
Évaluation du traitement thermique d'une pièce de viande bovine par spectroscopie d'impédance électrique

Auteur : Karabalis, Alexandros

Promoteur(s) : Goffin, Dorothée

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : chimie et bioindustries, à finalité spécialisée

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16252>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Évaluation du traitement thermique d'une pièce de viande bovine par spectroscopie d'impédance électrique

ALEXANDROS KARABALIS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN CHIMIE ET BIO-INDUSTRIES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR : PROF. DOROTHÉE GOFFIN

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.



LIÈGE université
Gembloux
Agro-Bio Tech

Évaluation du traitement thermique d'une pièce de viande bovine par spectroscopie d'impédance électrique

ALEXANDROS KARABALIS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN CHIMIE ET BIO-INDUSTRIES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR : PROF. DOROTHÉE GOFFIN

Remerciements

Ce travail de fin d'études a été réalisé au sein du Smart Gastronomy Lab et du Laboratoire de Sciences Gastronomiques de la Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, le Pr Dorothée GOFFIN, qui m'a guidé durant ce travail de fin d'études grâce à ses bons conseils, pour le temps qu'elle a consacré aux relectures et pour m'avoir permis de réaliser ce travail très intéressant au sein de son équipe.

J'aimerais aussi remercier, pour leur contribution importante dans la réalisation de mon mémoire : le Pr Eric HAUBRUGE, pour ses idées, sa supervision et son soutien, le Pr Marianne SINDIC qui a mis son laboratoire à disposition pour une grande partie de mes analyses chimiques ainsi que le Pr Yves BROSTAUX, pour son aide indispensable en statistiques.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers le Pr Pascal LEROY, qui m'a beaucoup aidé durant ces derniers mois, tant par le partage de ses connaissances sur la viande et sur les statistiques que pour son avis aiguisé sur mon mémoire ainsi que de m'avoir permis d'obtenir les pièces de viande dont j'avais besoin pour mes expériences.

Mes remerciements vont également aux membres du Smart Gastronomy Lab et du Laboratoire en Sciences Gastronomiques : Gaëtan pour son expertise sur la cuisson sous-vide, Charles pour son aide en statistiques, Simon pour ses connaissances en électronique, ainsi que Quentin et Adrien pour leur bonne humeur. J'aimerais aussi remercier les autres TFistes, Sarah et Quentin, pour nos échanges constructifs tout au long de ce travail, sans oublier les stagiaires Barbara, Laura, Meryem et Richard, qui ont contribué à la bonne ambiance au bureau.

Je voudrais encore remercier tous les amis que j'ai rencontré durant ces années à Gembloux, grâce auxquels j'ai passé de très bons moments et créé des souvenirs qui resteront gravés dans ma mémoire.

Last but not least, j'aimerais remercier ma mère pour son soutien indéfectible tout au long de mon cursus universitaire.

Résumé

La cuisson de la viande revêt une grande importance pour la consommation de celle-ci : elle permet de la rendre plus digestible, elle diminue le risque microbiologique et contribue aussi à l'amélioration de ses qualités gustatives, offrant une meilleure expérience au consommateur. Les deux facteurs les plus importants lors de la cuisson sont donc la température atteinte à cœur et le temps écoulé à cette température-ci (barème de cuisson).

Plusieurs méthodes sont disponibles pour la mesure de la température atteinte durant la cuisson par une pièce de viande, mais peu existent pour une mesure après son refroidissement. L'industrie et les cuisines de collectivités cherchent à déterminer la température maximale atteinte par un produit, après son refroidissement, afin de s'assurer de la qualité et surtout de la sécurité sanitaire de celui-ci. Il est donc important de développer de nouvelles méthodes dans ce but. Une méthode de plus en plus étudiée est la spectroscopie d'impédance électrique. Celle-ci peut être utilisée pour juger de la maturité des viandes bovines, déceler des décongelations non déclarées, mais aussi afin de connaître la température atteinte à la cuisson. C'est une technique rapide, fiable, peu onéreuse, facile à mettre en œuvre et à utiliser.

L'objectif de ce travail était de démontrer une preuve de concept en développant un dispositif de mesure de l'impédance électrique et en mettant en place un protocole permettant de déterminer la température maximale atteinte par un morceau de viande bovine, après son refroidissement, en fonction du muscle utilisé et de la race de l'animal.

Pour cela, différentes architectures de sondes connectées à l'appareil ont été testées et la précision de la méthode a été évaluée sur deux muscles (*Longissimus dorsi* et *Aductor magnus*), provenant de différents animaux et de différentes races. Ceux-ci ont été cuits à plusieurs paliers de températures afin d'en mesurer l'impédance et de déterminer la faisabilité ainsi que la précision de la méthode.

Les résultats confirment l'efficacité de la méthode mise au point, utilisant la spectroscopie d'impédance électrique pour la détermination de la température maximale atteinte par une pièce de viande bovine durant sa cuisson, après son refroidissement. La discrimination entre des paliers de cuisson de 10 °C est claire pour les deux muscles étudiés et pour plusieurs races. Les résultats obtenus indiquent qu'une plus grande précision peut être envisagée avec la méthode développée en interne, dans le cadre d'expériences ultérieures.

Enfin, une analyse en composantes principales (ACP) a permis de mettre en évidence que les paramètres relatifs à la teneur en eau de la viande cuite sont ceux ayant la plus grande influence sur la mesure de l'impédance électrique. Le degré de précision de la méthode se situe au niveau d'un même sexe, d'une même race et d'un muscle précis, qui requiert un étalonnage minutieux doit être effectué.

Abstract

Cooking meat is of great importance for its consumption: it makes it more digestible, reduces the microbiological risk and also contributes to the improvement of its taste, offering a better experience to the consumer. The two most important factors during cooking are therefore the core temperature and the time elapsed at this temperature.

Several methods are available for measuring the temperature reached during the cooking of a piece of meat, but few exist for measuring it after cooling. Industries and institutional kitchens are looking to determine the maximum temperature reached by a product after it has been cooled, in order to ensure its quality and, above all, its microbial safety. It is therefore important to develop new methods for this purpose.

One method that is increasingly being studied is electrical impedance spectroscopy. It can be used to judge the maturity of beef, to detect undeclared meat thawing, but also to determine the temperature reached during cooking. It is a fast, reliable, inexpensive, easy to implement and easy to use technique.

The objective of this work was to demonstrate a proof of concept by developing an electrical impedance measurement device, and setting up a protocol to determine the maximum temperature reached by a piece of beef after cooling, depending on the muscle used and the breed of the animal.

To this end, different probe architectures, connected to the device, were tested and the accuracy of the method was evaluated on two muscles (*Longissimus dorsi* and *Aductor magnus*) taken from different animals and breeds. The pieces of meat were cooked at several temperature levels to measure their impedance, and to determine the feasibility and accuracy of the method.

The results confirm the effectiveness of the method developed, using electrical impedance spectroscopy for the determination of the maximum temperature reached by a piece of beef during cooking, after cooling. The discrimination between 10°C cooking steps is clear for both muscles studied and for several breeds. The results obtained indicate that greater precision can be achieved with the method developed in the laboratory, with further experiments.

Finally, a principal component analysis showed that the parameters relating to the water content of the cooked meat had the greatest influence on the measurement of electrical impedance. The degree of accuracy of the method is at the level of a same sex, a same breed and a specific muscle, which requires careful calibration to be performed.

Abréviations

g = gramme

MS = matière sèche

s = seconde

SIE = spectroscopie d'impédance électrique

Impédance = Z

Tension = V

Courant = I

Fréquence = f

BBB = Blanc-Bleu Belge, race de vache

IC = Intervalle de confiance

ACP = Analyse en composantes principales

Liste des figures

Figure 1. Structure générale d'un muscle, tiré de Listrat et al. (2016) ² .	1
Figure 2. Gradient de couleur de steaks bovins, selon la température de cuisson (sous vide). Tiré de https://www.61degres.com/ .	4
Figure 3. Temps (en heures) nécessaire à la pasteurisation de la viande bovine, en fonction de l'épaisseur de la viande et de la température atteinte, lors d'une cuisson sous vide. Tiré de Baldwin et al. (2012) ²⁶ .	5
Figure 4. Influence de la technique de cuisson sur la digestibilité des protéines musculaires, via les mécanismes de dénaturation de celles-ci, tiré de Bhat et al. (2021) ¹¹ .	6
Figure 5. Applications de la SIE en contrôle de la qualité de la viande, tiré de Zhao et al. (2017) ⁵¹ .	9
Figure 6. Illustration du modèle de Fricke dans le cas de la viande, tiré de Guermazi et al. (2014) ⁶⁰ .	10
Figure 7. Illustration du passage du courant électrique en fonction de la fréquence, au travers d'un tissu, les ovoïdes bleus représentant des cellules, contenant le liquide intracellulaire et baignant dans le liquide extracellulaire, tiré de Huh et al. (2021) ⁴⁶ .	11
Figure 8. Schéma de la mesure de l'impédance à l'aide d'une sonde bipolaire, tiré de Damez et al. (2008) ⁴⁴ .	12
Figure 9. Différentes architectures de sondes dipolaires, tiré de Zhao et al. (2017) ⁵¹ .	13
Figure 10. Différentes architectures de sondes quadripolaires, tiré de Zhao et al. (2017) ⁵¹ .	13
Figure 11. Appareil de mesure de l'impédance avec sonde, monté sur son support.	18
Figure 12. Sondes de mesure de l'impédance, écartement de 2,54 mm (C), 5,08 mm (A) et 7,62 mm (D). Circuit de vérification de la calibration (B).	19
Figure 13. Prise de mesure sur une tranche de <i>A. magnus</i> .	20
Figure 14. Détail des expériences menées au laboratoire. Réalisé avec le logiciel EdrawMax.	21
Figure 15. Évolution de la température (°C) interne d'un steak de L. dorsi ainsi que celle des bains thermostaté (à 60 ± 1 °C) et refroidi (à 20 ± 1 °C) au cours du temps (minutes).	23
Figure 16. Pertes de cuisson (%) des steaks de L. dorsi de Blanc-Bleu Belge à quatre températures de cuisson différentes (50, 60, 70 et 80 °C). Les barres représentent la moyenne des mesures, avec leur écart-type. n = 3.	24
Figure 17. Teneur en matière sèche (%) des steaks de L. dorsi de Blanc-Bleu Belge à quatre températures de cuisson différentes (50, 60, 70 et 80 °C). Les barres représentent la moyenne des mesures, avec leur écart-type. n = 3.	24
Figure 18. Pertes de cuisson (%) des steaks de <i>A. magnus</i> de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge), à trois températures de cuisson différentes (50, 60 et 70 °C). Les barres représentent la moyenne des mesures, avec leur écart-type. n = 3.	26
Figure 19. Teneur en matière sèche (%) des steaks de <i>A. magnus</i> de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge), à trois températures de cuisson différentes (50, 60 et 70 °C). Les barres représentent la moyenne des mesures, avec leur écart-type. n = 3.	27
Figure 20. Répartition des modules de l'impédance pour chaque architecture de sonde (écartement/profondeur, en mm) sur L. dorsi cuit à 60 °C.	29
Figure 21. Courbe des impédances mesurées de 1 à 100.000 Hz sur des steaks de L. dorsi à quatre températures de cuisson différentes (50, 60, 70 et 80 °C). Chaque point représente la moyenne des mesures, avec leur écart-type. n = 15.	30

Figure 22. Comparaison de l'impédance mesurée de 10 à 100 kHz sur des steaks de L. dorsi à quatre températures de cuisson différentes (50, 60, 70 et 80 °C). Les barres représentent la moyenne des mesures, avec leur écart-type. n = 15. La courbe de tendance linéaire et son coefficient de détermination sont aussi représentés. 31

Figure 23. Biplot de l'analyse en composantes principales de l'expérience 2. Les vecteurs représentent les variables de l'analyse : Steak (pièce de viande sur laquelle les mesures ont été prises), Température (°C), Impédance (Ω), Matière sèche (%), Pertes de cuisson (%), Protéines (% MS) et Matières grasses (% MS). Les points représentent les résultats des mesures individuelles pour chaque pièce de viande, ceux-ci sont classés par température de cuisson (°C) (cf. légende à droite du graphe). 35

Figure 24. Biplot de l'analyse en composantes principales de l'expérience 3. Les vecteurs représentent les variables de l'analyse : Température (°C), Impédance (Ω), Matière sèche (%), Pertes de cuisson (%), Protéines (% MS) et Matières grasses (% MS). Les points représentent les résultats des mesures individuelles pour chaque pièce de viande, ceux-ci sont classés par température de cuisson (ellipse bleue = 50 °C, ellipse verte = 60 °C et ellipse rouge = 70 °C) et par race (B = Blanc-Bleu Belge, J = Limousin, O = Blonde d'Aquitaine et V = BBB Bleue des Prés, cf. légende à droite du graphe). 36

Liste des tableaux

Tableau 1. Âge des animaux au jour de l'abattage et nombre de jours de maturation au jour de la cuisson. Les numéros d'expérience correspondent à ceux présentés plus loin dans ce chapitre (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).....	15
Tableau 2. Effet de la température de cuisson des steaks de L. dorsi de Blanc-Bleu Belge sur les paramètres de couleur dans l'espace CIE L*a*b*. Les moyennes des mesures ainsi que leur écart-type sont indiqués. n = 3.	25
Tableau 3. Teneur en protéines (% MS) des steaks crus de A. magnus de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge). Les moyennes des mesures et leur écart-type sont indiqués. n = 3.	25
Tableau 4. Teneur en matières grasses (% MS) des steaks crus de A. magnus de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge). Les moyennes des mesures et leur écart-type sont indiqués. n = 3.	26
Tableau 5. Effet de la température de cuisson (50, 60 et 70 °C) des steaks de A. magnus de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge) sur différents paramètres de l'analyse de profil de texture. Les moyennes des mesures ainsi que leur écart-type sont indiqués. n = 6.	28
Tableau 6. Effet de la température de cuisson (50, 60 et 70 °C) des steaks de A. magnus de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge) sur les paramètres de couleur dans l'espace CIE L*a*b*. Les moyennes des mesures ainsi que leur écart-type sont indiqués. n = 3.	28
Tableau 7. Valeurs de probabilité obtenues lors de l'analyse de la variance des résultats obtenus (n=15) pour chaque architecture de sonde. En gras, les deux sondes choisies pour la suite des expériences.....	30
Tableau 8. Groupements des moyennes d'impédance par race et par température de cuisson, calculés par la méthode de Tukey de comparaison des moyennes (IC = 95 %). Les moyennes au sein d'une même race ne partageant pas une lettre sont significativement différentes.	33
Tableau 9. Groupements des moyennes d'impédance par température de cuisson et par race, calculés par la méthode de Tukey de comparaison des moyennes (IC = 95 %). Les moyennes au sein d'une même température ne partageant pas une lettre sont significativement différentes.	33

Table des matières

Remerciements	VI
Résumé	VII
Abstract	VIII
Abréviations	IX
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XII
État de l'art	1
1. Composition de la viande bovine	1
2. Cuisson de la viande bovine	2
2.1. Impact sur les caractéristiques sensorielles et physico-chimiques	2
2.1.1. Dénaturation des protéines	2
2.1.2. Modification de la texture	3
2.1.3. Pertes en eau.....	3
2.1.4. Modification de la saveur et de la couleur	3
2.2. Qualités nutritionnelles de la viande cuite.....	4
2.3. Réduction de pathogènes microbiens.....	4
3. Modes de cuisson	5
3.1. Cuisson courte à haute température	6
3.2. Cuisson longue à haute température.....	7
3.3. Cuisson longue à basse température (sous vide).....	7
4. Spectroscopie d'impédance électrique	8
4.1. Mise en contexte.....	8
4.1.1. Pertinence de la méthode	8
4.1.2. Propriétés électriques de la viande bovine	10
4.2. Mesure de l'impédance de la viande	10
4.2.1. L'impédance électrique	10
4.2.2. Caractéristiques influençant le module de l'impédance	10
4.2.3. Appareils de mesure et sondes	11
Objectifs	14
Matériel et méthodes	15
1. Sélection de la viande et découpe des steaks	15
2. Caractérisation de la viande avant, pendant et après la cuisson	15
2.1. Colorimétrie	16
2.2. Texturomètre	16
2.3. Matière sèche	16
2.4. Pertes de cuisson	16
2.5. Teneur en protéines.....	17
2.6. Teneur en matières grasses	17
2.7. Broyage de la viande	17
2.8. Suivi de la température.....	17
3. Cuisson de la viande	18
4. Appareil de mesure de l'impédance électrique	18
4.1. Description de l'appareil et du programme d'analyse	18
4.2. Description des sondes.....	19

4.3. Prise de mesures	19
5. Analyse statistique.....	20
Résultats et discussion	21
1. Plan d'expérimentation.....	21
2. Analyses physico-chimiques des pièces de viandes utilisées lors des expériences.....	22
2.1. Suivi de la température.....	22
2.2. Expérience 2 : Taurillons Blanc-Bleu Belges	23
2.2.1. Pertes de cuisson et matière sèche	23
2.2.2. Couleur	24
2.3. Expérience 3 : Quatre races différentes.....	25
2.3.1. Teneur en protéines et en matières grasses	25
2.3.2. Pertes de cuisson et matière sèche.....	26
2.3.3. Texture	27
2.3.4. Couleur	28
3. Évaluation de la méthode de spectroscopie d'impédance électrique.....	29
3.1. Expérience 1 : Choix de la géométrie des sondes	29
3.2. Expérience 2 : Essais sur <i>Longissimus dorsi</i> de Blanc-Bleu Belge	30
3.3. Expérience 3 : Essais sur <i>Adductor magnus</i> de plusieurs races.....	32
3.3.1. Observations générales.....	32
3.3.2. Observations pour chaque race	32
3.3.3. Observations pour chaque température.....	33
3.4. Conclusion préliminaire	34
4. Analyse en composantes principales	34
4.1. ACP – Expérience 2.....	34
4.2. ACP – Expérience 3.....	36
Conclusions et perspectives	37
Contribution personnelle de l'étudiant	39
Bibliographie	40

État de l'art

1. Composition de la viande bovine

Le terme « viande », selon la législation européenne (Directive 835/2004), désigne toutes les parties retirées de la carcasse d'animaux domestiques ou sauvages, qui sont comestibles ¹. Dans l'usage courant, le terme viande fait référence aux muscles de ces animaux. Les muscles sont de formes et tailles variées et se retrouvent à plusieurs endroits de la carcasse ². Ils contiennent de nombreux macronutriments et micronutriments, qui sont indispensables à l'alimentation humaine ^{3,4}.

Au niveau macroscopique, le muscle est composé à 90 % de fibres musculaires, arrangées en plusieurs sous-ensembles (**Figure 1**) ^{2,5,6}. La plus petite sous-unité d'un muscle est l'endomysium : celui-ci entoure chaque fibre musculaire, elle-même principalement composée de myofibrilles, responsables de la structure du muscle. Le pérимыsium regroupe plusieurs fibres et, enfin, l'épимыsium recouvre l'ensemble du muscle. Les tissus connectifs et le gras représentent les 10 % restants ^{2,5,7}.

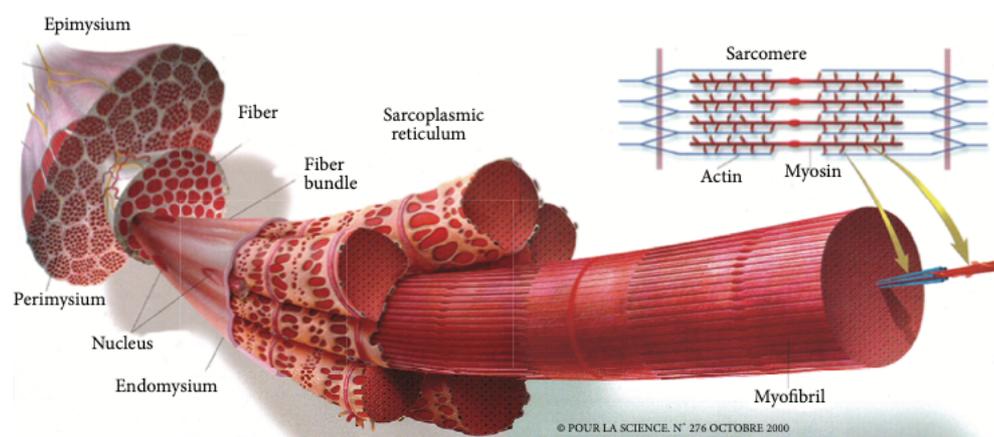


Figure 1. Structure générale d'un muscle, tiré de Listrat et al. (2016) ².

D'un point de vue chimique, la viande est composée majoritairement d'eau (jusqu'à 75 %), de protéines (en moyenne 22 %) et de gras (de 1,1 à 2 %) ^{2,7,8}. L'eau est contenue au sein des fibres musculaires où elle est principalement fixée aux protéoglycanes, un des composants de la matrice entourant les fibres musculaires. Le gras est stocké dans différentes régions anatomiques, autour et dans les muscles dans les cas respectivement de la graisse inter- ou intra- musculaire ². La teneur en gras change en fonction du muscle, de la race, du sexe, du génotype, de l'alimentation et des conditions de vie du bovin ^{2,7,8}. Dans le cas du *Longissimus dorsi*, le contenu en gras intra-musculaire varie de 0,6 % chez le Blanc-Bleu Belge jusqu'à 23,3 % chez le bœuf Wagyu japonais, pour un même âge à l'abattage ^{2,9}. Enfin, les protéines

musculaires constituent une source d'acides aminés essentiels pour l'être humain et peuvent être divisées en trois catégories, selon leur gradient de solubilité dans une solution saline :

- Myofibrillaires (50-60 %), notamment l'actine et la myosine, permettant la motilité du muscle ;
- Sarcoplasmiques (30 %), comme la myoglobine, responsable de la couleur rouge de la viande ;
- Connectives (10-20 %), telles que le collagène ou l'élastine, renforçant le lien entre les différentes structures musculaires ^{3,10}.

2. Cuisson de la viande bovine

Du point de vue de la perception du consommateur, la cuisson d'une viande influence ses caractéristiques sensorielles, telles que sa texture ou sa saveur ¹¹⁻¹⁴. D'un point de vue nutritionnel, elle impacte la digestibilité ainsi que la biodisponibilité de certains composés tels que les acides aminés ou les minéraux, contenus dans la viande, lors de la digestion. Enfin, elle a aussi un impact très important sur la qualité microbiologique du produit, permettant le contrôle (élimination ou stabilisation) par la chaleur d'organismes pathogènes, dangereux pour la santé humaine ^{4,11-13,15-17}. La cuisson est donc une étape cruciale, préalable à la consommation de viande.

2.1. Impact sur les caractéristiques sensorielles et physico-chimiques

L'impact de la cuisson peut être perçu au niveau sensoriel par le consommateur : changements de texture, de contenu en eau, de jutosité et de saveur ^{4,11-14}. Ces modifications dépendent de la composition chimique de la viande, de la température appliquée ainsi que de la durée de la cuisson. Elles sont principalement provoquées par la dénaturation des protéines contenues dans le muscle, ce qui va fortement impacter la structure interne de la viande ^{4,11-16}.

2.1.1. Dénaturation des protéines

Lorsque la viande est chauffée, les protéines vont se dénaturer, elles vont se contracter et les fibres vont par conséquent se rétrécir ^{11,13,15-18}. Jusqu'à 60°C, les fibres musculaires se contractent transversalement, augmentant l'espace entre elles et l'espace extracellulaire. Au-delà, il s'agit d'une contraction longitudinale ^{15,16,18}. Il existe trois principaux changements au niveau des protéines musculaires, à trois températures distinctes : de 50 à 60 °C, la myosine va se dénaturer, ensuite, de 60 à 70 °C, ce sont le collagène et les protéines sarcoplasmiques qui modifient leur structure et enfin, de 70 à 80 °C, c'est l'actine qui change de conformation ^{18,19}. Ces changements prennent du temps à se réaliser, ce qui rend importante la prise en compte du couple temps/température (barème) lors de la cuisson d'un morceau de viande, selon son profil protéique ^{14,18}.

2.1.2. *Modification de la texture*

Lors de la mastication, le morceau de viande est déformé et fracturé. La résistance, l'élasticité et la cohésion de la viande peuvent être appréciées de manière sensorielle ou mesurées à l'aide d'un texturomètre, en appliquant une méthode spécifique : l'analyse du profil de texture¹⁸. Cette analyse consiste en l'application, à vitesse constante, d'une déformation partielle de l'échantillon durant deux cycles, afin d'imiter la mastication et d'enregistrer les forces appliquées par l'appareil durant chaque cycle. Plusieurs paramètres peuvent être calculés sur le diagramme de force en fonction du temps, tels que la dureté (force nécessaire pour comprimer l'aliment), l'élasticité (hauteur à laquelle l'échantillon retrouve sa forme initiale après la première déformation), la mâchabilité (force nécessaire pour mâcher l'aliment avant de l'avalier),...²⁰. La texture est un élément important pour le consommateur et la cuisson de la viande doit donc permettre de satisfaire ses attentes, celui-ci préférant les morceaux tendres et faciles à mâcher^{7,14,17,21}. Pour la viande de bœuf, la tendreté de la viande augmente entre 50 et 65 °C, grâce à la dénaturation du collagène, protéine structurale du muscle et la gélatinisation de celui-ci mais aussi à la présence encore suffisante d'eau au sein des fibres. Ces deux phénomènes permettent de lubrifier les glissements entre les fibres lors de la mastication. Au-delà de 65 °C, les pertes en eau deviennent plus importantes et le réseau de gel plus dense, menant à une baisse de la tendreté¹⁸.

2.1.3. *Pertes en eau*

La dénaturation des protéines est aussi responsable de la perte en eau lors de la cuisson. Le rétrécissement des fibres rompt les membranes cellulaires, ce qui relargue l'eau contenue à l'intérieur de celles-ci, 80 % de l'eau au sein du muscle se trouvant au sein des myofibrilles^{15,17-19}. Au-delà de 60-70 °C, la perte en eau (qui correspond au ratio entre le poids frais de l'échantillon et le poids une fois cuit et égoutté) augmente drastiquement à cause de la contraction longitudinale des fibres musculaires, qui expulse l'eau hors du tissu^{4,18,22}.

2.1.4. *Modification de la saveur et de la couleur*

La couleur interne de la viande lors de sa cuisson est principalement due à la dénaturation de la myoglobine, protéine lui conférant sa couleur rouge lorsque la viande est crue, et qui passe au brun lorsqu'elle est chauffée^{23,24}. Cette modification commence à partir de 60 jusque 70°C¹⁸. La myoglobine est une protéine qui contient un cofacteur de type hème, au centre duquel se trouve un atome de fer. Lors de la cuisson, la myoglobine (Fe^{2+}) s'oxyde en metmyoglobine (Fe^{3+}), de couleur brune²⁵. Cette réaction étant fonction du temps et de la température, un gradient de couleur peut être observé en fonction de la température atteinte (**Figure 2**). Ce gradient est néanmoins subjectif, chaque consommateur ayant un regard et une préférence différents sur la couleur^{17,23}.



Figure 2. Gradient de couleur de steaks bovins, selon la température de cuisson (sous vide). Tiré de <https://www.61degres.com/>.

La saveur de la viande est principalement modifiée par la réaction de Maillard, qui a lieu à partir de 130 °C et qui produit plusieurs composés odorants ainsi que le brunissement de la viande (caramélisation) sur la partie externe exposée à la plaque de cuisson. Une cuisson trop longue au-delà de 175 °C peut mener à la formation de composés potentiellement cancérigènes ²⁶. Le temps et la température de cuisson doivent donc être surveillés de près pour obtenir un produit savoureux.

2.2. Qualités nutritionnelles de la viande cuite

La cuisson altérant la structure interne du muscle, elle a une influence sur la digestion de celui-ci par l'Homme, tant au niveau de la disponibilité de certains composés que de l'énergie nécessaire à leur assimilation ^{3,11,22}. La viande cuite est dès lors plus facile à digérer que la viande crue ⁴. Chez le bœuf, une cuisson au-delà de 60 °C diminue la biodisponibilité des lipides et au-delà de 70 °C, la digestibilité des protéines est grandement réduite, celles-ci étant tellement dénaturées qu'elles ne sont plus suffisamment reconnues par les enzymes digestives, empêchant ainsi leur activité protéolytique et augmentant l'énergie nécessaire pour les digérer ^{11,16,22}. Le schéma (**Figure 4**) au chapitre suivant présente l'impact de trois modes de cuisson sur la dénaturation des protéines et leur digestibilité.

2.3. Réduction de pathogènes microbiens

La cuisson de la viande permet, selon la température maximale atteinte et le temps durant lequel elle est maintenue (barème de cuisson), de réduire ou éliminer les pathogènes présents sur l'aliment cru ^{22,26-28}. En effet, plusieurs pathogènes peuvent être retrouvés sur la viande crue, suite aux traitements qu'elle subit lors de ses transformations depuis la ferme jusqu'à l'assiette. On retrouve principalement des bactéries telles que *Escherichia coli*, *Salmonella* ou *Listeria monocytogenes*, des levures comme *Yersinia enterocolitica* ou encore des virus ²⁹. La consommation de viande contenant un nombre trop important de ces bactéries (au-delà de 7log₁₀ cfu/g ¹³) peut entraîner des symptômes pouvant aller d'une diarrhée sévère, des vomissements et de la fièvre jusqu'à la mort de l'individu ²⁹. Cependant, la plupart de ces

pathogènes sont inactivés, grâce au respect du barème de pasteurisation (**Figure 3**), ce qui écarte le risque d'infection ^{13,26,29}. Enfin, une cuisson suffisante doit toutefois être couplée au respect de la chaîne du froid avant et un refroidissement efficace après la cuisson ²⁹.

La propreté des abattoirs et la chaîne du froid étant en général très respectées en Europe, la consommation de viande bovine cuite en dessous du barème de pasteurisation n'est cependant pas déconseillée, la population microbienne initiale étant très limitée ^{5,26}.

Thickness (mm)	55 °C 131 °F	56 °C 132.8 °F	57 °C 134.6 °F	58 °C 136.4 °F	59 °C 138.2 °F	60 °C 140 °F	61 °C 141.8 °F	62 °C 143.6 °F	63 °C 145.4 °F	64 °C 147.2 °F	65 °C 149 °F	66 °C 150.8 °F	
5	3:33	2:41	2:00	1:30	1:08	0:51	5	0:40	0:31	0:25	0:20	0:17	0:14
10	3:35	2:43	2:04	1:36	1:15	1:00	10	0:49	0:41	0:35	0:30	0:27	0:24
15	3:46	2:55	2:16	1:48	1:28	1:13	15	1:02	0:53	0:47	0:42	0:38	0:35
20	4:03	3:11	2:32	2:04	1:44	1:28	20	1:17	1:08	1:01	0:56	0:52	0:48
25	4:17	3:25	2:46	2:18	1:57	1:41	25	1:30	1:21	1:13	1:08	1:03	0:59
30	4:29	3:38	3:00	2:32	2:11	1:55	30	1:43	1:33	1:26	1:19	1:14	1:10
35	4:45	3:53	3:15	2:46	2:25	2:09	35	1:56	1:46	1:38	1:31	1:26	1:21
40	4:59	4:07	3:29	3:00	2:39	2:22	40	2:09	1:59	1:50	1:43	1:37	1:32
45	5:21	4:29	3:50	3:22	3:00	2:42	45	2:29	2:17	2:08	2:00	1:53	1:48
50	5:45	4:53	4:14	3:44	3:21	3:03	50	2:49	2:37	2:27	2:19	2:11	2:05
55	6:10	5:18	4:39	4:08	3:45	3:26	55	3:11	2:58	2:47	2:38	2:30	2:23
60	6:38	5:45	5:06	4:35	4:10	3:50	60	3:34	3:20	3:09	2:58	2:50	2:42
65	7:07	6:15	5:34	5:02	4:36	4:15	65	3:58	3:43	3:31	3:20	3:11	3:02
70	7:40	6:45	6:03	5:30	5:04	4:42	70	4:23	4:08	3:54	3:43	3:32	3:23

Figure 3. Temps (en heures) nécessaire à la pasteurisation de la viande bovine, en fonction de l'épaisseur de la viande et de la température atteinte, lors d'une cuisson sous vide. Tiré de Baldwin et al. (2012) ²⁶.

3. Modes de cuisson

Comme énoncé précédemment, la cuisson de la viande constitue une étape cruciale pour rendre la viande propre à la consommation humaine ¹¹. Plusieurs méthodes de cuisson existent, ainsi qu'un nombre encore plus grand de déclinaisons des paramètres celles-ci. Le consommateur choisit en général une méthode de cuisson qui procure un produit de haute qualité avec une saveur et une texture qui lui plaisent ^{4,27}. Certaines méthodes de cuisson demandent un matériel plus onéreux ou un temps plus long. Ces paramètres peuvent aussi influencer le choix du consommateur ^{11,27}. Au-delà des préférences gustatives, chaque mode de cuisson influence la digestibilité de l'aliment et ses qualités nutritives ¹¹. Le schéma ci-dessous (**Figure 4**) compare plusieurs techniques de cuisson avec leur impact sur la digestibilité des protéines contenues dans la viande, en fonction du processus de dénaturation de celles-ci. Comme expliqué précédemment, la température et son gradient ainsi que le temps de cuisson influencent la dénaturation des protéines, leur nouvel état influence leur susceptibilité à la dégradation enzymatique et à l'oxydation, ce qui, au final, influence la microstructure du muscle ¹¹.

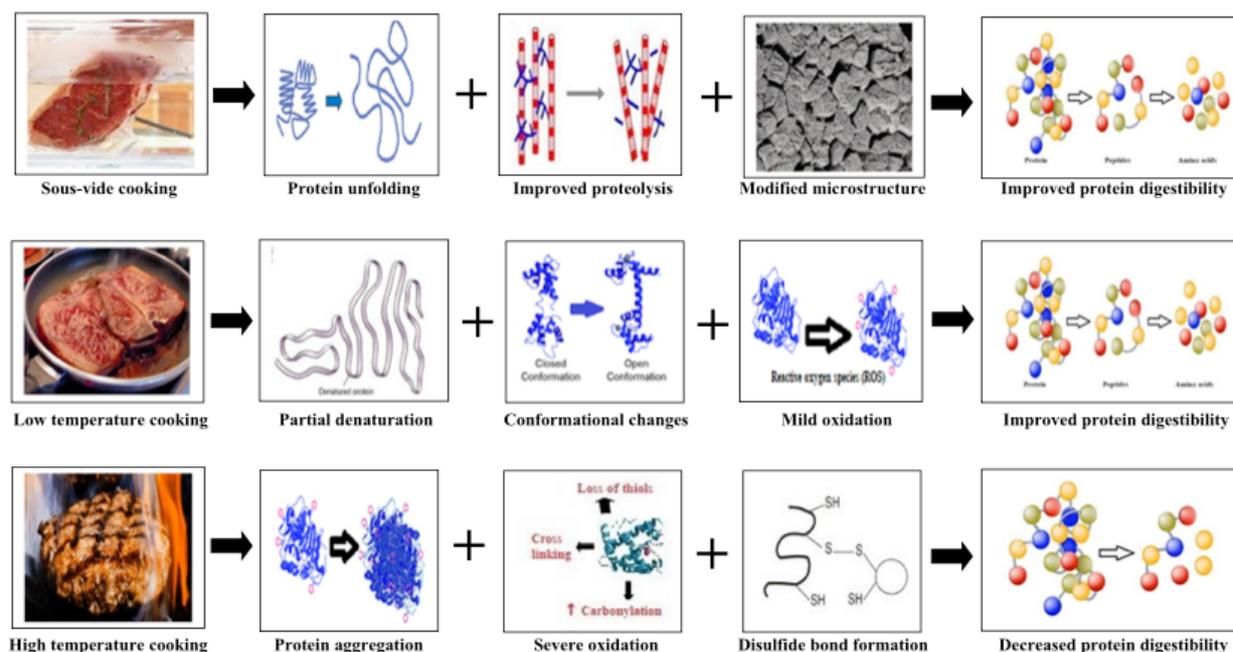


Figure 4. Influence de la technique de cuisson sur la digestibilité des protéines musculaires, via les mécanismes de dénaturation de celles-ci, tiré de Bhat et al. (2021) ¹¹.

Les différents types de cuisson peuvent être séparés en trois grandes catégories : la cuisson courte à haute température (à la poêle ou au grill), la cuisson longue à haute température (mijoter ou rôtir) et la cuisson longue à basse température (sous vide).

3.1. Cuisson courte à haute température

Les méthodes de cuisson à haute température et de courte durée sont les plus communément employées dans le domicile, pour des morceaux de viande plutôt tendres : frire un steak à la poêle ou le griller au barbecue. La cuisson à la poêle utilise de l'huile ou une autre matière grasse, chauffée à haute température et en contact direct avec l'aliment. La chaleur est transférée entre la poêle, l'huile et l'aliment. En revanche, lors du grillage, la viande est directement mise en contact avec la source de chaleur (flamme, charbon, infrarouge), pour une courte durée (p. ex. 260°C et 5 à 10 min pour de l'agneau ³⁰) ¹¹.

Ces deux techniques induisent une certaine perte en eau, la formation d'une croûte, l'absorption de matière grasse, le changement de couleur et la formation de composés aromatiques ^{4,11}. La cuisson ne peut pas durer trop longtemps, car la réaction de Maillard et la formation de la croûte deviendraient alors trop importantes et nuiraient tant à la qualité gustative que nutritionnelle de la viande ^{4,11,26,31}. De plus, une courte durée de cuisson permet une bonne digestibilité des protéines, le cœur de la pièce de viande n'ayant pas le temps d'atteindre une température trop élevée ^{22,31}.

3.2. Cuisson longue à haute température

Lorsqu'une viande est rôtie au four, les températures utilisées vont de 150 à 250 °C⁴, en général 160 °C pour une cuisson plus longue et 180 °C pour une cuisson plus courte¹¹. Ici, la viande n'est pas en contact direct avec la source de chaleur, c'est l'air qui permet le transfert de la source à la viande¹¹. Cette méthode est très utilisée dans le commerce (boucheries, restaurants) avec des morceaux plutôt tendres. Bien que le produit fini corresponde aux attentes du consommateur, cette méthode a aussi pour effet de réduire la digestibilité des protéines^{4,30}. Lors du mijotage, c'est un liquide qui sert de vecteur à la chaleur. La pièce de viande y est entièrement immergée et celui-ci est porté à ébullition durant plusieurs heures. Cette méthode a pour avantage de permettre la désagrégation des tissus et de donner une texture appréciable aux morceaux les moins tendres. Toutes les études analysées par Bhat et al. (2021) ont montré un impact négatif de la cuisson par mijotage sur la digestibilité des protéines¹¹.

3.3. Cuisson longue à basse température (sous vide)

Lorsque l'on parle de cuisson à basse température, méthode qui gagne en popularité ces dernières années pour ses nombreux avantages, une technique est particulièrement utilisée par les cuisiniers ou l'industrie et étudiée par la communauté scientifique : la cuisson sous vide dans un bain d'eau thermostaté^{11-13,15,16,22,26-28,32,33}.

La cuisson sous vide correspond à la mise sous vide du morceau de viande dans une poche plastique et de la plonger entièrement dans un bain d'eau thermostatée afin de permettre une cuisson uniforme de tout le morceau^{4,11,22}. Les températures, dépendant du muscle utilisé et du résultat recherché, varient entre 55 et 80 °C, durant des périodes pouvant aller de 6 à 48 heures²⁶. Cette technique est particulièrement utilisée dans l'industrie, mais tend à gagner en popularité dans les restaurants et chez les particuliers ces dernières années^{11,26,27}.

D'un point de vue sensoriel, elle permet d'obtenir une texture et une saveur très appréciables, avec un produit final plus humide, plus tendre et d'une belle couleur, la température étant uniforme en tout point du morceau et le gradient inexistant, même pour des morceaux plus durs, qui sont attendris^{11,26,34}. Souvent, les morceaux cuits sous vide à basse température sont rapidement « snackés » à feu très vif afin de permettre la réaction de Maillard en surface, qui ne peut pas se développer aux températures du bain thermostaté et qui va ajouter des nouvelles saveurs et une couleur encore plus appréciable²⁶.

Au niveau physico-chimique, le gradient de température étant petit²², la dénaturation des protéines est plus lente et homogène, leur digestibilité en est donc augmentée^{18,26}. La basse température permet aussi la conservation de plusieurs autres composés tels que des antioxydants, des vitamines ou des minéraux, les rendant facilement assimilables par l'humain^{4,11,22,26,27}. Du point de vue microbiologique, les températures communément utilisées permettent de réduire efficacement la présence de pathogènes microbiens, tout en

préservant la qualité du produit, tant qu'un temps de cuisson nécessaire est respecté (**Figure 3**). L'emballage sous plastique permet aussi d'éviter toute contamination après la cuisson et l'absence d'oxygène inhibe la survie de certaines bactéries tout en permettant d'empêcher l'oxydation chimique de la viande, qui a un effet négatif sur la couleur et la saveur, ce qui permet donc une meilleure conservation de la viande après sa cuisson, avant la consommation^{26,27,34}. Enfin, le contrôle précis de la température permet une reproductibilité presque parfaite entre les cuissons, ce qui est intéressant tant pour les industries et cuisines de collectivités que pour les scientifiques qui désirent étudier la cuisson de la viande²⁶.

4. Spectroscopie d'impédance électrique

4.1. Mise en contexte

4.1.1. Pertinence de la méthode

Actuellement, plusieurs méthodes existent pour caractériser la cuisson d'un morceau de viande, si l'on se concentre sur les caractéristiques organoleptiques comme la texture, la couleur ou encore les pertes en eau et des protocoles d'analyses existent et sont couramment utilisés dans l'industrie et en recherche^{6,14,24,35-37}. Concernant la maîtrise de la charge microbologique et de l'élimination de la flore pathogène, il est important de faire subir un traitement thermique suffisant au produit dans son entièreté, autrement dit, atteindre une certaine température à cœur durant un certain laps de temps (barème thermique), sans pour autant dégrader ses qualités nutritionnelles et organoleptiques^{38,39}. En effet, le cœur du produit constitue le point le plus froid de celui-ci et la chaleur sera transmise jusqu'à celui-ci par convection.

Une méthode de contrôle communément utilisée est la mise en place d'un thermomètre sonde dans le morceau durant la cuisson afin de suivre la température à cœur⁴⁰. Celle-ci présente le désavantage de se faire en direct lors de la cuisson et non à posteriori, empêchant un contrôle de la qualité dans la suite de la chaîne de production et d'assurer un suivi des traitements thermiques subis par le produit, même s'il a été refroidi³⁸. Toutefois, certaines méthodes existent pour connaître la température finale atteinte par le produit, après son refroidissement, telle que la spectroscopie UV-vis. Celle-ci produit de bons résultats en laboratoire mais l'interférence importante de l'eau, qui présente une grande absorbance, empêche son utilisation industrielle³⁹. D'autre part, la mesure de l'activité catalytique de certaines enzymes dans la viande, en fonction de la température atteinte peut être utilisée, mais cette méthode demande un appareillage coûteux, du temps et est destructrice⁴¹. L'utilisation de ces méthodes sur une ligne de production ou dans une cuisine de collectivité reste donc difficile. La mise au point d'une technique rapide, efficace, peu onéreuse, non destructrice et portable est nécessaire. La spectroscopie d'impédance électrique (SIE) peut s'avérer être une méthode potentielle, plusieurs études ayant montré sa pertinence dans le contrôle de la qualité de la viande et de ses co-produits⁴²⁻⁵¹, et plus particulièrement pour le contrôle de la température maximale atteinte, après refroidissement³⁸.

La SIE est une méthode permettant d'analyser les propriétés électriques de systèmes par l'induction d'un signal électrique alternatif à différentes fréquences et la mesure de la réponse obtenue par ce signal ^{51,52}. Les premières expériences de SIE remontent à 1894, quand Nernst a mesuré les constantes diélectriques de plusieurs fluides organiques ⁵³. Ensuite, en 1925, Fricke a présenté un modèle de circuit électrique analogue de la viande ⁵⁴, ce qui permit à Callow en 1936 d'effectuer les premières recherches plus complexes de mesure d'impédance électrique sur la viande ⁵⁵. Cependant, ce n'est qu'à partir des années 1980 que l'intérêt pour la SIE grandit, grâce à la mise sur le marché d'ordinateurs performants, permettant une prise de mesure rapide et précise de l'impédance sur des tissus, ainsi que l'analyse des résultats obtenus ⁵⁶. Depuis lors, cette méthode a été mise en application pour le contrôle qualité de nombreux aliments, tels que la mesure de la maturation de fruits ou de légumes, le contrôle de la maturation de viandes ou du respect de la chaîne du froid lorsqu'elles sont congelées ⁵¹.

Zhao et al. (2017) ont recensé les principales applications de la SIE pour la viande (**Figure 5**). Lors de la maturation de la viande de bœuf, les protéines se dégradent, ce qui change les électrolytes présents dans les liquides intra- et extra- cellulaires et impacte les propriétés électriques de la viande ^{44,50}. La viande de porc crue est classée en trois catégories, selon des critères de couleur, de texture et de pertes lors de la cuisson. La structure du muscle ayant une influence sur la texture et son contenu initial en eau sur les pertes de cuisson, l'impédance a permis à Forrest et al. (2000) et Whitman et al. (1996), de développer une méthode permettant de classer la viande dans les trois catégories grâce à une mesure rapide d'impédance ^{57,58}. La congélation de la viande impacte la qualité de celle-ci lors de son utilisation par le consommateur, de par la destruction des membranes cellulaires, la modification de la mobilité de l'eau libre et les changements ioniques. Il est presque impossible de distinguer à l'œil nu un morceau de viande de poulet décongelé d'un morceau frais. Chen et al. (2016) ont utilisé l'impédance pour déterminer si la viande a été préalablement congelée ou non ⁴³. Dell'Osa et al. (2021) ont réalisé une expérience similaire, sur la viande bovine ⁴⁵. Enfin, Schmidt et al. (2016) ont utilisé l'impédance pour mesurer la température maximale atteinte par un blanc de poulet, après refroidissement, afin de s'assurer de la qualité microbiologique du produit fini ³⁸.

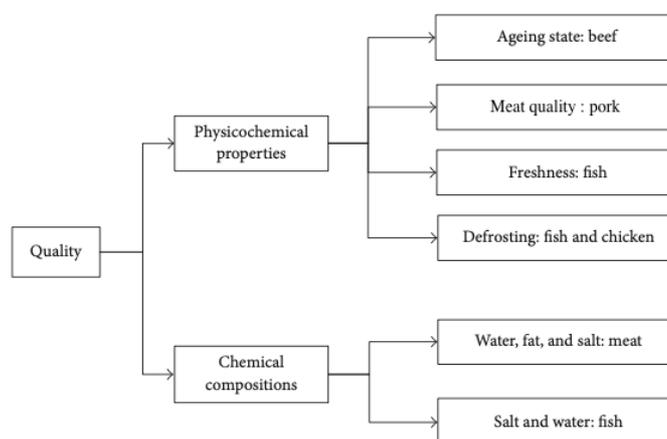


Figure 5. Applications de la SIE en contrôle de la qualité de la viande, tiré de Zhao et al. (2017) ⁵¹.

4.1.2. Propriétés électriques de la viande bovine

Selon Fricke (1925), la viande peut être considérée comme une suspension homogène de cellules dans un liquide contenant des ions. Les tissus biologiques la composant sont la membrane cellulaire ainsi que les liquides intra- et extra- cellulaires. Ceux-ci sont modélisés comme des résistances et des condensateurs, connectés en parallèle ou en série ^{54,59}. Guermazi et al. (2014) a proposé un schéma adapté du modèle de Fricke (**Figure 6**), qui illustre bien ce dernier ⁶⁰.

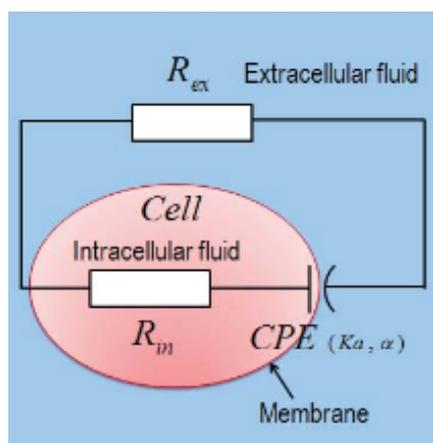


Figure 6. Illustration du modèle de Fricke dans le cas de la viande, tiré de Guermazi et al. (2014) ⁶⁰.

4.2. Mesure de l'impédance de la viande

4.2.1. L'impédance électrique

Selon le Larousse en ligne, l'impédance est la « grandeur scalaire égale, en régime sinusoïdal établi, au quotient de l'amplitude de la tension aux bornes d'un dipôle passif par l'amplitude du courant qui le parcourt. L'impédance s'exprime en ohms, de symbole Ω » ⁶¹. Autrement dit, selon la loi d'Ohm : $Z = \frac{V}{I}$. L'impédance est une fonction complexe de la fréquence d'un courant alternatif, telle que $Z = Z_{réel} + iZ_{imag}$, où $Z_{réel}$ est la partie réelle (résistive), Z_{imag} est la partie imaginaire (capacitive) et $i = (-1)^{1/2}$ ⁴⁴.

4.2.2. Caractéristiques influençant le module de l'impédance

Dans le cas de la viande, le module de l'impédance mesuré sur une pièce spécifique dépend de plusieurs paramètres :

- La structure du muscle, celle-ci changeant en fonction de la zone prise sur la carcasse ²,
- La composition chimique et ionique, les ions Na^+ et Cl^- étant principalement retrouvés dans le liquide extracellulaire, alors que les porteurs de charges au sein du liquide intracellulaire sont les ions K^+ , les protéines et des acides organiques ⁴⁴,
- La teneur en eau, car le module de l'impédance va augmenter lorsque la teneur en eau diminue ^{44,47},
- La teneur en gras, celui-ci ayant des propriétés isolantes ⁴⁴,

- La fréquence utilisée, en général de 10-100 Hz à 100-200 kHz^{42,43,45,50}, qui a un impact de par le chemin emprunté par le courant au travers des tissus, plus celui-ci est long, plus le module de l'impédance sera élevé⁴⁴ (**Figure 7**) :
 - Lorsque des basses fréquences sont appliquées (1 Hz à 1 kHz³⁸), le courant passe principalement dans le liquide extracellulaire, la membrane des cellules servant d'isolant et se comportant comme un condensateur, empêchant le courant d'y pénétrer ;
 - À de plus hautes fréquences (à partir de 10 kHz^{45,62}), le courant traverse la membrane cellulaire et passe à travers le liquide intracellulaire^{38,45,46,63}.

Lors de la mesure d'une impédance, on peut donc considérer qu'au-delà d'une fréquence de 10 kHz, la composante de capacité de la membrane cellulaire est nulle et que le module obtenu correspond uniquement aux résistances des liquides intra- et extra- cellulaires^{45,62}.

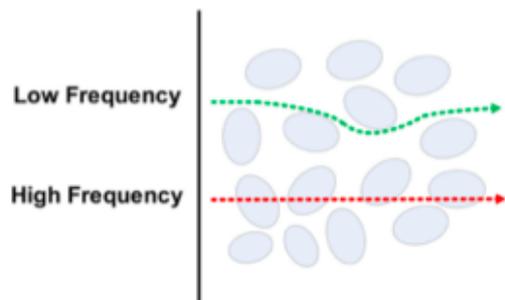


Figure 7. Illustration du passage du courant électrique en fonction de la fréquence, au travers d'un tissu, les ovoïdes bleus représentant des cellules, contenant le liquide intracellulaire et baignant dans le liquide extracellulaire, tiré de Huh et al. (2021)⁴⁶.

4.2.3. Appareils de mesure et sondes

Dans le passé, les mesures de spectroscopie d'impédance électrique étaient effectuées grâce à un oscilloscope XY, sur l'écran duquel étaient affichés les signaux du test et de la réponse, méthode qui demande beaucoup de temps, les résultats de chaque fréquence devant être notés à la main. Plus récemment, beaucoup de laboratoires ont utilisé des instruments très coûteux (plusieurs milliers d'euros), qui sont très précis, permettent de mesurer l'impédance sur une large gamme de fréquences et d'utiliser plusieurs architectures de sondes, mais nécessitent de travailler dans des conditions qui ne sont atteignables qu'en laboratoire. Aujourd'hui, la présence sur le marché d'oscilloscopes plus abordables (quelques centaines d'euros) et qui peuvent être alimentés en électricité directement par l'ordinateur auquel ils sont reliés, permet d'envisager réellement la mise en œuvre d'appareils portables abordables pour des applications industrielles, des programmes étant souvent fournis par le fabricant pour la récolte et l'analyse des résultats⁵⁶.

Concernant les sondes, reliées à l'appareil de mesure et en contact avec l'échantillon, deux méthodes sont communément utilisées pour mesurer l'impédance électrique dans des

applications alimentaires : le dipôle qui utilise un circuit de deux électrodes et le quadripôle qui en utilise quatre par circuit ^{44,51,56}. La méthode la plus simple est d'utiliser deux électrodes pour induire un courant (I) dans un circuit et de mesurer la tension (V) entre ces deux mêmes électrodes, afin d'en déduire l'impédance selon la loi d'Ohm (**Figure 8**). L'avantage de cette méthode est une plus grande simplicité du circuit. Toutefois, une erreur de mesure est produite par la création d'une zone de polarisation autour des électrodes, par le passage du courant et des charges sont dès lors créées et la mobilité des ions est modifiée ^{44,51,56}, et cela particulièrement à des basses fréquences. Lorsque les fréquences sont plus élevées, cette erreur peut être négligée ⁶³.

D'autre part, cette erreur peut être éliminée en utilisant un circuit de quatre électrodes (quadripôle) où deux d'entre elles transportent le courant et deux autres mesurent la différence de potentiel, aucun courant ne passant dans ces dernières ^{44,51,56}. Une autre façon d'éliminer cette erreur est de placer plusieurs électrodes bipolaires sur la sonde (**Figure 9, d**) et de prendre des mesures entre chaque paire. Pour des échantillons homogènes, l'impédance dépend de la distance entre les électrodes (son module augmente avec la distance), avoir plusieurs électrodes permet alors de mesurer plusieurs impédances en fonction de la distance, de les placer dans un diagramme et, par la pente de celui-ci, calculer l'erreur qui est égale à la valeur de l'impédance lorsque la distance entre deux électrodes est nulle ⁴⁴.

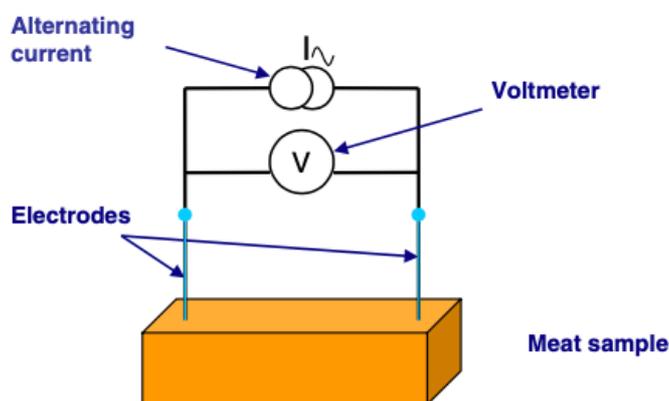


Figure 8. Schéma de la mesure de l'impédance à l'aide d'une sonde bipolaire, tiré de Damez et al. (2008) ⁴⁴.

Les sondes servant à la mesure bipolaire de l'impédance peuvent avoir plusieurs architectures, de la plus simple, comprenant deux aiguilles séparées par une distance connue ^{38,44,63} (**Figure 9, a**) ou une seule aiguille avec une gaine conductrice dans laquelle est emmanché un fil isolé ⁵¹ (**Figure 9, b**) jusqu'à des systèmes plus complexes avec plusieurs paires d'électrodes disposées à intervalles réguliers linéairement ou bien circulairement ^{43,47,49,50} (**Figure 9, c, d et e**). Les sondes servant à la mesure quadripolaire ont une architecture similaire, la plus utilisée étant deux paires d'aiguilles (**Figure 10, a**), où le courant passe dans celles placées à l'extérieur et la différence de potentiel mesurée entre celles à l'intérieur ^{45,46}.

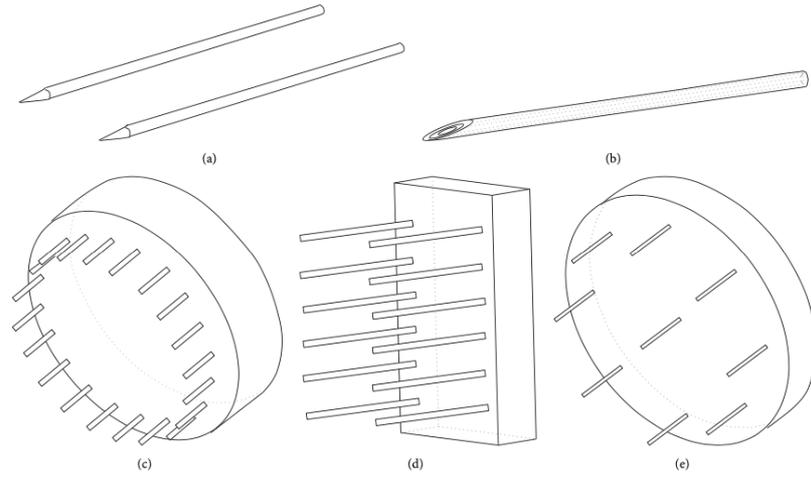


Figure 9. Différentes architectures de sondes dipolaires, tiré de Zhao et al. (2017) ⁵¹.

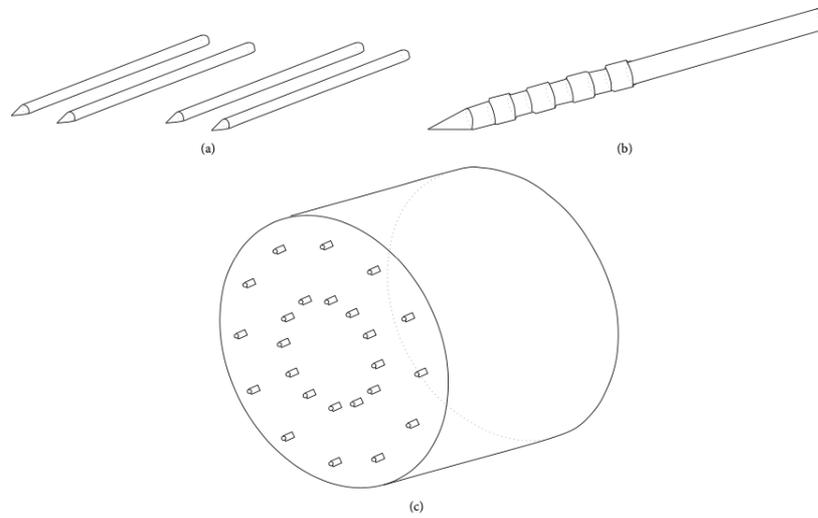


Figure 10. Différentes architectures de sondes quadripolaires, tiré de Zhao et al. (2017) ⁵¹.

Objectifs

Une analyse de la littérature scientifique relative à la cuisson de la viande et plus particulièrement sur la cuisson sous vide, son utilisation industrielle et l'importance de la température de cuisson (et du temps) afin d'assurer une qualité microbiologique mais aussi une digestibilité satisfaisante et une texture appréciable par le consommateur a été réalisée. D'autre part, un état des recherches sur la spectroscopie d'impédance électrique utilisée dans des applications alimentaires et la possibilité d'utiliser la SIE pour connaître la température maximale atteinte par de la viande cuite (poulet), après son refroidissement a été entreprise. Suite à cette étude, il est apparu pertinent d'explorer la possibilité de créer un nouvel appareil qui pourrait déterminer la température maximale atteinte par un steak bovin (ou appoint de cuisson) cuit sous vide et refroidit, grâce à la mesure de son impédance.

Ce travail de fin d'études a pour objectif de réaliser une « preuve de concept » sur l'application de la SIE pour l'évaluation de la qualité de la cuisson de viande bovine ainsi que déterminer les possibilités et limites de cette méthode. Une première étape est la création du dispositif de mesure, plus particulièrement les sondes et la recherche de l'architecture idéale, présentant la meilleure répétabilité statistique. Ensuite, plusieurs températures de cuisson sur plusieurs morceaux de viande bovine provenant de muscles et/ou de races différentes ont été effectuées, afin de connaître le domaine d'application de la méthode et les éventuels réglages possibles afin de, par la suite, pouvoir élargir les perspectives.

Six architectures différentes de sondes ont été testées : trois écartements (2,54/5,08/7,62 mm) et deux profondeurs (5 ou 10 mm). Deux muscles ont été explorés : le *Longissimus dorsi* pour la race Blanc Bleu Belge (BBB) et l'*Aductor magnus* pour les races BBB, BBB « Bleue des Prés », Limousin et Blonde d'Aquitaine.

Matériel et méthodes

1. Sélection de la viande et découpe des steaks

Des tranches de viande (appelées « steak » par la suite), d'une épaisseur adéquate (2 cm ^{48,49} pour le *Longissimus dorsi* et 1,5 cm pour l'*Aductor magnus*) ont été découpées dans le muscle entier, perpendiculairement aux fibres à l'aide d'une trancheuse (Severin, China). Les tranches ont ensuite été mises sous vide (Henkelman, Jumbo 42, Germany) et stockées à une température de 4 °C jusqu'à leur utilisation. Les détails de chaque animal (race, sexe, âge à l'abattage et nombre de jours de maturation à la cuisson) sont repris dans le tableau en ci-dessous (**Tableau 1**).

Tableau 1. Âge des animaux au jour de l'abattage et nombre de jours de maturation au jour de la cuisson. Les numéros d'expérience correspondent à ceux présentés plus loin dans ce chapitre (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

N° d'expérience	Race de l'animal	Sexe	Âge à l'abattage (en mois)	Muscle utilisé	Maturation (en jours)	Commentaires
1	Blanc-Bleu Belge	Mâle	14	L. dorsi	24	
2	Blanc-Bleu Belge	Mâle	17	L. dorsi	15	Cuisson à 60 et 70°C
2	Blanc-Bleu Belge	Mâle	18	L. dorsi	11	Cuisson à 50°C
2	Blanc-Bleu Belge	Mâle	19	L. dorsi	15	Cuisson à 80°C
3	Limousin	Mâle	40	A. magnus	15	
3	Blanc-Bleu Belge	Mâle	25	A. magnus	15	
3	BBB « Bleue des Prés »	Vache	48	A. magnus	15	
3	Blonde d'aquitaine	Mâle	20	A. magnus	15	

Il est important de préciser que l'appellation « Bleue des Prés » correspond à un label Wallon signifiant qu'un individu de race Blanc-Bleu Belge a, entre-autres, connu au moins deux saisons de pâturage avant d'être abattu ⁶⁴.

2. Caractérisation de la viande avant, pendant et après la cuisson

En résumé, plusieurs analyses ont été effectuées sur les steaks :

- Avant leur cuisson : colorimétrie, texturométrie, matière sèche, teneur en matières grasses, teneur en protéines
- Durant leur cuisson : suivi de la température
- Après leur cuisson : pertes de cuisson, colorimétrie, texturométrie, teneur en matières grasses, teneur en protéines, spectroscopie d'impédance électrique. Suite à un refroidissement dans un bain thermostaté à 20 ± 1 °C.

Ces analyses permettent de comparer les différents paramètres de cuisson testés et de mieux comprendre la réponse obtenue par la SIE. Chaque analyse a été réalisée en deux ou trois répétitions afin de pouvoir déterminer une moyenne et un écart-type. Les pesées ont été

effectuées sur une balance de laboratoire (Sartorius Lab Instruments - Germany) ou analytique (Kern ALS - KERN, Germany), selon la précision demandée par l'analyse.

2.1. Colorimétrie

La couleur de chaque échantillon/essai a été analysée au moyen d'un colorimètre (ColorFlex EZ - HunterLab) afin d'établir une base de travail. Le centre de chaque steak a été déposé sur la cellule de mesure et les données colorimétriques ont été récoltées dans l'espace CIE L*a*b*. La première valeur, L*, représente la clarté (blanc/noir) alors que les deux autres (a* et b*) représentent l'intensité des couleurs perçues par l'œil humain : rouge, vert, bleu et jaune.

2.2. Texturomètre

Une analyse du profil de texture de la viande (TPA) a été effectuée afin de déterminer la texture des échantillons, sur un texturomètre TA1 (Lloyd Instruments, UK). Pour cela, deux carottes de 2,5 cm de diamètre sont prélevées parallèlement à la direction des fibres du muscle et sur toute sa hauteur, pour chaque steak. Celles-ci sont comprimées à 90% de leur hauteur initiale avec une sonde de 2,54 cm de diamètre, avec une vitesse de 50 mm/min par une cellule de charge de 500 N, selon la technique utilisée par Botinestean et al. (2021)³⁷. Les paramètres de dureté (N), la force maximale appliquée à la première compression ; l'élasticité (mm), la distance sur laquelle l'échantillon reprend sa forme entre les deux cycles de compression ; la cohésion (-), le ratio entre la résistance du produit à la seconde déformation et la première ; la résistance à la mastication (N*mm), le produit de la dureté, la cohésion et l'élasticité ; ont été calculés par le programme Nexygen Plus 4.1.

2.3. Matière sèche

La matière sèche a été déterminée pour chaque lot de steaks soumis aux analyses de matières grasses et protéines totales, selon un protocole interne. Une quantité d'environ exactement 5 grammes de viande a été déposée dans une conserve tarée, contenant du sable, placée dans une étuve (Memmert UF110 – Memmert, Germany) à 105 °C pendant 72 h. La différence de masse permet de calculer la teneur en matière sèche de l'échantillon et son humidité initiale :

Équation 1. Détermination de la matière sèche (%) de la viande.

$$\% MS = 100 - \left(\left(\frac{(tare + \text{échantillon frais}) - (tare + \text{échantillon sec})}{(tare + \text{échantillon frais}) - tare} \right) * 100 \right)$$

2.4. Pertes de cuisson

Les pertes de cuisson ont été calculées en pesant individuellement chaque steak avant la mise sous vide puis une fois refroidit à 20 ± 1 °C, sorti du sac sous vide et légèrement essuyé avec du papier absorbant. Ce calcul permet de déterminer les pertes aqueuses qui surviennent durant la cuisson et la formule s'établit comme suit³⁷ :

Équation 2. Détermination des pertes de cuisson (%)

$$\% \text{ Pertes de cuisson} = \left(\left(\frac{\text{steak cru} - \text{steak cuit}}{\text{steak cru}} \right) * 100 \right)$$

2.5. Teneur en protéines

La teneur en protéines des échantillons/essais a été déterminée selon la méthode Kjeldhal et un protocole interne tiré de la norme AFNOR NF V 04-407, à l'aide d'un appareil (Tecator 2020 Digestor & Kjeltac 2200 - FOSS, Germany). Environ exactement 1 g de chaque échantillon/essai a été pesé pour la détermination de la teneur totale en azote de la viande. Un facteur de conversion de 6,25 a été utilisé pour connaître la teneur équivalente en protéines.

2.6. Teneur en matières grasses

La teneur en matières grasses des échantillons a été déterminée par extraction à l'éther de pétrole (Soxhlet), selon un protocole interne. Environ exactement 3 g d'échantillon sont placés dans une cartouche d'extraction en cellulose, recouverte de coton. La cartouche est placée dans une nacelle et glissée au sein d'un berlin d'extraction sec et taré au préalable. Un volume de 140 mL d'éther de pétrole est ensuite versé dans le berlin et celui-ci est placé dans un appareil Soxtherm SE416 (C. Gerhardt, Germany), pour une extraction d'un peu plus de 2 heures. Suite à l'extraction, la nacelle est retirée, l'excédent d'éther de pétrole est évaporé sous hotte et les berlins sont placés dans une étuve à 102 °C pendant une heure. Ceux-ci sont à nouveau pesés lorsque refroidis dans un dessiccateur. Le pourcentage de matière grasse se calcule comme suit (% MS) :

Équation 3. Détermination de la matière grasse (%MS).

$$\% \text{ Matière grasse (\%MS)} = \left(\left(\frac{(\text{tare} + \text{matière grasse}) - \text{tare berlin sec}}{\text{pesée matière sèche}} \right) * 100 \right)$$

2.7. Broyage de la viande

Lorsqu'une méthode d'analyse (matières grasses, matière sèche, protéines) nécessitait l'utilisation d'un broyat homogène de l'échantillon, celui-ci a été obtenu par broyage d'à peu près 50 g de viande provenant de chaque steak individuel a été pulvérisé au Grindomix GM200 (Retsch GmbH, Germany) durant 10 sec à 10000 RPM.

2.8. Suivi de la température

Durant toute la durée de la cuisson, la température à cœur de chaque steak ainsi que celle du bain ont été mesurées en continu ³⁸ à l'aide de sondes reliées à un appareil Testo 176T4 (Testo SA, Belgium). Ce suivi a permis de suivre la cuisson et l'arrêter au bon moment.

3. Cuisson de la viande

Selon le protocole de Vaskoska et al. (2020)¹⁵ les steaks, une fois mis sous vide, ont été plongés dans un bain d'eau thermostaté (Anova Precision Cooker – ANOVA, USA) à différentes températures. Lorsque la température à cœur atteint la température du bain, les steaks sont laissés 30 minutes¹⁵ supplémentaires afin de permettre aux changements physico-chimiques internes de se développer. Ensuite, ils sont retirés du bain et mis à refroidir dans un bain refroidi à 20 ± 1 °C^{35,38}, avant d'effectuer des analyses dessus. Les analyses de teneur en matière sèche, protéines et matière grasse ne pouvant pas se faire le jour même, les steaks sont remis sous vide et stockés à 4 ± 1 °C jusqu'au lendemain ou congelés à -22 ± 1 °C pour analyse ultérieure.

4. Appareil de mesure de l'impédance électrique

4.1. Description de l'appareil et du programme d'analyse

Un appareil de mesure de l'impédance électrique a été mis au point au sein du Laboratoire de Sciences Gastronomiques (Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège), avec la collaboration du Dr S. Yunus. Celui-ci se compose d'un oscilloscope Analog Discovery 2 (Digilent, USA) auquel des sondes peuvent être reliées. Celui-ci est aussi doté d'un générateur d'ondes permettant d'appliquer un signal oscillant sur une plage de fréquences allant du millihertz à 20 MHz. L'oscilloscope est monté sur un support (**Figure 11**) qui permet de régler la hauteur de la sonde grâce à une vis et ainsi de maîtriser la profondeur d'enfoncement de celle-ci dans le steak. Le programme Waveforms (Digilent, USA) a été utilisé pour contrôler l'oscilloscope et pour récupérer les résultats. La plage de fréquences sur laquelle les mesures sont effectuées par l'appareil va de 10 à 100.000 Hz^{38,46,50} avec 501 mesures au sein de cette plage. L'amplitude du signal a été placée à 200 mV.

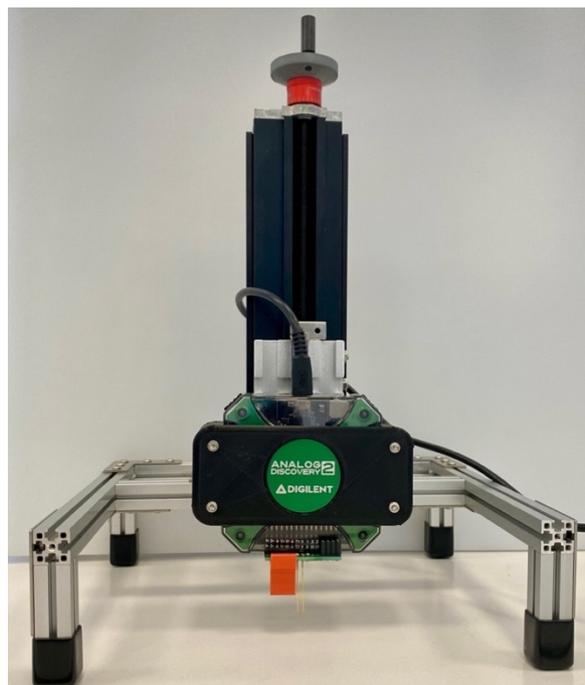


Figure 11. Appareil de mesure de l'impédance avec sonde, monté sur son support.

4.2. Description des sondes

Une sonde (**Figure 12**) se présente sous forme d'une carte imprimée dans laquelle deux aiguilles à coudre en nickel, plaquées d'or⁶⁰, sont insérées afin de permettre une mesure bipolaire de l'impédance, via la mesure de la tension aux bornes de ces aiguilles. Les deux aiguilles sont espacées par multiples de 2,54 mm (2,54/5,08/7,62 mm), en fonction des expériences. Une résistance de charge de 1000 Ω , connectée en série aux aiguilles, permet de mesurer l'intensité du courant alternatif qui passe dans le circuit. Enfin, une pièce de plastique attachée à la sonde permet d'affiner le réglage de la profondeur et de s'assurer de sa constance (5 ou 10 mm).

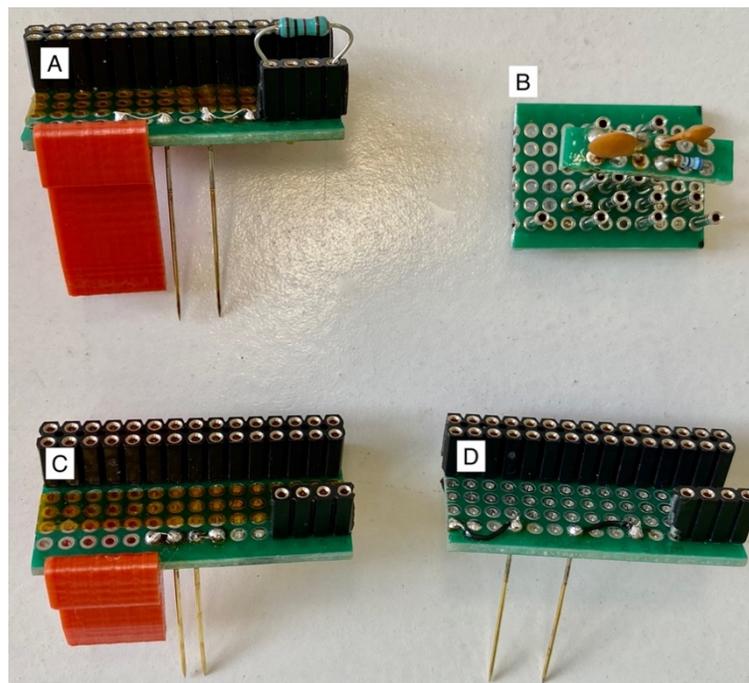


Figure 12. Sondes de mesure de l'impédance, écartement de 2,54 mm (C), 5,08 mm (A) et 7,62 mm (D). Circuit de vérification de la calibration (B).

4.3. Prise de mesures

L'impédance électrique de la viande est mesurée sur le steak refroidi à 20 ± 1 °C après la cuisson, comme indiquée au point précédent. Pour chaque steak, 5 points de mesures sont effectués, de haut en bas et à intervalles réguliers, les aiguilles étant enfoncées parallèlement à la direction des fibres musculaires (**Figure 13**). Le module de l'impédance est calculé selon la formule $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ où R est la valeur de la résistance ($Z_{\text{réel}}$) et X la valeur de la capacitance (iZ_{imag}). Une moyenne des modules mesurés entre 10.000 et 100.000 Hz est ensuite calculée (sauf mention contraire), afin d'obtenir l'impédance moyenne sur ces fréquences et pouvoir analyser/comparer les résultats^{45,62}.

Au préalable de chaque analyse, un circuit de vérification de la calibration (**Figure 12, B**) a été branché aux aiguilles, une mesure a été effectuée et le résultat observé, afin de s'assurer que l'appareil est bien calibré.

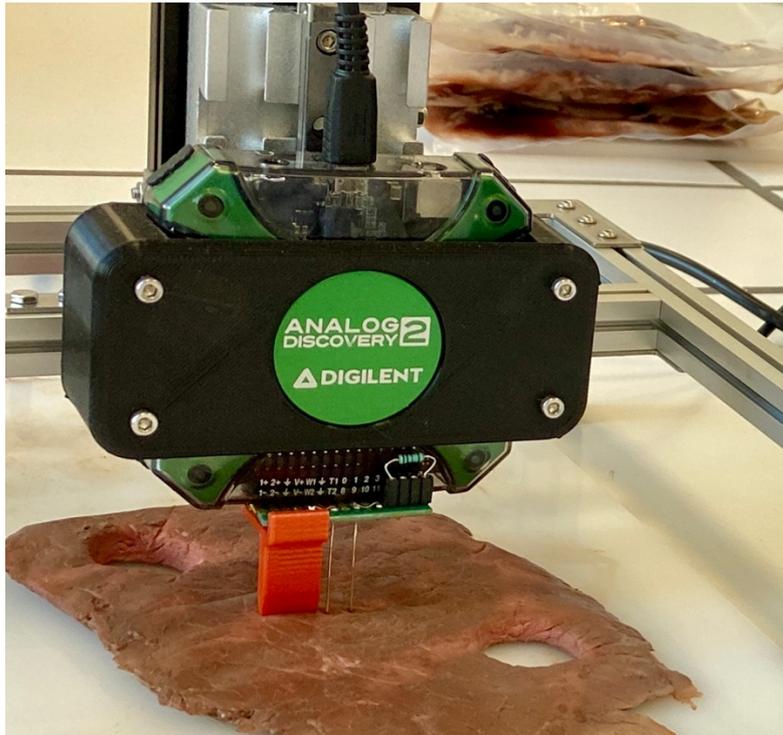


Figure 13. Prise de mesure sur une tranche de *A. magnus*.

5. Analyse statistique

Les résultats sont exprimés bruts ou sous la forme de la moyenne, de l'écart-type et du coefficient de variation, ces calculs ont été effectués sur le programme Microsoft Excel (Redmond, USA). Lorsque nécessaire, une analyse de la variance (ANOVA) avec un intervalle de confiance de 95 % a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab Web App (Pennsylvanie, USA), les conditions d'application du test ont été vérifiées avant chaque analyse (échantillons aléatoires, simples et indépendants ; distribution normale des populations-parents ; variances des populations-parents égales). Les résultats des analyses de la variance sont considérés comme significatifs lorsque la valeur du test de F conduit à rejeter l'hypothèse au seuil 5% ($p < 0,05$). Suite à l'analyse de la variance, la comparaison des moyennes a été effectuée par un test de Tukey, avec un indice de confiance de 95 %. Enfin, une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée grâce à l'aide du logiciel R-Studio (Boston, USA). Cette analyse permet de synthétiser l'information, en mettant en évidence la ou les variables(s) du système qui ont la plus grande influence sur celui-ci, réduisant ainsi le nombre de variables à étudier. C'est un analyse qui produit des facteurs, combinaisons linéaires des variables initiales indépendantes les unes des autres⁶⁵.

Résultats et discussion

1. Plan d'expérimentation

Comme annoncé dans les objectifs, plusieurs expériences ont été menées afin de démontrer que la SIE est une méthode capable de déterminer la température maximale atteinte par un morceau de viande cuit, après son refroidissement et, ainsi, d'évaluer la qualité de sa cuisson. Premièrement, après la création du dispositif de mesure et de plusieurs jeux de sondes (différents écartements), l'objectif était de déterminer le couple écartement/profondeur permettant l'obtention de mesures les plus précises et répétables. A cette fin, trois steaks de *Longissimus dorsi* de BBB ont été cuits à 60 °C puis refroidis et les six couples de sondes ont été testés sur chacun d'entre eux.

Une fois l'architecture de la sonde optimisée, la seconde expérience a consisté en la cuisson à quatre températures différentes (50, 60, 70 et 80 °C) de steaks de *L. dorsi* de BBB afin de juger de l'existence d'une différence significative entre les mesures d'impédance aux différentes températures et dès lors de la pertinence de la méthode.

Pour la troisième expérience, ce sont des steaks d'*Adductor magnus*, issus de quatre races différentes : BBB, BBB « Bleue des Prés », Limousin et Blonde d'Aquitaine qui ont été cuits, à trois températures (50, 60 et 70°C) afin de confirmer les différences significatives d'impédance pour les différentes températures de cuisson, malgré un changement de muscle et de race, et dès lors une composition chimique différente.

Enfin, tous les steaks cuits précédemment ont été analysés sur différents critères physico-chimiques, dans le but d'identifier les liens entre le module mesuré de l'impédance et la composition de la viande. Le tableau ci-dessous récapitule les expériences menées au laboratoire (**Figure 14**).

Tous ces résultats recueillis permettent de mettre en évidence la précision de la méthode, les similarités ou différences entre les muscles et/ou les races et de mieux comprendre l'influence des caractéristiques physico-chimiques sur la mesure de l'impédance.

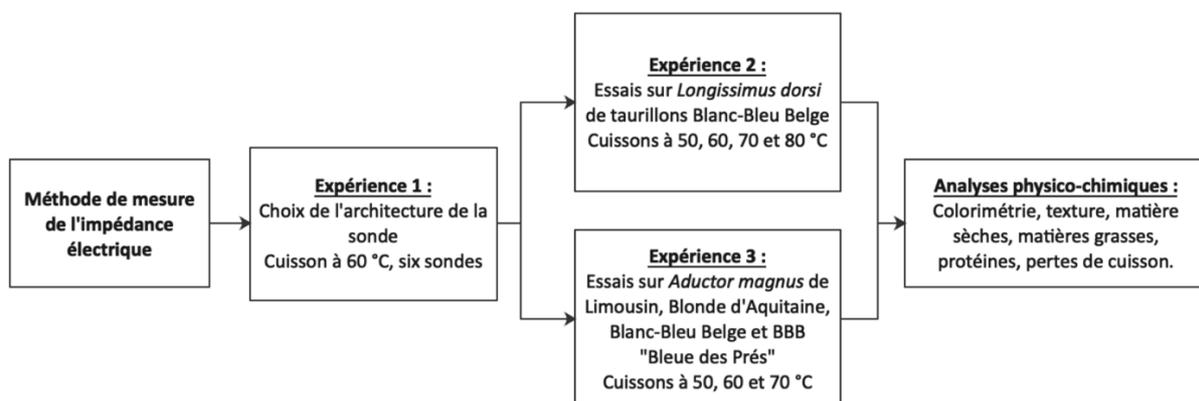


Figure 14. Détail des expériences menées au laboratoire. Réalisé avec le logiciel EdrawMax.

Dans le chapitre suivant, les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés et discutés, afin de décrire les pièces de viande utilisées, les similarités et les différences entre les bêtes, muscles ou races ainsi que l'impact des différentes températures de cuisson sur leurs propriétés physico-chimiques. Par la suite, les résultats d'impédance, obtenus au cours des différentes expériences, seront abordés d'un point de vue statistique afin de déterminer la qualité de ces résultats, leur répétabilité et, *in fine*, si la mesure de l'appoint de cuisson d'une pièce de viande est possible grâce à notre méthode de spectroscopie d'impédance électrique.

Enfin, une analyse en composantes principales (ACP) permettra de mettre en évidence les paramètres ayant une influence importante sur le résultat de la mesure d'impédance.

2. Analyses physico-chimiques des pièces de viandes utilisées lors des expériences

Dans ce premier chapitre, les résultats de la caractérisation physico-chimique des pièces de viande utilisées lors des expériences sont présentés. La comparaison de ces résultats entre eux ainsi qu'avec des résultats présents dans la littérature scientifique permettra de mettre en évidence les similarités et les différences entre les pièces de viande utilisées ainsi que les races concernées, tout en fournissant des pistes de compréhension et d'interprétation aux résultats des mesures d'impédance présentés plus bas, la composition chimique du muscle ayant un impact sur la mesure de son impédance^{44,47}.

2.1. Suivi de la température

L'évolution de la température interne de chaque steak a été enregistrée afin de s'assurer de la qualité de la cuisson et du respect exact du temps de celle-ci. À titre d'exemple, le graphe ci-dessous (**Figure 15**) représente l'évolution de la température d'un steak au cours de sa cuisson dans un bain thermostaté à 60 °C et de son refroidissement. La sonde de référence permet de connaître la température exacte des bains thermostaté et refroidi. Lorsque la température du bain atteint les 60 °C, le steak y est plongé (**Figure 15, a**), après 24 minutes, la température interne du steak étant équivalente à celle du bain (**Figure 15, b**), le chronomètre est lancé pour 30 minutes. Au bout de laps de temps, le steak ainsi que la sonde de référence sont plongés dans le bain refroidi à 20 °C (**Figure 15, c**). Enfin, après 26 minutes, la température interne du steak s'égalise avec celle du bain refroidi (**Figure 15, d**). Les temps observés ici peuvent varier en fonction de l'épaisseur du morceau de viande mais aussi de la température du bain (qui change selon l'expérience). Le suivi de la température (**Figure 15**) montre que le bain permet une cuisson homogène et un refroidissement efficace du morceau de viande, gage de bonne réplicabilité entre les expériences. Le choix de la cuisson sous-vide semble donc avoir été le bon.

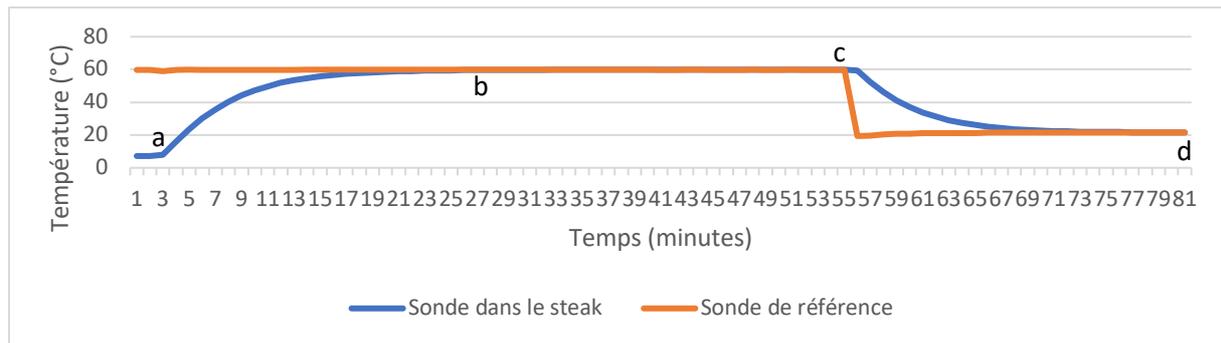


Figure 15. Évolution de la température (°C) interne d'un steak de *L. dorsi* ainsi que celle des bains thermostaté (à 60 ± 1 °C) et refroidi (à 20 ± 1 °C) au cours du temps (minutes).

2.2. Expérience 2 : Taurillons Blanc-Bleu Belges

Des steaks prélevés sur le *Longissimus dorsi* de trois taurillons de race Blanc-Bleu Belge ont été cuits à quatre températures différentes : 50, 60, 70 et 80 °C. Ces taurillons ont un âge ainsi qu'une durée de maturation entre l'abattage et la cuisson relativement proches (**Tableau 1**). Les tranches de *L. dorsi* prélevées sur le premier taurillon ont été cuites à 60 et 70 °C, celles du deuxième à 50 °C et enfin, celles du troisième à 80 °C. La composition en protéines ($22,70 \pm 1,26$ %MS), en matières grasses ($1,12 \pm 0,3$ %MS) et le taux de matière sèche ($25,71 \pm 0,40$ %) sont similaires pour les steaks crus des trois bêtes employées dans l'expérience et correspondent aux compositions communément retrouvées dans la littérature ^{8,66-68}. L'évolution des résultats obtenus pour les pertes de cuisson, la matière sèche et la couleur est discutée plus en détail ci-dessous.

2.2.1. Pertes de cuisson et matière sèche

Lors de la cuisson de la viande, le rétrécissement des fibres musculaires va permettre le relargage de l'eau contenue au sein des cellules ^{15,17-19}. Au plus la température augmente, au plus la perte en eau va s'accroître et l'on remarque bien que, comme énoncé dans l'état de l'art, les pertes de cuisson augmentent drastiquement au-delà de 60 °C (**Figure 16**) ^{4,18,22}. La valeur des pertes de cuisson observées à 70 °C correspond à celle obtenue par Fiems et al. (2003) pour une cuisson similaire ⁸.

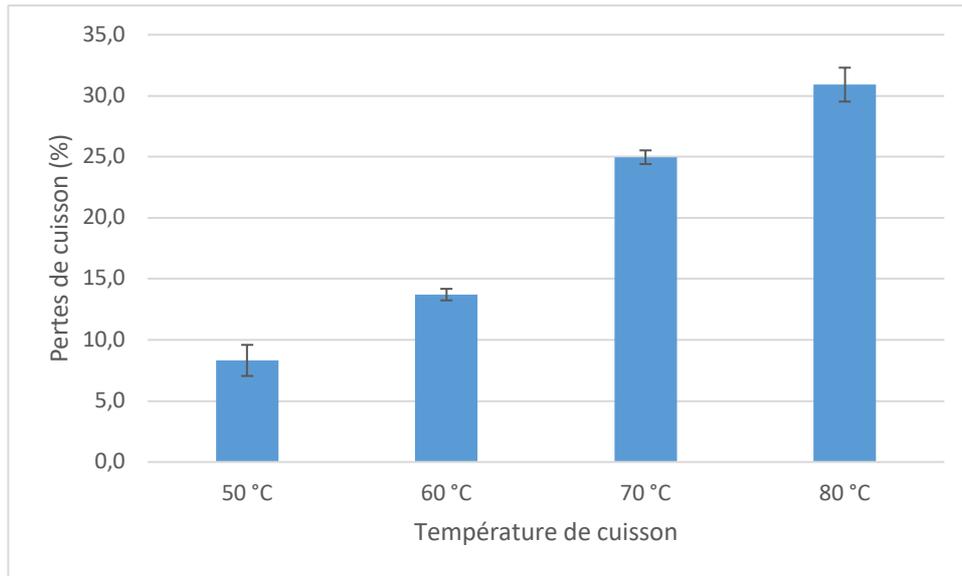


Figure 16. Pertes de cuisson (%) des steaks de *L. dorsis* de Blanc-Bleu Belge à quatre températures de cuisson différentes (50, 60, 70 et 80 °C). Les barres représentent la moyenne des mesures, avec leur écart-type. $n = 3$.

La teneur en matière sèche, à l’instar des pertes de cuisson, augmente avec la température de cuisson (**Figure 17**). Ce résultat s’explique par la perte en eau subie durant la cuisson. Nikmaram et al. (2013) ont observé que lors de la cuisson de *L. dorsis* de veau, la matière sèche augmente de manière significative après la cuisson ⁶⁹.

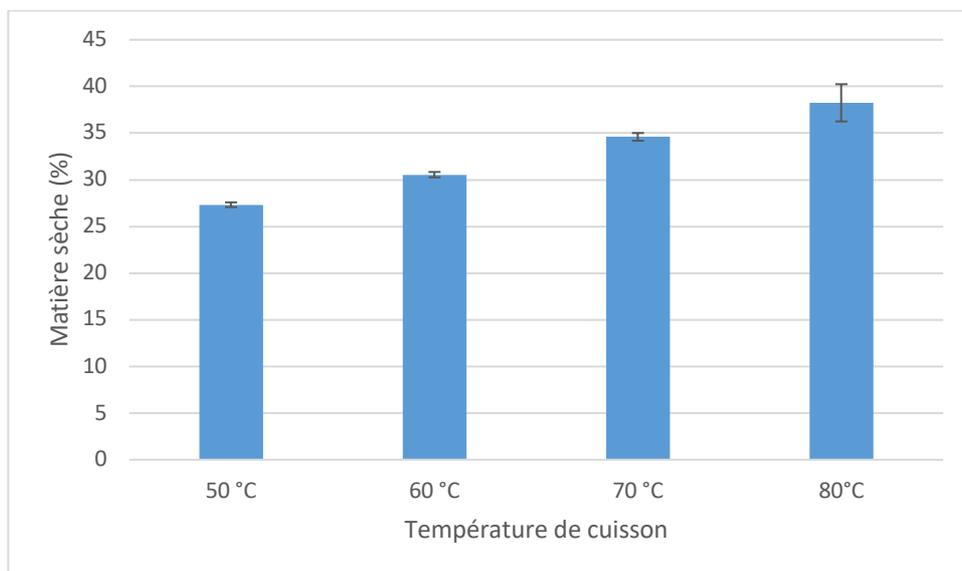


Figure 17. Teneur en matière sèche (%) des steaks de *L. dorsis* de Blanc-Bleu Belge à quatre températures de cuisson différentes (50, 60, 70 et 80 °C). Les barres représentent la moyenne des mesures, avec leur écart-type. $n = 3$.

2.2.2. Couleur

La couleur de la viande cuite, lorsqu’elle est perçue par le consommateur, est un gage pour lui de la qualité de la cuisson au niveau sensoriel mais aussi au niveau de la sécurité microbiologique du steak ¹⁷. L’évolution de la couleur en fonction de la température de cuisson montre une diminution de la valeur du paramètre a^* , autrement dit l’intensité du rouge, à partir de 60 °C (**Tableau 2**). Ceci peut être expliqué par la transformation de la

myoglobine en metmyoglobine durant la cuisson, qui a lieu à partir de 60 °C jusque 70 °C^{18,23,24}. Cette diminution est d'autant plus importante à partir de 70 °C, température à laquelle la transformation est complète.

Tableau 2. Effet de la température de cuisson des steaks de *L. dorsi* de Blanc-Bleu Belge sur les paramètres de couleur dans l'espace CIE L*a*b*. Les moyennes des mesures ainsi que leur écart-type sont indiqués. n = 3.

Température de cuisson	L*	a*	b*
50 °C	52,91 ± 0,83	9,35 ± 0,29	17,59 ± 0,56
60 °C	54,60 ± 1,19	9,12 ± 0,41	18,23 ± 0,49
70 °C	51,86 ± 2,32	6,32 ± 0,82	18,75 ± 0,45
80 °C	49,33 ± 0,90	5,83 ± 0,72	17,01 ± 0,59

2.3. Expérience 3 : Quatre races différentes

Des steaks prélevés sur l'*Aductor magnus* provenant de quatre races différentes : Limousin, Blonde d'Aquitaine, Blanc-Bleu Belge et BBB « Bleue des Prés » ont été cuits à trois températures différentes : 50, 60 et 70 °C. Ces bêtes sont toutes de sexe masculin, sauf la « Bleue des Prés » et ont un âge ainsi qu'une durée de maturation entre l'abattage et la cuisson assez différents (**Tableau 1**). Les tranches d'*A. magnus* prélevées sur le muscle entier des quatre bêtes ont été distribuées aléatoirement entre les trois températures de cuisson.

2.3.1. Teneur en protéines et en matières grasses

La teneur en protéines des steaks crus d'*A. magnus* est relativement similaire pour les quatre races et correspond aux teneurs communément retrouvées dans la littérature scientifique (**Tableau 3**)^{2,7,8,67,68}.

Tableau 3. Teneur en protéines (% MS) des steaks crus de *A. magnus* de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge). Les moyennes des mesures et leur écart-type sont indiqués. n = 3.

Race	Teneur en protéines (% MS)
Limousin	23,18 ± 0,01
Blonde d'Aquitaine	22,78 ± 0,24
BBB Bleue des Prés	22,99 ± 0,03
Blanc-Bleu Belge	24,38 ± 0,09

La teneur en matières grasses de la Blonde d'Aquitaine est la plus élevée, vient ensuite l'individu Limousin, puis le BBB Bleue des Prés et enfin, le Blanc-Bleu Belge (**Tableau 4**). La teneur plus élevée en matières grasses du Limousin par rapport au Blanc-Bleu Belge a déjà été observée dans plusieurs études précédentes^{67,68,70}. L'individu BBB Bleue des Prés a une teneur supérieure à l'individu Blanc-Bleu Belge, le premier étant une femelle alors que le second est un mâle, ce qui rejoint les résultats de Fiems et al. (2003) où les femelles Blanc-Bleu Belge ont

un taux de matières grasses supérieur aux mâles⁸. Le cahier des charges de la race Blanc-Bleu Belge reprend aussi cette différence entre les sexes comme critère⁶⁶.

Tableau 4. Teneur en matières grasses (% MS) des steaks crus de *A. magnus* de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge). Les moyennes des mesures et leur écart-type sont indiqués. $n = 3$.

Race	Teneur en matières grasses (% MS)
Limousin	2,00 ± 0,14
Blonde d'Aquitaine	2,48 ± 0,43
BBB Bleue des Prés	1,65 ± 0,25
Blanc-Bleu Belge	1,17 ± 0,12

2.3.2. Pertes de cuisson et matière sèche

Comme énoncé précédemment, la cuisson de la viande induit la sortie de l'eau contenue au sein de ses cellules^{15,17-19}. Les résultats obtenus pour les quatre races aux trois températures de cuisson (**Figure 18**) suivent une même tendance et sont similaires à ceux observés pour le *L. dorsi* à l'expérience 2 ainsi que ceux obtenus par Fiems et al. (2003)⁸. De manière analogue, la teneur en matière sèche de ces quatre races suit une même tendance avec l'augmentation de la température de cuisson (**Figure 19**), ce qui a également été observé à l'expérience 2 et par les recherches de Nikmaram et al. (2013)⁶⁹.

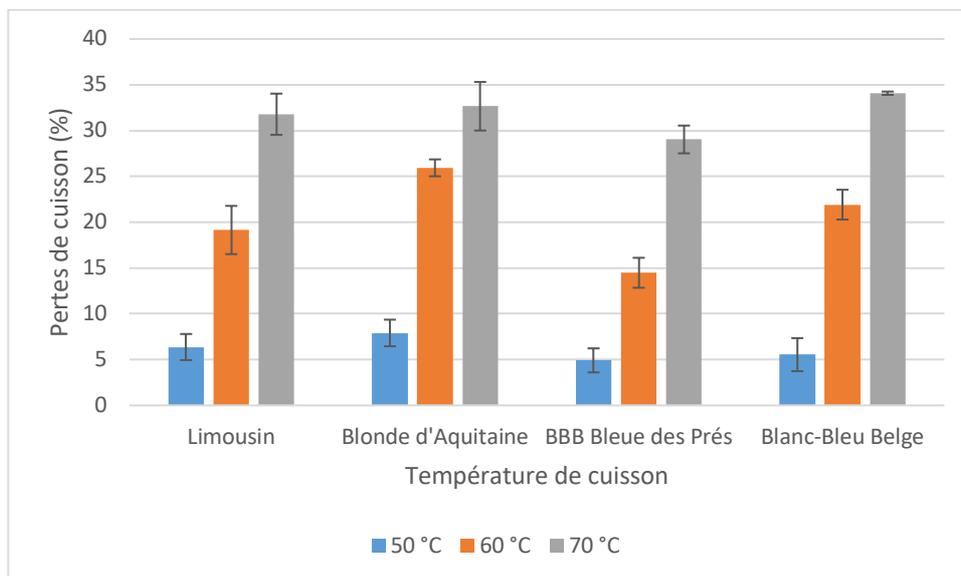


Figure 18. Pertes de cuisson (%) des steaks de *A. magnus* de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge), à trois températures de cuisson différentes (50, 60 et 70 °C). Les barres représentent la moyenne des mesures, avec leur écart-type. $n = 3$.

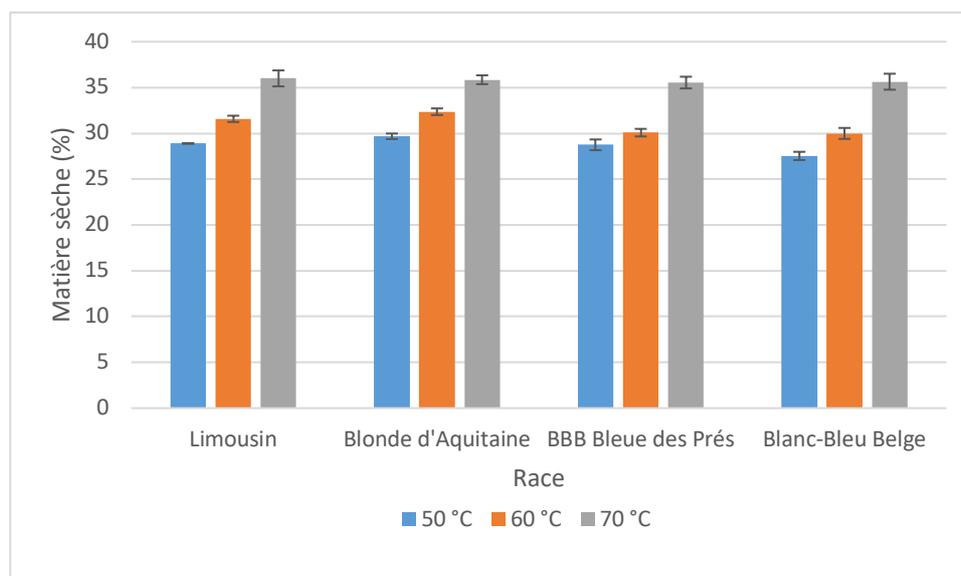


Figure 19. Teneur en matière sèche (%) des steaks de *A. magnus* de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge), à trois températures de cuisson différentes (50, 60 et 70 °C). Les barres représentent la moyenne des mesures, avec leur écart-type. $n = 3$.

2.3.3. Texture

L'observation de l'évolution de la dureté aux différentes températures de cuisson (50, 60 et 70 °C) montre, pour chaque race, que celle-ci augmente avec la température et que cette augmentation est encore plus importante entre les steaks cuits à 60 °C et ceux cuits à 70 °C (**Tableau 5**). Ces résultats peuvent être expliqués par les changements internes de la viande durant sa cuisson, la tendreté de la viande augmentant entre 50 et 65 °C, grâce à la dénaturation du collagène et la présence suffisante d'eau au sein des fibres, ce qui facilite les glissements entre-elles. Alors qu'au-delà de 65 °C, les pertes en eau deviennent plus importantes et le collagène commence à se gélifier, ce qui mène à une baisse de tendreté¹⁸. L'évolution de la résistance à la mastication est similaire à celle de la dureté, cette dernière étant un des paramètres permettant son calcul. Les modules de l'élasticité et de cohésion ne présentent pas de grandes différences selon les températures de cuisson, ce qui a aussi été observé par Palka et al. (1999) sur le *Semitendinosus* du bœuf⁶.

L'individu Limousin a une dureté inférieure à la Blonde d'Aquitaine (**Tableau 5**), ce qui a déjà été observé par Monson et al. (2004), sur le *Longissimus* de ces mêmes races, cuit à une température interne de 70 °C⁷¹.

Tableau 5. Effet de la température de cuisson (50, 60 et 70 °C) des steaks de *A. magnus* de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge) sur différents paramètres de l'analyse de profil de texture. Les moyennes des mesures ainsi que leur écart-type sont indiqués. n = 6.

Race	Température de cuisson	Dureté (N)	Élasticité (mm)	Cohésion (-)	Résistance à la mastication (N*mm)
Limousin	50 °C	1,26 ± 0,32	0,41 ± 0,08	0,51 ± 0,17	0,41 ± 0,30
	60 °C	2,40 ± 0,62	0,35 ± 0,08	0,66 ± 0,29	0,56 ± 0,07
	70 °C	5,21 ± 1,03	0,31 ± 0,09	0,58 ± 0,11	2,22 ± 0,67
Blonde d'Aquitaine	50 °C	1,08 ± 0,05	0,61 ± 0,12	0,45 ± 0,17	0,26 ± 0,16
	60 °C	2,68 ± 0,77	0,48 ± 0,14	0,87 ± 0,61	0,90 ± 0,81
	70 °C	7,85 ± 1,66	0,37 ± 0,04	0,57 ± 0,06	3,39 ± 1,35
BBB Bleue des Prés	50 °C	1,27 ± 0,25	0,54 ± 0,17	0,63 ± 0,10	0,47 ± 0,25
	60 °C	1,97 ± 0,48	0,54 ± 0,13	0,46 ± 0,13	0,64 ± 0,22
	70 °C	4,35 ± 1,00	0,52 ± 0,10	0,48 ± 0,11	1,48 ± 0,95
Blanc-Bleu Belge	50 °C	1,22 ± 0,36	0,51 ± 0,14	0,63 ± 0,33	0,38 ± 0,15
	60 °C	1,78 ± 0,54	0,51 ± 0,09	0,37 ± 0,31	0,39 ± 0,32
	70 °C	5,01 ± 1,36	0,44 ± 0,06	0,48 ± 0,11	1,54 ± 0,56

2.3.4. Couleur

Comme observé dans les résultats de l'expérience 2, la valeur du paramètre a* diminue avec l'augmentation de la température (**Tableau 6**), certainement à cause de la transformation, à partir de 60 °C, de la myoglobine (couleur rouge) contenue dans la viande en metmyoglobine (couleur brune) ^{18,23,24}. Le paramètre L*, qui représente la clarté (blanc/noir) diminue aussi légèrement, pour toutes les races, avec l'augmentation de la température de cuisson, ce phénomène peut être expliqué par la coloration en brun de la viande, ce qui la rend moins « claire » ²³. La valeur du paramètre L* chez le Blanc-Bleu Belge et le BBB Bleue des Prés est plus grande que pour le Limousin, ce résultat correspond aux observations de Raes et al. (2003) sur les muscles *Longissimus lumborum* et *Semimenbranosus* de ces deux espèces ⁷⁰.

Tableau 6. Effet de la température de cuisson (50, 60 et 70 °C) des steaks de *A. magnus* de quatre races différentes (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB Bleue des Prés et Blanc-Bleu Belge) sur les paramètres de couleur dans l'espace CIE L*a*b*. Les moyennes des mesures ainsi que leur écart-type sont indiqués. n = 3.

Race	Température (°C)	L*	a*	b*
Limousin	50	42,34 ± 2,58	15,23 ± 1,36	18,01 ± 1,51
	60	37,70 ± 1,83	13,94 ± 0,62	18,90 ± 0,93
	70	35,56 ± 1,02	10,44 ± 0,14	15,85 ± 0,30
Blonde d'Aquitaine	50	48,81 ± 3,10	15,91 ± 1,35	20,49 ± 1,36
	60	42,70 ± 1,14	12,22 ± 0,45	18,93 ± 1,12
	70	41,14 ± 0,48	10,09 ± 0,19	18,14 ± 0,46
BBB Bleue des Prés	50	44,42 ± 2,19	18,18 ± 1,85	20,01 ± 1,38
	60	41,47 ± 2,07	10,95 ± 0,64	17,95 ± 1,09
	70	35,99 ± 1,67	9,49 ± 0,04	17,44 ± 0,11
Blanc-Bleu Belge	50	45,49 ± 1,09	15,40 ± 1,55	19,32 ± 1,69
	60	40,03 ± 1,96	11,45 ± 0,82	18,51 ± 0,71
	70	38,34 ± 0,74	10,11 ± 0,87	17,42 ± 0,88

3. Évaluation de la méthode de spectroscopie d'impédance électrique

3.1. Expérience 1 : Choix de la géométrie des sondes

La première expérience a consisté en la comparaison de l'efficacité des différentes sondes (six au total), développées en interne pour la mesure de l'impédance de pièces de viande cuites, afin de déterminer celles avec lesquelles les résultats sont les plus répétables. La surface de la sonde en contact avec l'échantillon et la distance entre les deux électrodes ayant une influence sur le module de l'impédance, les résultats obtenus avec les six sondes ne pourront pas être comparés entre eux, mais l'analyse de la variance au sein des mesures d'une sonde permettra de sélectionner celles dont les résultats sont les plus répétables. Trois écartements (2,54/5,08/7,62 mm) et deux profondeurs (5 ou 10 mm) ont été testés. À cette fin, trois steaks prélevés dans le *L. dorsi* d'un taurillon BBB de 14 mois ont été cuits à 60°C selon la méthode décrite plus haut (cf. Matériel et méthodes). Les modules d'impédance obtenus pour chaque sonde sont présentés à la **Figure 20**.

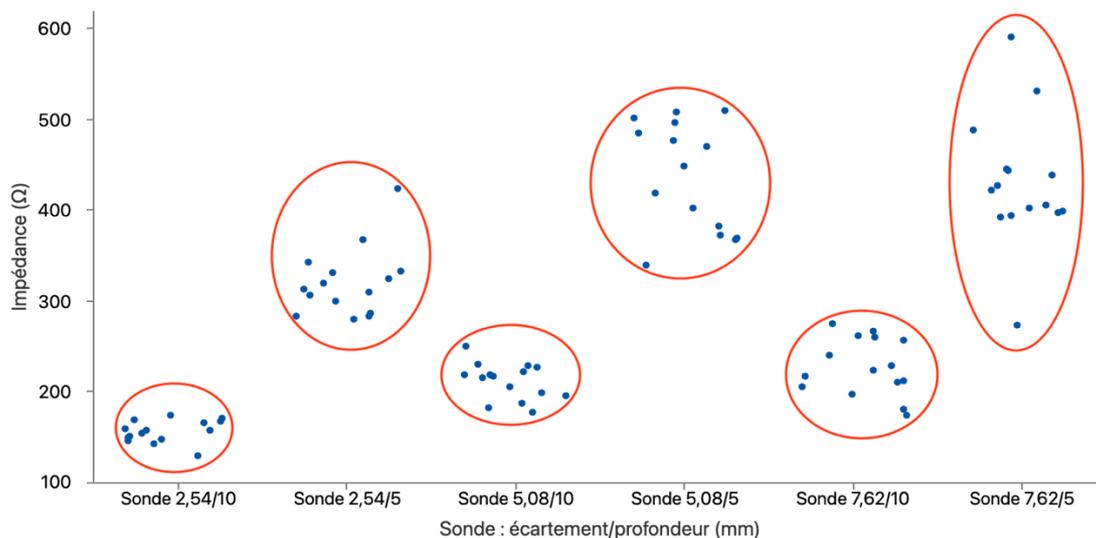


Figure 20. Répartition des modules de l'impédance pour chaque architecture de sonde (écartement/profondeur, en mm) sur *L. dorsi* cuit à 60 °C.

Les résultats obtenus (**Figure 20**) confirment l'influence qu'ont l'écartement entre les deux aiguilles et la profondeur d'enfoncement de celles-ci dans le morceau de viande, sur le module de l'impédance⁴⁴, les modules étant très différents. Le module augmente surtout lorsque la profondeur de la sonde diminue (5 au lieu de 10 mm), alors que l'écartement a un effet moins important.

Une comparaison des valeurs de p obtenues par l'analyse de la variance au sein de chaque sonde met en évidence deux sondes : 2,54 et 5,08 mm d'écartement avec 10 et 5 mm de profondeur respectivement. Les valeurs de p de ces deux sondes étant assez élevées (0,886 et 0,871) : cela veut dire que les moyennes de leurs mesures individuelles sont très égales et que la variance au sein des mesures est faible. L'étude du coefficient de variation mène à la même conclusion. Ces deux sondes sont donc celles permettant une meilleure répétabilité des mesures parmi les six sondes. Celles-ci seront utilisées pour les expériences suivantes.

Tableau 7. Valeurs de probabilité obtenues lors de l'analyse de la variance des résultats obtenus (n=15) pour chaque architecture de sonde. En gras, les deux sondes choisies pour la suite des expériences.

Architecture de sonde, écartement/profondeur [mm]	Coefficient de variation	Valeur de p
2,54/10	1,319	0,886
2,54/5	7,057	0,175
5,08/10	7,490	0,035
5,08/5	2,467	0,871
7,62/10	11,347	0,023
7,62/5	8,596	0,277

3.2. Expérience 2 : Essais sur *Longissimus dorsi* de Blanc-Bleu Belge

La capacité de la SIE à discriminer des pièces de viande présentant différentes températures de cuisson étant connue³⁸, l'appareil, les sondes et la méthode mise au point précédemment ont été testés afin de s'assurer que la réponse obtenue permette de discriminer différentes températures de cuisson. Un premier essai a été effectué à quatre températures différentes : 50, 60, 70 et 80 °C sur douze tranches de *L. dorsi* provenant de plusieurs taurillons de BBB dont les détails d'âge et de maturation se trouvent dans le **Tableau 1**. La sonde de 2,54 mm d'écartement et 10 mm de profondeur a été utilisée pour cette analyse, celle-ci présentant le plus petit coefficient de variation (**Tableau 7**). L'impédance des steaks à chaque cuisson a été mesurée sur une plage de fréquences allant de 1 à 100.000 Hz.

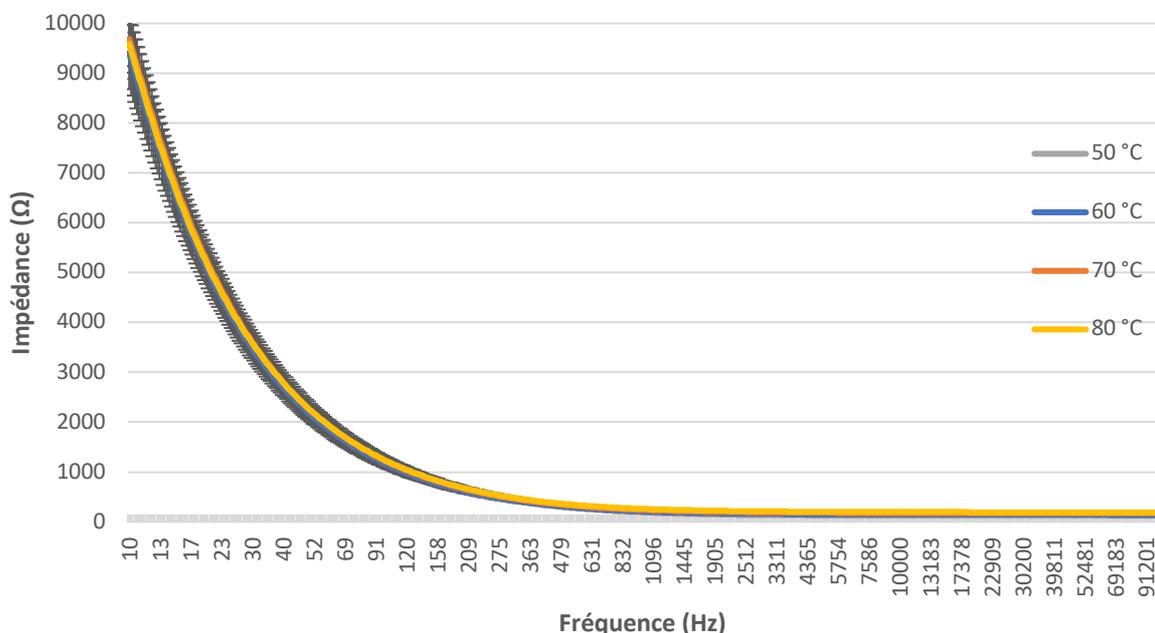


Figure 21. Courbe des impédances mesurées de 1 à 100.000 Hz sur des steaks de *L. dorsi* à quatre températures de cuisson différentes (50, 60, 70 et 80 °C). Chaque point représente la moyenne des mesures, avec leur écart-type. n = 15.

L'observation des résultats (**Figure 21**) montre que le module de l'impédance à de basses fréquences (jusqu'à 1 kHz) est plus élevé qu'aux hautes fréquences (10 kHz et plus). Cette

observation est similaire à celle de Schmidt et al. (2017) et peut être expliquée par le comportement du courant induit dans les tissus qui, à de basses fréquences, ne passe que dans le liquide extracellulaire, contournant ainsi les cellules alors qu'à de plus hautes fréquences, il emprunte un chemin plus direct en passant à travers la membrane de la cellule et son liquide interne (**Figure 7**)^{38,45,46,63}.

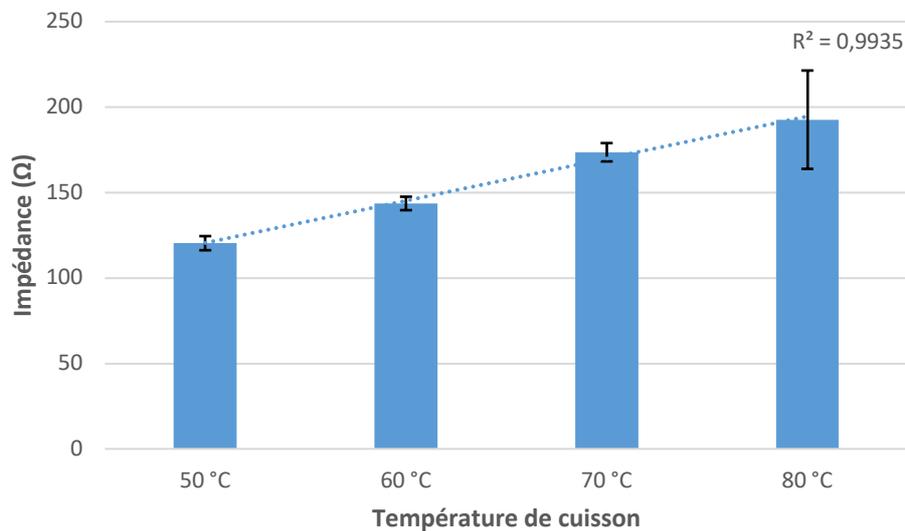


Figure 22. Comparaison de l'impédance mesurée de 10 à 100 kHz sur des steaks de L. dorsi à quatre températures de cuisson différentes (50, 60, 70 et 80 °C). Les barres représentent la moyenne des mesures, avec leur écart-type. $n = 15$. La courbe de tendance linéaire et son coefficient de détermination sont aussi représentés.

Les résultats obtenus pour les quatre températures (**Figure 22**) montrent bien que la SIE, et plus particulièrement notre méthode, est capable de discriminer différentes températures de cuisson pour la viande bovine, ce qui avait déjà été démontré pour la viande de poulet par Schmidt et al. (2017)³⁸. De plus, la courbe de tendance tracée sur le graphe et plus particulièrement la valeur de son R^2 montrent qu'il existe une relation linéaire entre les incréments de 10 °C de température. Une comparaison des moyennes d'impédance par le modèle de Tukey (IC = 95 %) montre que les moyennes d'impédance sont toutes significativement différentes ($p < 0,05$) les unes par rapport aux autres. L'écart-type des résultats augmente avec l'augmentation de la moyenne, ce qui est une situation classiquement observée, où la variance augmente lorsque la moyenne augmente.

Enfin, trois animaux différents ayant été utilisés pour cette analyse (**Tableau 1**), la différence significative entre les températures suggère que la méthode n'est pas influencée par l'individu d'où provient le steak analysé. Les âges sont toutefois très proches et les individus sont tous du même sexe, ce qui diminue le risque de grandes différences en composition chimique^{2,7,8}.

3.3. Expérience 3 : Essais sur *Adductor magnus* de plusieurs races

Le module de l'impédance dépendant de la composition du muscle, un essai sur une autre pièce de viande permet de confirmer la bonne discrimination de températures de la SIE mais aussi d'affiner la précision de celle-ci et de connaître les différences de modules mesurés entre différents muscles. Aussi, dans le cadre de cette expérience, plusieurs pièces d'*A. magnus* provenant de races différentes ont été utilisées : BBB, BBB « Bleue des Prés », Blonde d'Aquitaine et Limousin (**Tableau 1**). Les cuissons ont été réalisées à 50, 60 et 70 °C. En outre, cette expérience permet de renforcer le spectre de fonctionnement de la méthode et de déterminer ses limites. Les tranches découpées dans les *A. magnus* étant plus fines (1,5 cm), c'est la sonde de 5,08 mm d'écartement et 5 mm de profondeur qui a été utilisée, celle-ci ayant le deuxième coefficient de variation le plus bas (**Tableau 7**). Les résultats de l'expérience 3 ne pourront pas être comparés avec ceux de l'expérience 2, l'architecture des sondes n'étant pas la même.

3.3.1. Observations générales

L'analyse de la variance à trois critères de classification (AV3) montre qu'il n'existe pas d'interaction entre la température et la race ($p = 0,365$) et que le facteur race n'influence pas l'impédance ($p = 0,086$). Ce sont les facteurs de la température et du steak (échantillon individuel) cuit à cette dernière qui ont une influence sur le résultat, ce qui semble logique, la littérature montrant que la température a un impact sur le module de l'impédance³⁸. Le modèle de l'analyse explique 78,76 % de la variance.

3.3.2. Observations pour chaque race

Une analyse plus détaillée des résultats au sein de chaque race, avec un test de Tukey (IC = 95 %) permettant une comparaison des moyennes, a pu mettre en évidence que la discrimination par mesure d'impédance de pièces de viande cuites à différentes températures n'est pas possible pour toutes les races (**Tableau 8**). Seules les races Limousin et Blanc-Bleu Belge ont des moyennes d'impédance significativement différentes ($p < 0,05$) à chaque niveau de température. La méthode actuelle ne fonctionne donc que pour ces deux races pour l'*A. magnus*. Enfin, en considérant les résultats de l'expérience 2, l'expérience 3 permet de démontrer que pour la race BBB, la SIE est une méthode capable de discriminer les pièces de viande cuites à des températures différentes, et cela sur deux parties de la carcasse et au moins trois températures.

Tableau 8. Groupements des moyennes d'impédance par race et par température de cuisson, calculés par la méthode de Tukey de comparaison des moyennes (IC = 95 %). Les moyennes au sein d'une même race ne partageant pas une lettre sont significativement différentes.

Race	Température de cuisson	Moyenne (n = 15)	Groupes	
Limousin	50 °C	318	A	
	60 °C	376,87		B
	70 °C	497,8		C
Blonde d'Aquitaine	50 °C	383,6	A	
	60 °C	390,8	A	
	70 °C	516,61		B
BBB « Bleue des Prés »	50 °C	343,6	A	
	60 °C	353,8	A	
	70 °C	455,6		B
Blanc-Bleu Belge	50 °C	315,38	A	
	60 °C	369,1		B
	70 °C	513		C

3.3.3. Observations pour chaque température

En comparant les moyennes de l'impédance mesurée pour chaque race à chaque température, il n'y a qu'à 60°C que les moyennes ne sont pas significativement différentes (**Tableau 9**). Notre méthode ne pourrait donc être appliquée que pour des cuissons à 60 °C et ce, sur toutes les races. Ces résultats impliquent dès lors qu'il faille calibrer l'appareil en fonction de la race de l'animal et probablement, bien que les résultats ne sont pas comparables, en fonction du muscle analysé, la littérature montrant que la composition chimique change en fonction du muscle ^{2,44}.

Tableau 9. Groupements des moyennes d'impédance par température de cuisson et par race, calculés par la méthode de Tukey de comparaison des moyennes (IC = 95 %). Les moyennes au sein d'une même température ne partageant pas une lettre sont significativement différentes.

Température	Race	Moyenne (n = 15)	Groupes	
50 °C	Limousin	318	A	
	Blonde d'Aquitaine	383,6		B
	BBB « Bleue des Prés »	343,6	A	
	Blanc-Bleu Belge	315,38	A	
60 °C	Limousin	376,87	A	
	Blonde d'Aquitaine	390,8	A	
	BBB « Bleue des Prés »	353,8	A	
	Blanc-Bleu Belge	369,1	A	
70 °C	Limousin	497,8	A	B
	Blonde d'Aquitaine	516,61	A	
	BBB « Bleue des Prés »	455,6		B
	Blanc-Bleu Belge	513	A	

3.4. Conclusion préliminaire

Dans un premier temps, l'analyse en détail des résultats obtenus lors de la première expérience a permis de sélectionner les deux sondes ayant la meilleure répétabilité dans la mesure d'impédance dans les conditions d'expérience, ce qui est encourageant pour la suite des expériences et la mise au point de la méthodologie, nous assurant dans certaines conditions des résultats fiables et répétables. Ensuite, l'expérience 2 a démontré la pertinence et le bon fonctionnement de la méthode de mesure de la température maximale atteinte par un morceau de viande via la SIE, qui a été mise en place durant ce travail. Les résultats d'impédance obtenus ont permis de discriminer les quatre appoints de cuisson (50, 60, 70 et 80 °C) et ce, malgré des essais réalisés sur trois individus d'origine différente mais de la même espèce (taurillons BBB). Enfin, la troisième expérience réalisée sur différentes races de bœuf (Limousin, Blonde d'Aquitaine, BBB « Bleue des Prés » et BBB) a permis de confirmer les conclusions précédentes, mais a néanmoins mis en exergue les limitations de la méthode, qui nécessite une adaptation et calibration lorsque l'on étudie un autre muscle ou une autre race.

Le but de ce travail n'étant pas de développer un instrument de mesure fonctionnel et applicable à toute pièce de viande de bœuf, mais de faire la preuve de concept sur l'utilisation d'une méthode novatrice d'évaluation de l'appoint de cuisson d'une pièce de viande de bœuf et d'explorer les possibilités qu'elle offre ainsi que ses limites et les pistes d'amélioration à explorer.

4. Analyse en composantes principales

Après l'analyse des résultats physico-chimiques de chaque viande ainsi qu'une analyse statistique des résultats d'impédance obtenus, une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée à l'aide du logiciel R-Studio, afin de mettre en évidence les variables ayant le plus d'impact sur l'impédance mesurée. Deux ACP ont été réalisées : une première pour l'expérience 2 et une seconde pour l'expérience 3. Les jeux de données contenaient les variables suivantes, pour chaque morceau de viande cuit : la température de cuisson (°C), la mesure d'impédance (Ω), les pertes de cuisson (%), la matière sèche (%), la teneur en matières grasses (%MS) et la teneur en protéines (%MS). La variable de race a aussi été ajoutée pour l'ACP de l'expérience 3.

4.1. ACP – Expérience 2

Les deux premières dimensions expliquent 95,87 % de la variabilité des données, ce qui est très élevé. La première en exprimant 81,30 %, seule celle-ci sera étudiée, car elle représente suffisamment la variabilité des données. La température de cuisson, les pertes de cuisson, la matière sèche et la mesure d'impédance sont fort corrélées, c'est-à-dire que leurs résultats individuels mènent au même classement des morceaux de viande (steak sur la **Figure 23**). La mesure de l'impédance semble peu corrélée avec la teneur en matières grasses et la teneur en protéines (angle proche de 90°) (**Figure 23**). L'observation de la distribution spatiale des mesures individuelles de chaque steak montre que les quatre températures sont bien

séparées entre elles et qu’au sein de chaque *cluster*, ces mesures sont bien rapprochées, comme observé plus haut dans les résultats.

L’étude de l’ACP confirme que c’est la teneur en eau du produit, directement dépendante de sa température de cuisson, qui impacte le plus le résultat d’impédance, ce que les résultats physico-chimiques présentés plus haut laissaient entrevoir. En effet, les valeurs des pertes en eau (**Figure 16**), de la teneur en matière sèche (**Figure 17**) et du module de l’impédance (**Figure 22**) augmentent toutes avec l’augmentation de la température. La viande étant majoritairement composée d’eau (jusqu’à 75 %⁸) et cet élément étant connu pour ses capacités à conduire l’électricité, il n’est pas étonnant d’observer que sa teneur dans le morceau de viande ait une importance significative sur le résultat de la mesure d’impédance. Schmidt et al. (2017) ont aussi mis en évidence les pertes en eau, lors de la cuisson de blancs de poulet, comme étant responsables de l’augmentation du module de l’impédance³⁸.

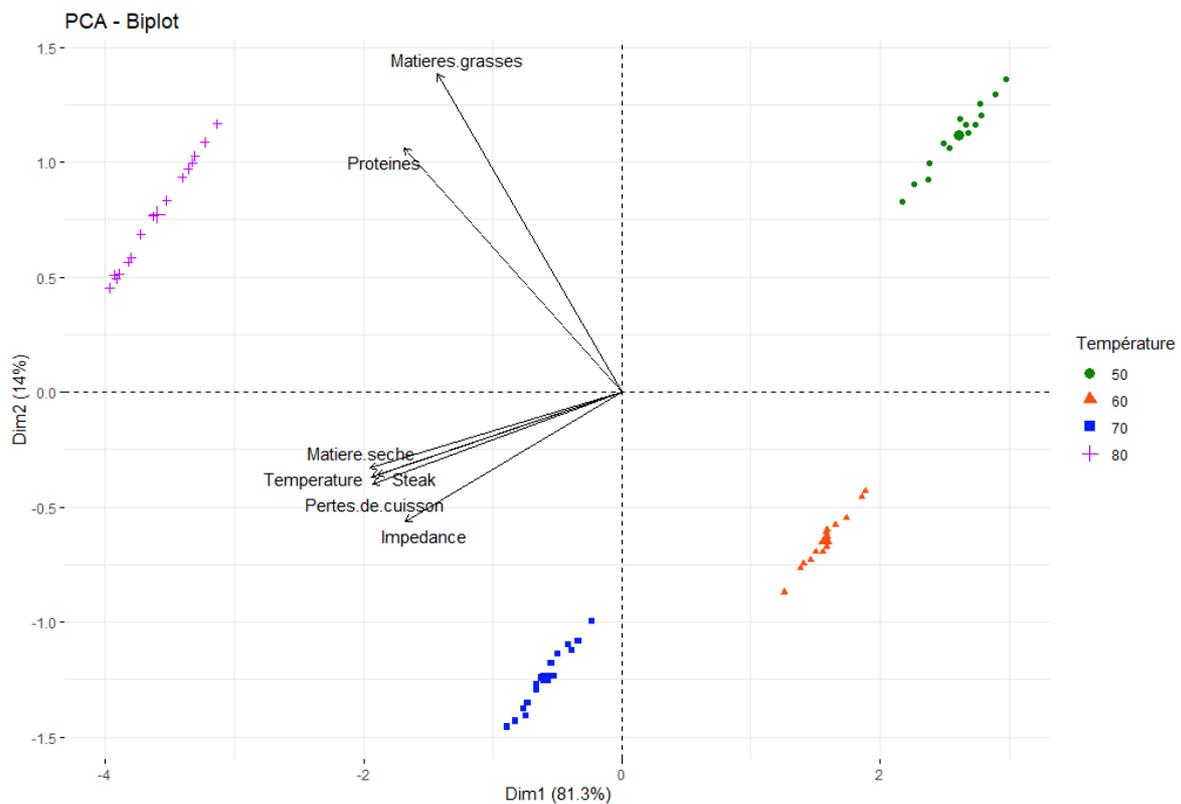


Figure 23. Biplot de l’analyse en composantes principales de l’expérience 2. Les vecteurs représentent les variables de l’analyse : Steak (pièce de viande sur laquelle les mesures ont été prises), Température (°C), Impédance (Ω), Matière sèche (%), Pertes de cuisson (%), Protéines (% MS) et Matières grasses (% MS). Les points représentent les résultats des mesures individuelles pour chaque pièce de viande, ceux-ci sont classés par température de cuisson (°C) (cf. légende à droite du graphe).

4.2. ACP – Expérience 3

Les deux premières dimensions expliquent 91,79 % de la variabilité des données, ce qui est très élevé. La première en exprimant 74,20 %, seule celle-ci sera étudiée. La teneur en matière sèche, la température de cuisson et les pertes de cuisson sont fortement corrélées entre-elles, c'est-à-dire que leurs résultats individuels mènent au même classement des morceaux de viande. Mais l'angle entre l'impédance et ces trois variables est un peu plus élevé que dans le cadre de l'expérience 2, mais elles ont tout de même une influence importante sur la mesure de l'impédance. Enfin, la teneur en protéines ne montre pas de corrélation avec l'impédance (angle presque droit) (**Figure 24**). L'observation de la distribution spatiale des mesures individuelles de chaque steak montre que les trois températures sont bien discriminées entre elles, et qu'au sein de chaque ellipse, les mesures individuelles de chaque race sont groupées. Globalement, les mesures individuelles sont beaucoup plus éparpillées, car, comme présenté plus haut, il existe une variabilité de composition et de résultats d'impédance entre les races étudiées.

Pour cette expérience 3, on observe une plus grande importance de la teneur en matières grasses sur la mesure de l'impédance (**Figure 24**). Différentes teneurs en matières grasses ont en effet été observées pour chaque race (**Tableau 4**), ce qui doit avoir une influence sur la mesure de l'impédance, bien que ce soient toutes des races maigres.

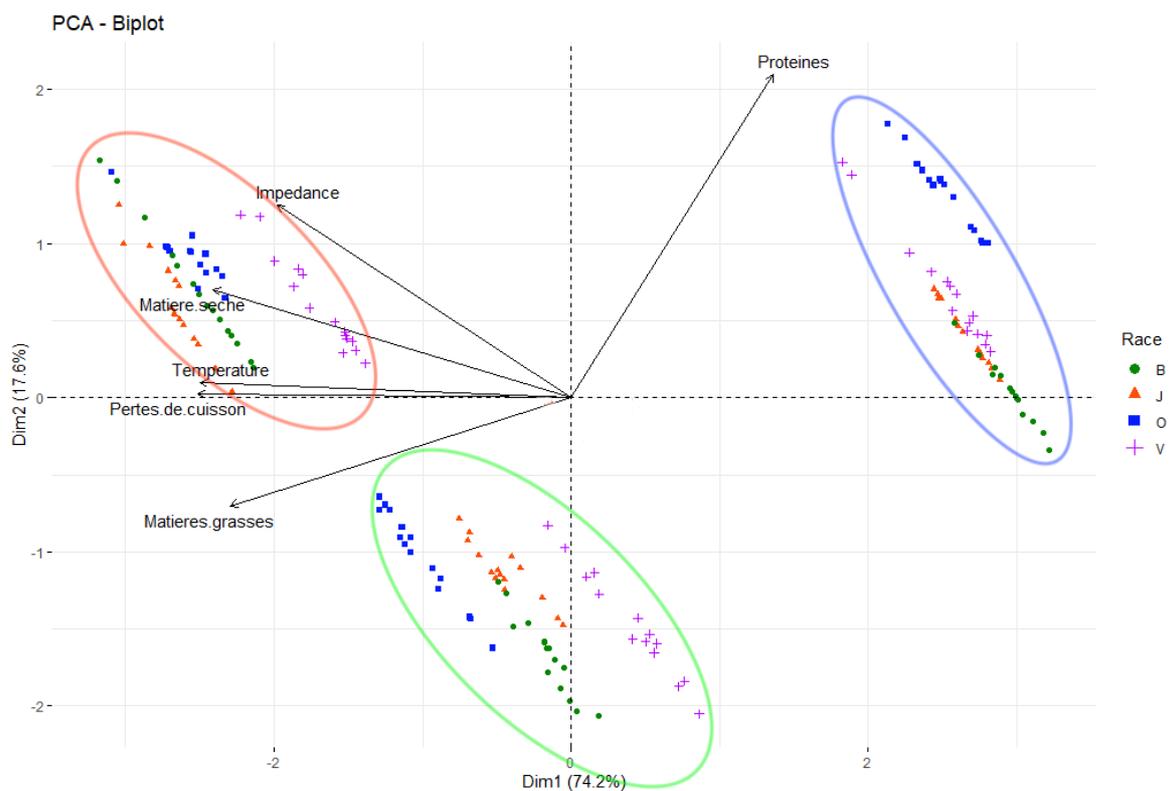


Figure 24. Biplot de l'analyse en composantes principales de l'expérience 3. Les vecteurs représentent les variables de l'analyse : Température (°C), Impédance (Ω), Matière sèche (%), Pertes de cuisson (%), Protéines (% MS) et Matières grasses (% MS). Les points représentent les résultats des mesures individuelles pour chaque pièce de viande, ceux-ci sont classés par température de cuisson (ellipse bleue = 50 °C, ellipse verte = 60 °C et ellipse rouge = 70 °C) et par race (B = Blanc-Bleu Belge, J = Limousin, O = Blonde d'Aquitaine et V = BBB Bleue des Prés, cf. légende à droite du graphe).

Conclusions et perspectives

Ce travail de fin d'études visait à développer un appareil de mesure d'impédance ainsi qu'une méthode d'utilisation de celui-ci ayant pour but de démontrer une preuve de concept de l'utilisation de la mesure d'impédance électrique dans l'évaluation du traitement thermique d'une pièce de viande, après son refroidissement.

Les différents résultats obtenus suggèrent que la méthode mise en place durant ce mémoire permet bien d'évaluer l'appoint de cuisson et ce, pour deux muscles différents et plusieurs races bovines. Le degré de précision de la méthode se réfère à un sexe, une race et un muscle précis, et nécessite par conséquent un étalonnage rigoureux.

La réflexion menée autour de la création de l'appareil de mesure d'impédance, de son support et de ses sondes a permis de mettre au point un système facile d'utilisation, peu onéreux et qui fournit des résultats satisfaisants dans le cadre de recherches en laboratoire. Celui-ci se connecte directement avec un câble USB 2.0 à l'ordinateur disposant du programme de contrôle. Des améliorations ergonomiques peuvent facilement être envisagées dans le cadre d'une utilisation dans le monde industriel (désinfection plus aisée, internalisation des données au sein de l'appareil, alimentation par batteries,...). Une grande variabilité de réponses entre les différentes architectures des sondes créées a été découverte, rendant pertinentes les architectures construites ainsi que le temps passé à les essayer.

L'étude des caractéristiques physico-chimiques des pièces de *L. dorsi* utilisées a démontré que pour un muscle provenant de bovins de la même race et du même sexe, la variabilité entre les trois individus échantillonnés est négligeable. Pourtant, l'achat de ces viandes ayant eu lieu à plusieurs jours d'intervalle, une certaine variabilité aurait pu être induite. Le manque d'impact sur les mesures d'impédance confirme la robustesse de la méthode. L'écart entre les températures de cuisson testées était assez grand (50, 60, 70 et 80 °C) mais les résultats d'impédance obtenus sur le *L. dorsi* laissent envisager qu'une précision plus élevée est possible. D'autre part, une relation linéaire est observée entre la mesure d'impédance et la température de cuisson, ce qui, avec un plus grand nombre de répétitions devrait permettre de créer une équation fiable permettant de relier impédance et appoint de cuisson, pour le muscle susmentionné, provenant de taurillons de race Blanc-Bleu Belge.

En revanche, des écarts ont été observés entre les caractéristiques physico-chimiques des différentes races étudiées, particulièrement au niveau des pertes d'eau. Ces différences de contenu en eau au sein du muscle cuit ont un impact sur la mesure d'impédance, mis en évidence par l'analyse en composantes principales. Il s'avère donc nécessaire d'étalonner la méthode pour chaque race, les résultats entre deux races pour un même muscle ne pouvant pas mener à une même conclusion sur l'appoint de cuisson.

Par ailleurs, bien que les résultats d'impédance entre le *L. dorsi* et l'*A. magnus* ne peuvent pas être comparés, à cause de l'utilisation d'une sonde différente, la différence entre leurs pertes en eau suggère qu'un étalonnage pour chaque muscle devrait être effectué. Par rapport à la différence de sexe, les résultats montrent que pour l'*A. magnus* et la race Blanc-Bleu Belge, la mesure d'impédance donne des résultats sans différence significative entre la femelle et le mâle pour des cuissons à 50 et 60 °C. Mais à 70 °C, la méthode affiche des résultats différents pour chacun des deux sexes. Enfin, l'appoint de cuisson n'a pas pu être différencié à 50 et 60 °C, par mesure d'impédance pour les individus BBB Bleue des Prés et Blonde d'Aquitaine. Une nouvelle expérience devrait être effectuée avec les mêmes conditions que celles appliquées durant ce mémoire, afin de pouvoir déterminer l'origine de cet insuccès et les améliorations potentielles à apporter à la méthode.

L'analyse en composantes principales quant à elle, indique une influence plus importante de la teneur en matières grasses sur la mesure d'impédance, lorsque des races un peu plus grasses (Limousin et Blonde d'Aquitaine) sont utilisées. Sachant que la présence de gras influence les propriétés électriques de la viande ⁴⁴, des essais devraient être effectués avec des races encore plus grasses (Angus, Wagyu) afin de comprendre l'influence de ce paramètre sur la mesure d'impédance. Celles-ci n'étaient pas disponibles lors des recherches effectuées.

Les expériences effectuées démontrent que le choix de l'origine de la pièce de viande a une influence sur tous les paramètres étudiés durant ce travail de fin d'études et ceux-ci ont tous une incidence sur le résultat essentiel : la mesure d'impédance. Il semble donc primordial de mener une étude plus approfondie de ces différents paramètres (race, âge, muscle, sexe) afin que la production de nouveaux résultats, puisse, en s'ajoutant à ceux de ce mémoire, permettre de mieux comprendre les interactions entre les paramètres susmentionnés et les résultats de mesure d'impédance. À cela, devront s'ajouter des essais comportant des écarts de températures plus faibles, afin de déterminer la précision réelle de la méthode et, éventuellement, de chercher à augmenter cette précision par la modification de l'architecture des sondes ou de la plage de fréquences appliquée durant l'analyse par l'appareil de mesure.

Cette nécessité d'étalonnage de la méthode selon les paramètres cités en amont était attendue, l'analyse de la littérature scientifique ayant mis en évidence les facteurs d'âge, de sexe, de race et d'emplacement du muscle sur la carcasse comme impactant le résultat de la mesure d'impédance. Malgré la nécessité de ce calibrage plus fin, les résultats obtenus durant ce mémoire démontrent clairement que la méthode mise au point pour la détermination de l'appoint de cuisson d'une viande refroidie par spectroscopie d'impédance électrique est fiable et robuste. Son développement peut permettre sa mise en œuvre en industrie et dans les cuisines de collectivités, afin d'améliorer le contrôle de la qualité des viandes cuites, augmentant ainsi la sécurité des aliments servis aux consommateurs.

Contribution personnelle de l'étudiant

À partir du mois de février 2022, l'étudiant a effectué une recherche approfondie de la littérature scientifique sur le sujet afin de pouvoir fixer ses objectifs de recherche et de mettre en place son plan expérimental.

Avec l'aide du Dr Yunus, l'étudiant a mis en place un appareil permettant de mesurer l'impédance électrique d'échantillons de viande ainsi que les sondes qui y sont attachées. La prise en main des logiciels de contrôle et de traitement des résultats, plusieurs essais d'architecture de sondes et de réglages ont été effectués.

L'étudiant a ensuite procédé à la cuisson de plusieurs pièces de viande, provenant de différents muscles, races et bêtes. L'impédance de ces pièces a été mesurée et des analyses physico-chimiques ont été effectuées, de manière rigoureuse et méthodique.

Tout au long du travail en laboratoire, les résultats des différentes expériences ont été analysés, interprétés et le protocole expérimental a été, lorsque nécessaire, modifié en concertation avec le promoteur académique.

Bibliographie

- (1) COMMISSION REGULATION (EC) No 835/2004 of 28 April 2004 Adapting Regulation (EC) No 2076/2002 and Decisions 2002/928/EC, 2004/129/EC, 2004/247/EC and 2004/248 as Regards the Continued Use of Certain Active Substances Not Included in Annex I to Directive 91/414/EEC, by Reason of the Accession of the Czech Republic, Estonia, Cyprus, Latvia, Lithuania, Hungary, Malta, Poland, Slovenia and Slovakia. 2004.
- (2) Listrat, A.; Lebret, B.; Louveau, I.; Astruc, T.; Bonnet, M.; Lefaucheur, L.; Picard, B.; Bugeon, J. How Muscle Structure and Composition Influence Meat and Flesh Quality. *Scientific World Journal* **2016**, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3182746>.
- (3) Pereira, P. M. de C. C.; Vicente, A. F. dos R. B. Meat Nutritional Composition and Nutritive Role in the Human Diet. *Meat Science* **2013**, 93 (3), 586–592. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2012.09.018>.
- (4) Pathare, P. B.; Roskilly, A. P. Quality and Energy Evaluation in Meat Cooking. *Food Engineering Reviews*. 2016. <https://doi.org/10.1007/s12393-016-9143-5>.
- (5) Smith, G.; Tatum, J.; Belk, K.; Scanga, J. Post-Harvest Practices for Enhancing Beef Tenderness.
- (6) Palka, K.; Daun, H. *Changes in Texture, Cooking Losses, and Myo[®]brillar Structure of Bovine M. Semitendinosus during Heating*; 1999.
- (7) McClellan Hadfield, J. The Thermal and Physical Properties of Beef from Three USDA-Quality Grades Cooked to Multiple Degrees of Doneness. *Utah State University* **2019**. <https://doi.org/https://doi.org/10.26076/rfrr-1c61>.
- (8) Fiems, L. O.; de Campeneere, S.; van Caelenbergh, W.; de Boever, J. L.; Vanacker, J. M. Carcass and Meat Quality in Double-Muscled Belgian Blue Bulls and Cows. *Meat Science* **2003**, 63 (3), 345–352. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00092-X).
- (9) Schreurs, N. M.; Garcia, F.; Jurie, C.; Agabriel, J.; Micol, D.; Bauchart, D.; Listrat, A.; Picard, B. Meta-Analysis of the Effect of Animal Maturity on Muscle Characteristics in Different Muscles, Breeds, and Sexes of Cattle. *J Anim Sci* **2008**, 86 (11), 2872–2887. <https://doi.org/10.2527/JAS.2008-0882>.
- (10) Boland, M.; Kaur, L.; Chian, M.; Astruc, T. Muscle Proteins. **2018**. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814026-0.21602-8>.
- (11) Bhat, Z. F.; Morton, J. D.; Bekhit, A. E. D. A.; Kumar, S.; Bhat, H. F. Thermal Processing Implications on the Digestibility of Meat, Fish and Seafood Proteins. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* **2021**, 20 (5), 4511–4548. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12802>.
- (12) Ismail, I.; Hwang, Y. H.; Joo, S. T. Interventions of Two-Stage Thermal Sous-Vide Cooking on the Toughness of Beef Semitendinosus. *Meat Science* **2019**, 157, 107882. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2019.107882>.
- (13) Naqvi, Z. B.; Campbell, M. A.; Latif, S.; Thomson, P. C.; Astruc, T.; Friend, M. A.; Vaskoska, R.; Warner, R. D. The Effect of Extended Refrigerated Storage on the Physicochemical, Structural, and Microbial Quality of Sous Vide Cooked Biceps Femoris Treated with Ginger Powder (Zingibain). *Meat Science* **2022**, 186. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108729>.
- (14) Botinestean, C.; Keenan, D. F.; Kerry, J. P.; Hamill, R. M. The Effect of Thermal Treatments Including Sous-Vide, Blast Freezing and Their Combinations on Beef Tenderness of M. Semitendinosus Steaks Targeted at Elderly Consumers. *LWT - Food*

- Science and Technology* **2016**, *74*, 154–159.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.026>.
- (15) Vaskoska, R.; Ha, M.; Naqvi, Z. B.; White, J. D.; Warner, R. D. Muscle, Ageing and Temperature Influence the Changes in Texture, Cooking Loss and Shrinkage of Cooked Beef. *Foods* **2020**, *9* (9). <https://doi.org/10.3390/foods9091289>.
- (16) West, E. A. L.; Xu, A. X.; Bohrer, B. M.; Corradini, M. G.; Joye, I. J.; Wright, A. J.; Rogers, M. A. Sous Vide Cook Temperature Alters the Physical Structure and Lipid Bioaccessibility of Beef Longissimus Muscle in TIM-1. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **2021**, *69* (30), 8394–8402. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c03422>.
- (17) García-Segovia, P.; Andrés-Bello, A.; Martínez-Monzó, J. Effect of Cooking Method on Mechanical Properties, Color and Structure of Beef Muscle (M. Pectoralis). *Journal of Food Engineering* **2007**, *80* (3), 813–821.
<https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2006.07.010>.
- (18) Tornberg, E. Effects of Heat on Meat Proteins - Implications on Structure and Quality of Meat Products. In *Meat Science*; 2005; Vol. 70.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.11.021>.
- (19) Ishiwatari, N.; Fukuoka, M.; Sakai, N. Effect of Protein Denaturation Degree on Texture and Water State of Cooked Meat. *Journal of Food Engineering* **2013**, *117* (3).
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.03.013>.
- (20) (PDF) *On the texture profile analysis test*.
https://www.researchgate.net/publication/316093466_On_the_texture_profile_analysis_test (accessed 2022-06-30).
- (21) López Osornio, M. M.; Hough, G.; Salvador, A.; Chambers IV, E.; McGraw, S.; Fiszman, S. Beef's Optimum Internal Cooking Temperature as Seen by Consumers from Different Countries Using Survival Analysis Statistics. *Food Quality and Preference* **2008**, *19* (1), 12–20. <https://doi.org/10.1016/J.FOODQUAL.2007.06.004>.
- (22) Bejerholm, C.; Tørngren, M. A.; Aaslyng, M. D. COOKING OF MEAT | Cooking of Meat. *Encyclopedia of Meat Sciences* **2014**, 370–376. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384731-7.00187-2>.
- (23) Suman, S. P.; Nair, M. N.; Joseph, P.; Hunt, M. C. Factors Influencing Internal Color of Cooked Meats. *Meat Science* **2016**, *120*, 133–144.
<https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2016.04.006>.
- (24) Lorenzo, J. M.; Cittadini, A.; Munekata, P. E.; Domínguez, R. Physicochemical Properties of Foal Meat as Affected by Cooking Methods. *Meat Science* **2015**, *108*, 50–54. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.05.021>.
- (25) Mancini, R. A.; Hunt, M. C. Current Research in Meat Color. *Meat Science* **2005**, *71* (1), 100–121. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2005.03.003>.
- (26) Baldwin, D. E. Sous Vide Cooking: A Review. *International Journal of Gastronomy and Food Science* **2012**, *1* (1), 15–30. <https://doi.org/10.1016/J.IJGFS.2011.11.002>.
- (27) Kilibarda, N.; Brdar, I.; Baltic, B.; Markovic, V.; Mahmutovic, H.; Karabasil, N.; Stanistic, S. The Safety and Quality of Sous Vide Food. *Meat Technology* **2018**, *59* (1).
<https://doi.org/10.18485/meattech.2018.59.1.5>.
- (28) Naqvi, Z. B.; Thomson, P. C.; Ha, M.; Campbell, M. A.; McGill, D. M.; Friend, M. A.; Warner, R. D. Effect of Sous Vide Cooking and Ageing on Tenderness and Water-Holding Capacity of Low-Value Beef Muscles from Young and Older Animals. *Meat Science* **2021**, *175*. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108435>.

- (29) Daube, G. *MICRO-ORGANISMES PATHOGÈNES ET VIANDE - LA TRAÇABILITÉ ALLIÉE DE LA SÉCURITÉ*; 2002.
- (30) Suleman, R.; Wang, Z.; Aadil, R. M.; Hui, T.; Hopkins, D. L.; Zhang, D. Effect of Cooking on the Nutritive Quality, Sensory Properties and Safety of Lamb Meat: Current Challenges and Future Prospects. *Meat Science* **2020**, *167*, 108172. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2020.108172>.
- (31) Zhang, Y.; Wang, X.; Wang, W.; Zhang, J. African Journal of Food Science Effect of Boiling and Frying on Nutritional Value and in Vitro Digestibility of Rabbit Meat. **2014**, *8* (2), 92–103. <https://doi.org/10.5897/AJFS2013.1114>.
- (32) Uttaro, B.; Zawadski, S.; McLeod, B. Efficacy of Multi-Stage Sous-Vide Cooking on Tenderness of Low Value Beef Muscles. *Meat Science* **2019**, *149*. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.11.008>.
- (33) Creed, P. G. Sensory and Nutritional Aspects of Sous Vide Processed Foods. In *Sous Vide and Cook Chill Processing for the Food Industry*; 1998.
- (34) Carlin, F. Microbiology of Sous-Vide Products. *Encyclopedia of Food Microbiology: Second Edition* **2014**, 621–626. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00205-6>.
- (35) Isleroglu, H.; Kemerli, T.; Kaymak-Ertekin, F. Effect of Steam-Assisted Hybrid Cooking on Textural Quality Characteristics, Cooking Loss, and Free Moisture Content of Beef. *International Journal of Food Properties* **2015**, *18* (2), 403–414. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.833219>.
- (36) Dolores Romero de Ávila, M.; Isabel Cambero, M.; Ordóñez, J. A.; de la Hoz, L.; Herrero, A. M. Rheological Behaviour of Commercial Cooked Meat Products Evaluated by Tensile Test and Texture Profile Analysis (TPA). *Meat Science* **2014**, *98* (2), 310–315. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.05.003>.
- (37) Botinestean, C.; Hossain, M.; Mullen, A. M.; Kerry, J. P.; Hamill, R. M. The Influence of the Interaction of Sous-Vide Cooking Time and Papain Concentration on Tenderness and Technological Characteristics of Meat Products. *Meat Science* **2021**, *177*. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108491>.
- (38) Schmidt, F. C.; Fuentes, A.; Masot, R.; Alcañiz, M.; Laurindo, J. B.; Barat, J. M. Assessing Heat Treatment of Chicken Breast Cuts by Impedance Spectroscopy. *Food Science and Technology International* **2017**, *23* (2), 110–118. <https://doi.org/10.1177/1082013216659609>.
- (39) Stormo, S. K.; Sivertsen, A. H.; Heia, K.; Skipnes, D. Endpoint Temperature of Heat-Treated Surimi Can Be Measured by Visible Spectroscopy. *Food Control* **2012**, *26* (1), 92–97. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2011.07.035>.
- (40) Siripon, K.; Tansakul, A.; Mittal, G. S. Heat Transfer Modeling of Chicken Cooking in Hot Water. *Food Research International* **2007**, *40* (7), 923–930. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2007.03.005>.
- (41) Ang, C. Y. W.; Liu, F.; Huang, Y. W. CATALATIC ACTIVITY AS AN INDICATOR OF END-POINT TEMPERATURES IN BREADED, HEAT PROCESSED CHICKEN PATTIES. *Journal of Muscle Foods* **1996**, *7* (3), 345–354. <https://doi.org/10.1111/J.1745-4573.1996.TB00610.X>.
- (42) Ain, K.; Chandra, F.; Zaka, Q.; Fahrani, B.; Amelia, A.; Enggar, A. F.; Rulaningtyas, R.; Muqmiroh, L.; Ariwanto, B. Design of Bioimpedance Spectroscopy to Characterize Meat Based on Gain and Phase Detector (AD8302); Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2021; pp 55–59. <https://doi.org/10.1109/ica52848.2021.9625691>.

- (43) Chen, T. H.; Zhu, Y. P.; Wang, P.; Han, M. Y.; Wei, R.; Xu, X. L.; Zhou, G. H. The Use of the Impedance Measurements to Distinguish between Fresh and Frozen-Thawed Chicken Breast Muscle. *Meat Science* **2016**, *116*, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.02.003>.
- (44) Damez, J. L.; Clerjon, S.; Abouelkaram, S.; Lepetit, J. Beef Meat Electrical Impedance Spectroscopy and Anisotropy Sensing for Non-Invasive Early Assessment of Meat Ageing. *Journal of Food Engineering* **2008**, *85* (1), 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.07.026>.
- (45) Dell’Osa, A. H.; Battacone, G.; Pulina, G.; Fois, A.; Tocco, F.; Loviselli, A.; Concu, A.; Velluzzi, F. Electrical Impedance to Easily Discover Undeclared Freeze-Thaw Cycles in Slaughtered Bovine Meat. *Journal of Electrical Bioimpedance* **2021**, *12* (1), 3–10. <https://doi.org/10.2478/JOEB-2021-0002>.
- (46) Huh, S.; Kim, H. J.; Lee, S.; Cho, J.; Jang, A.; Bae, J. Utilization of Electrical Impedance Spectroscopy and Image Classification for Non-Invasive Early Assessment of Meat Freshness. *Sensors (Switzerland)* **2021**, *21* (3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/s21031001>.
- (47) Ihara, S.; Islam, M. Z.; Kitamura, Y.; Kokawa, M.; Lee, Y. C.; Chen, S. Nondestructive Evaluation of Wet Aged Beef by Novel Electrical Indexes: A Preliminary Study. *Foods* **2019**, *8* (8). <https://doi.org/10.3390/foods8080313>.
- (48) Leng, Y.; Sun, Y.; Wang, X.; Hou, J.; Zhao, X.; Zhang, Y. Electrical Impedance Estimation for Pork Tissues during Chilled Storage. *Meat Science* **2020**, *161*. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108014>.
- (49) Leng, Y.; Sun, Y.; Wang, X.; Hou, J.; Bai, X.; Wang, M. A Method to Detect Water-Injected Pork Based on Bioelectrical Impedance Technique. *Journal of Food Measurement and Characterization* **2019**, *13* (2), 1341–1348. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00049-z>.
- (50) Lepetit, J.; Sale', P.; Favier, S. R.; Dalle, R. *Electrical Impedance and Tenderisation in Bovine Meat*; 2002.
- (51) Zhao, X.; Zhuang, H.; Yoon, S. C.; Dong, Y.; Wang, W.; Zhao, W. Electrical Impedance Spectroscopy for Quality Assessment of Meat and Fish: A Review on Basic Principles Measurement Methods, and Recent Advances. *Journal of Food Quality*. Hindawi Limited July 16, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/6370739>.
- (52) Al-Ali, A. A.; Maundy, B. J.; Elwakil, A. S. Bio-Impedance Measurement and Applications. *Design and Implementation of Portable Impedance Analyzers* **2019**, 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11784-9_1.
- (53) Nernst, W. Dielektrizitätskonstante Und Chemisches Gleichgewicht. *Zeitschrift für Physikalische Chemie* **1894**, *13U* (1), 531–536. <https://doi.org/10.1515/ZPCH-1894-1329>.
- (54) Fricke, H. A Mathematical Treatment of the Electric Conductivity and Capacity of Disperse Systems li. The Capacity of a Suspension of Conducting Spheroids Surrounded by a Non-Conducting Membrane for a Current of Low Frequency. *Physical Review* **1925**, *26* (5), 678. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.26.678>.
- (55) Callow, E. H. The Electrical Resistance of Muscular Tissue and Its Relation to Curing. *Annual report of food investigations board, London* **1936**, 57.
- (56) Grossi, M.; Riccò, B. Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) for Biological Analysis and Food Characterization: A Review. *Journal of Sensors and Sensor Systems* **2017**, *6* (2), 303–325. <https://doi.org/10.5194/JSSS-6-303-2017>.

- (57) Whitman, T. A.; Forrest, J. C.; Morgan, M. T.; Okos, M. R. Electrical Measurement for Detecting Early Postmortem Changes in Porcine Muscle. *J Anim Sci* **1996**, *74* (1), 80–90. <https://doi.org/10.2527/1996.74180X>.
- (58) Forrest, J. C.; Morgan, M. T.; Borggaard, C.; Rasmussen, A. J.; Jespersen, B. L.; Andersen, J. R. Development of Technology for the Early Post Mortem Prediction of Water Holding Capacity and Drip Loss in Fresh Pork. *Meat Sci* **2000**, *55* (1), 115–122. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00133-3](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00133-3).
- (59) Fricke, H. A Mathematical Treatment of the Electric Conductivity and Capacity of Disperse Systems I. The Electric Conductivity of a Suspension of Homogeneous Spheroids. *Physical Review* **1924**, *24* (5), 575. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.24.575>.
- (60) Guerhazi, M.; Kanoun, O.; Derbel, N. Investigation of Long Time Beef and Veal Meat Behavior by Bioimpedance Spectroscopy for Meat Monitoring. *IEEE Sensors Journal* **2014**, *14* (10), 3624–3630. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2328858>.
- (61) *Définitions : impédance - Dictionnaire de français Larousse*. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/imp%C3%A9dance/41833> (accessed 2022-06-30).
- (62) Banach, J. K.; Ywica, R. The Effect of Electrical Stimulation and Freezing on Electrical Conductivity of Beef Trimmed at Various Times after Slaughter. *Journal of Food Engineering* **2010**, *100* (1), 119–124. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2010.03.035>.
- (63) Sun, J.; Zhang, R.; Zhang, Y.; Li, G.; Liang, Q. Estimating Freshness of Carp Based on EIS Morphological Characteristic. *Journal of Food Engineering* **2017**, *193*, 58–67. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2016.08.007>.
- (64) Leroy, P. SYSTÈME RÉGIONAL DE QUALITÉ DIFFÉRENCIÉE Bleue Des Prés. Proaniwal SPRL 2017.
- (65) Guerrien; Marc. L'intérêt de l'analyse En Composantes Principales (ACP) Pour La Recherche En Sciences Sociales. <http://journals.openedition.org/cal> **2003**, No. 43, 181–192. <https://doi.org/10.4000/CAL.7364>.
- (66) Witblauw, B.; Fleisch Von Blau, V. /; Belgier, W. *Association IGP BBB a INDICATION GEOGRAPHIQUE PROTEGEE (IGP)*; 2017.
- (67) Cuvelier, C.; Cabaraux, J. F.; Dufasne, I.; Clinquart, A.; Hocquette, J. F.; Istasse, L.; Hornick, J. L. Performance, Slaughter Characteristics and Meat Quality of Young Bulls from Belgian Blue, Limousin and Aberdeen Angus Breeds Fattened with a Sugar-Beet Pulp or a Cereal-Based Diet. *Animal Science* **2006**, *82* (1), 125–132. <https://doi.org/10.1079/ASC20057>.
- (68) Cuvelier, C.; Clinquart, A.; Hocquette, J. F.; Cabaraux, J. F.; Dufasne, I.; Istasse, L.; Hornick, J. L. Comparison of Composition and Quality Traits of Meat from Young Finishing Bulls from Belgian Blue, Limousin and Aberdeen Angus Breeds. *Meat Science* **2006**, *74* (3), 522–531. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2006.04.032>.
- (69) Nikmaram, P.; Yarmand, M. S.; Emamjomeh, Z. Effect of Cooking Methods on Chemical Composition, Quality and Cook Loss of Camel Muscle (*Longissimus Dorsi*) in Comparison with Veal. *African Journal of Biotechnology* **2013**, *10* (51), 10478–10483. <https://doi.org/10.4314/ajb.v10i51>.
- (70) Raes, K.; Balcaen, A.; Dirinck, P.; de Winne, A.; Claeys, E.; Demeyer, D.; de Smet, S. Meat Quality, Fatty Acid Composition and Flavour Analysis in Belgian Retail Beef.

Bibliographie

- Meat Science* **2003**, 65 (4), 1237–1246. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(03\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(03)00031-7).
- (71) Monsón, F.; Sañudo, C.; Sierra, I. Influence of Cattle Breed and Ageing Time on Textural Meat Quality. *Meat Science* **2004**, 68 (4), 595–602. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2004.05.011>.