



Le test d'indentation instrumentée, une méthode adaptée pour mesurer la tendreté de la viande ?

Impact du niveau de tendreté de la viande bovine sur les paramètres mécaniques issus d'un essai d'indentation – Étude préliminaire.

Mots-clés : Viande bovine, tendreté, indentation, relaxation, recouvrance.

Auteurs : Sarah Iaquinta¹, Axel Conti¹, Mathis Coué¹, Etienne Roquefeuil¹, Jonathan Barés², Romain Léger¹, Stéphane Corn¹, Arnaud Regazzi¹, Xavier Aleyrangues², Alain Peyron², Anne-Sophie Caro¹

¹ LMGC, IMT Mines Ales, Univ Montpellier, CNRS, 6, Avenue de Clavières, 30100 Alès, France

² LMGC, Univ Montpellier, CNRS, 860, Rue de Saint Priest, 34090 Montpellier, France

³ ADIV, 10, rue Jacqueline Auriol, ZAC du Parc Industriel des Gravanches, 63039 Clermont-Ferrand cedex 2

Email : Anne-Sophie.Caro@mines-ales.fr

Une mesure non destructive et rapide de la tendreté de la viande permettrait d'en évaluer sa qualité en ligne dans les abattoirs. Un nouvel outil basé sur une méthode d'indentation a été testé sur des morceaux de faux filet et de rond de gîte. Les résultats mettent en évidence le potentiel de l'outil et devront être affinés.

Cet article a été rédigé dans le cadre d'un projet de recherche et développement Master 1 (département d'enseignement ECOMAP, IMT Mines Alès) réalisé par les 3 premiers co-auteurs.

Résumé :

La filière « viande » réfléchit à assurer la garantie de délivrer à ses clients des produits réguliers en qualité. Toutefois, les méthodes utilisées pour qualifier la tendreté de la viande sont pour la majorité destructives puisqu'elles nécessitent le prélèvement d'échantillons de la viande à qualifier. De ce fait, la tendreté n'est pas ou peu évaluée dans la filière. L'objectif de cette étude est de proposer un test non destructif, idéalement réalisable sur carcasse et/ou en ligne permettant de se substituer aux tests invasifs classiquement utilisés au laboratoire (test de cisaillement de Warner-Bratzler, test de dureté, test de pénétration, test de cuisson). L'essai envisagé est un test d'indentation/relaxation/recouvrance qui conduit à l'estimation d'indicateurs de tendreté. Le protocole d'indentation consiste en la pénétration d'une pointe hémisphérique, en son maintien en position et en son rapide retrait, phase liée au retour à l'équilibre, pendant laquelle le mouvement de la surface de la viande est particulièrement suivi. Un travail préliminaire sur deux pièces de viande dont les niveaux de tendreté sont très différents a permis de mettre en relation certains de ces indicateurs avec les données issues d'un test par compression (tendéromètre), dispositif mis à disposition pour cette étude par l'Association pour le Développement de l'Institut de la Viande de Clermont-Ferrand (ADIV). En particulier, après indentation, le rond de gîte retourne plus rapidement à son état d'équilibre que le faux filet. La tendance observée sur cette phase dite de « recouvrance » semble corrélée avec des données plus classiques obtenues lors d'essais de pénétrométrie sur des échantillons similaires. Des études statistiques doivent maintenant être réalisées pour valider l'utilisation de cet outil pour la qualification industrielle des pièces de viande.

Abstract : Impact of beef tenderness on the mechanical parameters of an indentation test – a preliminary study.

The « beef » sector is exploring how to guarantee delivering products to its clients with regular quality. However, the methods used to qualify beef tenderness are mainly invasive since they require sampling meat samples to be qualified. Therefore, tenderness is little or not at all evaluated by the sector. The objective of this study was to propose a non-invasive test, which ideally can be performed on a carcass and/or on-line, replacing the invasive tests used previously in laboratories (Warner-Bratzler shearing test, hardness test, penetration test, baking test). The new test is an indentation/relaxation/recovery test that leads to an estimation of tenderness indicators. The indentation method consists in the penetration of the meat with a hemispherical point, maintaining it in position then its rapid withdrawal, a phase associated with the return to equilibrium during which the movement at the meat surface is closely observed. A preliminary study on two pieces of meat with very

different tenderness levels associates some of these indicators with data from compression tests (tensiometer), a device made available for this study by the Association for Development of the Meat Institute in Clermont-Ferrand (ADIV). In particular, after indentation, the gîte round returns more quickly to its equilibrium state than the sirloin steak. The tendency that was observed on this “recovery” stage seems to be correlated with data obtained during penetrometry trials on similar samples. Statistical studies now need to be performed to validate the use of this tool for the industrial qualification of pieces of meat.

INTRODUCTION

Au cours des 20 dernières années, la consommation de viande bovine en France est passée de 66 kg à 55 kg par an et par habitant. Cette baisse de consommation est multifactorielle : elle peut être liée à l’inflation, la santé, l’environnement, l’éthique ou à la qualité des produits. Les consommateurs s’orientent davantage vers la viande hachée, car elle est moins chère et régulière en qualité. Les morceaux les plus chers se vendent de moins en moins.

Pour ces morceaux, la tendreté de la viande est la principale attente des consommateurs. Elle est définie comme son aptitude à se laisser découper, déchirer, broyer pendant la mastication puis déglutir (d’après (Touraille 1994)) Or la gestion de la tendreté et sa régularité dans le temps constituent un enjeu très important pour la filière viande. Elle est d’autant plus d’actualité dans un contexte global actuel de baisse de la consommation des viandes bovines sous forme de steak (versus viandes hachées en croissance). Ces produits sont coûteux car cher à produire ; il est aujourd’hui crucial de ne plus décevoir le consommateur. Sur le plan physico-chimique, la tendreté dépend de deux composantes majeures : le collagène (et son degré de réticulation) et les fibres musculaires (type et état des myofibrilles). Depuis l’animal jusqu’au morceau cuit dans l’assiette, de nombreux facteurs à la fois d’amont ou d’aval agissent à des degrés divers sur cette tendreté qui reste l’élément majeur d’appréciation organoleptique. La tendreté peut donc être très variable même au sein d’un même groupe homogène de carcasses, mais aussi au sein d’un même muscle (Bonny et al. 2017), il n’existe pas de méthode prédictive du potentiel de tendreté, qui est donc subi car impossible à anticiper. Cela a pour conséquence un risque de déception du consommateur final qui finit par se sécuriser en se reportant sur la viande hachée.

Il existe de nombreuses méthodes (physique, physico-chimiques ou biochimiques (Gicquet et al. 2016) pour qualifier la tendreté de la viande. Les méthodes physiques vont par exemple permettre de solliciter mécaniquement les différentes structures qui composent la viande (cisaillement : méthode de Salé, compression : tendéromètre, masticateur (Evrat-georgel 2008) alors que les méthodes physico-chimiques vont permettre d’analyser les composants et la microstructure (dosage du collagène) de la viande. Des méthodes sensorielles (odeur, aspect, goût, jutosité) sont également fréquemment utilisées pour évaluer la qualité de la viande.

Quelles que soient ces méthodes, elles présentent très souvent des limites : manque de fiabilité, de précision, de reproductibilité ou inadaptées aux conditions industrielles

car le plus souvent destructives (coupure, déchirement ou broyage). Nous testons dans ce travail une méthode locale d’indentation. Cet essai est classiquement utilisé pour caractériser les propriétés locales de matériaux. Il consiste en la pénétration d’une pointe (à géométrie variable : hémisphérique, conique...) dans la matière afin d’en déterminer ses propriétés mécaniques à partir de la relation force-déplacement. Dans certaines conditions, il est possible de remonter, par exemple, au module d’élasticité du matériau. Concernant les matériaux mous et particulièrement la viande, certaines études utilisent cette méthode d’indentation multi-points, pour mettre en relation les modules d’élasticité locaux avec la composition biochimique de la viande ou même avec des indicateurs issus des méthodes de qualification physique (Boots et al. 2021). L’utilisation de cette méthode non destructive permettrait de réaliser des procédures de mesures de tendreté moins coûteuses (pas de prélèvement de matière ni d’utilisation de machine de laboratoire ne sont nécessaire) et chronophages (la mesure pouvant être réalisée au cours du procédé et non en laboratoire). Ainsi, en plus de rendre possible l’estimation de la tendreté de chaque morceau, un tel dispositif contribuerait à améliorer la chaîne de production (réduction des coûts et optimisation du temps).

IMT Mines Alès et l’Association pour le Développement de l’Institut de la Viande de Clermont-Ferrand (ADIV) proposent dans cette étude préliminaire de mettre en corrélation les résultats d’un essai d’indentation avec une pointe hémisphérique avec ceux issus de l’essai traditionnel au tendéromètre pour la mesure de tendreté de deux types de viande. Pendant la pénétration de la pointe, la force et le déplacement ont été relevés en fonction du temps. Cette phase d’indentation a été suivie d’une phase de relaxation pendant laquelle la pointe a été maintenue en position enfoncée et la force a été enregistrée en fonction du temps. La dernière étape a consisté en le retrait rapide de la pointe pour permettre d’observer et de quantifier via des mesures laser le retour à l’équilibre de la viande (recouvrance). Les indicateurs les plus pertinents issus de ces essais ont été corrélés avec ceux issus d’essais de compression de type tendéromètre. Deux types de pièces bovines ont été étudiées : du faux filet et du rond de gîte, pièces connues pour leurs différences de tendreté. L’influence de la durée de stockage a aussi été étudiée.

L’objectif de ce projet de faisabilité est de vérifier si cette méthode peut s’appliquer à la mesure prédictive de tendreté et d’en évaluer son potentiel.

I. MATERIAUX ET METHODES

I.1 Matériaux

Quatre muscles bovins présentant des niveaux de tendretés différents, deux faux-filets (FF) et deux ronds de gîte (RDG), ont été prélevés par l'ADIV sur un même animal et nous ont été fournis sans subir quelque transformation. Ces muscles sont présentés sur les Figure 1 (FF) et Figure 2 (RDG), respectivement. Ils ont été prélevés sur les côtés droit et gauche de la carcasse, et sont de ce fait

désignées avec un numéro 1 (gauche) ou 2(droite). Des tranches parallélépipédiques de dimensions $L*l*e=10*5*1\text{ cm}^3$ ont ensuite été découpées de telle sorte que les fibres musculaires soient dans le plan de découpe et parallèle au plus grand coté du parallélépipède de découpe (Figure 3).



Figure 1 : Faux filet, pièce entière



Figure 2 : Rond de gîte, pièce entière



Figure 3 : Tranches découpées

Ces tranches ont été conditionnées sous plastique et stockées à 3°C pour être utilisées lors de tests de compression à 10, 13 et 17 jours (correspondant à trois

durées de maturation différentes) après l'abatage de l'animal.

I.2 Protocole expérimental

L'ADIV utilise classiquement les tests de compression (méthode INRA (Lepetit, Salé, and Ouali 1986; Salé et al. 1984) réalisés par un tendéromètre (voir Figure 4) pour évaluer la tendreté de la viande. Il s'agit d'un essai de compression sur un parallélépipède rectangle de viande, de dimension $L*l*e=5\pm 0.1*1\pm 0.1*1\pm 0.1\text{ cm}^3$. L'échantillon est placé dans un étrier et est comprimé par un piston métallique plan à déplacement imposé et à vitesse constante. Un capteur de force permet de suivre la force de

compression en fonction de l'enfoncement du piston dans la viande. Un exemple typique d'évolution de cette force est présenté en Figure 5. Deux indicateurs sont utilisés pour évaluer l'essai : les forces mesurées pour une compression à 20% et 80% de l'épaisseur du parallélépipède, notées $F_{20\%}$ et $F_{80\%}$, respectivement. Ce test permet d'évaluer à 20% la tendreté myofibrillaire et à 80% la tendreté collagénique (Guillemin et al. 2009).

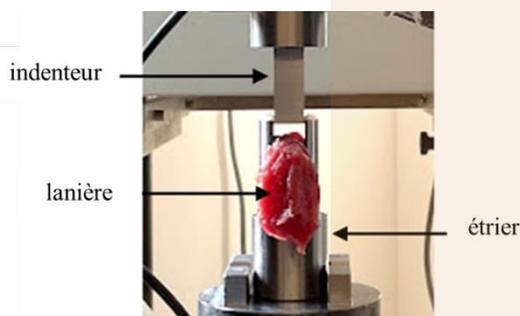


Figure 4 : Tendéromètre monté sur une presse d'essais

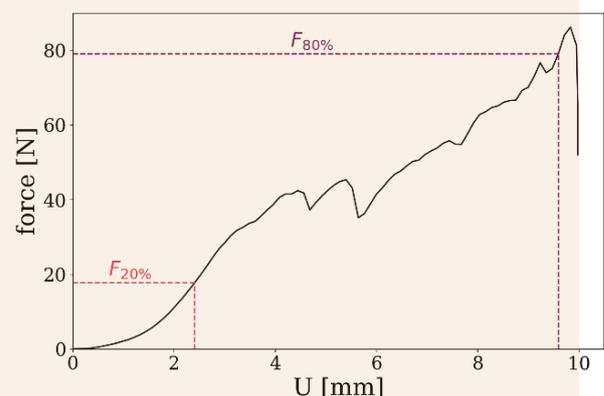


Figure 5 : Évolution de la force mesurée en fonction de l'enfoncement U du piston.

Les indicateurs mesurés sont la force à un enfoncement U de 20% et 80% de l'épaisseur de l'échantillon.

Cas du FF à 10 jours de stockage. Échantillon d'épaisseur 12 mm

IMT Mines Alès a développé un dispositif d'indentation doté d'une pointe hémisphérique de diamètre 1 cm, monté sur une presse d'essais mécanique dans le but d'analyser le comportement de la viande. Une première phase consiste à faire pénétrer la pointe dans la viande, puis de la maintenir en position et enfin d'effectuer un retrait rapide de la pointe. Lors de ces différentes phases, il est possible de suivre l'évolution de la force sous la pointe (indentation et maintien) mais aussi le déplacement de la surface des échantillons. Ce dispositif s'inspire et tend à automatiser et à compléter la méthode artisanale du boucher qui consiste à apprécier la tendreté d'une viande en exerçant une pression avec le pouce sur celle-ci (Evrat-georgel 2008). Toutefois, cette méthode ne fonctionnant qu'intra muscle, il faudra s'assurer de son application à des mesures inter-muscles. La force de compression et la vitesse d'enfoncement de la pointe sont contrôlées via la presse d'essais. Son déplacement est suivi grâce à la position de la traverse de la presse et la recouvrance via un profilomètre laser (Stemer, Gocator 2100) positionné au-dessus de l'échantillon. Ce profilomètre permet de suivre le mouvement hors plan

d'une ligne située sur la surface de la viande. L'altitude du point le plus bas, qui correspond au point directement sous la pointe, est alors évaluée en fonction du temps à une fréquence de 420 Hz avec une précision de 0.05 mm. Le retrait rapide de la pointe est assuré par des ressorts retenus par des électroaimants. Ces électroaimants permettent de maintenir la pointe en position basse (indentation). Lorsqu'ils ne sont plus alimentés en électricité, les ressorts ramènent rapidement la pointe en position haute (retrait de la pointe). Le dispositif est présenté en Figure 6 pour la phase d'indentation, en Figure 7 pour la phase de relaxation et en Figure 8 pour la phase de recouvrance. Une indentation à une force de 1.2 N a été appliquée pour permettre de solliciter la structure collagénique de la viande tout en limitant l'endommagement. La mesure est ainsi non destructive. Cette force correspond à un enfoncement de la pointe et donc à un taux de déformation sous la pointe pouvant varier d'un échantillon à l'autre. Une étude préliminaire a permis de fixer les durées de maintien et de recouvrance à 10 et 30 secondes, respectivement.

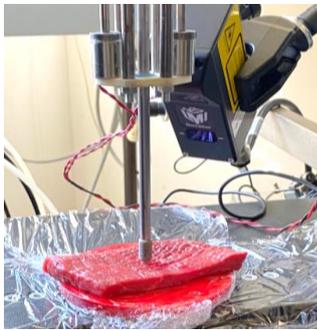


Figure 6 : Indentation (enfoncement de la pointe).

Les électro-aimants et le laser en arrière-plan servent au déclenchement et au suivi de la recouvrance.

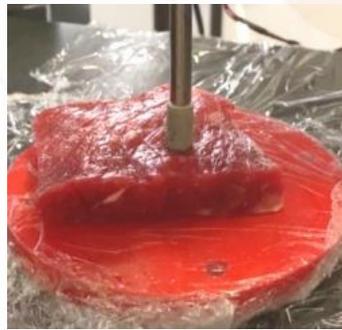


Figure 7 : Relaxation (maintien en position de la pointe et mesure de l'évolution de la force au cours du temps.)



Figure 8 : Recouvrance (retrait rapide de la pointe grâce aux électroaimants et suivi laser de la position du tissu au cours du temps.)

Des courbes d'indentation/relaxation/recouvrance dans le cas du FF1 à 10 jours de stockage sont présentées en Figure 9 (évolution du déplacement en fonction du temps)

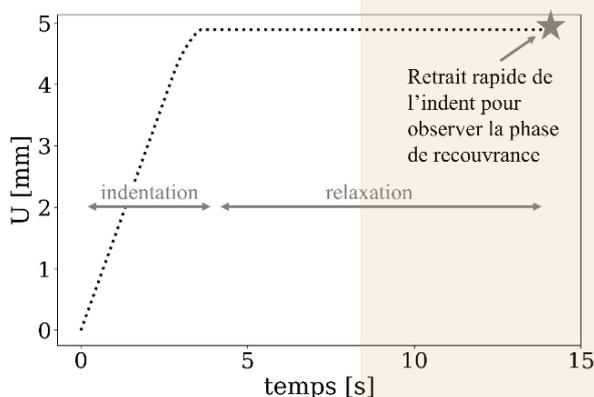


Figure 9 : Déroulement de l'essai.

(i) Indentation : La pointe s'enfonce à vitesse contrôlée jusqu'à atteindre la force consigne $F=1,2$ N puis (ii) Relaxation : il est maintenu en position pendant 10 secondes et enfin (iii) Recouvrance : il est retiré rapidement grâce à des ressorts. Cas d'un échantillon de FF à 10 jours de stockage.

et Figure 10 (évolution de la force en fonction du temps). Les données mesurées lors de la recouvrance sont illustrées en Figure 11.

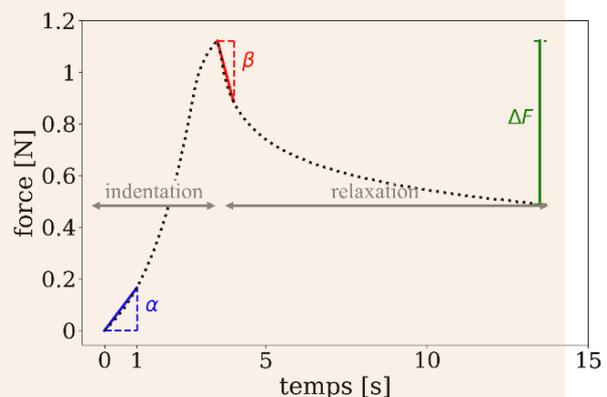


Figure 10 : Evolution de la force en fonction du temps au cours des phases d'indentation (i) et de relaxation (ii) (lors de la phase de recouvrance (iii), la force est nulle).

Les indicateurs mesurés sont α , la pente de la courbe de force sur la première seconde d'indentation, β , la pente de la courbe de force durant la première demi-seconde de la phase de relaxation et ΔF , la variation de la force mesurée au cours des 10 premières secondes de la relaxation. Cas d'un échantillon de FF à 10 jours de stockage.

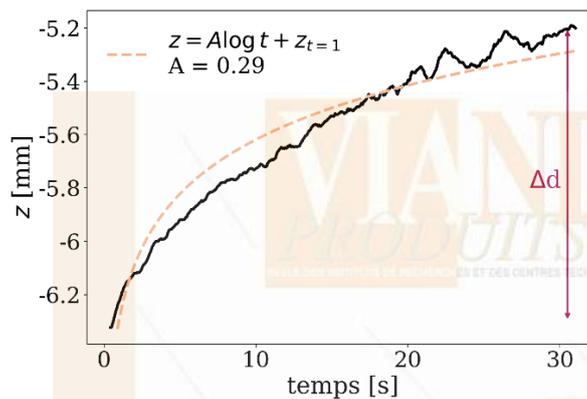


Figure 11 : Evolution de la position z du point sur la viande situé sous la pointe en fonction du temps au cours de la phase de recouvrance.

Les indicateurs mesurés sont Δd , la remontée totale mesurée, qui sera ensuite normalisée par l'enfoncement maximal $UMAX$ de la pointe, et A le taux de croissance de la fonction logarithmique utilisée pour approcher l'évolution de $z(t)$. Cas d'un échantillon de FF1 à 10 jours de stockage.

I.3 Analyse des données

Concernant l'essai en compression utilisé comme mesure de référence, 9 essais sont réalisés par type de pièces pour chacune des 3 campagnes, soit 108 parallélépipèdes rectangles de viande testées pour la totalité des essais. Les résultats de ces essais, i.e. les mesures de F20% et F80% ont été utilisées comme référence pour évaluer la tendreté des morceaux testés par notre dispositif d'indentation.

Concernant les mesures d'indentation, 2 tranches ont été nécessaires par type de morceau pour chacune des 3 campagnes. Sur chaque tranche, 3 essais d'indentation ont été réalisés, représentant ainsi un total de 72 mesures. Des indicateurs ont été proposés afin d'analyser et de comparer les courbes d'évolution de la force au cours du temps pour les phases d'indentation et de relaxation ainsi que les courbes de recouvrance. Ces indicateurs pour les deux premières phases sont α , la pente de la force lors de la première seconde d'indentation, β , la pente en début de

relaxation pendant la première demie seconde de relaxation et ΔF , défini comme la variation de la force au cours de la relaxation normalisée par la force maximale mesurée. Les temps utilisés pour évaluer les indicateurs sont fixes pour tous les échantillons et permettent d'évaluer les pentes initiales (chargement/relaxation). Pour la recouvrance, phase pour laquelle la remontée (z) du point de la viande situé sous la pointe est enregistrée, on s'est intéressé au taux de croissance logarithmique, paramètre noté A , défini par l'intermédiaire de la fonction :

$$z(t) = A \log(t) + z(t=1).$$

$z(t=1)$ est l'altitude enregistrée au bout de 1s de recouvrance et t le temps de l'essai. Δd , paramètre associé à la remontée de la viande est un autre indicateur.

Au total, 72 essais sont réalisés.

II. RESULTATS ET DISCUSSION

Le stockage à 3°C induit une évolution de la microstructure de la viande : il affecte principalement sa structure myofibrillaire en conduisant à une dégradation des

II.1 Essais de compression

Les résultats concernant les essais de compression (forces à 20 et 80% en fonction de la durée de stockage) sont présentés dans les Figures 12 et 13. Outre la grande variabilité observée, la force à 20% diminue effectivement pour les 2 muscles avec la durée de maturation, ce qui est un mécanisme biologique bien connu. Ce phénomène est malgré tout peu prononcé car la viande, qui n'a pas été stockée sous vide, a subi de la dessiccation ce qui a tendance à augmenter sa dureté. Par ailleurs, le taux de collagène du

protéines (Frylinck et al. 2019; Guillemain et al. 2009; Listrat et al. 2015; Touratier 1992). Il s'agit de la maturation de la viande bien connue pour améliorer sa tendreté.

RDG est supérieur à celui du FF ; ce résultat est confirmé par les valeurs de force à 80% pour le FF inférieures à celles obtenues sur le RDG quelle que soit la durée de stockage (Figure 13). On constate également que le temps de maturation affecte peu F80%. Ceci était attendu dans la mesure où cet indicateur reflète la dureté collagénique qui n'est pas affecté par la maturation. Cela a été effectivement observé dans d'autres études sur de la viande porcine (Astruc 2014; Vautier et al. 2005)

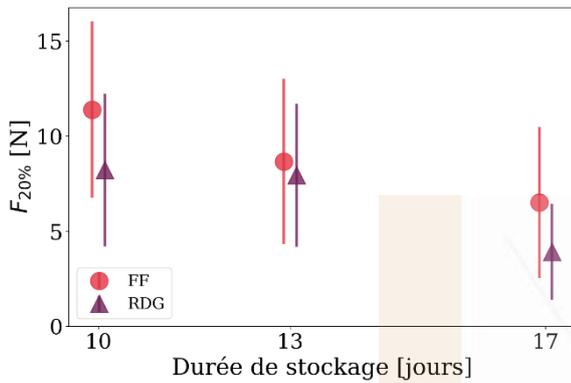


Figure 12 : Essai de compression. Évolution de la force à 20 % d'enfoncement et des écarts type associés en fonction de la durée de maturation.

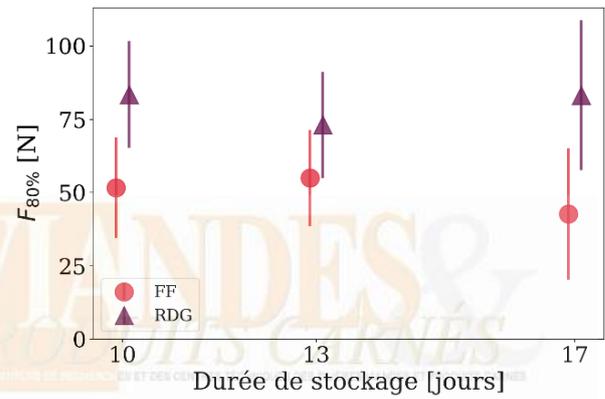


Figure 13 : Essai de compression : évolution de la force à 80 % d'enfoncement et des écarts type associés en fonction de la durée de maturation.

II.2 Essais d'indentation

Les différents indicateurs obtenus à partir de l'essai d'indentation présentés dans la section précédente ont été évalués pour chaque campagne. Seuls les indicateurs les plus pertinents sont présentés en fonction des indicateurs issus de la méthode de référence : F20% et F80%. On retrouve Figure 14 et Figure 15, les indicateurs A et β tracés en fonction de F20% et F80%. Même si la tendance est à confirmer avec une campagne plus importante, ces paramètres semblent corrélés avec des coefficients de

détermination linéaire de Pearson respectivement de $R^2=0.39$ et $R^2=0.63$. Plus le paramètre A est faible, plus F80% est faible. Le taux de croissance logarithmique A (mm) pendant la phase de recouvrance permettrait de décrire significativement la dureté collagénique. De la même façon, plus le paramètre β est faible, plus F20% est faible. La pente (N/s) au début de la phase de relaxation permettrait donc de décrire significativement la dureté myofibrillaire.

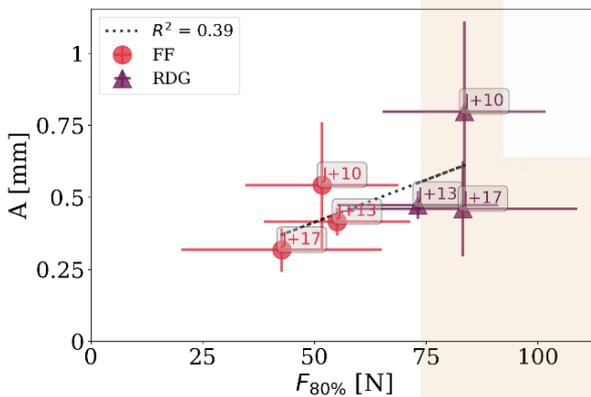


Figure 14 : Evolution de l'indicateur A de la phase de recouvrance avec la force à 80% issue de l'essai de compression.

Les traits pointillés correspondent à une régression linéaire, de coefficient de détermination $R^2=0,39$.

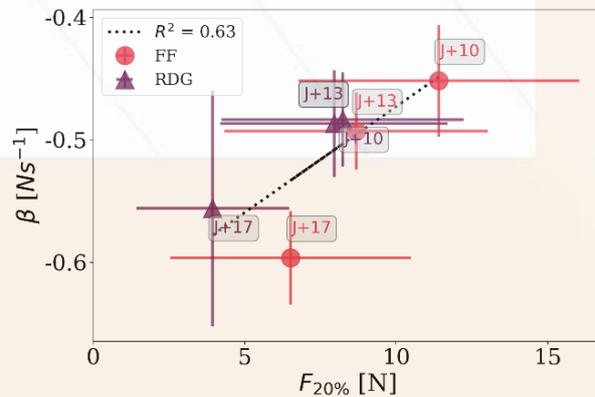


Figure 15 : Evolution de l'indicateur β de la phase de relaxation avec la force à 20% issue de l'essai de compression.

Les traits pointillés correspondent à une régression linéaire, de coefficient de détermination $R^2=0,63$.

CONCLUSION

Ces premiers travaux offrent de premiers résultats encourageants quant à la possibilité d'envisager l'utilisation de l'indentation (enfoncement d'une pointe hémisphérique, suivi de son maintien en position puis de son retrait rapide) pour estimer la tendreté d'un échantillon de viande bovine de façon non destructive sur des tranches prédécoupées de viande (conditionnées pour être mises en vente), sans nécessité de réaliser des prélèvements. Les phases d'essai qui semblent contenir le plus d'informations potentiellement corrélées avec le niveau de tendreté de la

viande sont le maintien de la pointe en position (relaxation) et le retrait de la pointe (recouvrance). Toutefois, il est indispensable de poursuivre les investigations afin de lever les nombreux verrous liés à cette étude. Par exemple, une étude statistique basée sur un nombre d'échantillons plus important doit être menée. Le protocole expérimental doit lui aussi être affiné : taille de la pointe, vitesse d'indentation et durée des phases d'indentation, de relaxation et de recouvrance. Il est à noter malgré tout que cette méthode ne réduit pas la variabilité des mesures par rapport à l'essai de

référence (tendéromètre), des répétitions de mesures locales sont donc à envisager ; ceci est un frein à une utilisation « en ligne » de cet outil. Une étude sur muscle entier doit aussi

être envisagée afin de valider ou non l'utilisation de cet outil avant découpe de la viande.

Références bibliographiques

Astruc T. (2014). "Connective tissue: Structure, function, and influence on meat quality." *Encyclopedia of Meat Sciences*: 321–28.

Bonny S.P.F., Hocquette J.F., Pethick D.W., Legrand I., Wierzbicki J., Allen P., Farmer L.J., Polkinghorne R.J., Gardner G.E. (2017). Untrained consumer assessment of the eating quality of beef: 1. A single composite score can predict beef quality grades. *Animal* 11(8): 1389–98. <http://dx.doi.org/10.1017/S1751731116002305> .

Boots J.N.M., Humblet-Hua N.P.K., Tonneijck L., Fokkink R., van der Gucht J., Kodger T.E. (2021). Characterization of the local mechanical texture of animal meat and meat replacements using multi-point indentation. *Journal of Food Engineering* 300, 110505. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110505>.

Evrat-Georgel C. (2008). Bibliographie critique des méthodes instrumentales de mesure de la tendreté de la viande bovine. Institut de l'élevage, Collection résultats: 156 p. Evrat-Georgel C. (2008). Bibliographie Critique Des Méthodes Instrumentales de Mesure de La Tendreté de La Viande Bovine. Institut de l'élevage, Collection résultats: 156 p. https://www.agrireseau.net/bovinsboucherie/documents/pdf_CR_170832028%5B1%5D.pdf

Gicquet M., Philippe M., Guillon-Kroom C., Raoult M. (2016). Définition, évaluation et déterminisme de la tendreté de la viande bovine. *Viandes & Produits Carnés* 32(3): 1–7.

Guillemin N., Cassar-Malek I., Hocquette J.F., Jurie C., Micol D., Listrat A., Levéziel H., Renand G., Picard B. (2009). La maîtrise de la tendreté de la viande bovine : un futur proche. I. Approche biologique et identification de marqueurs. *INRA Productions Animales*, 22 (4), 331-344.

Lepetit J.P., Salé P., Ouali A. (1986). Post Mortem evolution of rheological properties of the myofibrillar structure. *Meat Science*, 16, 161–74.

Listrat A., Lebret B., Louveau I., Astruc T., Bonnet M., Lefaucheur L., Bugeon J. (2015). Comment la structure et la composition du muscle déterminent la qualité des viandes ou chairs. *INRA Productions Animales* 28(2): 125–36.

Moloto K.W., Frylinck L., Modika K.Y., Pitse T., Strydom P.E. (2019). Biomarqueurs Protéiques et Tendreté de La Viande Bovine Maturée." *Viandes & Produits Carnés* 35-1-3.

Salé P., Noel Y., Lasteyras A., and Oleon C. (1984). A Sinusoidal Compression System to Study Rheological Properties of Foods in the Transient State. *Journal of Texture Studies* 15,103–14.

Touraille C. (1994). Incidence des caractéristiques musculaires sur les qualités organoleptiques des viandes. *Rencontres Recherches Ruminants*, 1, 169–76.

Touratier C. (1992). Comportement des protéines sarcoplasmiques de la viande de porc au cours du stockage et du chauffage: Relations avec la qualité de la viande." Institut National Polytechnique de Lorraine. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01776206>.

Vautier A., Boulard J., Houix Y., Le Roux A., Minvielle B., Bozec A. (2005). Viande de Porc : Une maturation plus longue pour une viande plus tendre *Viandes & Produits Carnés* 24(6): 215–18.

Remerciement :

Cette étude a été réalisée grâce au soutien financier de l'ADIV (Clermont Ferrand) et matériel de la Société d'Economie Mixte des Abattoirs Alès Cévennes (SEMAAC) (Alès). Nous remercions également Gille Camp, Stéphan Devic et Gilles Genevois pour la réalisation des dispositifs expérimentaux.