

La tendreté et les propriétés mécaniques de la viande dépendent principalement des tissus conjonctifs et myofibrillaires et de leurs interactions. Les tissus conjonctifs, et leur constituant principal qui est le collagène, contribuent à ce que certains appellent la dureté intrinsèque de la viande (Purslow, 2005). La tendreté optimale d'une viande donnée dépend donc in fine essentiellement de la maturation.

La maturation de la viande est un phénomène complexe, enzymatique et physico-chimique intervenant durant le stockage qui conduit à une amélioration progressive de la tendreté. Dans le cas de la viande bovine la phase de maturation peut nécessiter 2 jours ou bien 3 semaines, selon l'animal, sans que ceci soit prévisible a priori. Il n'est actuellement pas encore possible de sélectionner des animaux sur la vitesse de maturation faute de connaissances suffisantes sur l'hérédité de ce caractère. Dès lors qu'il n'existe pas non plus de traitement technologique connu et fiable pour la maturation, une des possibilités pour garantir une maturation optimale est de contrôler cette caractéristique après l'abattage, ce qui permettrait de faire un tri des carcasses et/ou des muscles à une étape précoce de la phase de maturation et de diriger les produits vers des circuits appropriés.

Il est possible à la fois de commercialiser des viandes complètement maturées et de diminuer les coûts de stockage si l'on dispose d'un système permettant une mesure de l'état de maturation de la viande au début de sa phase de maturation (Lepetit et Hamel, 1998). Sur un plan pratique, cette mesure permettra de commercialiser rapidement les carcasses dont les muscles ont vite mûri. Les autres pourront être, soit conservées jusqu'à une mesure ultérieure, soit vendues dans une autre classe de produits. L'intérêt pour l'industriel est double car la méthode permet à la fois de diminuer les frais de stockage et d'augmenter la qualité du produit commercialisé. En effet la mesure permet d'une part, de ne pas conserver inutilement des carcasses ou des muscles qui ont mûri rapidement et d'autre part, de ne pas commercialiser dans la même gamme, des produits peu mûris et des produits très mûris.

Tendreté de la viande bovine

Vers un système autonome pour la détermination de l'état de maturation

La variabilité de la qualité de la viande bovine, particulièrement de la tendreté, est une des critiques fréquemment invoquée par les consommateurs et de ce fait un des problèmes majeurs à résoudre pour l'industrie de la viande. Les auteurs de cet article démontrent la faisabilité d'un capteur de l'état de maturation. Pour l'industriel l'intérêt est double : diminuer les frais de stockage et augmenter la qualité du produit, pour le consommateur il est unique : acheter à coup sur une viande tendre !

DAMEZ J.-L., CLERJON S.,
ALBOUELKARAM S., LEPETIT J.

INRA
Unité Qualité des produits animaux (QuaPA)
63122 Saint Genès Champanelle

Science et technique

Les viandes qui mûrissent très vite ont une résistance myofibrillaire déjà faible 1 ou 2 jours après l'abattage. En sélectionnant les muscles sur cette valeur on peut faire plusieurs sous-populations dont les viandes seront complètement mûries à des temps plus ou moins longs.

L'état de maturation peut être évalué par la mesure de la contrainte à 20 % (Lepetit et al., 1986) qui est une mesure de référence mais destructive. Le développement de méthodes non destructives pouvant fournir la même information est nécessaire. Il est apparu que les propriétés électriques de la viande, qui pendant la maturation évoluent de la même manière que la résistance mécanique des fibres musculaires, répondaient à ce critère (Lepetit et al., 2002). Nous nous sommes attachés à démontrer la faisabilité d'un capteur de l'état de maturation, utilisable dans l'industrie de la viande, et basé sur la mesure de l'anisotropie électrique de la viande.

CARACTÉRISATION DES VIANDES PAR LEURS PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES

L'impédance électrique est la propriété d'un matériau à s'opposer au passage du courant. Lorsque cette propriété ne dépend pas de la fréquence du courant, on parle de résistance sinon et c'est le cas des tissus biologiques on parle d'impédance, laquelle comprend une composante résistive et une composante capacitive qui traduit certaines propriétés diélectriques du milieu. On appelle propriétés diélectriques d'un matériau les propriétés qui régissent son interaction avec un champ électromagnétique. Les propriétés diélectriques comprennent la permittivité (interaction avec un champ électrique alternatif) et la perméabilité (interaction avec un champ magnétique alternatif). Chacune de ces deux grandeurs est complexe, sa partie réelle traduit l'aptitude du matériau à stocker l'énergie électromagnétique, et sa partie imaginaire à la dissiper. Les propriétés diélectriques d'un matériau existent, quelle que soit la fréquence du champ électromagnétique auquel il est soumis. On peut étudier ces propriétés depuis les très basses fréquences jusqu'aux hyperfréquences. Suivant la gamme de fréquence, différentes techniques de mesures sont mises en œuvre et permettent d'accéder à des phénomènes ou à différents niveaux de structures du matériau. Les niveaux de structure les

plus fins sont atteints par l'utilisation de hautes fréquences, les niveaux correspondants aux éléments de dimensions plus importantes sont observés en utilisant des basses fréquences.

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Il n'y a pas actuellement une connaissance fondamentale des phénomènes électriques mis en évidence dans la viande. Ceci s'explique partiellement par le fait que les études qui ont été entreprises jusqu'à présent ne se sont attachées qu'à la détection rapide de défauts. Certains auteurs ont utilisé l'impédancemétrie comme moyen de détection des viandes PSE (Swatland 1997; Chizzolini et al., 1993). Dans ce cas, l'évolution de l'impédance a été mise en correspondance avec le pH. D'autres auteurs ont misé sur la détection des viandes congelées (Salé, 1972; Charpentier et al., 1972). Ceux-ci ont montré que la diminution de l'impédance des viandes décongelées résulte d'altérations des propriétés des membranes cellulaires et de modifications de la structure du milieu, permettant une plus grande mobilité des ions. Par ailleurs de nombreuses études ont été menées depuis les années 1970 sur l'évolution *post mortem* des propriétés électriques de la viande. Il a été montré que l'impédance du muscle diminue rapidement à l'installation de la *rigor mortis* dans la viande bovine (Salé 1976) et dans la viande de porc (Swatland, 1980). Cependant l'impédance diminue moins vite durant la période *post-rigor* (Salé, 1976, Pliquet et al., 1995). Les variations d'impédance pendant la phase *ante-rigor* ont été mises en relation avec les modifications des membranes mais les variations d'impédance pendant la période *post-rigor* n'ont pas été expliquées. Dans ce domaine, il a été cependant montré (Lepetit et al., 2002) qu'il existe une relation étroite entre l'évolution de l'impédance électrique et celle de la résistance mécanique de la viande au cours de la maturation. Cette relation diffère néanmoins d'un muscle à l'autre, mais par contre l'évolution de l'anisotropie en fonction de la résistance des fibres est indépendante du muscle. L'évolution de l'impédance au cours de la maturation s'explique par des changements majeurs qui interviennent dans la structure de la viande (Damez et al., 2005). Ces modifications concernent la structure myofibrillaire, le cytosquelette et les membranes.

LA VIANDE EST UN PRODUIT ANISOTROPE

Le muscle et donc la viande ont une structure fortement anisotrope organisée sur plusieurs dimensions. Le muscle peut être vu comme un matériau composite formé d'un ensemble de fibres contractiles entourées de tissus conjonctifs. Ces fibres sont composées d'un ensemble aligné de myofibrilles. Les myofibrilles sont assemblées par le cytosquelette qui est lui-même constitué de filaments intermédiaires. Chaque fibre musculaire ou myofibrille est entourée d'une fine enveloppe d'endomysium. Ces divers éléments constitutifs du muscle forment plusieurs niveaux de structure. Ils ont des propriétés électriques et diélectriques très contrastées: la permittivité du tissu conjonctif est très proche de celle mesurée sur le tendon et du fait de la faible quantité de tissu conjonctif de la viande, la permittivité de la viande peut être assimilée à celle des fibres musculaires. D'un point de vue électrique, la viande peut être représentée de façon simplifiée par un ensemble de cellules très allongées et conductrices (conductivité due principalement à la présence d'ions Na⁺, K⁺, Cl⁻) isolées les unes des autres par les membranes. Dans le cas de la maturation de la viande l'impédance électrique chute rapidement au cours de la phase *ante-rigor* du fait des modifications membranaires. Les tissus biologiques, et la viande en particulier, sont anisotropes vis-à-vis de l'impédance c'est-à-dire que l'impédance est différente selon que le courant se propage parallèlement ou perpendiculairement aux fibres musculaires.

Les modifications structurales de la viande qui interviennent pendant la maturation au cours du stockage affectent donc non seulement les propriétés mécaniques mais également les propriétés électriques et diélectriques du produit.

Pendant la phase de maturation surviennent des dégradations des protéines qui conduisent à la fragmentation des myofibrilles et à une dégradation du cytosquelette. Du fait de ces modifications, le caractère fortement anisotrope de la structure évolue et peut être observé à l'aide d'un capteur basé sur l'émission d'une onde polarisée (Felbaq et al., 2002). Il suffit alors, par exemple, de suivre les variations de l'amplitude des conceptions en fonction de l'angle entre la direction du champ électrique et la direction

principale des fibres pour avoir une mesure de l'état de la structure et donc de l'état de maturation d'un muscle.

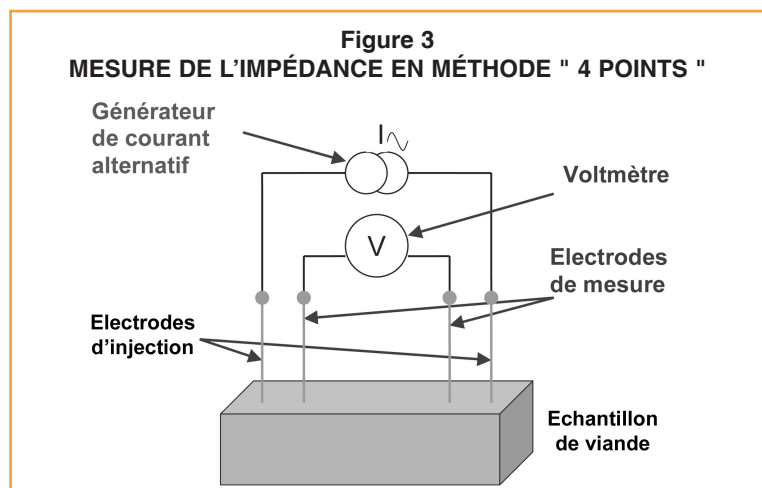
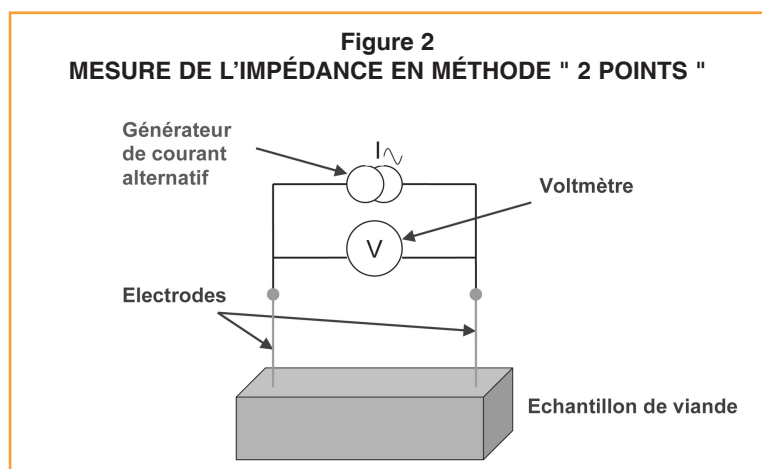
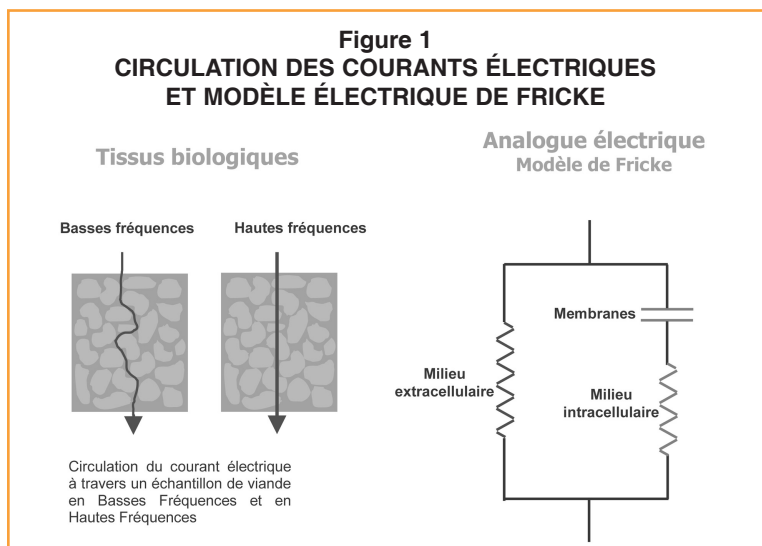
DES CAPTEURS APPROPRIÉS POUR LA MESURE D'IMPÉDANCE DES VIANDES

L'étude spectrométrique de l'impédance de la viande est très riche en informations sur l'organisation de la structure et sur l'état de ses divers constituants. A basses fréquences l'anisotropie est très marquée: l'impédance dans le sens transversal à la direction des fibres musculaires est de l'ordre du double de celle observée dans le sens longitudinal. L'anisotropie disparaît dans le domaine des hautes fréquences, les parois cellulaires n'agissant plus comme des barrières électriques et l'impédance reflète alors les caractéristiques des milieux intra et extracellulaires. A l'échelle microscopique les phénomènes prédominants sont la polarisation des interfaces, les déplacements de charge ionique et les phénomènes de relaxation à basse fréquence. Le modèle décrit par Fricke (Fricke H., Morse S., 1924) (figure 1) assimile les constituants des tissus biologiques (parois cellulaires, liquide intra cellulaire, liquide extra cellulaire, ...) à des composants électriques passifs (résistances, condensateurs).

La méthode la plus élémentaire et la plus couramment utilisée pour mesurer une impédance Z est d'utiliser deux électrodes, de faire circuler un courant I dans le circuit, de mesurer la tension V aux bornes de ces deux électrodes et d'en déduire l'impédance électrique en appliquant la loi d'Ohm $V = ZI$. (figure 2)

Avec un système à deux électrodes, la tension aux bornes de deux électrodes données est entachée d'une erreur systématique. Cela est dû à une zone de polarisation se trouvant autour des électrodes, où des charges se créent et où la mobilité des ions est différente. Il se produit également des phénomènes d'électrolyse partielle. Le résultat est l'apparition d'impédances parasites au niveau des deux contacts électrode-échantillon qui introduisent une chute de tension parasite due au courant qui circule dans le circuit.

Une méthode pour éliminer cette chute de tension est de ne faire circuler aucun courant dans le circuit de mesure, ce qui est obtenu grâce à la méthode de mesure en " 4 points " dans laquelle on applique un courant par deux électrodes d'injection et on mesure la tension par l'intermédiaire de deux autres électrodes de mesure (figure 3).



DES CAPTEURS CONÇUS POUR UNE UTILISATION EN MILIEU INDUSTRIEL

Dans une étude qui a reçu le soutien financier de l'Interbev et de l'Ofival, nous avons pu mettre au point des capteurs spécifiques mesurant l'anisotropie électrique par une méthodologie appropriée associée à un système autonome de mesure dans l'optique de leur utilisation à l'échelle industrielle. Les capteurs développés ont été conçus afin de pouvoir être aisément

manipulables, réalisés avec des matériaux compatibles avec les contraintes des industries agro-alimentaires alliant propriétés électriques (conducteurs ou isolants parfaits) et robustesse. Sur cette base nous avons ainsi développé un capteur original de géométrie circulaire (breveté) qui permet d'atteindre les propriétés d'anisotropie d'impédance en une seule application du capteur. L'avantage principal de ce capteur est de permettre d'effectuer rapidement une multitude de mesures dans diffé-

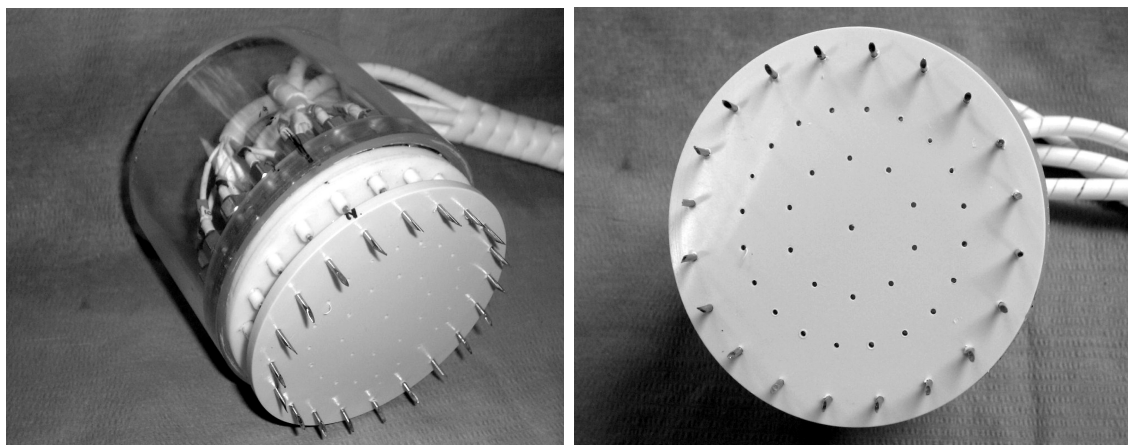


Photo 1 : SONDE CIRCULAIRE 20 ÉLECTRODES EN CONFIGURATION " 2 POINTS "

rentes directions par rapport aux fibres et ceci en une seule application du capteur.

Ce capteur se décline sous la forme de deux sondes de forme circulaire de diamètres différents qui utilisent la technologie 2 points à l'aide d'une sonde circulaire à 20 électrodes ou 4 points à l'aide d'une sonde circulaire couronne.

Sonde circulaire à 20 électrodes

Le capteur utilisant cette sonde permet la mesure de l'impédance par la méthode de 2 électrodes (20 électrodes disposées sur la périphérie du capteur, 2 électrodes diamétralement opposées commutées successivement pour la mesure de l'impédance dans une direction radiale).

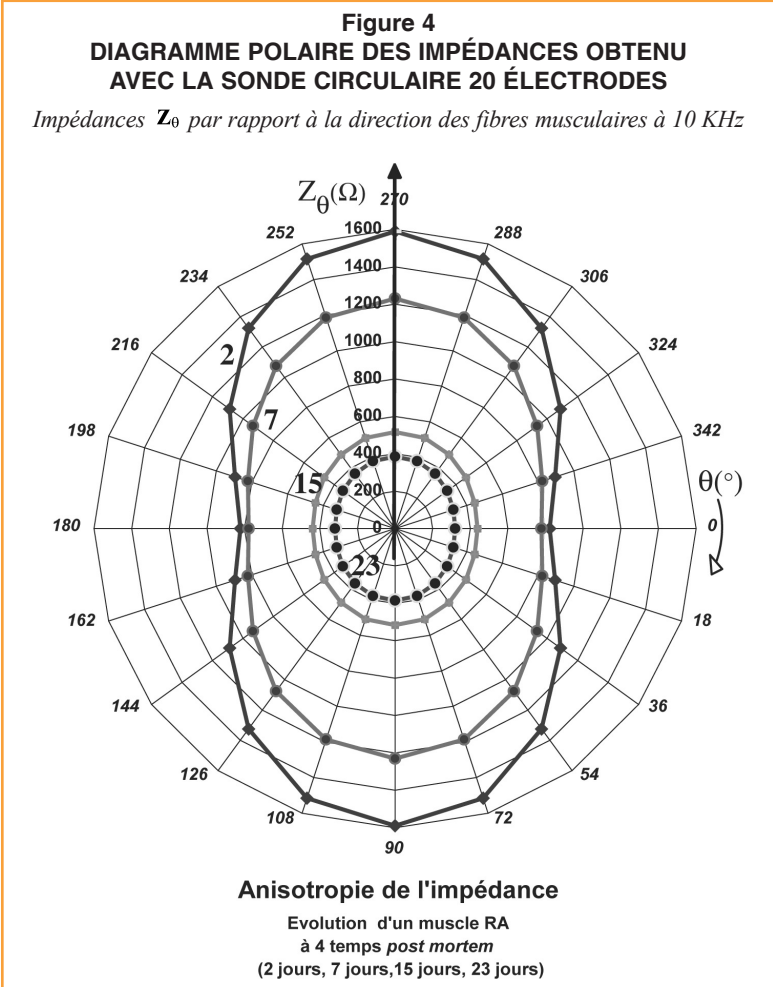
Les résultats de la mesure peuvent être représentés sur un diagramme polaire (figure 4) indiquant les valeurs des impédances suivant les directions radiales. La représentation polaire est caractérisée par une équation de la forme :

$$Z_{\theta} = Z_{||} \cos^2\theta + Z_{\perp} \sin^2\theta$$

où Z_{θ} est l'impédance suivant l'angle par rapport à l'axe des fibres musculaires, $Z_{||}$ est l'impédance minimum (mesurée parallèlement à la direction des fibres musculaires),

Z_{\perp} est l'impédance maximum (mesurée perpendiculairement à la direction des fibres musculaires).

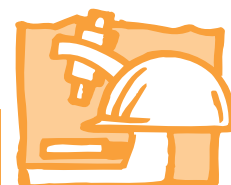
Les diagrammes polaires d'anisotropies, représentant l'impédance par rapport à la direction des fibres, ont une forme oblongue caractéristique. L'impédance est plus basse dans le sens des fibres musculaires et de façon globale diminue avec le temps *post mortem* du fait de la libération des élec-



trolytes notamment dans les compartiments extracellulaires (Kristensen et al., 2001) Du fait de la déstructuration de l'organisation des fibres et de la perméabilisation des parois cellulaires, l'impédance dans le sens transversal des fibres diminue et tend à égaler l'impédance dans le sens des fibres, ce qui se traduit par une allure circulaire sur le diagramme polaire.

Les essais de suivis de maturation à l'aide de ce capteur ont été effectués sur

une population de 104 échantillons constituée de 28 muscles bovins *Rectus Abdominis* (RA), 48 muscles bovins *Semimembranosus* (SM), 28 muscles bovins *Semitendinosus* (ST), qui ont été mis en relation avec la contrainte mécanique à 20 % de déformation. Un quart des échantillons a subi des mesures à 2 jours *post mortem*, un quart à 3 jours *post mortem*, un quart à 6 jours *post mortem* et le dernier quart à 14 jours *post mortem*. Chaque muscle a été conservé sous vide à 4 °C. La mesure a



été effectuée trois fois sur chaque échantillon portant l'ensemble des tests à 312 observations. Une observation consiste en l'acquisition d'un spectre d'impédance fréquentielle sur 80 fréquences suivant une loi logarithmique entre 100 Hz et 1,5 MHz pour chacune des 10 positions angulaires des électrodes.

Le logiciel MAEL d'acquisition et de traitement de données que nous avons conçu pour cette étude permet d'extraire, parmi les mesures d'impédances acquises dans toutes les directions angulaires, les valeurs d'impédances minimales et maximales correspondant aux impédances parallèles et orthogonales à l'axe des fibres musculaires. (logiciel déposé auprès de l'Agence de Protection des Programmes (APP).

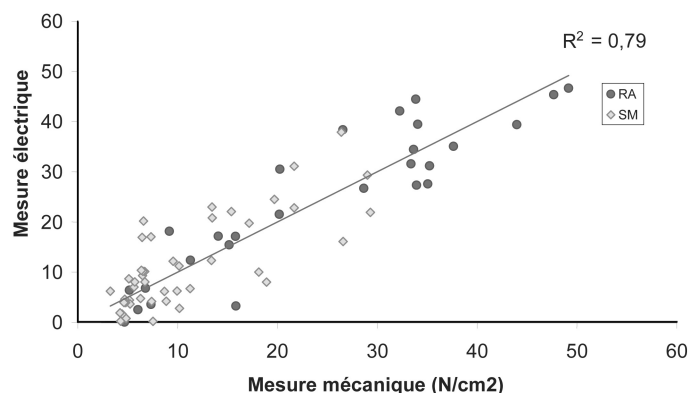
Afin d'exploiter statistiquement les données, le nombre de variables a été réduit à 128 en moyennant par groupes de 5 fréquences adjacentes les 8 variables retenues pour l'étude: le module de l'impédance transversale, la partie réelle de l'impédance transversale, le module de l'impédance longitudinale, la partie réelle de l'impédance longitudinale, le rapport des modules des impédances transversale et longitudinale, le rapport des parties réelles des impédances transversale et longitudinale, la différence des modules des impédances transversale et longitudinale, la différence des parties réelles des impédances transversale et longitudinale.

Des analyses de variances utilisant la procédure Stepwise du logiciel SAS® ont permis d'établir les relations avec les mesures de compression mécanique à 20 % de déformation caractérisant la dureté myofibrillaire liée à la maturation. Les résultats concernant les muscles *Rectus Abdominus* (RA) et *Semimembranosus* (SM) sont présentés sur la figure 5.

La relation entre les mesures électriques avec cette sonde et les mesures mécaniques est particulièrement marquée avec un $R^2 = 0,79$. Le résultat sur l'ensemble des muscles étudiés (RA, SM et ST) est nettement moins intéressant ($R^2 = 0,49$), les résultats par muscle (en appliquant

Figure 5
RELATION ENTRE MESURES ÉLECTRIQUES OBTENUES AVEC LA SONDE 20 ÉLECTRODES ET MESURES DE LA RÉSISTANCE MÉCANIQUE POUR LES MUSCLES *Rectus Abdominus* (RA) ET *Semimembranosus* (SM)

Les valeurs de mesures électriques (sans dimensions) sont obtenues à partir des équations paramétriques issues des traitements statistiques.



pour chaque type de muscle une relation mesure électrique/mesure mécanique) étant par ailleurs satisfaisant excepté pour le *Semitendinosus* (RA $R^2 = 0,83$, SM $R^2 = 0,58$, ST $R^2 = 0,18$).

Il est par ailleurs intéressant de connaître les performances de ces capteurs dans une optique d'utilisation en classement des muscles en différentes classes de maturation.

Trois classes de maturation ont été définies en prenant comme références les forces de compression à 20 % de déformation: de 0 à 10 N/cm² (maturé), de 10 à 30 N/cm² (intermédiaire) et supérieur à 30 N/cm² (pas maturé). Les essais de classement ont été effectués sur l'ensemble des mesures entreprises sur les 104 muscles (312 observations) et sur les 104 mesures obtenues par les moyennes de 3 mesures effectuées sur chaque muscle. La base de données sur laquelle nous avons travaillé (312 observations) comporte 153 échantillons maturés, 114 échantillons intermédiaires, 45 échantillons non maturés d'après un classement effectué à partir des tests de compression à 20 % de déformation. Pour la base de

données des 104 muscles 51 sont maturés, 38 sont intermédiaires et 15 sont non maturés.

Le tableau 1 ci-dessous résume l'ensemble des résultats de ce classement sous la forme: nombre d'observations bien classées, pourcent de bien classé (maturé, intermédiaire, non maturé). Deux classements sont présentés pour lesquels on utilise les 128 variables et un ensemble réduit de 36 variables. Le classement à 36 variables comprend les impédances transversales et les rapports d'impédance sans les groupes de basses fréquences inférieures à 7 kHz qui sont statistiquement moins significatives. La diminution du nombre de variable est rendue nécessaire à la fois pour des raisons de simplification d'utilisation du capteur industriel ainsi que pour la validité des analyses statistiques.

Il est à souligner que les performances de ce capteur sont particulièrement intéressantes dans une optique de tri puisqu'il permet d'obtenir d'excellents taux de classement, même avec un nombre de variables réduit et ce tous types de muscles confondus. Les muscles maturés et les muscles non maturés peuvent être ainsi triés avec un taux de réussite de plus de 85 %.

Tableau 1
RÉSULTATS DES CLASSEMENTS EFFECTUÉS AVEC LA SONDE À 20 ÉLECTRODES (EFFECTIF ET POURCENTAGE D'ÉCHANTILLONS BIEN CLASSÉS)

Sonde circulaire 20 électrodes	Nb d'observations	128 variables			36 variables		
		Maturé	Intermédiaire	Non maturé	Maturé	Intermédiaire	Non maturé
	312	135 (88 %)	92 (81 %)	40 (89 %)	115 (75 %)	73 (64 %)	34 (76 %)
	104				45 (88 %)	26 (68 %)	13 (87 %)



Photo 2. SONDE CIRCULAIRE COURONNE (TAILLE RÉELLE)

Sonde circulaire couronne

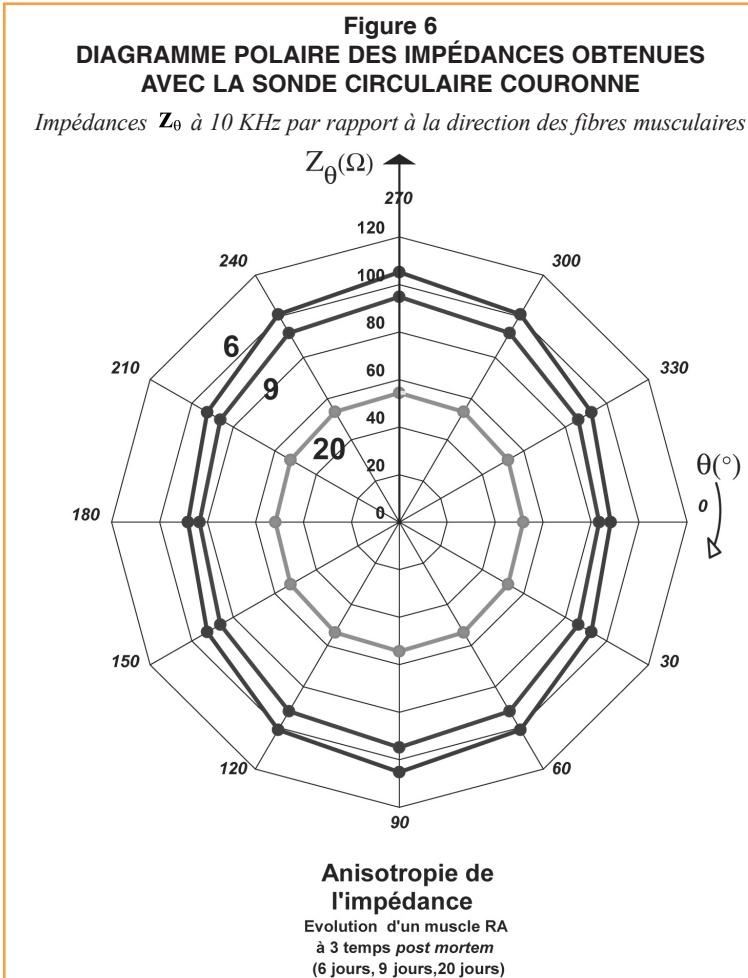
Cette sonde a été mise au point dans la même optique et avec les mêmes contraintes que la sonde à 20 électrodes. Son principal avantage est néanmoins d'être de plus petites dimensions (cylindre de 4 cm de diamètre par 5 cm de hauteur). Elle met en œuvre la méthode de mesure 4 points. Les 24 électrodes de mesures sont dorées, les électrodes d'injection de courant en forme de plot central et de couronne sont en laiton argenté, la plaque support d'électrodes est en isolant Téflon. Ce capteur permet, en une seule application, d'effectuer 12 mesures réparties tous les 30° suivant des directions radiales.

Comme dans le cas de la sonde circulaire 20 électrodes, les résultats de la mesure peuvent être représentés sur un diagramme polaire indiquant les valeurs des impédances suivant les directions radiales (figure 6).

Néanmoins l'évolution constatée avec cette sonde est nettement moins marquée qu'avec la sonde circulaire 20 électrodes aussi bien en ce qui concerne le rapport d'anisotropie que la différence des impédances maximum et minimum (impédance transversale et impédance longitudinale).

Les résultats statistiques obtenus à l'aide du logiciel SAS® établissant les relations avec les mesures de compression mécanique à 20 % de déformation concernant les muscles *Rectus Abdominus* (RA) et *Semitendinosus* (ST) sont présentés sur la figure 7.

La relation entre les mesures électriques avec cette sonde et les mesures mécaniques est moyennement marquée avec un $R^2 = 0,55$. Le résultat sur l'ensemble des muscles étudiés (RA, SM et ST) est médiocre ($R^2 = 0,35$), les résultats par type de



muscle étant par ailleurs satisfaisant excepté pour le *Semimembranosus* (RA $R^2 = 0,55$, SM $R^2 = 0,11$, ST $R^2 = 0,58$).

De la même manière que pour la sonde à 20 électrodes, les essais de tri en trois classes d'état de maturation ont été effectués à partir des données issues d'une base de données de 312 observations établie à partir de mesures effectuées sur les mêmes 104 muscles. Les classes préétablies à partir des mesures mécaniques sont de compositions identiques (153, 114 et 45 échantillons et 51, 38 et 15

muscles respectivement maturés, intermédiaires et non maturés).

Malgré de moins bons résultats concernant les corrélations entre mesures électriques et mesures mécaniques, cette sonde permet néanmoins un tri en trois classes de maturation avec de bonnes performances. Les bons classements avoisinent les 80 %, performances inférieures à la sonde circulaire à 20 électrodes, mais qui sont compensées par une utilisation plus aisée compte tenu des plus petites dimensions de la sonde et du caractère moins invasif des électrodes de mesure.

CONCLUSIONS

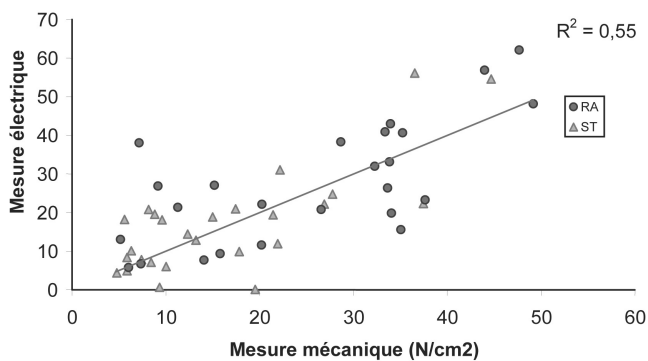
Ce projet a permis de mettre au point des capteurs répondant à des contraintes d'utilisations industrielles, et a débouché sur la réalisation de systèmes fiables de l'évaluation de l'anisotropie de l'impédance. Deux types de sondes circulaires ont été conçus et réalisés et leurs performances ont été évaluées. L'évaluation des capteurs s'est faite

sur deux critères qui sont leur aptitude à mesurer l'impédance de la viande et leur aptitude à déterminer l'état de maturation par la mesure de l'anisotropie de l'impédance. La sonde circulaire à 20 électrodes permet d'évaluer l'état de maturation avec une bonne corrélation ($R^2 \approx 0,80$) avec la méthode de référence de la contrainte mécanique à 20 % de déformation. Cette sonde permet d'effectuer un tri sur l'état de maturation des muscles

avec des résultats de bon classement proches de 90 %. La sonde circulaire couronne permet une moins bonne appréciation de l'état de maturation ($R^2 = 0,55$) et permet des tris en trois classes de maturation avec des performances de bon classement de l'ordre de 80 %.

L'ajout d'une électronique intégrée dans les capteurs permettant d'une part d'effectuer les mesures d'impédance et les commutations entre les électrodes, et d'autre part d'effectuer des calculs classiques afin d'obtenir un affichage de la mesure, devrait permettre dans un avenir proche la mise à disposition d'un appareillage assurant l'appréciation de l'état de maturation nécessaire à une meilleure gestion des stocks et une assurance de la qualité des produits distribués.

Figure 7
RELATION ENTRE MESURES ÉLECTRIQUES OBTENUES AVEC LA PETITE SONDE COURONNE ET MESURES DE LA RÉSISTANCE MÉCANIQUE *Rectus Abdominus* (RA) ET *Semitendinosus* (ST)



Remerciements

Cette étude a pu être réalisée grâce au soutien de L'Interbev et de L'Ofival et à l'aide technique de R. Favier et B. Dominguez.

Tableau 2
RÉSULTATS DES CLASSEMENTS EFFECTUÉS AVEC LA PETITE SONDE CIRCULAIRE COURONNE (EFFECTIF ET POURCENTAGE D'ÉCHANTILLONS BIEN CLASSÉS)

	Nb d'observations	128 variables			36 variables		
		Maturé	Intermédiaire	Non mûré	Maturé	Intermédiaire	Non mûré
Sonde circulaire	312	124 (81 %)	84 (74 %)	37 (82 %)	104 (68 %)	68 (60 %)	31 (69 %)
sonde circulaire couronne	104				37 (73 %)	30 (79 %)	13 (87 %)

BIBLIOGRAPHIE

- CHARPENTIER J., GOUTEFONGEA R., SALÉ P., THOMASSET A. (1972). La discrimination des viandes fraîches et congelées par mesure d'impédance à deux fréquences. Ann. Biol. Anim. Biochim. Biophys., 12, 173-178.
- CHIZZOLINI R., NOVELLI E., BADIANI A., ROSA P., DELBONO G. (1993). Objective measurements of pork quality: evaluation of various techniques. Meat Sci. 34 pp. 49-77.
- DAMEZ J. L., CLERJON S., ABOUELKARAM S. (2005). Mesostructure assessed by alternating current spectroscopy during meat ageing, 51st International Congress of Meat Science and Technology, 2005, Baltimore, August 7-12.
- FELBACQ D., CLERJON S., DAMEZ J. L., ZOLLA F. (2002). Modelling microwave electromagnetic field absorption in muscle tissues. Eur. Phys. J. AP.19: pp. 25-27.
- FRICKE H., MORSE S. (1924). A mathematical treatment of the electrical conductivity and capacity of disperse systems. I. The electric conductivity of a suspension of homogeneous spheroids. Phys Rev 24: 575-587
- KRISTENSEN L., PURSLOW P. (2001). The effect of ageing on the water-holding capacity of pork: role of cytoskeletal proteins, Meat Sci., 58: 17-23.
- LEPETIT J., BUFFIERE C. (1993). Comparaison de deux méthodes mécaniques de mesure de la résistance myofibrillaire de la viande crue. Sci. Aliments, 5, 521-540.
- LEPETIT J., HAMEL C. (1998). Correlations between successive measurements of myofibrillar resistance of raw longissimus dorsi muscle during ageing, Meat Sci., 49 (2): 249-254.
- LEPETIT J., SALÉ P., FAVIER R., DALLE R. (2002). Electrical impedance and tenderisation in bovine meat. Meat Sci. (60): 51-62.
- MAEL (Mesure de l'Anisotropie en Ligne) Logiciel déposé auprès de l'Agence pour la Protection des Programmes, avec l'aide de la Direction en charge de l'Innovation à l'Inra (DISI/UCPI) Logibox N°30617, N° 03-300009-00, IDDN.FR.001.300009.000.R.P.2003.000.10800 (2003).
- PLIQUETT F., PLIQUETT U., SCHÖNBERLEIN L., FREYWALD K. (1995). Impedanzmessungen zur Charakterisierung der Fleischbeschaffenheit. Fleischwirtschaft, 75 (4), 496-498.
- PURSLOW P. (2005). Intramuscular connective tissue and its role in meat quality, Meat Sci., 70, 435-447.
- SALÉ P. (1972). Appareil de détection des viandes décongelées par mesure de conductance électrique. Bulletin de l'Institut International du Froid, 2, 265-275.
- SALÉ P. (1976). The electrical impedance of meat. 11ème Congrès International d'Impédance Bioélectrique, 347-355.
- SWATLAND H.J. (1980). Anisotropy and post mortem changes in the electrical resistivity and capacitance of skeletal muscle. J.F. Anim Sci, 50 (1), 67-74.
- SWATLAND H.J. (1997). Observations on rheological, electrical, and optical changes during rigor development in pork and beef. J Anim Sci. Apr; 75 (4): 975-85.