance of the meat (e.g. its colour, freshness)
- Energy intake of the animal during production (Calories used)
- Nutritional value of the meat (e.g. No. of proteins, vitamins)
- Origins and how traceable it is to find out where the meat came from
- Safety
- Information on the nutrition labels, food labels or marks
- Others

SOCIETAL CHALLENGES

We will now look at your perceptions towards how meat is produced, with a focus on **On-Farm Animal breeding**. **On Farm Animal Breeding** is the selective mating of animals to increase the possibility of obtaining certain desired characteristics in the animal's offspring. For each answer, scale is from 1 to 5 where 1 means You completely disagree, and 5 means you completely agree.

- * **16. 11.** Do you believe that on-farm breeding can cause important **ETHICAL** problems, (e.g. the animals suffering, the animals being slaughtered)? *Please tick the one option that most applies to you*

(Select one option)

- 1 - Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Neutral /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5- Completely Agree

- * **17. 12.** In your opinion does on-farm breeding cause important ENVIRONMENTAL issues e.g. huge water consumption and greenhouse gas emissions? *Please tick the one option that most applies to you*

(Select one option)

- 1 - Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Neutral /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5- Completely Agree

- * **18. 13.** In your opinion can the potential problems of on-farm breeding be dealt with by reducing our meat consumption? *Please tick the one option that most applies to you*

(Select one option)

- 1 - Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Neutral /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5- Completely Agree

- * **19. 14. And do you believe that if people ate Artificial Meat instead of conventional/ normal meat, it would improve the state of animals and reduce animal suffering? Please tick the one option that most applies to you**

(Select one option)

- 1 - Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Neutral /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5 - Completely Agree

- * **20. 15.** Using the following rating scale, do you think that Artificial meat could negatively impact live stock farming and the meat industry (e.g. by reducing the number of jobs available)? *Please tick the one option that most applies to you*

(Select one option)

- 1 – Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Neutral /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5- Completely Agree

* **21. 16.** Do you think that Artificial meat would have a negative impact on rural life? *Please tick the option that most applies to you*

(Select one option)

- 1 - Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Neutral /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5- Completely Agree

* **22. 17. To what extent do you believe that Artificial Meat would be healthier& have higher nutritional value than normal meat? Please tick the one option that most applies to you (Select one option)**

- 1 - Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Neutral /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5- Completely Agree

- * **23. 18.** In your opinion do you believe that Artificial Meat is more tasty compared to normal meat. *Please tick the one option that most applies to you*

(Select one option)

- 1 - Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Neutral /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5 - Completely Agree

POTENTIAL INTERESTS

- * **24. 19. Would you accept Artificial Meat as a viable alternative to normal meat in the future (Just like other meat substitute like Soy proteins)? Please tick the one option that most applies to you**

(Select one option)

- Yes, I already eat meat substitute or meat alternatives
- Yes, but I do not eat meat substitute or meat alternatives
- No, but I eat meat and meat alternatives
- No, I do not eat meat substitutes and/or meat alternatives

* **25. 20. Which of the following reasons would be most likely to persuade you to try artificial meat? Please tick ALL the options that you agree with**

- As a solution to feed the ever growing human population
- It has more attractive pricing than conventional meat
- Ethics – it improves the well being of animals and reduces animal slaughtering
- Less risk of Zoonosis (diseases that can be transmitted from animals to people e.g. Foot & mouth disease)
- Attractiveness of high-tech technologies
- The artificial meat product is a clean product
- Artificial meat is an Eco-friendly product
- Curiosity
- Other reasons
- I am not willing to try artificial meat

NOTE : Answer the below question only if answer to Q#25 is Other reasons

* **26. Other reasons (Please specify)**

NOTE : Answer the below question only if answer to Q#25 is I am not willing to try artificial meat

* **27. 21. And which of the following reasons would be the most likely reasons that you are not willing to try artificial meat? Please tick ALL the options that you agree with**

- It is unnatural
- It is less tasty/appealing
- I am worried about its safety
- It is more expensive than normal meat
- I am reluctant (feel disgusted/nervous)
- Negative impact on local farmers & their jobs
- Negative impact on rural life
- I do not trust laboratories and artificial meat start-up companies
- It has significant environmental footprint
- Negative impact on land reserves and rural life e.g biodiversity, tourism, land scape maintenance
- Other (Please specify) _____

* **28. 22. Which of the following statements would you associate with artificial meat? We are just looking for your opinion, even though you may have had little experience with Artificial meat. Please tick ALL the options that you agree with**

- Adequate nutrition
- Tasty /tastes similar to real/normal meat
- Safety
- Less as a solution to feed the ever growing human population
- It is less expensive or has better pricing than conventional meat
- It has less environmental footprint
- Leads to the reduction of farming
- Requires no farming
- There is no animal pain, or suffering
- Other (Please specify)
- Nothing

NOTE : Answer the below question only if answer to Q#28 is Other (Please specify)

* **29. Other (Please specify)**

* **30. 23.** Now that you have learnt a little bit more about artificial meat, what do you think about it? *Please tick the ONE statement that you agree with the most (Select one option)*

- It is promising and/or acceptable
- It is fun and/or intriguing
- It is absurd and/or disgusting

* **31. 24.** In your opinion would you say that you have emotional resistance to trying out artificial meat (e.g. disgust or nervous)? *Please tick the one option that you agree with (Select one option)*

- 1 - Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Neutral /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5 - Completely Agree

* **32. 25. Would you be willing to try out artificial meat? Please tick the one option that you most agree with (Select one option)**

- 1 – Will definitely try
- 2 – Will probably try
- 3 – Unsure or Undecided
- 4 – Will probably not try
- 5 - Will definitely not try

* **33. 26.** Which of the following cases are you most likely to eat artificial meat regularly? *Please tick all options that you agree with*

- At the restaurant
- At home
- In prepackaged ready-to-eat meals (e.g. Spaghetti and mincemeat)
- Other
- I do not want to eat artificial meat regularly

* **34. 27. Compared to the price of normal/conventional meat how much are you willing to pay for artificial meat? Please tick the one option that you most agree with (Select one option)**

- Much less than what I would pay for conventional meat, even nothing at all
- Less than for conventional meat
- Same price as for conventional meat
- More than what I would pay for conventional meat
- Much more than what I would pay for conventional meat

* **35. 28. Artificial meat is already available in some countries, what timeline do you believe that artificial meat will be widely accepted? Please tick the one option that you most agree with (Select one option)**

- In the short term – 1 to 5 years
- In the medium term – 6 to 15 years
- In the long term – more than 15 years
- Never

* **36. 29.** Below is a list of names which are most commonly used to refer to artificial meat. Given what you know of artificial meat, which of the following names do you believe is most suitable for artificial meat?
Please tick ALL the options that you agree with

- Artificial Meat
- In-vitro Meat
- Clean Meat
- Cultured Meat
- Cellular Meat
- Lab meat
- Synthetic Meat
- Animal-free meat
- Slaughter-free meat

* **37. 30. The Private research model is when scientific research is supported by private money for instance from rich people to private companies. To which extent do you agree that the private research model is relevant for developing research on artificial meat? *Please tick the ONE option that you most agree with (Select one option)***

- 1 - Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Unsure /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5 - Completely Agree

* **38. 31. The Public research model is when scientific research is supported by public grants given to research organizations by governments or public agencies. To which extent do you believe that scientific public research must invest (time and money) to develop this biotechnology)? Please tick the ONE option that you agree with (Select one option)**

- 1 - Completely Disagree
- 2 – Disagree
- 3 – Unsure /Do not have an opinion
- 4 – Agree
- 5 - Completely Agree

* **39. 32.** If this product is commercialized one day, do you think it should be labelled as "meat"? *Please tick the ONE option that you most agree with (Select one option)*

Yes

No

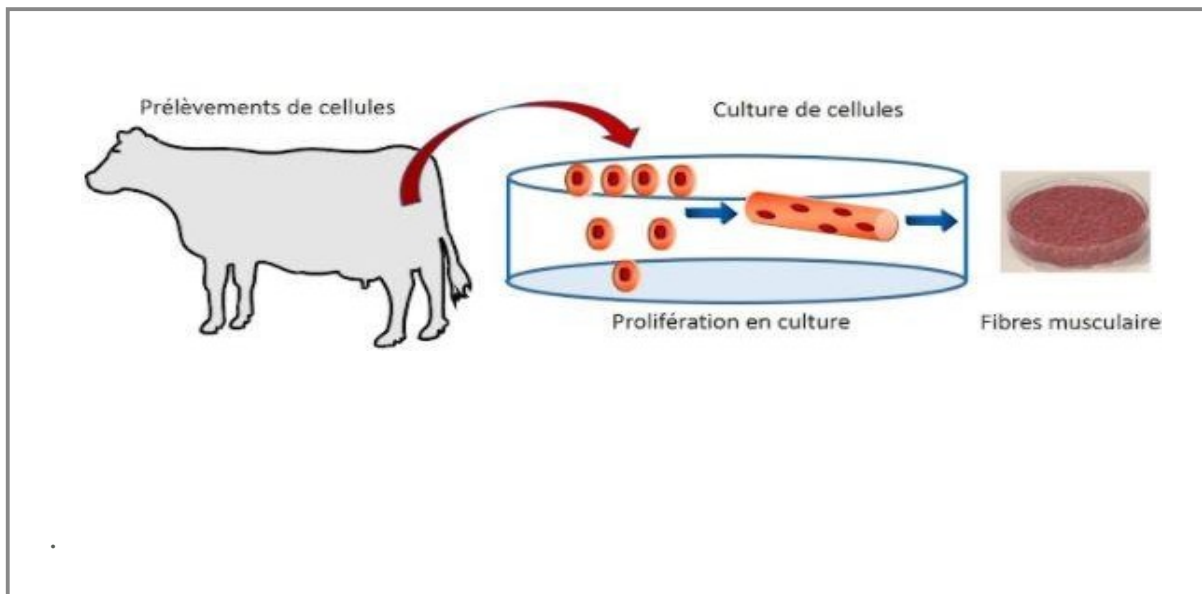
* **40. 33.** Do you agree that the information you provided today will be saved? All information will remain anonymous and confidential and cannot be linked to you. *Please tick the ONE option that you agree with (Select one option)*

- Yes
- No

NOTE : IF ANSWER TO Q40 is
Yes Stop, you have finished the survey
No Stop, you have finished the survey

La viande artificielle est également connue sous le nom de viande in vitro, de viande de culture, de viande de laboratoire, de viande propre ou de viande synthétique. C'est de la viande de laboratoire, où la « viande » est cultivée à l'extérieur du corps de l'animal, à l'aide de cellules souches des muscles de l'animal (voir l'image ci-dessous). Cela nous permet donc d'obtenir de la viande sans avoir à abattre des vaches ou d'autres animaux. Il y a beaucoup d'intérêt pour la viande artificielle car elle peut aider à résoudre la faim dans le monde en fournissant de la nourriture pour la population humaine croissante. Il contribuera également à résoudre les problèmes environnementaux croissants (p. ex., le réchauffement climatique) et d'autres problèmes éthiques, car il améliore la vie des animaux en raison de la réduction des abattages. Pour ces raisons, la recherche scientifique est consacrée au développement de la viande artificielle comme source viable de viande pour l'avenir.

étude est menée par des chercheurs français de l'INRAE (Theix, 63), de l'ISARA (Lyon, 69) et de Bordeaux Sciences-Agro (Bordeaux, 33). Le but de cette enquête est de comprendre comment les gens ordinaires comme vous se sentent au sujet de cette nouvelle biotechnologie et de savoir quelles sont vos préférences et vos préoccupations. C'est un sujet intéressant, et il ne devrait pas prendre plus de 5 minutes pour vous de compléter. Si vous avez des questions, vous pouvez écrire à l'équipe de recherche à « futurecellmeat@gmail.com ». Merci de votre participation!



* **41.** 7. Comment êtes-vous impliqué dans le secteur de la viande? Veuillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous. (Select one option)

- Je suis un scientifique, qui travaille dans le secteur de la viande
- Je suis un scientifique qui travaille à l'extérieur du secteur de la viande.
- Je ne suis pas un scientifique et je travaille dans le secteur de la viande.
- Je ne suis pas un scientifique et je ne travaille pas dans le secteur de la viande.

* **42. 8.** À quelle fréquence mangez-vous de la viande? *Veillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous. (Select one option)*

- Je ne mange jamais de viande – Je suis Végétarien ou végétalien
- Je mange rarement de la viande – une fois par semaine ou moins
- Je mange régulièrement ensemble – plusieurs fois par semaine
- Je mange de la viande tous les jours - ou à chaque repas

- * **43.** 9. Avant aujourd'hui, aviez-vous déjà entendu parler de la viande artificielle? *Veillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous.*

(Select one option)

Oui

Non

* **44. 10. Parmi les facteurs suivants, lesquels sont importants pour vous lorsque vous allez acheter de la viande?**
Veillez cocher TOUTES les options qui s'appliquent le plus à vous.

- Éthique de la façon dont la viande a été produite, p. ex., les animaux ont-ils pu se déplacer librement?
- Impact environnemental de la nourriture/viande pendant sa production
- Prix
- Qualité de la viande (goût, jus, tendresse) ...
- Aspect de la viande (p.ex. sa couleur, sa fraîcheur)
- Consommation d'énergie de l'animal pendant la production (Calories utilisées)
- Valeur nutritive de la viande (p. ex., nombre de protéines, vitamines)
- Origines et traçabilité de la viande
- Sécurité
- Information sur les étiquettes nutritionnelles, les étiquettes d'aliments ou les marques
- Autre

DÉFIS SOCIÉTAUX

Nous allons maintenant examiner vos perceptions de la façon dont la viande est produite, en nous concentrant sur la reproduction des animaux à la ferme. L'élevage d'animaux de ferme est l'accouplement sélectif d'animaux pour augmenter la possibilité d'obtenir certaines caractéristiques souhaitées chez la progéniture de l'animal. Pour chaque réponse, l'échelle de réponse va de 1 à 5, 1 signifiant que vous n'êtes pas du tout d'accord, et 5 que vous êtes tout à fait d'accord

- * **45. 11.** Croyez-vous que l'élevage à la ferme peut causer d'importants problèmes ÉTHIQUES, (p. ex, les animaux qui souffrent, les animaux qui sont abattus)? *Veillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous*

(Select one option)

- 1 - Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Neutre / Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5- Entièrement d'accord

- * **46. 12.** À votre avis, l'élevage à la ferme cause-t-il des problèmes ENVIRONNEMENTAUX importants p. ex., énorme consommation d'eau et émissions de gaz à effet de serre? *Veillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous*

(Select one option)

- 1 - Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Neutre / Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5- Entièrement d'accord

- * **47. 13.** À votre avis, peut-on régler les problèmes potentiels de la sélection à la ferme en réduisant notre consommation de viande? *Veillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous.*

(Select one option)

- 1 - Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Neutre / Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5- Entièrement d'accord

- * **48. 14.** Croyez-vous que si les gens mangeaient de la viande artificielle au lieu de la viande conventionnelle/normale, cela améliorerait la condition des animaux et réduirait leur souffrance ? *Veillez cocher l'option qui vous concerne le plus.*

(Select one option)

- 1 - Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Neutre / Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5 - Entièrement d'accord

- * **49. 15.** En utilisant l'échelle de cotation suivante, pensez-vous que la viande artificielle pourrait avoir un impact négatif sur l'élevage vivant et l'industrie de la viande (p. ex., en réduisant le nombre d'emplois disponibles)? *Veillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous.*

(Select one option)

- 1 – Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Neutre / Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5- Entièrement d'accord

- * **50. 16.** Pensez-vous que la viande artificielle aurait un impact négatif sur la vie rurale? *Veillez cocher l'option qui s'applique le plus à vous.*

(Select one option)

- 1 - Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Neutre / Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5- Entièrement d'accord

- * **51. 17.** Dans quelle mesure croyez-vous que la viande artificielle serait plus saine et aurait une valeur nutritive plus élevée que la viande normale? *Veillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous.*

(Select one option)

- 1 - Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Neutre / Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5- Entièrement d'accord

- * **52. 18.** Et enfin, à votre avis, croyez-vous que la viande artificielle est plus savoureuse par rapport à la viande normale? *Veillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous.*

(Select one option)

- 1 - Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Neutre / Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5 - Entièrement d'accord

INTÉRÊTS POTENTIELS

- * **53. 19.** Accepteriez-vous la viande artificielle comme alternative viable à la viande normale à l'avenir? (Tout comme d'autres substituts de viande comme les protéines de soya)? *Veillez cocher la seule option qui s'applique le plus à vous.*

(Select one option)

- Oui, je mange déjà des substituts de viande ou des substituts de viande
- Oui, mais je ne mange pas de substituts de viande ou de substituts de viande
- Non, mais je mange de la viande et/ou des substituts de viande
- Non, je ne mange pas de substituts de viande et/ou de substituts de viande

* **54. 20. Laquelle des raisons suivantes serait le plus susceptible de vous persuader d'essayer la viande artificielle? Veuillez cocher TOUTES les options avec lesquelles vous êtes d'accord**

- Comme une solution pour nourrir la population humaine toujours croissante
- Il a des prix plus attrayants que la viande conventionnelle
- Éthique – améliore le bien-être des animaux et réduit l'abattage des animaux
- Risque moindre de zoonose (maladie qui peut être transmise des animaux aux humains, p. ex., fièvre aphteuse)
- Attractivité des technologies de pointe
- Le produit de viande artificielle est un produit propre
- La viande artificielle est un produit écologique
- Curiosité
- Autres raisons
- Je ne suis pas prêt à essayer de la viande artificielle?

NOTE : Answer the below question only if answer to Q#54 is Autres raisons

* **55. Autres raisons (veuillez préciser)**

NOTE : Answer the below question only if answer to Q#54 is Je ne suis pas prêt à essayer de la viande artificielle?

* **56. 21. Et laquelle des raisons suivantes serait la plus probable que vous n'êtes pas prêt à essayer la viande artificielle? Veuillez cocher TOUTES les options avec lesquelles vous êtes d'accord**

- C'est contre nature
- Il est moins savoureux/attractif
- Je m'inquiète pour sa sécurité
- Il est plus cher que la viande normale
- Je suis réticent (dégoûté/nerveux)
- Elle a un impact négatif sur les emplois des agriculteurs locaux
- Impact négatif sur les agriculteurs locaux et leurs emplois
- Impact négatif sur la vie rurale
- Je ne fais pas confiance aux laboratoires et aux jeunes entreprises de viande artificielle
- Il a une empreinte environnementale importante
- Impact négatif sur les réserves foncières et la vie rurale, par exemple la biodiversité, le tourisme, l'entretien du paysage.
- Autre (veuillez préciser) _____

* **57. 22.** Lequel des énoncés suivants associez-vous à la viande artificielle? Nous sommes à la recherche de votre avis, même si vous avez peut-être eu peu d'expérience avec la viande artificielle? *Veillez cocher TOUTES les options avec lesquelles vous êtes d'accord*

- Nutrition adéquate
- Savoureux/goût semblable à la viande réelle/normale
- Sécurité
- Moins comme solution pour nourrir la population humaine toujours croissante
- Il est moins cher ou a un meilleur prix que la viande conventionnelle
- Il a moins d'empreinte environnementale
- Conduit à la réduction des famings
- Ne nécessite pas d'encadrement
- Il n'y a ni douleur animale, ni souffrance
- Autre (préciser)
- Rien

NOTE : Answer the below question only if answer to Q#57 is Autre (préciser)

* **58.** Autre (préciser)

* **59. 23. Maintenant que vous avez appris un peu plus sur la viande artificielle, que pensez-vous à ce sujet?**
Veillez cocher l'énoncé ONE que vous approuvez le plus.
(Select one option)

- C'est prometteur et/ou acceptable
- C'est amusant et/ou intrigant
- C'est absurde et/ou dégoûtant

* **60. 24.** À votre avis, diriez-vous que vous avez une résistance émotionnelle à essayer de la viande artificielle (p. ex., dégoût ou nerveux)? *Veillez cocher la seule option que vous approuvez.* **(Select one option)**

- 1 - Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Neutre / Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5 - Entièrement d'accord

* **61. 25.** Seriez-vous prêt à essayer de la viande artificielle? *Veillez cocher la seule option que vous approuvez le plus (Select one option)*

- 1 – Va certainement essayer
- 2 – Essaiera probablement
- 3 – Incertain ou indécis
- 4 – Ne tentera probablement pas
- 5 - Ne tentera certainement pas

* **62. 26. Lequel des cas suivants êtes-vous le plus susceptible de manger de la viande artificielle régulièrement?**
Veillez cocher toutes les options que vous acceptez.

- Au restaurant
- À la maison
- Dans les repas prêts-à-manger préemballés (p. ex. spaghetti et viande hachée)
- Autre
- Je ne veux pas manger de viande artificielle régulièrement

* **63. 27. Par rapport au prix de la viande normale/conventionnelle, combien êtes-vous prêt à payer pour la viande artificielle? Veuillez cocher la seule option que vous approuvez le plus (Select one option)**

- Beaucoup moins que ce que je paierais pour la viande conventionnelle, même rien du tout
- Moins que pour les viandes conventionnelles
- Même prix que pour la viande conventionnelle
- Plus que ce que je paierais pour la viande conventionnelle
- Beaucoup plus que ce que je paierais pour la viande conventionnelle

* **64. 28.** La viande artificielle est déjà disponible dans certains pays; quel délai croyez-vous que la viande artificielle sera largement acceptée? *Veillez cocher la seule option que vous approuvez le plus (Select one option)*

- À court terme – 1 à 5 ans
- À moyen terme – 6 à 15 ans
- À long terme – plus de 15 ans
- Jamais

- * **65. 29.** Voici une liste de noms qui sont les plus couramment utilisés pour se référer à la viande artificielle. Compte tenu de ce que vous savez de la viande artificielle, lequel des noms suivants croyez-vous est le plus approprié pour la viande artificielle?
Veillez cocher TOUTES les options avec lesquelles vous êtes d'accord

- Viande artificielle
- Viande in vitro
- Viande propre
- Viande de culture
- Viande cellulaire
- Viande de laboratoire
- Viande synthétique
- Viande exempte d'animaux
- Viande non abattue

* **66. 30.** Le modèle de la recherche privée est quand la recherche scientifique est soutenue par l'argent privé par exemple des personnes riches aux entreprises privées. Dans quelle mesure êtes-vous d'accord pour dire que le modèle de recherche privé est pertinent pour le développement de la recherche sur la viande artificielle? *Veillez cocher la SEULE option que vous approuvez le plus. (Select one option)*

- 1 - Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Incertain/Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5 - Entièrement d'accord

- * **67. 31.** Le modèle de la recherche publique s'applique lorsque la recherche scientifique est appuyée par des subventions publiques accordées à des organismes de recherche par des gouvernements ou des organismes publics. Dans quelle mesure croyez-vous que la recherche scientifique publique doit investir (temps et argent) pour développer cette biotechnologie? *Veillez cocher la SEULE option que vous approuvez.*
(Select one option)

- 1 - Complètement en désaccord
- 2 – En désaccord
- 3 – Incertain/Pas d'opinion
- 4 – D'accord
- 5 - Entièrement d'accord

* **68. 32.** Si ce produit est commercialisé un jour, pensez-vous qu'il devrait être étiqueté comme étant "de la viande"? *Veillez cocher la SEULE option que vous approuvez le plus. (Select one option)*

Oui

Non

* **69. 33.** Convenez-vous que les renseignements que vous avez fournis aujourd'hui seront sauvegardés? Toutes les informations demeureront anonymes et confidentielles et ne peuvent pas être liées à vous. *Veillez cocher la SEULE option que vous approuvez. (Select one option)*

Oui

Non