

Novembre 2008
Compte rendu final n° 17 08 32 028
Département Techniques d'Élevage et Qualité
Service Qualité des Viandes
Caroline EVRAT-GEORGEL

Bibliographie critique des méthodes instrumentales de mesure de la tendreté de la viande bovine

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier d'Interbev et de l'Office de l'Élevage

collection résultats



Novembre 2008
Compte-rendu final provisoire n°170832028
Département Techniques d'Elevage et Qualité
Service Qualité des Viandes
Caroline EVRAT GEORGEL

Bibliographie critique des méthodes instrumentales de mesure de la tendreté de la viande bovine

Programme 2006

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier d'Interbev et de l'Office de l'Elevage

Collection Résultats

Sommaire

Sommaire	2
Résumé	4
Contexte et attendus	5
1 Méthodologie de l'étude	8
1.1 La tendreté, un paramètre complexe à apprécier du fait de sa nature	8
1.1.1 Qu'est-ce que la tendreté ?	8
1.1.2 Quelles sont les principales difficultés liées à la mesure de la tendreté ?	11
1.2 Mise au point de la grille d'évaluation des méthodes de mesure	17
1.2.1 Une grille de lecture des publications lues	17
1.2.2 Une grille d'évaluation des méthodes de mesure	18
1.3 Outils utilisés pour l'analyse critique des méthodes de mesure	23
1.3.1 Origine des informations sur les méthodes de mesure	23
1.3.2 Application de la grille d'évaluation des méthodes de mesure	25
2 Méthodes sensorielles	27
2.1 L'analyse sensorielle classique.....	27
2.1.1 Principe de l'analyse sensorielle.....	27
2.1.2 Performances de l'analyse sensorielle	30
2.1.3 Fiche synthétique de l'Analyse sensorielle classique	31
2.1.4 Perspectives	32
2.2 Les méthodes sensorielles temporelles.....	34
2.2.1 Principe des méthodes sensorielles temporelles.....	34
2.2.2 Performances des méthodes sensorielles temporelles	35
2.2.3 Fiche synthétique du time-intensité	38
2.2.4 Fiche synthétique de l'électromyographie	39
2.2.5 Perspectives	40
2.3 La pression du pouce.....	42
2.3.1 Principe de la pression du pouce.....	42
2.3.2 Performances de la pression du pouce	42
2.3.3 Fiche synthétique de la pression du pouce	43
2.3.4 Perspectives	44
3 Méthodes physiques	46
3.1 Mesure des forces de cisaillement.....	46
3.1.1 Principe de la mesure des forces de cisaillement.....	46
3.1.2 Performances de la mesure des forces de cisaillement	47
3.1.3 Fiche synthétique de la mesure des forces de cisaillement	52
3.1.4 Perspectives	54
3.2 Mesure des forces de compression	55
3.2.1 Principe de la mesure des forces de compression	55
3.2.2 Performances de la mesure des forces de compression.....	58
3.2.3 Fiche synthétique de la mesure des forces de compression.....	60
3.2.4 Perspectives	62
3.3 Les autres tests de mesures rhéologiques	63
3.3.1 Tests de mastication.....	63
3.3.2 Tests de pénétration	64
3.3.3 Tests de hachage et d'extrusion	64
3.3.4 Tests d'extension et de torsion	66

4	Méthodes physico-chimiques.....	69
4.1	Principe des méthodes spectroscopiques	69
4.1.1	La spectroscopie électromagnétique	69
4.1.2	Des mesures possibles sur tout le spectre électromagnétique	70
4.1.3	Expression des mesures spectroscopiques	71
4.2	Mesures spectroscopiques dans le visible et/ou le proche infrarouge.....	72
4.2.1	Performances des mesures spectroscopiques dans le visible et/ou le proche infrarouge.....	73
4.2.2	Fiche synthétique des mesures spectroscopiques dans le visible et le proche infra-rouge (VISNIR)	77
4.2.3	Fiche synthétique des mesures avec le QualitySpec® BT	79
4.2.4	Perspectives	82
4.3	La spectroscopie de fluorescence	83
4.3.1	Principe de la spectroscopie de fluorescence	83
4.3.2	Performances des mesures spectroscopiques de fluorescence	84
4.3.3	Fiche synthétique des mesures par spectroscopie de fluorescence	87
4.3.4	Fiche synthétique de la mesure par l'appareil modulaire de spectrofluorescence frontale ADIV - ENITAC	88
4.3.5	Perspectives	89
4.4	Impédance électrique.....	90
4.4.1	Principe de la mesure par impédance électrique.....	90
4.4.2	Performances de mesure par impédance électrique	90
4.4.3	Fiche de synthèse sur la mesure par impédance électrique	92
4.4.4	Perspectives	95
5	Méthodes explicatives.....	97
5.1	Dosage du collagène	97
5.1.1	Principe du dosage du collagène.....	97
5.1.2	Performances du dosage du collagène	98
5.1.3	Fiche de synthèse du dosage du collagène	100
5.1.4	Perspectives	101
5.2	Mesures sur les myofibrilles.....	102
5.2.1	Typage des fibres	102
5.2.2	Mesure de la taille des fibres	104
5.2.3	Mesure de la longueur des sarcomères	106
5.2.4	Perspectives	107
5.3	Dosage des enzymes impliquées dans la maturation.....	108
5.3.1	La maturation : un processus principalement enzymatique.....	108
5.3.2	Principe de la quantification des enzymes.....	109
5.3.3	Plusieurs enzymes identifiées dont l'implication reste encore mal connue	110
5.3.4	Perspectives	112
5.4	Génétique et génomique.....	113
5.4.1	De la génétique à la génomique, de quoi parle-t-on ?	113
5.4.2	Intérêts de la génomique pour la filière viande	113
5.4.3	Perspectives	115
5.5	Les autres méthodes	116
6	Discussion conclusive	118
	Bibliographie.....	123
	Annexes	137
	Table des Tableaux.....	151
	Table des Figures.....	153

Résumé

En viande bovine, la tendreté compte parmi les critères de qualité les plus importants pour le consommateur. Son impact commercial n'est plus à démontrer, et compte tenu de son énorme variabilité, il existe en France une forte demande pour mieux la maîtriser. Malgré les éléments déjà à la disposition des professionnels pour les aider dans ce sens, un problème demeure : la filière ne dispose pas d'outil simple et fiable permettant de mesurer la tendreté de la viande en temps réel. L'analyse sensorielle reste pour beaucoup LA méthode de référence. Elle présente néanmoins des inconvénients de taille ; c'est pourquoi de nombreux travaux ont été réalisés pour mettre au point des méthodes de mesure alternatives, sans que l'on sache vraiment quel est leur pertinence par rapport à l'analyse sensorielle. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail était de réaliser un état des lieux comparatif et critique des méthodes instrumentales de mesure de la tendreté disponibles à ce jour (niveau d'utilisation, précision, fiabilité, coût et facilité de mise en œuvre...).

Une grille d'évaluation critique des méthodes de mesure a été mise au point. Toutes les méthodes de mesure de la tendreté recensées au travers de la bibliographie ont été analysées selon cette grille, et l'ensemble des informations sont synthétisées par une fiche caractérisant la méthode, les conditions de sa mise en oeuvre, et la fiabilité du résultat donné par rapport à la référence qu'est l'analyse sensorielle.

Il existe 3 grandes catégories de méthodes de mesure : les méthodes sensorielles, les méthodes physiques et les méthodes physico-chimiques. Chacune présente des avantages et des inconvénients sur le plan pratique, et une capacité à évaluer la tendreté plus ou moins fiable. Sur ce dernier point, une quatrième catégorie de méthode est apparue au cours de ce travail : les méthodes dites explicatives de la tendreté, c'est-à-dire celles qui ne mesurent pas la tendreté en soi mais des facteurs indicateurs de tendreté. La confusion est fréquente dans les travaux de recherche.

Sans grande surprise, aucune méthode ne combine tous les atouts nécessaires pour envisager une mesure de la tendreté en temps réel. L'analyse sensorielle demeure à ce jour la méthode la plus complète pour évaluer la tendreté telle que perçue réellement par le consommateur. Cela dit, selon le contexte, certaines méthodes alternatives peuvent s'avérer opérationnelles. Les fiches synthétiques réalisées dans ce travail pour chaque méthode de mesure apportent l'ensemble des éléments permettant d'aider la filière à choisir en connaissance de cause la méthode de mesure de la tendreté la plus adaptée selon les objectifs recherchés (programme de R&D, démarches qualité, orientation des produits selon les circuits commerciaux...) et les moyens à sa disposition.

Contexte et attendus

La France est probablement un des pays où la tendreté constitue encore et toujours un des critères primordial de la qualité de la viande bovine, et ce pour plusieurs raisons :

- d'une part, contrairement à certains pays, la découpe bovine française est très élaborée et un maximum de muscles sont valorisés en « cuisson rapide », muscles sur lesquels le consommateur a l'attente la plus forte en terme de tendreté.
- d'autre part, il existe en France une forte tradition de consommation de la viande « en l'état », c'est-à-dire non transformée. En comparaison, les anglo-saxons consomment majoritairement des produits à base de viande (viandes hachées), de même que les allemands et les espagnols par exemple (charcuterie, saucisses), ou encore les italiens qui possèdent des modes de préparation pouvant se satisfaire d'une tendreté limitée (carpaccio).

De fait, étant donné l'impact commercial important de la tendreté, et compte tenu de son énorme variabilité, il existe naturellement en France une forte demande pour une meilleure maîtrise de la tendreté. Les opérateurs tentent de la gérer plutôt que de la subir, notamment au travers de démarches qualité. Pour ce faire, ils s'appuient sur un certain nombre d'éléments (durée de maturation, conditions de réfrigération...), fruits des dernières recherches menées dans ce domaine, qui sont synthétisés dans différents documents (« le point sur », rapports d'étude...) et codifiés au travers de normes ou de cahiers des charges spécifiques.

Mais au-delà de ces connaissances, probablement pas encore assez diffusées et exploitées, encore faut-il que les professionnels puissent déterminer le niveau de tendreté de leur produit ! En effet, la filière ne dispose pas d'outils de mesure simples et fiables permettant d'évaluer la tendreté de la viande en temps réel. En France, l'analyse sensorielle est encore considérée aujourd'hui comme la méthode de référence pour mesurer la tendreté de la viande bovine. Complète, elle présente cependant des inconvénients non négligeables : inutilisable sur le terrain et de grands effectifs, longue, coûteuse et complexe à mettre en œuvre, destructive... C'est pourquoi de nombreux laboratoires travaillent sur des méthodes de mesure alternatives.

Ainsi, selon les conditions, certaines équipes de recherche remplacent l'analyse sensorielle par des méthodes instrumentales, mais sans que l'on sache vraiment quelle est la pertinence de la méthode utilisée, et notamment son niveau de corrélation avec l'analyse sensorielle. De plus, au-delà de la technique utilisée, comme toute mesure instrumentale, la question de l'échantillonnage et de la représentativité de l'échantillon mesuré se pose. Ce point est particulièrement délicat étant donné l'hétérogénéité des animaux d'une part, mais également des muscles au sein d'une même carcasse, et même du site de prélèvement dans le muscle !

A ce jour il n'existe pas de document synthétique regroupant et comparant les diverses méthodes de mesure de la tendreté sur l'ensemble de leurs caractéristiques : niveau d'utilisation (muscle, carcasse...), précision, fiabilité, coût, facilité de mise en œuvre... Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de réaliser un état des lieux critique des méthodes de mesure instrumentales de la tendreté en les comparant si possible à la méthode de référence qu'est l'analyse sensorielle, voire à d'autres méthodes, notamment celles également prises communément pour référence.

La première partie de ce rapport présente les aspects méthodologiques du travail réalisé. Après avoir rapidement rappelé ce qu'est la tendreté et quelles sont les principales difficultés liées à sa mesure, cette partie détaille la grille d'évaluation des méthodes de mesure mise au point dans le cadre de ce travail. Cette grille pose l'ensemble des questions auxquelles il faut répondre pour caractériser précisément une méthode de mesure, sa mise en œuvre, et l'expression de son résultat, de façon à en avoir une vision globale et critique.

Les parties suivantes de ce rapport inventorient et analysent chaque méthode de mesure selon cette grille d'évaluation. Elles sont regroupées et présentées en 3 grandes catégories : les méthodes sensorielles, les méthodes physiques, et les méthodes physico-chimiques. Une quatrième catégorie traite certaines méthodes souvent mises en avant en tant que méthodes de mesure de la tendreté, mais qui mesurent en réalité des éléments indicateurs ou explicatifs de la tendreté et non la tendreté en soi.

Sauf cas particuliers, et notamment pour les méthodes traitées dans cette dernière partie, chaque méthode de mesure est présentée de la même façon : son principe est expliqué, une fiche récapitulative synthétise l'ensemble de ses caractéristiques, ses performances de mesure sont discutées, et enfin un dernier point donne un avis critique sur ce que la méthode peut apporter à la filière.

Cet inventaire critique permettra à la filière d'avoir une vue d'ensemble, synthétique, quasi exhaustive des méthodes disponibles à ce jour, avec leurs avantages et leurs inconvénients, de façon à pouvoir choisir la méthode la plus adéquate en fonction des conditions de mesure et de l'objectif recherché.

Méthodologie de l'étude

1 Méthodologie de l'étude

Avant de présenter la grille mise au point pour évaluer les méthodes de mesure répertoriées dans ce travail, il est important de préciser ce qu'est la tendreté et quelles sont les principales difficultés rencontrées lors de sa mesure.

1.1 *La tendreté, un paramètre complexe à apprécier du fait de sa nature*

1.1.1 Qu'est-ce que la tendreté ?

La **tendreté** correspond à une **somme de sensations perçues lors de la mastication**. Il peut s'agir de la facilité avec laquelle celle-ci se laisse trancher ou mastiquer, ou encore de la résistance qu'elle présente au tranchage ou à la mastication, on parle alors de **dureté**.

La tendreté peut être estimée par de nombreuses méthodes. Ces méthodes se réfèrent à différents paramètres qui caractérisent la tendreté d'une viande, dont les fondamentaux sont :

- le **paramètre structurel**, c'est-à-dire les composantes de la tendreté
- le **paramètre temporel**, c'est-à-dire l'évolution de la tendreté au cours du temps
- les **paramètres enzymatiques** et/ou **physico-chimiques**, qui interviennent pendant la phase de maturation.

Aujourd'hui, la méthode qui permet d'approcher au plus près l'ensemble des perceptions définissant la tendreté demeure **l'analyse sensorielle** par un jury de dégustation. Pour cette raison, elle est le plus souvent prise en référence pour le développement de méthodes d'appréciation instrumentales. En général, ces dernières sont basées sur des propriétés biochimiques ou mécaniques du muscle. Cela dit, certaines méthodes émergentes consistent à compiler le maximum de caractéristiques influant sur la tendreté pour estimer le « potentiel de tendreté global » du muscle.

1.1.1.1 *Deux composantes définissent la tendreté*

La tendreté est définie par 2 composantes : le **tissu conjonctif** et les **fibres musculaires**. Dans tous les muscles, quelles que soient leur forme, leur localisation ou leur fonction, les fibres musculaires (éléments contractiles) sont enveloppées dans le tissu conjonctif. Souple et à la fois très résistant, ce tissu se compose principalement de collagène.

Il existe 3 types de gaines conjonctives selon le niveau musculaire enveloppé (**Figure 1**) : l'endomysium entoure chaque fibre musculaire, le périmysium entoure chaque groupe de fibres musculaires, et l'épimysium enveloppe l'ensemble du muscle et elles se prolongent par les tendons.

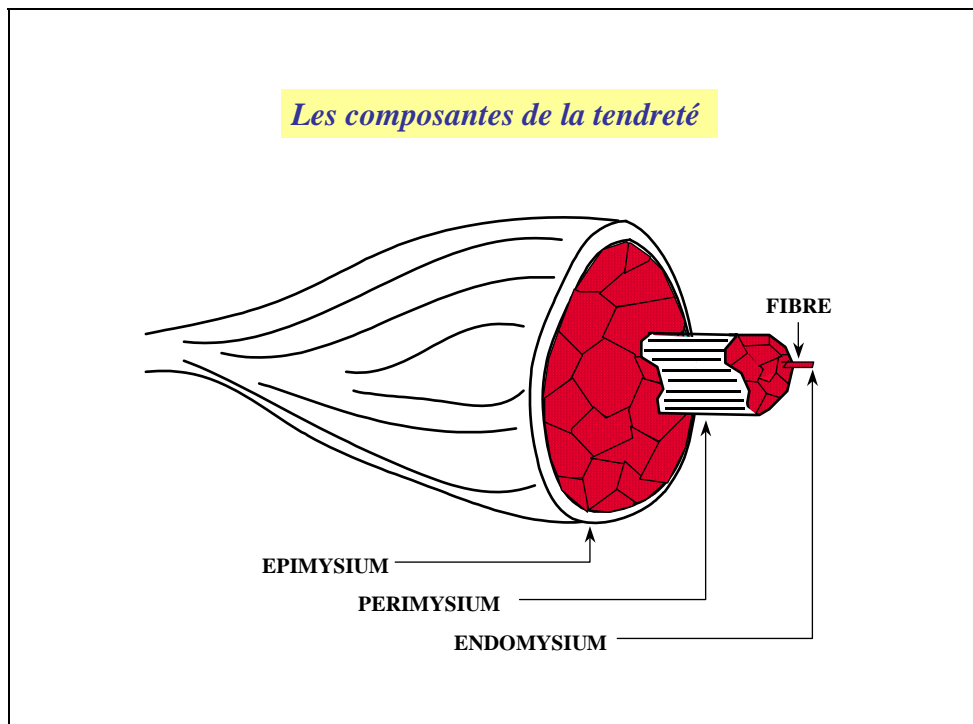


Figure 1 : Les composantes de la tendreté

1.1.1.2 La transformation du muscle en viande

1.1.1.2.1 Le rôle du collagène

Le collagène est une protéine extracellulaire fibreuse très résistante à la tension en raison de sa structure en triple hélice compacte. Cette hélice représente la molécule de collagène de base ; elle est formée de 3 chaînes polypeptidiques reliées entre elles par des liaisons covalentes et hydrogènes. Ces brins de base s'enroulent entre eux comme les ficelles d'un cordage pour donner des fibrilles de diamètres différents selon la nature du collagène. Des liaisons, dont le nombre et la nature sont variables, peuvent se former entre les fibres et les fibrilles : on parle de réticulation. Plus le degré de réticulation du collagène est important, plus les fibres et les fibrilles sont solidement ancrées les unes aux autres et donc plus la viande est dure. Au sein du tissu conjonctif, les structures collagéniques ne sont pas toutes identiques :

- pour l'endomysium, le collagène forme un feutrage dense de fibrilles,
- pour le périmysium, il forme un feutrage lâche permettant la cohésion entre les fibres musculaires,
- et pour l'épimysium, des fibres collagènes ondulées s'entrecroisent de façon à former une enveloppe continue autour des fibres musculaires.

De plus, par définition, plus la quantité de collagène est importante, plus la dureté de la viande est grande, quel que soit le degré de réticulation.

Après l'abattage de l'animal, la quantité et le degré de réticulation du collagène n'évoluent quasiment pas au cours du temps. Ainsi, le **collagène fixe uniquement la dureté de base de la viande**. Son taux définit la destination culinaire du morceau puisqu'il est dénaturé par la chaleur (la collagène dénaturé est appelé gélatine). Ainsi, les muscles qui contiennent peu de collagène sont à cuisson rapide tandis que ceux qui en contiennent beaucoup sont à cuisson lente.

1.1.1.2.2 Une évolution des fibres musculaires en 3 phases

Contrairement au collagène, les **fibres musculaires subissent de nombreuses transformations** après la mort de l'animal. Leur résistance se modifie différemment au cours des 3 états par lesquels le muscle passe (**Figure 2**).

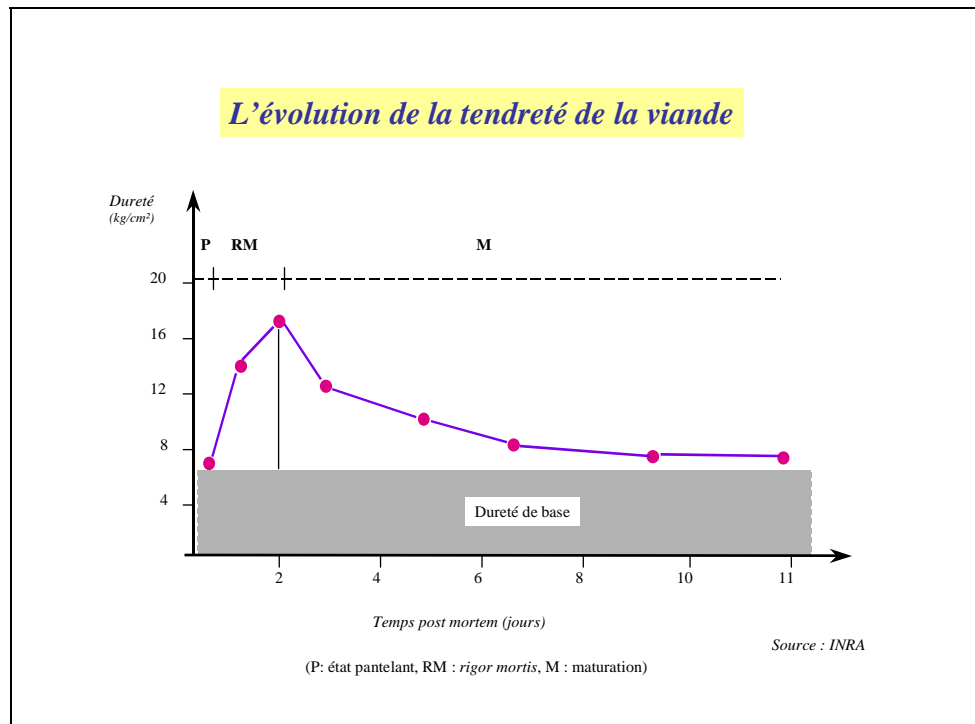


Figure 2 : Profil d'évolution de la dureté du muscle

▪ **L'état pantelant :**

Dans les secondes qui suivent l'abattage, les **muscles restent excitables** pendant une courte durée correspondant au temps de survie du système nerveux périphérique (environ 30 minutes pour les bovins). Durant cet état, encore mal connu et peu caractérisé, les muscles perdent progressivement leurs réserves d'énergie sous l'effet de contractions/relâchements successifs.

▪ **L'état rigide :**

C'est la phase d'installation de la rigidité cadavérique. Après l'abattage, le muscle se trouve privé d'oxygène du fait de l'arrêt de la circulation sanguine. La synthèse d'énergie (sous forme d'ATP¹) n'est donc plus assurée par la respiration mais seulement par voie anaérobie, la glycolyse, à partir des réserves en glycogène² du muscle. Cette synthèse est beaucoup moins efficace que la respiration, et la quantité de glycogène dans le muscle est limitée. Il y a donc diminution du taux d'ATP au sein du muscle, ce qui aboutit à sa rigidité progressive. En effet, c'est l'ATP qui permet au muscle de rester élastique : il est indispensable pour la contraction ou la relâche du muscle. Lorsque la totalité du stock d'ATP est épuisé, le muscle perd toutes ses propriétés d'élasticité, sa **dureté** est alors **maximale**. La glycolyse est accompagnée d'une acidification du muscle par hydrolyse d'ATP et production d'acide lactique pour conduire à un pH ultime moyen compris entre 5,4 et 6.

¹ Adénosine TriPhosphate : molécule emmagasinant et transportant l'énergie chez les organismes vivants.

² Le glycogène est la principale forme de stockage des glucides dans l'organisme.

La rigidité maximale et le pH ultime sont atteints en moyenne 24 à 48 heures après la mort de l'animal. De nature enzymatique, ces processus dépendent :

- de la vitesse d'hydrolyse de l'ATP, qui règle la vitesse de chute du pH,
- du niveau des réserves énergétiques de l'animal au moment de la mort,
- des conditions de réfrigération des carcasses dans les 24 à 36 heures post-abattage.

▪ **L'état mûri :**

C'est la phase d'**augmentation de la tendreté** de la viande *via* la modification de la structure des fibres musculaires. Cette étape commence dès la mort de l'animal et les conditions d'installation de la rigidité cadavérique sont déterminantes pour le bon déroulement de la maturation. Les problèmes de contracture au froid³ notamment portent préjudice à la tendreté de manière irréversible, quelle que soit la durée de maturation du muscle.

Les fibres musculaires sont altérées par des enzymes protéolytiques endogènes. Plusieurs systèmes enzymatiques plus ou moins connus seraient en jeux, et notamment le couple calpaïnes/calpastatine (enzyme/inhibiteur).

La maturation peut se caractériser par 2 paramètres, sa vitesse et son intensité, qui vont dépendre de l'activité des systèmes enzymatiques impliqués. Cette activité est influencée par des facteurs biologiques (type de muscle, teneur en protéinases...) et technologiques (réfrigération, stimulation électrique...).

1.1.1.3 La maturation des viandes

Le processus de maturation des viandes est principalement le résultat de mécanismes enzymatiques. Aujourd'hui, plusieurs systèmes enzymatiques sont plus ou moins connus au niveau du tissu musculaire pour agir conjointement sur la maturation :

- parmi les cathepsines, protéases lysosomiales, le couple calpaïnes/calpastatine est bien connu. Les calpaïnes sont des protéases calcium dépendantes actives à pH neutre. D'autres cathepsines (B, D, L et H) sont actives mais à des pH plus acides compris entre 4 et 6.
- les sérines protéases, sur lesquelles les résultats sont plus mitigés.
- le protéasome, complexe multicatalytique encore à l'étude, à l'INRA notamment.

L'activité de ces systèmes enzymatiques dépend de la température, ainsi que de la vitesse et l'amplitude de chute du pH.

1.1.2 Quelles sont les principales difficultés liées à la mesure de la tendreté ?

La mesure de la tendreté est un enjeu commercial important : le consommateur attend que la viande qu'il achète soit tendre de façon régulière et homogène dans le temps. Or, cet objectif est encore difficile à atteindre pleinement sur les étals. En effet, pour y parvenir, encore faut-il que les professionnels puissent déterminer le niveau de tendreté de la viande qu'ils commercialisent !

³ On parle de contracture au froid lorsque le muscle est réfrigéré trop brutalement avant que ses réserves en énergie soient suffisamment épuisées (température du muscle inférieure à 10°C alors que le pH est encore supérieur à 6. Dans ce cas, le muscle se contracte sous l'effet du froid intense et il entre en rigidité cadavérique à l'état contracté.

1.1.2.1 La première difficulté : la nature même du produit à mesurer

Quelle que soit la technique de mesure utilisée, l'estimation de la tendreté d'une viande est rendue délicate en raison de la nature même du produit. En effet, même lorsque le protocole de mesure est standardisé (ce qui est rarement le cas entre les différentes équipes de recherche), les différences intervenant dans le protocole d'étude dans sa globalité peuvent induire des biais non négligeables dus aux caractéristiques de la viande, et notamment le fait :

- qu'il existe une très grande variabilité individuelle : dans ce cas, comment choisir les animaux à mesurer (quels animaux, combien...) ?
- qu'il s'agisse d'un produit éminemment hétérogène : il existe plus de 200 muscles dans une carcasse bovine, le ou lesquels choisir pour tester un animal de façon à ce qu'il(s) soi(en)t représentatif(s) de l'ensemble de la carcasse ? On observe cette hétérogénéité également au sein d'un même muscle, alors quelle partie choisir ?
- qu'il s'agisse d'un produit évolutif, et très périssable : comment gérer les conditions de prélèvement, de maturation, et de conservation ?
- qu'il y ait un passage obligatoire par une étape de découpe (sauf exception), et même de cuisson pour certaines méthodes de mesure : lesquelles choisir, et comment les maîtriser ?

Toutes les équipes de recherche se posent ces questions lorsqu'elles construisent leur protocole d'étude. Mais, évidemment, chaque équipe choisit les éléments qui correspondent le mieux à son objectif et à son contexte. Or, selon les pays, le contexte peut être très différent (types d'animaux, type de découpe, circuits de commercialisation, habitudes de cuisson, attentes consommateurs...), ce qui explique la grande variabilité des protocoles d'étude mis en œuvre d'une équipe à l'autre, et rend d'autant plus difficile la comparaison des résultats entre eux.

1.1.2.2 L'échantillonnage : un point délicat

Quels que soient la méthode de mesure et le paramètre mesuré, l'échantillonnage est un point très important. Ce point est particulièrement délicat dans le cas de la mesure de la tendreté étant donné son énorme variabilité entre animaux, entre muscles, et même au sein d'un même muscle !

Ainsi, des différences au niveau de l'échantillonnage peuvent faire apparaître des performances de mesure très différentes pour une même méthode. En effet, très logiquement, plus les modalités étudiées sont éloignées en terme de tendreté (muscle bien mûré vs muscle non mûré par exemple), plus il est facile de discerner ces différences *via* une mesure, quelle que soit cette mesure. De fait, dans la plupart des études, les forts coefficients de corrélation observés entre la méthode de mesure testée et celle prise pour référence sont en partie expliqués par ce phénomène. A l'inverse, il n'est pas surprenant d'obtenir des corrélations faibles lorsque les modalités étudiées sont très proches (cas de l'étude Qualvigène par exemple). Il est donc important de relativiser ces performances, notamment au travers des effectifs mesurés : plus ils sont importants, plus les résultats sont fiables car représentatifs de l'ensemble d'une population.

Au delà des types d'animaux testés, le choix du ou des sites de mesure est également à prendre en compte. En effet, une mesure sur un muscle présage difficilement de la tendreté de l'ensemble des muscles de la carcasse. Pour exemple, la relation entre les forces de cisaillement mesurées sur le long dorsal et celles mesurées sur d'autres muscles de la carcasse est faible ($r = -0,03$ à $0,56$) (SHACKELFORD et al, 1995). On peut alors douter de la précision de l'estimation globale de la tendreté d'une bête à partir d'une mesure exercée sur un seul muscle. Ce jugement est d'autant plus discutable qu'il est pratiqué dans quasiment tous les cas sur le long dorsal, muscle certes de référence mais généralement

tendre quel que soit l'animal, ce qui ne facilite pas l'identification des variations de tendreté. Il s'agit également d'un des muscles les plus sensibles à la contracture au froid, ce qui peut fausser le résultat. Toutes les méthodes d'évaluation de la tendreté ou de la maturation basées sur la mesure d'un seul muscle sont donc à relativiser pour rendre compte de la tendreté d'ensemble d'une carcasse.

1.1.2.3 Des performances analytiques dépendantes du protocole

Dans une étude, au-delà de l'expérimentation mise en œuvre (choix des éventuels facteurs de variation, des animaux, des muscles...), la façon de réaliser le protocole de mesure peut largement influencer les performances de la méthode et les résultats obtenus. Plusieurs paramètres sont particulièrement importants, dont notamment :

▪ Les caractéristiques techniques de la méthode

Pour une même méthode de mesure, il peut exister une multitude de choix techniques de mise en œuvre qui vont modifier, parfois de façon importante, les résultats des mesures réalisées. Pour exemple, ces différences peuvent notamment porter sur :

- le nombre de dégustateurs et/ou l'échelle de notation dans le cas de l'analyse sensorielle,
- les dimensions de la lame ou du piston, ou les caractéristiques de la force appliquée (vitesse de cisaillement ou intensité de compression) dans le cas de méthodes de mesure physiques,
- le diamètre de la sonde de mesure, les longueurs d'onde auxquelles sont soumis les échantillons, ou encore le nombre d'observations moyennées dans le cas de méthodes spectroscopiques...

▪ La préparation des échantillons

Il existe certaines méthodes de mesure pour lesquelles la préparation des échantillons est primordiale sur les performances de mesure. L'exemple des mesures des forces de cisaillement ou de compression est assez caractéristique puisque les résultats dépendent énormément de l'orientation des fibres musculaires. L'état de la surface du muscle mesuré ou la congélation des échantillons peuvent également avoir un impact non négligeable, c'est le cas par exemple des techniques de mesure faisant intervenir la spectroscopie. La température initiale des échantillons, et en particulier leurs conditions et leur temps de décongélation dans le cas d'une congélation, peuvent également modifier la tendreté de la viande et donc sa mesure (MOODY et al, 1978 ; HOSTETLER, 1982 ; BERRY et LEDDY, 1990).

Mais une des sources majeures de variation des performances de mesure d'une méthode est la cuisson des échantillons. En effet, les processus de cuisson diffèrent largement d'une étude à l'autre et il est reconnu que la cuisson joue sur la tendreté de la viande. Aux Etats-Unis, de plus en plus d'équipes de recherche suivent les recommandations du AMSA (AMSA, 1995) qui préconise une cuisson de la viande à 71°C avec une plaque électrique de type Faberware. Cependant, ce choix est loin de faire l'unanimité. En France, il n'y a pas de protocole de cuisson normalisé. De plus, nos habitudes de cuisson ne cadrent pas avec celles de la majorité des autres pays qui consomment la viande beaucoup plus cuite que nous. Pour exemple, notre modalité « saignante » correspond à une température à cœur de 57°C contre plus de 65°C dans la majorité des autres pays.

La cuisson est un des paramètres qui peut induire de fortes différences en terme de tendreté entre les échantillons au sein d'une même étude. A l'image des problèmes d'échantillonnage soulevés précédemment, les différents degrés de cuisson testés vont alors jouer sur la qualité des performances de la méthode de mesure : plus les modalités étudiées sont éloignées, plus les corrélations sont faciles à mettre en évidence.

▪ **Le nombre et la qualité des répétitions par échantillon**

Le degré de précision d'une méthode de mesure, qu'elle soit instrumentale ou sensorielle, peut varier selon plusieurs facteurs. Comme nous l'avons déjà dit, il peut s'agir de l'échantillonnage, du modèle expérimental et/ou instrumental, de l'absence de standardisation des paramètres expérimentaux, ou encore de l'interprétation des résultats. Or, dans toute mesure instrumentale, on décide au préalable le niveau de précision désiré et la variabilité du produit testé permet théoriquement de déterminer le nombre de mesures nécessaires pour obtenir cette précision. Ce n'est pas aussi simple dans le cas de la mesure de la tendreté de la viande, étant donné son importante variabilité et le grand nombre de facteurs de variation pouvant intervenir. C'est pourquoi pour bon nombre d'instruments de mesure, un certain nombre de répétitions est nécessaire. En l'absence de protocole de mesure standard, les chercheurs définissent le nombre de répétitions à faire selon la précision souhaitée, en regard du rapport gain de précision/contrainte pratique qu'implique la réalisation de chaque répétition supplémentaire. Pour une même méthode, on observe ainsi un nombre de répétition très différent d'un protocole à un autre, ce qui joue inévitablement sur les performances de mesure de la méthode.

1.1.2.4 La calibration : un passage obligé et complexe pour les méthodes de mesures indirectes

La phase de calibration est un passage obligé pour toutes les méthodes de mesure indirectes de la tendreté ou de la maturation. Elle consiste à régler l'instrument de mesure par rapport à des données de référence (note de tendreté par exemple) de façon à ce que le paramètre indirect mesuré par l'appareil puisse exprimer le paramètre directement recherché, c'est-à-dire la tendreté ou l'état de maturation. La calibration est souvent le problème majeur avec les méthodes de mesure indirectes, et ce pour plusieurs raisons :

- Les modèles prédictifs sont obtenus dans un contexte spécifique qui est souvent difficilement transposable au contexte français (animaux différents, impossibilité de prendre la mesure dans les mêmes conditions...).
- Les conditions d'obtention des modèles prédictifs ne sont pas toujours très claires, notamment en ce qui concerne les traitements statistiques mis en œuvre. Par conséquent, il y a toujours une incertitude quant à la validité du modèle dans d'autres circonstances (gammes de tendreté différentes par exemple).
- Les modèles prédictifs sont parfois développés à partir d'un effectif animal trop faible pour être représentatif de la variabilité de la population animale bovine, quelle que soit cette population.
- Par définition, la calibration permet de prédire la tendreté à partir de la mesure d'un autre paramètre. Cependant, la tendreté est une caractéristique qualitative qui résulte d'une multitude de critères. A ce jour, aucun critère unique ne peut expliquer à lui seul l'intégralité de la variabilité de la tendreté.
- La méthode prise comme référence pour calibrer les appareils n'est pas toujours la même d'une étude à l'autre ; et même lorsque les méthodes prises pour référence sont similaires, elles ne sont pas forcément comparables. Beaucoup d'études calibrent leurs appareils par rapport à des mesures de cisaillement selon Warner-Bratzler, notamment dans les pays anglo-saxons. En France, les méthodes de référence sont plutôt l'analyse sensorielle ou la mesure de compression selon la méthode INRA.

- L'estimation de la qualité de la prédiction se fait par l'intermédiaire d'un critère définissant la qualité de la prédiction. Le critère le plus juste à considérer est le R^2 qui exprime la part de variabilité de la tendreté expliquée par le paramètre mesuré par l'appareil. Dans les études, c'est souvent le coefficient de corrélation r (racine du R^2) qui est présenté, ce qui porte souvent à confusion. Parfois, le critère de qualité de la prédiction est un pourcentage de bien classé selon des classes définies par l'auteur.

1.1.2.5 Importance du référentiel choisi, en sensoriel comme en instrumental

1.1.2.5.1 Des différences de goûts entre les pays

Au-delà des importantes différences pouvant exister entre les protocoles mis en œuvre d'un pays à l'autre, une des difficultés principales des méthodes sensorielles réside dans la différence d'appréciation des dégustateurs. En effet, les habitudes et goûts alimentaires sont spécifiques de chaque culture ; ainsi, à conditions égales, une population ne jugera pas de la même manière la tendreté qu'une autre population.

En matière de préférences, la France fait office d'exception en raison de l'importante consommation de viande peu cuite, voire crue. En effet, la cuisson « bleue » telle que nous la pratiquons est quasi inexistante dans la plupart des autres pays, et la cuisson « saignante » trouve rarement sont équivalent dans les autres pays consommateurs de viande (une cuisson « saignante » à l'étranger équivaut généralement à notre cuisson « à point »).

Un dégustateur non habitué à consommé de la viande peu cuite, ou inversement trop cuite, peut avoir des difficultés à la juger, peut inconsciemment changer son comportement masticatoire, ou encore moins bien noter les échantillons correspondants, tous ces éléments induisant des biais dans l'évaluation de la tendreté du morceau.

Les préférences individuelles font parties des biais potentiels existant lors d'une analyse sensorielle ; cela dit, elles sont gommées à l'échelle du jury et c'est pourquoi l'outil de mesure n'est pas l'individu mais le jury dans son ensemble. Par contre, entre 2 jurys de populations différentes, ces préférences peuvent induire un réel biais si l'on veut comparer les résultats entre eux. C'est notamment pour cette raison que de nombreux travaux étudiant l'effet d'un même facteur sur la tendreté font apparaître des conclusions contradictoires.

1.1.2.5.2 Nécessité de définir des seuils d'acceptabilité par le consommateur

La majorité des méthodes de mesure donnent un résultat relatif, c'est-à-dire qu'il n'a un sens que s'il est positionné par rapport à un autre résultat. La conversion d'un tel résultat *via* la calibration mise au point pour obtenir le paramètre directement recherché (tendreté ou état de maturation) permet d'obtenir un résultat absolu, c'est-à-dire qui possède un sens même considéré individuellement, tel qu'une note de tendreté par exemple. Même dans ce cas, il faut savoir comment se situe ce résultat par rapport aux attentes consommateur pour envisager un classement des muscles selon leur niveau de tendreté. Ainsi, en sensoriel comme en instrumental, il faut pouvoir relier le résultat d'une méthode de mesure aux attentes des consommateurs. Dans cet objectif, divers chercheurs ont tenté de définir des seuils marquant la limite entre les différents niveaux de tendreté acceptables par le consommateur. Ces seuils sont établis en reliant les résultats de la méthode de mesure étudiée à ceux de la méthode prise pour référence et dont le résultat peut avoir une interprétation concrète en terme d'attente consommateur, c'est-à-dire à l'analyse sensorielle.

Ainsi, un grand nombre d'études ont mis en relation les résultats d'analyses sensorielles aux forces de cisaillement mesurées selon Warner-Bratzler, cette dernière étant la méthode instrumentale la plus souvent prise pour référence. Les seuils fixés pour séparer les différentes classes de tendreté sont variables d'une étude à l'autre, selon les éléments considérés acceptables par les auteurs. Par exemple, considérant qu'une note sensorielle de 5/8 est suffisante pour avoir des muscles « plutôt tendres », SHACKELFORD et al (1991) ont fixé ce seuil à 4,6 kg. Pour d'autres auteurs (WHEELER et al, 1997b), la variabilité des dégustateurs oblige une segmentation en plusieurs classes de tendreté.

Cependant, au-delà des résultats techniques, le nombre et les valeurs seuils définissant les classes de tendreté sont à raisonner en fonction de comment seront utilisées ces classes. L'aspect économique doit ainsi rentrer en ligne de compte. C'est le choix qui a été fait pour définir le seuil de tendreté acceptable pour une mesure réalisée avec le QualitySpect® BT⁴ : 80% des carcasses présentent une force de cisaillement inférieure à ce seuil ; ainsi 20% des carcasses les plus dures sont écartées et les 80% restantes sont commercialisées sous un label de type « tendreté assurée » (SHACKELFORD, 2005).

Ce type d'approche est particulièrement intéressant mais encore difficilement applicable dans l'état actuel. En effet, il faut avoir l'assurance que les mesures de cisaillement sont comparables d'une institution à l'autre, ce qui n'est pas nécessairement le cas. D'autre part, ces seuils sont établis selon certaines conditions dépendantes de l'analyse sensorielle mise en œuvre (notamment variabilité des échantillons présentés, échelle de notation et types de cuisson) et des goûts consommateurs, différents selon la culture. Or, à l'image de l'étude de HUFFMAN et al (1996), les travaux menés jusqu'à présent restent de portée limitée (petits échantillonnages de viande, nombre de dégustateurs faible et sans diversité géographique, un seul type de cuisson testé...).

Le système MSA (Meat Standards Australia), mis en place depuis 1996 en Australie afin de prédire et de garantir la qualité sensorielle de la viande bovine pour les consommateurs, est basé sur ce principe de seuils. D'importants tests de dégustation ont été mis en place de façon à mettre en relation 4 niveaux de tendreté affectés par les consommateurs avec divers critères pré et post-abattage. Dix d'entre eux se sont révélés les plus explicatifs et pour chacun de ces critères des seuils d'acceptabilité ont été définis pour que la carcasse puisse être classée dans un des 4 niveaux de tendreté assurée MSA. Cela dit, encore une fois, ces seuils sont pour le moment spécifiquement adaptés au contexte australien. Pour exemple, pour intégrer une classification dans le système MSA, les animaux doivent posséder un pourcentage minimum de *bos indicus* dans leur type racial car ce paramètre aurait un effet non négligeable sur la tendreté de la viande. Or, aucun type racial élevé en France ne possède cette caractéristique ; aucun animal français ne pourrait alors prétendre à une classification selon le système MSA tel que mis au point pour les Australiens.

⁴ Appareil de mesure spectroscopique en fonctionnement aux Etats-Unis (détaillé dans la partie sur les méthodes de mesure physico-chimiques).

1.2 Mise au point de la grille d'évaluation des méthodes de mesure

Un préalable important à ce travail a consisté à mettre au point une méthode d'évaluation des méthodes de mesure. En effet, étant donné la masse des travaux issus de la recherche bibliographique, ainsi que la diversité des méthodes de mesure de la tendreté de la viande bovine, il était préférable de se doter d'un outil formalisé pour récolter l'ensemble des informations nécessaires pour caractériser chaque méthode tout en ayant un œil critique.

Ce document a été réalisé en consultation avec des experts de la tendreté et/ou des méthodes de mesure, de façon à s'assurer de sa pertinence et que l'intégralité des informations intéressantes a été prise en compte. Ce document, dont la version synthétique est disponible en **Annexe 1**, se divise en 2 parties détaillées ci-après.

1.2.1 Une grille de lecture des publications lues

La première partie du document est une grille de lecture des publications. Remplie pour chaque source consultée, elle permet de retenir l'essentiel concernant le ou les essais réalisés dans la publication, de façon à caractériser au mieux la fiabilité des résultats obtenus avec telle ou telle méthode de mesure de la tendreté utilisée. En effet, pour garder un œil critique sur chaque méthode de mesure il est essentiel de savoir dans quelles conditions les résultats ont été obtenus avec chaque méthode.

Cette grille comporte 4 parties :

- Une partie destinée à **caractériser la source bibliographique** mentionnant :
 - le titre de la publication,
 - le ou les auteurs de l'étude,
 - la date, la revue et le pays de publication,
 - le ou les produits concernés dans l'étude (bovin, ovin...).
- Une partie destinée à **caractériser l'essai réalisé** permettant de relever :
 - les méthodes de mesure comparées dans l'essai : la ou les méthode(s) de mesure testée(s) et la méthode de référence prise en comparaison.
 - les animaux et effectifs : ensemble des caractéristiques des animaux considérés dans l'essai (catégorie, race, âge...) et nombre par lot.
 - le ou les muscles et effectifs : ensemble des caractéristiques des muscles mesurés dans l'essai (type de muscle, partie prélevée...) et nombre par carcasse.
 - le moment de réalisation de la mesure : délai entre le prélèvement de viande et la mesure (temps de maturation si viande maturée, temps de congélation si viande congelée...)
 - la méthodologie de l'essai : protocole détaillé de l'essai réalisé, description des diverses modalités comparées (différents degrés de cuisson par exemple)...
- Une partie destinée à **caractériser les résultats obtenus** au travers :
 - des méthodes statistiques mises en œuvre,
 - des résultats en tant que tels (coefficients de corrélation, concordances...).
- Et une partie permettant éventuellement d'émettre certaines **critiques** sur l'essai réalisé en identifiant ses avantages et ses inconvénients.

1.2.2 Une grille d'évaluation des méthodes de mesure

La seconde partie du document est la grille d'évaluation des méthodes de mesure. Cette grille regroupe l'ensemble des informations permettant de caractériser pleinement une méthode de mesure en compilant les données issues de chaque publication consultée se rapportant à la méthode en question. Dans ce travail, toutes les méthodes de mesure de la tendreté ont été évaluées sur la base de cette grille, déclinée en 4 parties.

Dans l'idéal, chaque méthode de mesure devrait être comparée à la méthode de référence choisie, à savoir l'analyse sensorielle. Cependant, l'information est souvent absente car de nombreuses équipes de recherches ont choisi d'autres méthodes pour référence dans leurs travaux, notamment les mesures de compression ou de cisaillement. Par ailleurs, même lorsqu'une analyse sensorielle est réalisée, les différences de protocole sont telles que la comparaison des résultats entre eux n'est pas aisée. C'est pourquoi chaque méthode de mesure a également été comparée aux autres méthodes prises en référence dans les travaux consultés.

1.2.2.1 Caractérisation de la méthode de mesure évaluée

La première partie de la grille d'évaluation permet de **caractériser la méthode de mesure** au travers des éléments suivants :

- Le **nom** et le **principe** de la méthode de mesure
- Le **critère qui est mesuré** : s'agit-il d'un élément physique (énergie de compression d'un échantillon de viande par exemple), ou chimique (collagène par exemple), ou autre ?
- La ou les **composante(s) de la tendreté évaluée(s)** : comme expliqué dans la première partie (§ 1.2), la tendreté dépend de 2 composantes. La méthode permet-elle d'évaluer la composante conjonctive, musculaire ou les 2 simultanément ?
- Le **type de méthode** : étant donné les 2 composantes qui déterminent la tendreté et les évolutions qui ont lieu dans le muscle, de l'abattage à sa consommation, on distingue 2 grands types de méthodes. Il y a celles permettant de **mesurer la tendreté** de la viande en tant que telle, et celles permettant de **mesurer le niveau de maturation** de la viande. Bien que la nuance entre les 2 ne soit pas toujours évidente, il est important de faire la distinction entre ces 2 types d'approche puisque maturation ne signifie pas forcément tendre et vice-versa. En effet, un morceau maturé peut demeurer dur et à l'inverse un morceau non maturé peut être très tendre. Pour exemple, un rond de gîte (muscle à cuisson lente) même maturé 14 jours sera toujours plus dur qu'un filet (muscle à cuisson rapide) n'ayant subi aucune maturation.
- Le caractère **direct ou indirect** de la méthode : la méthode permet-elle de mesurer directement le critère de qualité initialement recherché (la tendreté ou le niveau de maturation) ou à l'inverse de mesurer une autre caractéristique utilisée comme un indicateur du critère recherché (mesure de spectroscopie par exemple).
- Les **caractéristiques techniques** de la méthode : s'agit-il d'une méthode de mesure réalisée grâce à un appareil (le texturomètre par exemple) ou grâce à une analyse (jugement sensoriel ou dosage chimique par exemple) ? Dans le cas des méthodes instrumentales, il est important de détailler certains points :
 - **la portabilité** : l'outil de mesure est-il portable ou non ?
 - **l'encombrement** : l'outil de mesure est-il volumineux, lourd... ou non ?

- **la résistance** : l'outil est-il sensible à des conditions de mesure particulières (température, humidité...) ?
- **l'automatisation** : l'outil permet-il de prendre la mesure automatiquement ou nécessite-t-il l'intervention d'un ou plusieurs opérateurs ?
- Le **coût** de la méthode de mesure : s'agit-il d'une méthode chère ou non ? Ce point doit être raisonné en terme de coût global, incluant une estimation de l'investissement initial et des frais de fonctionnement (achat du matériel, coûts de mise en œuvre, coûts liés aux prélèvements de viande...).

1.2.2.2 Conditions de mise en œuvre de la méthode de mesure évaluée

La seconde partie de la grille d'évaluation concerne les **conditions de mise en œuvre de la méthode de mesure**. On distingue 3 niveaux d'information indispensables pour définir le degré « d'opérationnabilité » de la méthode :

- **Le niveau d'application de la méthode de mesure**

La question qui se pose de prime abord est celle du **lieu** dans lequel il est envisageable d'utiliser la méthode : est-elle ou pourrait-elle être applicable sur le terrain, par exemple en routine dans une structure d'abattage, ou est-elle uniquement adaptée pour une utilisation en laboratoire ?

Ensuite, la question concerne **l'échantillon** sur lequel la mesure est réalisée : est-elle pratiquée sur l'animal vivant, la carcasse entière, ou un muscle après découpe ? Dans ce cas, la mesure est-elle possible et fiable sur tous les types de muscles et/ou parties musculaires, ou seulement sur certains ? Enfin, quelles doivent être les caractéristiques des échantillons en terme de taille, de poids, de forme, de volume... ?

- **L'état de l'échantillon mesuré**

Dans le cas où la mesure nécessite un prélèvement de viande, la méthode peut obliger une certaine **préparation de l'échantillon** préalablement à la mesure : l'échantillon doit-il être découpé ou broyé suivant des recommandations particulières, doit-il être cuit, ou alors est-il mesuré « en l'état » ? De plus, il est parfois plus facile de congeler les échantillons de façon à les conserver au mieux entre le prélèvement et la mesure de tendreté (notamment dans le cas d'analyse sensorielle par exemple). Or, la **congélation** pourrait avoir un impact négatif sur la fiabilité de la mesure pour certaines méthodes ; une nouvelle question concernant l'état de l'échantillon se pose : est-il possible de congeler les échantillons ou doivent-ils être analysés impérativement en frais ?

- **La mise en œuvre de la méthode de mesure**

A ce niveau, il est important de détailler les points suivants :

- le **décal entre le prélèvement et la mesure** : pour être fiable et pertinente la méthode implique-t-elle un délai minimum ou maximum à respecter entre le prélèvement de l'échantillon et la mesure ?
- les **conditions de prélèvement et/ou de préparation des échantillons** : la méthode implique-t-elle des étapes spécifiques ?
- le **caractère destructif ou non** de la méthode : une fois appliquée sur le matériau (l'échantillon servant pour la mesure), l'outil de mesure peut-il être utilisé une seconde fois sur le même matériau, ou non ? Si non, il est intéressant de déterminer le « niveau de destruction » de la méthode en considérant notamment le lieu de prélèvement et la quantité à prélever. En effet, une méthode nécessitant par exemple

1 Kg de filet sera bien moins intéressante qu'une méthode évaluant la tendreté sur 100 g de rond de gîte.

- le niveau de **facilité de mise en œuvre** de la méthode : la facilité de chaque étape constituant la mesure entre en jeu, soit :
 - la facilité d'installation ou de mise en place de la méthode de mesure (avec considération du coût s'il y avait des adaptations à réaliser ou réalisables),
 - la facilité de récupération ou d'accessibilité des échantillons à mesurer,
 - la facilité de préparation des échantillons,
 - puis la facilité de réalisation de la mesure (utilisation par un opérateur ou adaptations à réaliser pour l'automatisation de la mesure).
- la **durée de la mesure**, c'est-à-dire le temps nécessaire pour réaliser la mesure
- le **décali de réponse de la mesure**, c'est-à-dire le temps nécessaire pour disposer du résultat de la mesure
- le **nombre de répétitions**, soit le nombre de mesures minimum à prendre pour 1 échantillon permettant d'assurer une bonne fiabilité du résultat pour l'échantillon considéré.
- la **dangerosité de la méthode** : la mise en œuvre de la mesure implique-t-elle des manipulations à risque ?
- le **caractère multi-usage** de la méthode, c'est-à-dire si elle permet de mesurer, simultanément à la tendreté, d'autres paramètres de qualité de la viande (par exemple la couleur, le taux de lipides...).

1.2.2.3 Caractérisation du résultat

La troisième partie de la grille d'évaluation concerne la caractérisation du résultat donné par la méthode de mesure. On distingue 2 niveaux d'information pour estimer la pertinence du résultat exprimé :

▪ **L'expression du résultat**

Plusieurs questions se posent concernant l'expression du résultat en elle-même :

- le **caractère sensoriel ou instrumental** du résultat : si la mesure rend compte d'une perception issue d'un ou plusieurs des 5 sens (vue, ouïe, toucher, odorat, goût), il s'agit d'un résultat de type sensoriel, si non c'est un résultat de type instrumental.
- le **caractère absolu ou relatif** du résultat : si la mesure a une signification individuelle, il s'agit d'un résultat absolu. Au contraire, un résultat est dit relatif s'il faut le positionner par rapport à un autre résultat pour qu'il ait un sens.
- l'**objectivité** du résultat, c'est-à-dire si le résultat est impartial et indépendant de toute interprétation, ou si à l'inverse il fait intervenir des jugements individuels susceptibles de varier selon la personnalité de chacun ; il est alors dit subjectif.
- la **facilité d'interprétation** du résultat, c'est-à-dire si le résultat est directement disponible ou s'il nécessite une transformation préalable, plus ou moins délicate (équation de prédiction, résultat exprimé avec plusieurs paramètres à combiner...).

▪ Le pouvoir prédictif de la méthode

Dans le cas d'une méthode indirecte, il est essentiel d'estimer le pouvoir prédictif de la mesure. Il s'agit de sa capacité à rendre compte plus ou moins bien du critère initialement recherché (tendreté et/ou degré de maturation). Cette notion intègre :

- **l'intensité de la liaison** entre le critère mesuré et le critère recherché, c'est-à-dire la force de la relation existant entre ces 2 critères. Cette liaison est exprimée par le coefficient de corrélation r calculé entre les 2 variables concernées. Compris entre -1 et 1, ce coefficient exprime simultanément le sens et l'intensité de la liaison. Quel que soit son sens, la liaison est d'autant plus forte que le coefficient de corrélation est proche de 1. Le r porté au carré donne le R^2 . Compris entre 0 et 1, il traduit la part de variabilité d'une variable expliquée par l'autre variable. Plus le R^2 se rapproche de 1, plus la part de variabilité expliquée est grande, c'est-à-dire plus une variable va pouvoir être estimée par l'autre variable. Le R^2 exprime le pouvoir prédictif d'une variable par une autre. Dans le cas où le modèle explicatif met en jeu plusieurs variables, on parle de R^2 partiel pour désigner la part de la variable expliquée (donc prédite) par une seule des variables, et de R^2 global lorsque l'ensemble des variables est considéré.
- la **précision** de la méthode : la précision rend compte de la fiabilité d'une mesure. Une mesure est fiable lorsqu'elle combine (**Figure 3**) :
 - **la fidélité** : l'outil de mesure est fidèle lorsqu'il est répétable et reproductible.
 - la **répétabilité** est l'aptitude d'une méthode à redonner un résultat identique lors d'une répétition effectuée dans les mêmes conditions expérimentales.
 - la **reproductibilité** est l'aptitude d'une méthode à redonner un même résultat lors d'une répétition au cours de laquelle au moins une condition expérimentale a été modifiée (ex : mesure réalisée par un autre opérateur, ou avec un autre appareil du même type...).
 - **la justesse** : l'outil de mesure est juste lorsque la moyenne des indications données (moyenne des mesures réalisées) est très voisine de la vraie valeur de la grandeur à mesurer.
 - ⇒ Lorsqu'un outil de mesure est simultanément fidèle et juste, alors il est **exact**. Cela signifie que les indications individuelles données (mesures individuelles réalisées) sont très proches de la vraie valeur de la grandeur à mesurer.
 - **la sensibilité** : il s'agit de la plus petite valeur, ou plus petit écart, détectable par l'outil de mesure. Plus ce seuil de détection est petit, plus l'outil est sensible.
- la **représentativité de l'échantillonnage**, c'est-à-dire dans quelle mesure la méthode de mesure estime-t-elle la tendreté et/ou le niveau de maturation réels du muscle. Cette représentativité dépend de nombreux paramètres répertoriés précédemment dans la grille de lecture des publications lues, dont notamment :
 - la taille de l'échantillon mesuré,
 - le nombre de répétitions réalisées,
 - le ou les types de muscles analysés
 - les modalités testées dans l'étude (différents temps de maturation, différents degrés de cuisson des échantillons...)
 - les effectifs animaux analysés...

Que la méthode de mesure soit directe ou indirecte, la représentativité de l'échantillonnage est particulièrement importante à prendre en compte pour avoir un esprit critique sur la méthode de mesure. En effet, selon ses conditions de mise en œuvre, une méthode peut

apparaître très prometteuse pour mesurer la tendreté et/ou le degré de maturation de la viande bovine, et pourtant s'avérer inadaptée dans un autre contexte. Par exemple, il est possible d'observer des liaisons très fortes entre le critère mesuré et le critère recherché, mais obtenues sur des effectifs animaux très faibles ou alors *via* la comparaison de modalités très éloignées (mesures sur le faux-filet et le gîte noix par exemple). Il est donc très important de relativiser les résultats d'une méthode en fonction de la représentativité de l'échantillonnage pour estimer au mieux le pouvoir prédictif d'une méthode de mesure.

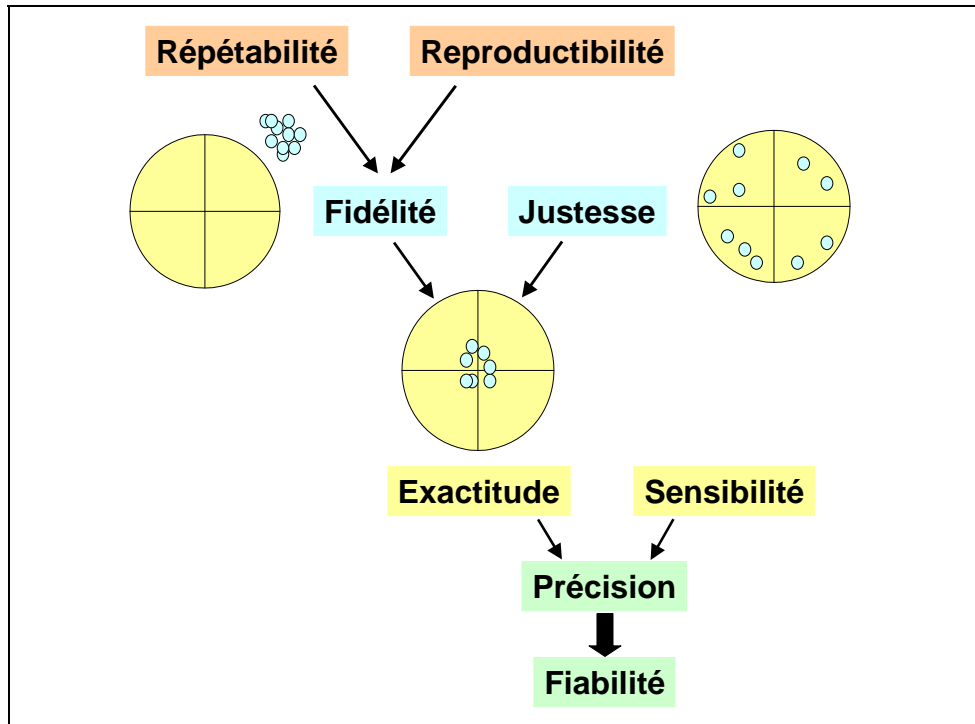


Figure 3 : Eléments déterminants la fiabilité d'une mesure

Dans ce travail, les caractéristiques de chaque méthode sont synthétisées aux travers d'une fiche récapitulative (sauf cas particulier). Etant donné qu'il n'est pas possible de présenter de façon synthétique l'ensemble des informations reflétant les performances d'une méthode, un paragraphe spécifique est dédié à la discussion de cette caractéristique. Néanmoins, lorsque l'information était disponible, les coefficients de corrélation r reflétant la liaison entre chaque méthode de mesure et l'analyse sensorielle (considérée comme méthode de référence) sont intégrés dans la fiche récapitulative. Les effectifs également mentionnés dans cette fiche font référence à ceux sur lesquels les coefficients de corrélation présentés précédemment ont été obtenus.

1.2.2.4 Bilan sur la méthode de mesure

La quatrième et dernière partie de la grille d'évaluation correspond au bilan qu'il est possible de faire sur chaque méthode de mesure à partir de l'ensemble des informations récoltées précédemment. Ce bilan critique est proposé pour chaque méthode de mesure dans le paragraphe perspectives pour la filière.

La grille d'évaluation mise au point permet en effet de compiler les informations relatives à la méthode testée, ses conditions de mise en œuvre (niveau d'application, état de l'échantillon, et réalisation de la mesure), les différents résultats obtenus selon les expérimentations, et notamment le pouvoir prédictif de tendreté et/ou de niveau de maturation de la méthode.

L'analyse de ces éléments dans leur globalité permet de conclure sur les avantages et les inconvénients de la méthode, qui aident à définir les situations pertinentes d'utilisation de cette méthode en fonction de l'objectif recherché. En effet, selon le contexte, une méthode peut s'avérer plus ou moins pertinente à utiliser. Par exemple, un instrument qui serait, sur l'ensemble des travaux analysés, très fiable, objective, simple d'utilisation... mais qui nécessiterait un prélèvement de 3 kg de viande sur une carcasse, ne serait pas adaptée pour déterminer la tendreté en routine à l'abattoir et orienter les carcasses vers des circuits de distribution spécifiques.

1.3 Outils utilisés pour l'analyse critique des méthodes de mesure

Deux outils ont été utilisés pour réaliser l'analyse critique des méthodes de mesure :

- une recherche bibliographique variée a permis de récolter les articles d'intérêt concernant les méthodes de mesure de la tendreté ou du niveau de maturation de la viande bovine.
- la grille d'évaluation des méthodes de mesure mise au point précédemment a permis d'analyser précisément et sur le même modèle toutes les méthodes de mesure rencontrées dans la bibliographie.

1.3.1 Origine des informations sur les méthodes de mesure

L'analyse critique des méthodes de mesure instrumentales de la tendreté ou du niveau de maturation a été réalisée sur la base d'une recherche bibliographique diversifiée. Cette recherche s'est limitée aux articles rédigés en anglais et en français, voire en espagnol lorsqu'ils présentaient un intérêt particulier.

1.3.1.1 Trois types de sources bibliographiques consultées

Les éléments bibliographiques consultés sont issus :

- **D'une recherche bibliographique scientifique à partir de bases de données**

En plus du fond bibliographique déjà acquis par l'équipe du Service Qualité des Viandes au cours des études précédentes menées sur la tendreté, une recherche bibliographique a été réalisée au sein de la Documentation de l'Institut de l'Élevage, et par interrogation de la base de données Food Sciences and Technology Abstract (FSTA). Le choix s'est porté sur cette base car elle est spécifique de notre thème de recherche et répertorie les informations depuis 1969 sur 1800 périodiques. Cette base offre donc l'avantage d'être très bien renseignée, y compris pour les informations les plus anciennes. Cependant, comme la plupart des bases de données, elle ne répertorie pas les publications en temps réel⁵, certains travaux récents n'y sont alors pas encore recensés.

Les mots clés utilisés ont concerné spécifiquement la tendreté de la viande bovine, il s'agit notamment :

- pour le produit concerné, c'est-à-dire la viande bovine : meat* or muscle* or beef or beef meat* or beef muscle*

⁵ Avant d'être entrées dans la base de données, les publications sont triées selon leur thématique puis classées avec des mots clés standards par grands thème. Le délai est au minimum d'une année.

- pour les caractéristiques recherchées, c'est-à-dire la tendreté et la maturation : tenderness or softness or quality or aging or meat tenderness or meat softness or meat quality or meat aging
- pour les méthodes de mesure, et en particulier l'analyse sensorielle : measure or method* or measure method* or tenderness measurement or tenderization or sensory or sensory assessment or sensory quality.

Etant donné l'ampleur des travaux sur le thème de la tendreté⁶, une telle recherche bibliographique a fait ressortir une énorme quantité de publications, certaines étant très éloignées de notre sujet. En effet, bien qu'ils aient été ciblés, les mots clés choisis englobent inévitablement quantité d'études ne nous intéressant pas directement. C'est pourquoi certains mots clés ont été écartés au cours de l'affinage de la recherche bibliographique. Celui désignant la maturation en est un bon exemple, le terme « aging » dans les publications faisant le plus souvent référence à la maturité des animaux et non à la maturation de la viande. Par ailleurs, l'attention a été portée plus particulièrement sur les publications mettant en relation une ou plusieurs méthodes de mesure avec l'analyse sensorielle, voire entre elles. Au final, ce sont **plus de 200 références** qui ont été consultées, la plupart étant des publications scientifiques et des rapports d'études.

▪ **Des travaux des centres techniques**

En particulier ceux menés le cadre de la recherche et développement financée par Interbev et l'Office de l'Elevage.

▪ **Des résultats issus de revues de vulgarisation**

Selon leur disponibilité, les revues consultées sont :

- Viandes et Produits Carnés
- INRA Productions Animales
- Viande Magazine
- Réussir Bovin Viande
- Les Marchés
- In focus

1.3.1.2 La bibliographie : un outil puissant mais avec ses limites

La diversité des sources bibliographiques consultées offre l'avantage d'accéder au maximum de travaux susceptibles de nous intéresser. La recherche sur bases de données permet de « capter » la majeure partie des travaux « scientifiques » publiés dans le domaine, notamment les études étrangères. En effet, la valorisation des travaux réalisées par les équipes de recherche passe essentiellement par la publication dans les revues ayant si possible une diffusion internationale.

Cependant, certains travaux de recherche, de développement ou d'innovation ne sont jamais publiés. Il s'agit de ceux des professionnels ou de ceux des laboratoires privés. Pour la France, le nombre de travaux non « captés » devrait être faible étant donné la prise en compte des travaux des centres techniques et des revues de vulgarisation dans la recherche bibliographique effectuée. En effet, le « monde de la viande » français est relativement restreint et les quelques structures susceptibles de faire des recherches sur les méthodes de mesure de la tendreté communiquent *a priori* via les canaux examinés.

⁶ Une étude précédente de l'Institut de l'Elevage a montré qu'il s'agit d'un des thèmes d'étude concernant la viande le plus exploré à travers le monde (DENOYELLE, 1999).

En revanche, ces travaux sont plus difficiles à approcher pour les pays étrangers. De plus, quel que soit le pays, les travaux menés par les structures privées sont également peu accessibles du fait du secret de fabrication. En effet, lorsqu'il existe une forte probabilité d'application et donc de brevetabilité, les laboratoires attendent souvent le dernier moment pour divulguer leurs résultats. Par conséquent, ces travaux ne peuvent être pris en compte dans le présent rapport. La quantité d'informations manquantes, difficile à estimer, peut être non négligeable.

De plus, il est possible que certaines publications « scientifiques » récentes ne soient pas apparues au cours de cette recherche bibliographique, d'une part en raison du délais de recensement des publications dans les bases de données (environ 1 an), et d'autre part en raison de la période de latence existante entre la réalisation d'un projet et la publication de ses résultats.

1.3.2 Application de la grille d'évaluation des méthodes de mesure

L'analyse de chaque méthode de mesure a été réalisée à l'aide de la grille d'évaluation présentée précédemment, dans la limite des informations disponibles. Précisons que les méthodes de prédiction ou de mesure liées à la compréhension du déterminisme de la tendreté, notamment *via* la recherche sur les mécanismes de la maturation, ne sont pas abordées ici. En effet, elles relèvent des recherches fondamentales sur la connaissance des mécanismes cellulaires impliqués dans la tendreté, et non des méthodes de mesure opérationnelles.

Ainsi, quatre catégories de méthodes se distinguent pour mesurer ou prédire⁷ la tendreté de la viande et/ou son degré de maturation. Les informations disponibles dans la bibliographie ne sont pas équitables entre elles ; c'est pourquoi l'analyse de chaque méthode est plus ou moins complète, bien qu'elles aient toutes été évaluées suivant la même grille.

⁷ Il s'agit de réaliser une mesure à un temps T pour prédire la tendreté à un temps T+1.

Méthodes sensorielles

2 Méthodes sensorielles

2.1 L'analyse sensorielle classique

2.1.1 Principe de l'analyse sensorielle

L'analyse sensorielle est une méthode directe qui consiste à examiner les propriétés organoleptiques et la qualité hédonique de la viande par les organes des sens (**Figure 4**). Elle permet d'apprécier simultanément l'ensemble des paramètres qui déterminent la tendreté et demeure aujourd'hui la méthode qui fournit les résultats les plus proches de ce que le consommateur est susceptible de ressentir. Pour ces raisons, elle est considérée par beaucoup, et notamment l'Institut de l'Élevage, comme la méthode la plus fiable pour déterminer la tendreté de la viande, et a donc été prise comme référence dans ce travail.

L'analyse sensorielle est une méthode relativement bien connue aujourd'hui et ses différentes approches décrites et codifiées. Cependant, il est bon d'en rappeler ici ses principales caractéristiques pour la bonne compréhension de la suite du travail réalisé.

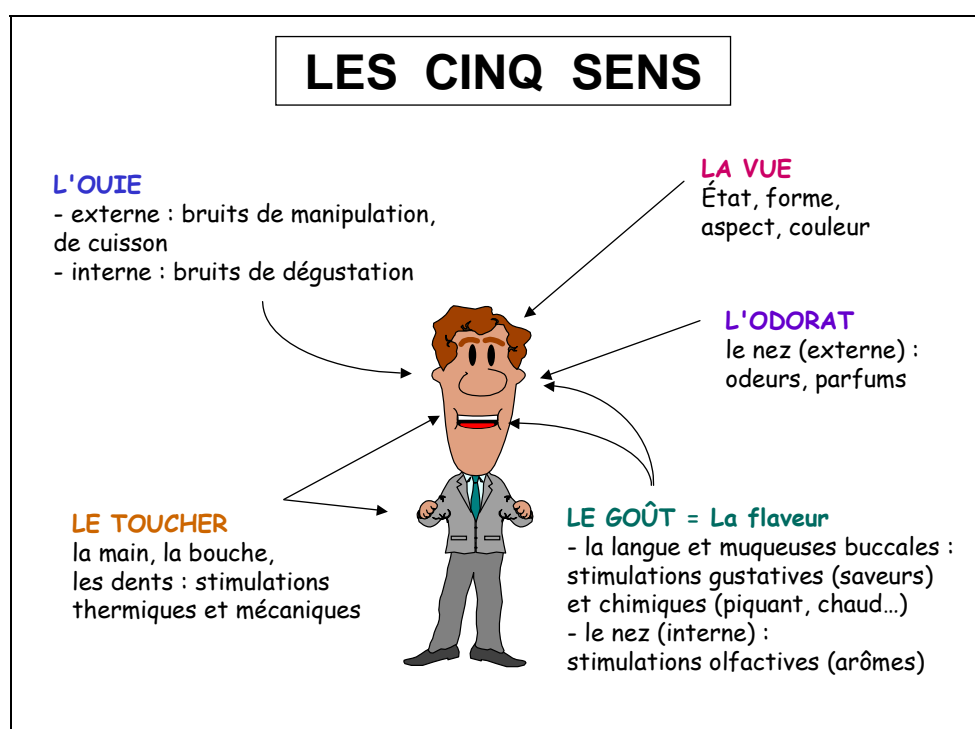


Figure 4 : Les 5 sens intervenant dans la perception organoleptique d'un produit

2.1.1.1 Deux approches opposées mais complémentaires

L'analyse sensorielle comprend 2 approches : l'approche analytique et l'approche hédonique. Ces démarches s'opposent sur de nombreux plans, notamment en terme de réalisation (**Tableau 1**), tout en étant complémentaires dans leurs résultats puisqu'elles permettent de répondre à des questions de différente nature. Du fait de leurs contraintes spécifiques, ces 2 approches ne peuvent pas être mise en œuvre simultanément. De

nombreux ouvrages décrivent les différentes options possibles (Normes AFNOR ou ISO, ANONYME, 1990 ; COFRAC, 1994 ; ACTIA, 1999) mais aucun n'est spécifiquement dédié à la viande.

Approche analytique	Approche hédonique
Jugement objectif qui ne dépend que du produit	jugement essentiellement subjectif qui dépend de celui qui consomme le produit
Jury entraîné (au moins 10 personnes) = instrument de mesure - ne représente aucune population de consommateurs - non questionné sur des aspects hédoniques	Jury de consommateurs naïfs (au moins 60 personnes) = approche de l'opinion d'une population cible - aucune autre méthode envisageable - difficulté d'échantillonnage pour assurer une bonne précision
Juges sélectionnés sur leur capacité à comprendre la signification des descripteurs utilisés et leur aptitude à les évaluer et à détecter des différences (seuil de détection supérieur à celui d'un jury non averti)	Juges sélectionnés de façon à être représentatifs de la population
Réalisation en laboratoire dans des conditions contrôlées	Réalisation dans des conditions proches de la réalité
Résultat objectif relativement indépendant des juges et du moment de réalisation. Possibilité de relier à des mesures instrumentales.	Résultat dépendant des juges et à remettre en cause régulièrement dans le temps. Difficile à relier à des mesures instrumentales

Tableau 1 : Comparaison de l'approche analytique et de l'approche hédonique

▪ **L'approche analytique**

L'approche analytique consiste à décrire les caractéristiques sensorielles d'un produit. Il s'agit de « *l'ensemble des propriétés d'un produit perçues par les sens, liées à la fois au produit et à la perception qu'en ont les sujets. Elle décrit la perception sensorielle de la présence ou de l'intensité d'une ou plusieurs propriétés perçues ou bien celle d'une différence de perceptions sensorielles* » (AFNOR, 1999).

L'approche analytique est réalisée par un jury entraîné assimilable à un instrument de mesure ; il n'a aucune prétention à représenter une population de consommateurs puisqu'il n'est pas sélectionné dans ce but. Les juges sont sélectionnés sur leur capacité à comprendre la signification des descripteurs utilisés, ainsi que sur leur aptitude à les évaluer et à détecter des différences entre échantillons, même minimes. Ces juges acquièrent un seuil de détection supérieur à celui d'un jury non averti.

Cependant, les évaluations diffèrent entre experts. Il n'existe pas de dégustateur standard, et les résultats individuels sont considérés comme subjectifs car propre à chacun. Dans ce type d'approche, le résultat considéré est la réponse du jury dans son ensemble (moyenne des notes de tous les juges). Ce résultat est objectif, sous réserve que le nombre de juges soit suffisant (au moins 10 à 18 selon l'épreuve), et indépendant du moment de réalisation.

▪ **L'approche hédonique**

L'approche hédonique étudie les préférences et aversions des consommateurs. Il s'agit de « *l'appréciation affective que portent les consommateurs sur un produit sur la base de ses propriétés sensorielles. La qualité hédonique est entièrement associée à l'appréciation faite par les consommateurs et n'est jamais attribuable au seul produit : un produit est bon ou mauvais pour un sujet ou un groupe de sujets, mais non en lui même. L'appréciation hédonique traduit la réaction affective du consommateur face au produit à tester dans un contexte déterminé et à un moment donné* » (AFNOR, 1999).

L'approche hédonique est réalisée par un jury de consommateurs naïfs ; ils donnent des réponses spontanées, sans chercher à différencier les échantillons. L'objectif est d'approcher l'opinion d'une population cible, le jury doit donc être représentatif de cette population et les juges sont sélectionnés selon les paramètres la décrivant : sexe, âge, catégorie socio-professionnelle, fréquence de consommation de viande...

Les résultats ne sont pas exprimés par des moyennes mais par des fréquences (enquête quantitative), et ils ne permettent pas de distinguer les critères organoleptiques à l'origine de l'appréciation. Ces préférences ne peuvent pas être reliées à une mesure instrumentale, notamment car elles sont dépendantes des juges et à remettre en cause régulièrement du fait de l'évolution des goûts consommateurs dans le temps. Le nombre de juges dépend de l'information recherchée et de la taille de la population à représenter, mais pour une enquête quantitative il ne doit pas être inférieur à 60.

2.1.1.2 Analyse comparative ou monadique

Pour chacune des approches, l'analyse sensorielle peut être comparative (comparaison de plusieurs produits entre eux simultanément pour les positionner les uns par rapport aux autres), ou monadique (appréciation d'un seul produit pour le positionner par rapport aux références du dégustateur). Le choix du type d'exercice (comparatif ou monadique) auquel le jury est soumis se raisonne en fonction des objectifs recherchés.

▪ Analyse comparative

Cette méthode est indiquée pour comparer des échantillons et les discriminer entre eux, surtout lorsque les écarts suspectés sont faibles. Elle offre l'avantage d'être très sensible si des différences existent, mais le résultat n'a de sens qu'en relatif puisque le résultat de chaque échantillon dépend partiellement de celui des autres. Cette méthode peut s'appliquer seulement si le nombre de descripteurs est faible, et elle implique parfois la mise en œuvre de dispositifs expérimentaux assez complexes. De plus, l'analyse comparative amène parfois à « surdimensionner » les écarts entre échantillons.

▪ Analyse monadique

Cette méthode, qui offre l'avantage d'avoir des résultats valables dans l'absolu, est indiquée pour décrire une population, ou étudier des liens entre les critères de dégustation et des données instrumentales. Cette méthode est moins adaptée à la comparaison car *a priori* moins sensible, sauf si le nombre de descripteurs est élevé. Par contre, elle est plus simple à mettre en œuvre que l'analyse comparative.

2.1.1.3 Tests les plus fréquents pour mesurer la tendreté

Dans les travaux de recherche destinés à comparer l'effet d'une variante sur la tendreté des animaux (au niveau de l'élevage, de l'abattage, ou du traitement de la viande) c'est l'approche analytique qui est mise en œuvre. En effet, il s'agit de mesurer la tendreté de façon objective et indépendante du moment de réalisation de l'étude.

L'analyse sensorielle est souvent couplée à une, voire plusieurs, mesures instrumentales. Dans ce cas, l'approche analytique est la plupart du temps de type monadique. Les principaux tests mis en œuvre pour évaluer la tendreté de la viande sont des essais de positionnement, et plus précisément des tests de classement couplés à des notations. Les tests de classement consistent à classer plusieurs échantillons de viande selon un ordre croissant ou décroissant de tendreté. Simultanément, les dégustateurs doivent noter chaque échantillon de manière à évaluer l'intensité des différences de tendreté perçues. Il existe différentes échelles de notation : structurée par niveaux ou continue, avec ou sans qualificatifs (très tendre, moyen, dur...).

2.1.2 Performances de l'analyse sensorielle

L'analyse sensorielle étant une méthode de mesure directe de la tendreté, on ne parle pas de pouvoir prédictif mais plutôt de performances de la méthode. Pour beaucoup d'équipes de recherche, et notamment l'Institut de l'Élevage, l'analyse sensorielle est à ce jour la méthode la plus fiable pour mesurer la tendreté d'une viande car c'est la seule qui rend compte de l'ensemble des perceptions du consommateur. Pourtant, pour des raisons principalement économiques, l'analyse sensorielle n'est pas toujours choisie en tant qu'instrument de mesure de référence de la tendreté. Certaines équipes, notamment anglo-saxonnes, lui préfèrent des mesures strictement instrumentales.

La fidélité, la justesse et la sensibilité de l'analyse sensorielle ne sont pas définies comme dans le cas d'une méthode instrumentale. Il est admis que cet outil de mesure de la tendreté est le plus précis si le jury est composé d'un nombre de membres suffisant et si l'échantillonnage est représentatif de la population testée. Mais, en l'absence de consensus international, chaque équipe met en œuvre son propre protocole. Les résultats d'analyse sensorielle sont donc difficilement comparables d'une étude à l'autre, et les performances de mesure par cette méthode peuvent être largement variables selon le protocole.

Comme l'illustrent quelques exemples de protocoles en **Annexe 2**, les différences peuvent porter sur de nombreux paramètres, dont :

- la nature du jury, et notamment son niveau d'entraînement : initié, qualifié, expert.
- le nombre de dégustateurs constituant le jury.
- le type d'essai : discriminatifs, de positionnement, descriptifs.
- le plan d'expérience : complet, incomplet, équilibré.
- les conditions de travail : neutralité du milieu, notation en aveugle.
- La préparation des échantillons.
- l'échelle de notation.
- les descripteurs choisis pour qualifier la viande : dure, ferme, élastique, souple, fondante, moelleuse...

2.1.3 Fiche synthétique de l'Analyse sensorielle classique

Caractérisation de la méthode	
<p>Nom Critère(s) mesuré(s) Composante(s) évaluée(s) Type de méthode Méthode directe Caractéristiques techniques</p> <ul style="list-style-type: none"> - outil de mesure - portabilité/encombrement - résistance - automatisation <p>Coût</p>	<p>ANALYSE SENSORIELLE CLASSIQUE (ASC) tendreté - note ou classement fibrillaire et conjonctive sans dissociation évaluation du niveau de tendreté oui</p> <p>jury de dégustateurs (experts, entraînés ou naïfs selon les objectifs)¹ oui mais nécessité de la mobilité du jury et d'une salle de dégustation normalisée</p> <p>- automatisation impossible variable – élevé²</p>
Conditions de mise en oeuvre	
<p><u>Niveau d'application</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - terrain / laboratoire - animal / carcasse / découpe - type muscle - taille, poids, volume échantillon <p><u>Etat de l'échantillon</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - frais / congelé - cru / cuit - broyé / en l'état <p><u>Mise en oeuvre</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - destructive / non - délais prélèvement/mesure - prélèvement/préparation échantillons - niveau de facilité - durée mesure - délais de réponse <ul style="list-style-type: none"> - nombre de répétitions - dangerosité - multi-usage 	<p>méthode de laboratoire / terrain dans le cas d'un jury interne à une entreprise dégustation sur muscle après découpe tous - long dorsal le plus souvent portion équivalente à 2 ou 3 bouchées³</p> <p>congélation possible cuisson obligatoire découpé en portions</p> <p>méthode destructive aucun mais obligation de salubrité⁴ aucune sauf la cuisson⁵ complexe⁶ quelques secondes à minutes durée de la séance (1 à 2h) et des traitements statistiques (au moins 24h) au moins 1 par dégustateur</p> <p>non oui (jutosité, flaveur...)</p>
Caractérisation du résultat	
<p><u>Performances - pouvoir prédicteur</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - intensité de liaison - précision - fiabilité <p>- effectifs utilisés pour le calcul de r</p> <p><u>Expression du résultat</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - sensoriel / instrumental - absolu / relatif - objectif / subjectif - interprétation facile 	<p>- la plus fiable car la seule qui rend compte de l'ensemble des perceptions des consommateurs</p> <p>- sensoriel absolu (analyse monadique) ou relatif (analyse comparative) objectif⁷ oui</p>

Précisions sur l'analyse sensorielle classique

¹ Selon les normes françaises, le jury doit être composé au moins de 10 membres dans le cas de dégustateurs entraînés, 60 dans le cas de consommateurs naïfs.

² L'analyse sensorielle est relativement **coûteuse** du fait du besoin en main d'œuvre important pour la mise en œuvre, la dégustation en elle-même, et l'analyse des résultats. Les **prix sont très variables** selon les protocoles, mais pour exemple une séance de dégustation de 12 échantillons en mode monadique par 12 experts coûte environ 1000 euros. En comparaison, pour une séance du même type avec un jury de 60 consommateurs naïfs dégustant 6 échantillons il faut compter en moyenne 2000 euros.

³ On compte qu'un échantillon de viande (part de 150g environ) permet de couper 3 à 6 portions de dégustation. Pour exemple, dans le cas d'une analyse sensorielle monadique de 12 experts, on prélève 3 à 4 tranches de faux-filet (soit environ 500g de viande) par modalité étudiée.

⁴ Les prélèvements de viande sont généralement réalisés 24 heures post-mortem.

⁵ En raison de l'obligation de salubrité, dans nombre de cas les échantillons sont congelés entre le prélèvement de viande et la séance d'analyse sensorielle. La **congélation ne pose pas de problèmes** en soit sur la fiabilité de l'analyse sensorielle ; par contre, le mode de décongélation (à l'air ambiant, au frigo, au micro-onde...) peut influencer sur les pertes d'eau à la cuisson et modifier la perception de tendreté des dégustateurs.

⁶ Méthode relativement **complexe** à mettre en œuvre car elle demande une très bonne organisation pour la gestion de l'approvisionnement, du jury, des cuissons, de l'identification des échantillons et de leur distribution selon le plan de dégustation...

⁷ Le résultat d'une dégustation est **objectif** puisqu'il correspond à la moyenne des perceptions de l'ensemble des dégustateurs. C'est notamment pour cette raison qu'il est important qu'un jury soit composé d'un nombre suffisant de dégustateurs.

2.1.4 Perspectives

L'analyse sensorielle permet d'apprécier simultanément l'ensemble des paramètres qui déterminent la tendreté. Il s'agit d'une méthode directe, complète, qui fournit les résultats les plus proches de ce que le consommateur est susceptible d'apprécier. La dégustation par un jury entraîné permet de comparer avec précision l'effet d'une variante, quelle qu'elle soit, sur la tendreté de la viande. C'est pourquoi l'Institut de l'Élevage, entre autres équipes de recherche, considère l'analyse sensorielle comme LA référence en matière d'évaluation de tendreté.

Aujourd'hui, aucune méthode de mesure de la tendreté n'égale les atouts de l'analyse sensorielle. Elle présente néanmoins des inconvénients de taille qui expliquent l'intérêt des équipes de recherche à développer d'autres méthodes de mesure. En effet, il s'agit d'une méthode sujette à de nombreux biais et sa réalisation demande une grande rigueur car elle repose sur un protocole précis, concernant notamment la constitution du jury, le nombre et la composition des assiettes, le système de notation de la tendreté, et l'analyse statistique des données. De plus, la dégustation de la viande implique que les échantillons soient sains pour être consommés sans risques par le jury, préalablement cuits, et en quantité suffisante. L'analyse sensorielle est donc une méthode destructive, complexe, et lourde à mettre en

œuvre. Ces contraintes la rendent coûteuse, ce qui ne permet de comparer qu'un nombre limité de modalités. Enfin, les protocoles de réalisation de l'analyse sensorielle sont variés et les notes de tendreté attribuées ne sont pas comparables d'une séance de dégustation à l'autre, et encore plus difficilement d'une étude à l'autre.

Ainsi, l'analyse sensorielle n'est pas et ne sera jamais une méthode de mesure envisageable en routine pour déterminer la tendreté d'une viande en temps réel. Elle trouve néanmoins sa place dans les entreprises au travers de jury internes dont l'utilité est reconnue, notamment pour le développement de produits et la vérification de leur acceptabilité par le consommateur. Mais l'analyse sensorielle est avant tout un outil de laboratoire, d'une efficacité sans égal pour déterminer la tendreté dans le contexte d'études expérimentales (jury expert) ou terrain (jury consommateur). Bien que longue et coûteuse, son utilisation se justifie pleinement lorsque l'on souhaite approcher au plus près la tendreté réelle d'une viande.

2.2 Les méthodes sensorielles temporelles

2.2.1 Principe des méthodes sensorielles temporelles

Lorsque l'on consomme un aliment, toutes les sensations de texture ont lieu au cours du temps buccal, et plus particulièrement pendant la mastication. Cette activité s'adapte à la consistance initiale de l'aliment, ainsi qu'à l'évolution de cette consistance tout au long de la dégradation de l'aliment. La perception de la texture au cours de la mastication se fait au travers des efforts musculaires qu'il a fallu fournir pour dégrader le produit : on parle de proprioception.

Dans ce contexte, certaines méthodes basées sur la mesure de l'intensité de la mastication ont été étudiées pour évaluer la tendreté de la viande. Il s'agit de « variantes » de l'analyse sensorielle ; on distingue le time-intensité et l'électromyographie. L'évaluation de ces 2 méthodes est réalisée simultanément car elles ont un grand nombre de points communs.

2.2.1.1 Principe du time-intensité

Le principe du **time-intensité** est le même que celui de l'analyse sensorielle réalisée par un jury d'experts, mais au lieu d'apprécier la tendreté du morceau en final, les dégustateurs doivent apprécier la force nécessaire pour mastiquer le morceau au cours du temps, de la première bouchée à la dernière (ingestion). Concrètement, pendant qu'il déguste le produit, chaque dégustateur dessine une courbe qui représente la force de mastication appliquée en fonction du temps (**Figure 5**). Ce graphique regroupe l'intégralité des sensations perçues par le dégustateur tout au long de la mastication ; elles sont synthétisées au travers de 8 paramètres :

- l'intensité maximale (I_{max}) = force maximale de mastication saisie par le dégustateur
- le temps à l'intensité maximale (T_{max}) = temps nécessaire pour atteindre cette force maximale
- la durée (DUR) = durée totale de la mastication, de la première bouchée à l'ingestion
- l'angle de croissance (Inc Angle) = angle de l'ascension de la force de mastication de son début à son maximum d'intensité
- la surface de croissance (Inc Area) = surface située sous la portion de courbe de la force de mastication de son début à son maximum d'intensité
- l'angle de décroissance (Dec Angle) = angle de descente de la force de mastication de son maximum à la dernière valeur enregistrée
- la surface de décroissance (Dec Area) = surface située sous la portion de courbe de la force de mastication de son maximum à la dernière valeur enregistrée
- la surface sous la courbe (AUC) = surface totale située sous la courbe
- le taux de réaction (Rx) = temps auquel la force de mastication a été détectée en premier

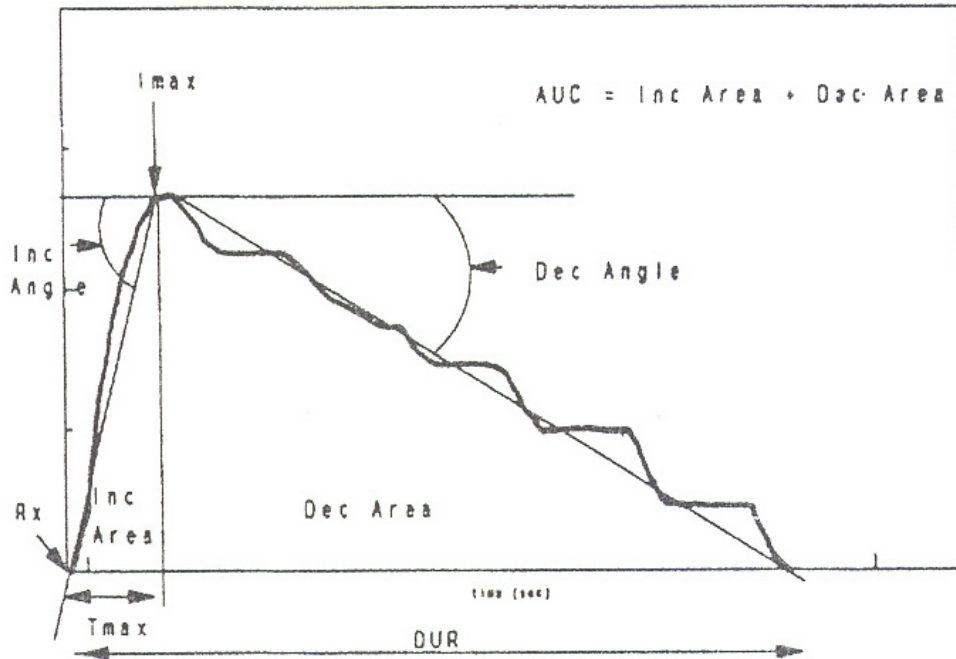


Figure 5 : Paramètres de la méthode time/intensity

2.2.1.2 Principe de l'électromyographie

L'électromyographie consiste à enregistrer le profil de mastication des dégustateurs au cours d'une analyse sensorielle. Les contractions musculaires génèrent une activité électrique proportionnelle à leur intensité. Celle-ci est recueillie par des électrodes de surface pour chacun des principaux muscles de la mastication : les masseters et/ou les temporaux droits et gauches. A partir des enregistrements, plusieurs paramètres peuvent être calculés, comme notamment : le nombre de mastications, la durée de mastication, le taux de mastication (nombre de mastications par seconde), le travail (intensité moyenne de la mastication par sa durée). Ces paramètres peuvent être calculés pour la première contraction, les 3 premières, ou l'ensemble de la séquence. Le travail sur l'ensemble de la séquence masticatoire, aussi appelé somme des aires de chaque mastication et noté AUC, est une variable fréquemment considérée.

2.2.2 Performances des méthodes sensorielles temporelles

2.2.2.1 Intensité de la liaison

Idéalement, la combinaison du time-intensité et de l'électromyographie simultanément pourrait permettre d'obtenir des résultats complets et comparables. Cependant, cette approche n'est pas réalisable en pratique car les dégustateurs ne sont pas soumis aux mêmes contraintes lors de la dégustation. De fait, la relation entre les paramètres du time-intensité et l'électromyographie est faible, comme le montre les coefficients de corrélation du **Tableau 2**.

Paramètres	Evaluation sensorielle		Electromyographie		
	Force de mastication	Temps de mastication	Taux de mastication	Nombre de mastications	Temps de mastication
Imax	0,84	0,82	0,19	0,19	-
Tmax	-	-	-	-	-
DUR	-	-	-0,25	0,19	0,40
Inc Angle	-	-	-	0,17	0,12
Inc Area	-	-	-	0,12	0,18
Dec Angle	-	-	0,46	0,10	-0,23
Dec Area	0,85	0,86	-	0,16	0,19
AUC	0,85	0,86	-	0,18	0,19
Référence	DUIZER et al, 1993		DUIZER et al, 1994		

Tableau 2 : Coefficients de corrélations r entre les paramètres du time-intensité et d'autres méthodes de mesure sensorielles de la tendreté

Dans l'étude de DUIZER et al (1993), le Dec Area et l'AUC, paramètres du time-intensité les plus discriminants, sont bien corrélés à la force et au temps de mastication obtenus avec une analyse sensorielle traditionnelle, avec des coefficients r de 0,85 et 0,86. Dans l'étude de MATHEVON et al (1995), l'aire de la séquence complète obtenue par électromyographie est significativement corrélée à la dureté ($r = 0,73$), la fibrosité ($r = 0,70$) et la durée ($r = 0,77$) obtenus par analyse sensorielle. Ces résultats traduisent la liaison existant entre ces méthodes sensorielles temporelles et la dégustation traditionnelle. Par ailleurs, dans les travaux analysés, les 2 types de méthodes sensorielles (traditionnelle et temporelle) différencient les échantillons de viande selon les mêmes facteurs de variation, ce qui valide la fiabilité de ces méthodes par rapport à l'analyse sensorielle traditionnelle.

Dans certains cas, il apparaît même que l'électromyographie aurait un meilleur pouvoir discriminant puisque cette méthode apporte des informations sur la texture de la viande avant que les dégustateurs ne perçoivent consciemment la texture au cours de l'analyse sensorielle (MATHEVON et al, 1995). Selon MATHONIERE et al (1996), qui ont fait les mêmes observations, cette moins bonne discrimination s'expliquerait par l'utilisation d'une échelle non structurée par le jury de dégustation face à un enregistrement précis sur l'ensemble de la séquence masticatoire dans le cas de l'électromyographie.

2.2.2.2 Précision et représentativité de l'échantillonnage

▪ Time-intensité

Comme l'ont montré diverses études (DUIZER, 1992 ; DUIZER et al, 1993, 1994, 1996), le **time-intensité** permet de différencier les muscles selon la perception de leur tendreté. Dans tous les cas, ce sont les paramètres de surface qui sont les plus discriminants, notamment la surface totale (AUC) et celle de décroissance (Dec Area). La durée totale de mastication (DUR) aide à différencier les muscles uniquement lorsqu'ils présentent des niveaux de tendreté relativement distincts (DUIZER, 1992 ; DUIZER et al, 1993). Les autres paramètres sont trop influencés par l'effet juge pour être significatifs.

Très logiquement, les muscles les moins tendres demandent généralement une force de mastication plus importante et un temps de mastication plus long. On observe ainsi des courbes plus grandes, qui se traduisent par des surfaces plus importantes.

Des exemples de protocoles de time-intensité mis en œuvre dans les études analysées sont disponibles en **Annexe 3**. Globalement, les auteurs ont conclu qu'il s'agit d'une méthode intéressante pour évaluer la tendreté de la viande bovine. Cela dit, les études menées n'ont concerné qu'un nombre limité d'échantillons et ont le plus souvent comparé des modalités

relativement éloignées en terme de tendreté (long dorsal comparé à un jarret par exemple, ou viande peu cuite comparée à une viande bien cuite). Lorsque les échantillons étudiés étaient plus proches sur le plan de la tendreté (DUIZER et al, 1994 ; 1996), les auteurs ont observé une importante perte d'efficacité des paramètres du time-intensité à différencier les échantillons. Ce constat s'explique principalement par la subjectivité de la perception de chaque dégustateur (ZIMOGH et GULLETT, 1997), dont l'importance est telle qu'elle prend le pas sur les éventuelles différences de tendreté.

▪ **Electromyographie**

Des exemples de protocoles d'**électromyographie** mis en œuvre dans les études analysées sont disponibles en **Annexe 4**. Dans l'étude de DUIZER et al (1994), aucune différence significative de tendreté entre les morceaux n'a pu être mise en évidence alors que dans les autres études l'électromyographie a permis de discriminer certains traitements, en particulier lorsque le jury était entraîné (DUIZER et al, 1996 ; MIOCHE et MARTIN, 1996) ou lorsque les échantillons présentaient des niveaux de tendreté réellement différents. Dans les travaux de MATHONIERE et al (1996) par exemple, l'électromyographie différencie le mieux les échantillons selon leur degré de maturation (conditionne le statut myofibrillaire) puis leur niveau de cuisson, le type de muscle n'intervenant pas significativement.

De même que pour le time-intensité, l'électromyographie est efficace lorsque les modalités comparées sont relativement éloignées en terme de tendreté, comme pour différents degrés de cuisson par exemple (MATHEVON et al, 1995 ; SHEEHAN et al, 1997). Les paramètres discriminants sont le nombre de mastication et le temps de mastication. Le taux de mastication, en revanche, ressort rarement influencé par la tendreté des morceaux dégustés. Ces résultats s'expliquent principalement par la grande variabilité existante entre les comportements masticatoires des dégustateurs. En effet, d'une part la compression des aliments et la perception de la tendreté en bouche sont largement influencées par le profil de mastication individuel (BOURNE, 1977). Et d'autre part, les comportements masticatoires sont influencés par la dureté des aliments (PLESH et al, 1985 ; JACK et al, 1993). De plus, non seulement la mastication des sujets naïfs est différente de celles de sujets entraînés, mais elle se modifie à partir du moment où un jugement sensoriel est demandé, et ce d'autant plus chez les sujets entraînés (MIOCHE et MARTIN, 1996). Outre sa mise en œuvre particulièrement lourde, il s'agit là de la difficulté principale relative à cette méthode de mesure de la tendreté.

2.2.3 Fiche synthétique du time-intensité

Caractérisation de la méthode	
<p>Nom</p> <p>Critère(s) mesuré(s)</p> <p>Composante(s) évaluée(s)</p> <p>Type de méthode</p> <p>Méthode directe</p> <p>Caractéristiques techniques</p> <ul style="list-style-type: none"> - outil de mesure - portabilité - encombrement - résistance - automatisation <p>Coût</p>	<p>TIME-INTENSITE</p> <p>Tendreté - forces de mastication fibrillaire et conjonctive</p> <p>évaluation du niveau de tendreté</p> <p>oui</p> <p>jury de dégustateurs entraîné¹</p> <p>oui</p> <p>nécessité d'une salle de dégustation</p> <p>-</p> <p>automatisation impossible</p> <p>variable - au moins autant que l'ASC</p>
Conditions de mise en oeuvre	
<p><u>Niveau d'application</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - terrain / laboratoire - animal / carcasse / découpe - type muscle - taille, poids, volume échantillon <p><u>Etat de l'échantillon</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - frais / congelé - cru / cuit - broyé / en l'état <p><u>Mise en oeuvre</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - destructive / non - délais prélèvement/mesure - prélèvement/préparation échantillons - niveau de facilité - durée mesure - délais de réponse - nombre de répétitions - dangerosité - multi-usage 	<p>méthode de laboratoire</p> <p>dégustation sur muscle après découpe</p> <p>tous - long dorsal le plus souvent</p> <p>portion équivalente à 2 ou 3 bouchées</p> <p>congélation possible</p> <p>cuisson obligatoire</p> <p>découpé en portions</p> <p>méthode destructive</p> <p>aucun mais obligation de salubrité</p> <p>aucune sauf la cuisson</p> <p>très complexe²</p> <p>quelques secondes à minutes</p> <p>durée de la séance (1 à 2 heures)</p> <p>au moins 1 par dégustateur</p> <p>non</p> <p>non³</p>
Caractérisation du résultat	
<p><u>Performances - pouvoir prédicteur</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - intensité de liaison - précision – fiabilité - effectifs utilisés pour le calcul de r <p><u>Expression du résultat</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - sensoriel / instrumental - absolu / relatif - objectif / subjectif - interprétation facile 	<p>r = 0,82 à 0,86 avec ASC (force et temps de mastication)</p> <p>plus précis que l'ASC - fiabilité variable selon les différences de tendreté</p> <p>petits - n = 1 à 8</p> <p>sensoriel</p> <p>absolu majoritairement ou relatif</p> <p>objectif</p> <p>pas évidente⁴</p>

2.2.4 Fiche synthétique de l'électromyographie

Caractérisation de la méthode	
<p>Nom Critère(s) mesuré(s) Composante(s) évaluée(s) Type de méthode Méthode directe Caractéristiques techniques</p> <ul style="list-style-type: none"> - outil de mesure - portabilité - encombrement - résistance - automatisation <p>Coût</p>	<p>ELECTROMYOGRAPHIE Tendreté - activité des muscles impliqués dans la mastication fibrillaire et conjonctive évaluation du niveau de tendreté oui</p> <p>jury de dégustateurs novice¹ oui nécessité d'une salle de dégustation et du matériel spécifique (électrodes) - automatisation impossible variable - au moins autant que l'ASC</p>
Conditions de mise en oeuvre	
<p><u>Niveau d'application</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - terrain / laboratoire - animal / carcasse / découpe - type muscle - taille, poids, volume échantillon <p><u>Etat de l'échantillon</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - frais / congelé - cru / cuit - broyé / en l'état <p><u>Mise en oeuvre</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - destructive / non - délais prélèvement/mesure - prélèvement/préparation échantillons - niveau de facilité - durée mesure - délais de réponse - nombre de répétitions - dangerosité - multi-usage 	<p>méthode de laboratoire dégustation sur muscle après découpe tous - long dorsal le plus souvent portion équivalente à 2 ou 3 bouchées</p> <p>congélation possible cuisson obligatoire découpé en portions</p> <p>méthode destructive aucun mais obligation de salubrité aucune sauf la cuisson très complexe² quelques secondes à minutes durée de la séance (1 à 2 heures) au moins 1 par dégustateur non non³</p>
Caractérisation du résultat	
<p><u>Performances - pouvoir prédicteur</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - intensité de liaison - précision - fiabilité - effectifs utilisés pour le calcul de r <p><u>Expression du résultat</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - sensoriel / instrumental - absolu / relatif - objectif / subjectif - interprétation facile 	<p>r = 0,70 avec ASC (dureté) plus précis que l'ASC - fiabilité variable selon les différences de tendreté petits - n = 1 à 8</p> <p>sensoriel et instrumental absolu objectif⁴ critères assez simples à interpréter⁵</p>

Précisions sur le time-intensité

¹ Les membres du jury doivent mastiquer tout en évaluant le produit, ce qui requiert une grande concentration et connaissance du produit.

² Être particulièrement rigoureux sur l'entraînement du jury.

³ Les dégustateurs sont trop concentrés sur l'évaluation de la tendreté.

⁴ Il y a un nombre important de critères mesurés (8 paramètres) donc l'interprétation par rapport à la tendreté n'est pas évidente.

Précisions sur l'électromyographie

¹ Les membres du jury doivent mastiquer le plus naturellement possible, « sans réfléchir ».

² Nécessité de gérer l'installation du matériel sur les dégustateurs en plus de l'organisation de la dégustation en elle-même.

³ Les dégustateurs doivent justement déguster « sans réfléchir ».

⁴ Le résultat de l'électromyographie est la transcription instrumentale d'un événement sensoriel. Il ne peut être qu'absolu puisqu'il s'agit de l'enregistrement de l'activité d'un mouvement qui doit théoriquement être indépendant du contexte de dégustation (la mastication des dégustateurs se modifie lorsqu'un jugement sensoriel est demandé). Les résultats obtenus sur l'ensemble du jury sont théoriquement objectifs. Cependant, les profils masticatoires sont particulièrement dépendants de chaque dégustateur, ce qui rend l'objectivité du résultat discutable pour certains paramètres de mesure selon les études.

⁵ L'enregistrement de l'activité musculaire de la mâchoire est difficile à interpréter tel quel mais il permet de calculer des paramètres de mesure assez simples d'interprétation.

2.2.5 Perspectives

L'intérêt de ces méthodes temporelles par rapport à une analyse classique vient du fait qu'elles mesurent la perception de la tendreté dans son ensemble, du début de la mastication à l'ingestion, et sans interruption du processus de mastication. De fait, elles sont beaucoup plus sensibles et donnent des résultats précis et complets sur la totalité de la séquence masticatoire.

L'efficacité de ces méthodes, comme toutes, est tributaire du contexte de l'expérimentation (muscles et effets testés, large différentiel de tendreté entre les différentes modalités testées ou pas)... Dans les travaux analysés, ces méthodes semblent aussi fiables qu'une dégustation traditionnelle pour évaluer la tendreté de la viande, voire même plus précises dans certains cas, ce qui est logique puisque les informations récoltées sont plus riches. Ces conclusions ont néanmoins été acquises sur des effectifs limités et des échantillons éloignés en terme de tendreté. Sur le plan pratique, les méthodes sensorielles temporelles possèdent les mêmes inconvénients qu'une dégustation classique (destructives, obligation que les

échantillons soient consommables, besoin d'un jury entraîné...) et sont même encore plus lourdes à mettre en œuvre et à interpréter. L'électromyographie demande notamment un matériel spécifique délicat à installer.

Le time-intensité et l'électromyographie sont donc des méthodes qui peuvent s'avérer très intéressantes mais uniquement dans un contexte expérimental. Leur utilisation peut se justifier uniquement lorsque l'on souhaite avoir des informations complètes et précises, car elles sont complexes à mettre en œuvre et, de fait, relativement coûteuses.

2.3 La pression du pouce

2.3.1 Principe de la pression du pouce

Parmi les méthodes sensorielles on trouve la pression du pouce, méthode « ancestrale » du boucher, encore encrée dans les habitudes de certains professionnels. Comme son nom l'indique, cette méthode consiste à évaluer **la tendreté** d'une viande en exerçant une pression avec le pouce sur la surface de la viande. Cette vieille méthode, basée sur le toucher, s'appuie sur le savoir-faire de l'opérateur qui la pratique.

2.3.2 Performances de la pression du pouce

Le « pouce du boucher » est un outil efficace pour repérer la limite entre les zones tendres et les zones dures d'un muscle. En effet, dans l'étude de HOULBERT et MORAND (1984), les notes de dégustations diffèrent entre la zone tendre et la zone dure, alors qu'elles sont équivalentes entre 2 parties d'une même zone, même proche de la limite (**Tableau 3**).

Par contre, cette même étude a montré que la pression du pouce ne permet pas de hiérarchiser correctement différents muscles de la carcasse selon leur catégorie de tendreté. En effet, il existe bien des écarts entre les notes de dégustation de morceaux classés en 3 catégories de tendreté par la pression du pouce, mais ces écarts ne sont pas suffisamment significatifs (**Tableaux 3 et 4**). Ces résultats ne sont pas surprenants car cette méthode de mesure n'est **pas précise**.

Muscles	Zone tendre	Limite de zone	Zone dure
Macreuse	4,65	4,58	3,93
Ronds de tranche grasse	4,74	4,67	3,72
Plat de tranche grasse	4,18	3,94	3,21
Tranche	4,32	4,43	3,82
Gîte noix	4,04	4,28	3,78

Tableau 3 : Notes moyennes de tendreté sensorielle attribuées à chaque partie pour un échantillon de 6 vaches et 6 JB (note de 1 à 7 ; 7 = extrêmement tendre)

Morceaux « garantis tendres »	Morceaux « tendres »	Morceaux « à attendrir »
4,55	4,13	3,68

Tableau 4 : Notes moyennes de tendreté sensorielle attribuées à des morceaux de viande classés par niveau de tendreté à l'aide de la pression du pouce (note de 1 à 7 ; 7 = extrêmement tendre)

2.3.3 Fiche synthétique de la pression du pouce

Caractérisation de la méthode	
<p>Nom Critère(s) mesuré(s) Composante(s) évaluée(s) Type de méthode Méthode directe Caractéristiques techniques</p> <ul style="list-style-type: none"> - outil de mesure - portabilité - encombrement - résistance - automatisation <p>Coût</p>	<p>PRESSION DU POUCE tendreté fibrillaire et conjonctive évaluation du niveau de tendreté oui doigt «entraîné » (juge expert) oui - totale aucun totale automatisation impossible, mais possible de systématiser avec un opérateur faible</p>
Conditions de mise en oeuvre	
<p><u>Niveau d'application</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - terrain / laboratoire - animal / carcasse /découpe - type muscle - taille, poids, volume échantillon <p><u>Etat de l'échantillon</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - frais / congelé - cru / cuit - broyé / en l'état <p><u>Mise en œuvre</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - destructive / non - délais prélèvement/mesure - prélèvement/préparation échantillons - niveau de facilité - durée mesure - délais de réponse - nombre de répétitions - dangerosité - multi-usage 	<p>méthode de terrain toucher sur carcasse ou muscle¹ tous muscle entier en frais cru en l'état non 24h post-mortem min², aucun max aucune – le muscle doit être accessible très simple mais obligation d'un savoir-faire spécifique (juge expert) quelques secondes instantané pas de répétition en tant que telle³ non oui (grain de viande⁴)</p>
Caractérisation du résultat	
<p><u>Performances - pouvoir prédicteur</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - intensité de liaison - précision - fiabilité - effectifs utilisés pour le calcul de r <p><u>Expression du résultat</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - sensoriel / instrumental - absolu / relatif - objectif / subjectif - interprétation facile 	<p>Efficace pour repérer la zone tendre de la zone dure d'un muscle mais pas pour hiérarchiser les muscles entre eux - peu précise petite - n = 12 sensoriel relatif subjectif⁵ très simple</p>

Précisions sur la pression du pouce

¹ En pratique, la pression du pouce est mise en œuvre par certains opérateurs pour juger en entreprise la tendreté moyenne d'une carcasse par le toucher de **muscles accessibles à la coupe de gros** (long dorsal le plus souvent, dessus de côte, hampe). Elle est également utilisée par les bouchers sur les **muscles prêts à découper**, notamment pour la pratique de l'affranchi.

² Lorsqu'elle est pratiquée sur carcasse, la pression du pouce est généralement réalisée **minimum 24h post-mortem** de façon à ce que la transformation du muscle en viande ait commencé.

³ Il n'y a **pas de répétitions** à proprement parler ; le professionnel peut néanmoins tâter le muscle plusieurs fois et en différents endroits avant de donner son sentiment sur la tendreté (estimation globale sur carcasse, ou délimitation des zones tendres et dures sur un muscle).

⁴ Pour certains, la finesse du « grain de viande » serait à l'origine d'une part importante de la tendreté. Il existe différentes façon d'estimer le « grain de viande », allant de la simple caresse pour estimer le côté soyeux ou rugueux de la viande, à une pression plus soutenue visant plutôt à éprouver la résistance du produit, voire en y associant le jugement visuel de divers critères (fibres, persillé...). Cette évaluation se fait généralement sur le long dorsal au niveau de la coupe primaire. Dans cette étude, l'évaluation du « grain de viande » n'a pas été analysée dans le détail en tant que méthode de mesure de la tendreté car une étude antérieure (JABET et TURIN, 1997) a montré qu'il est impossible de formaliser cette technique, chaque professionnel possédant sa propre définition et approche du « grain de viande ». Par ailleurs, des travaux récents ont formalisé une grille de notation du « grain de viande » chez des bovins charolais, mais l'éventuelle relation entre la tendreté et le « grain de viande » ainsi défini reste à évaluer (OURY et al, 2008).

⁵ Il s'agit d'un **résultat subjectif** car défini par un seul professionnel, chacun ayant son propre référentiel de tendreté en fonction de ses perceptions, son expérience, ainsi que les niveaux de tendreté des muscles évalués précédemment et/ou habituellement. Un autre biais peut intervenir sur la subjectivité du jugement : les considérations commerciales telles que le débouché des produits. Dans un contexte expérimental, certains auteurs (MATHEVON et al, 1995) ont testé la pression du pouce en tant qu'outil de mesure objectif (plusieurs juges, évaluation en aveugle, 4 répétitions sur 6 échantillons) avec expression du résultat sur une échelle non structurée de 10 cm.

2.3.4 Perspectives

Compte tenu de sa simplicité, de sa rapidité, et du fait qu'elle soit non destructive, la pression du pouce est une méthode de terrain par excellence. Ses performances pour délimiter « en temps réel » les zones tendres et dures d'un muscle la rendent particulièrement adaptée à la pratique de l'affranchi au sein d'un muscle, et elle est effectivement utilisée à cet effet par les professionnels. Son utilisation en entreprise pour orienter les carcasses selon les circuits de distribution est plus discutable. En effet, elle n'est pas suffisamment précise pour comparer les muscles (*et a fortiori* les carcasses) entre eux, elle est éminemment subjective. Enfin, elle requiert l'intervention d'un professionnel expérimenté. En raison de ces contraintes, son utilisation en abattoir de façon automatique et standardisée est difficilement envisageable. Pour les mêmes raisons, et en particulier son imprécision, son utilisation dans un contexte expérimental n'est pas non plus adaptée. La pression du pouce est donc la méthode de terrain par excellence mais adaptée à un seul type d'usage, la pratique de l'affranchi.

Méthodes physiques

Les méthodes de mesure physiques de la tendreté font appel à des instruments qui tentent de simuler certaines sensations du consommateur (principalement le toucher) pendant la mastication, puis de les mesurer. Il s'agit pour la plupart de tests mécaniques, qui mesurent la résistance ou l'amplitude de la déformation du produit à différents types de forces qui lui sont appliquées. Selon les cas, ces mesures sont réalisées sur des échantillons de viande crue ou cuite.

Il existe différents types de forces susceptibles d'être mesurées et rendant compte de la résistance de la viande. La mesure des **forces de cisaillement** est celle qui est la plus répandue. Elle consiste à mesurer la force nécessaire pour cisailer (séparer un morceau en 2 ou plusieurs parties) un échantillon de viande, généralement cuit. La mesure des **forces de compression** est également fréquemment utilisée. Il s'agit de mesurer la force nécessaire pour comprimer un échantillon de viande crue ou cuite. L'échantillon reste entier mais son volume diminue. Il est également possible de mesurer les **forces de tension**, c'est-à-dire la force (appliquée en surface) nécessaire pour étirer un échantillon.

De nombreux instruments de mesure de ces différentes forces ont été mis au point, si bien qu'il est difficile de les considérer de façon exhaustive, notamment pour les plus anciens. D'ailleurs, cela ne présente que peu d'intérêt car beaucoup mesurent les mêmes forces, sont basés sur le même principe, et ne diffèrent que dans le détail du protocole mis en œuvre. Les instruments retenus pour une évaluation précise sont ceux encore et majoritairement utilisés aujourd'hui dans les travaux de recherche français et internationaux.

3 Méthodes physiques

3.1 Mesure des forces de cisaillement

3.1.1 Principe de la mesure des forces de cisaillement

La force de cisaillement correspond à la contrainte nécessaire pour faire passer une arrête tranchante à travers un morceau de viande perpendiculairement aux fibres musculaires. En pratique, les appareils de mesure développés prennent en compte 2 facteurs : d'une part les myofibrilles sont comprimées et se déplacent latéralement sous l'effet de cette pression, et d'autre part le tissu conjonctif est cisailé (SALE, 1971). Ainsi, déterminé sur une viande crue maturée où la résistance des myofibrilles est négligeable par rapport à celle du conjonctif, la force de cisaillement représente une bonne approximation de la résistance des tissus conjonctifs, et donc de la dureté de base de la viande.

En fait, lors d'une mesure de cisaillement, l'échantillon est comprimé jusqu'à ce qu'il se coupe en 2 moitiés. Le profil de la force appliquée tout au long de la mesure est enregistré, mais la valeur communément utilisée est le pic maximum de la force appliquée au moment du cisaillement de l'échantillon.

3.1.1.1 La cellule de Warner-Bratzler : de loin la plus utilisée aujourd'hui

Historiquement, plusieurs types d'appareils ont été développés pour mesurer les forces de cisaillement d'un morceau de viande. En fait, la différence principale entre ces appareils vient de leur cellule de mesure, c'est-à-dire de la partie de l'appareil permettant de cisailier l'échantillon (taille et épaisseur de la lame, nombre de lames, vitesse de déplacement, force appliquée...). Aujourd'hui, la mesure des forces de cisaillement est généralement réalisée avec des machines à essai ou texturomètres⁸ de type Instron. Ces machines sont dites « universelles » car elles sont prévues pour que l'essentiel des cellules de mesure mises au point puissent y être installées. Elles permettent ainsi de réaliser la majorité des tests rhéologiques grâce à l'installation de la cellule spécifique de la méthode que l'on souhaite utiliser. Pour la mesure des forces de cisaillement, une méthode est aujourd'hui prépondérante dans l'ensemble des études : celle de Warner-Bratzler.

L'idée que cisailier un échantillon de viande cuite pourrait donner des indications sur sa tendreté date de la fin des années 20 avec la mise au point de l'appareil de WARNER (1928). Perfectionné progressivement, notamment par BRATZLER (1932), la version finale de l'appareil de mesure a été présentée dans les années 50 (BRATZLER, 1949 ; WARNER, 1952). L'appareil de Warner-Bratzler développé historiquement n'est plus utilisé tel quel aujourd'hui, ce sont les cellules de mesure issues de cette méthode qui sont largement utilisées. On parle alors de mesure des forces de cisaillement selon Warner-Bratzler. Cette

⁸ Les machines à essais permettent de réaliser quasiment tous les types de tests rhéologiques. BOURNE (1966) fut le premier à utiliser ce genre d'appareil pour des recherches en agroalimentaire. Aujourd'hui, l'essentiel des études est réalisé avec ce genre d'appareils, notamment l'Instron ou le texturomètre. Ces appareils sont munis d'une cellule test qui soutient et manipule l'échantillon. Les cellules sont variables ce qui permet de réaliser différents types de tests agro-alimentaires. Une de leur application commune est l'utilisation de cellules de cisaillement ou de compression pour la mesure de la tendreté.

méthode est à ce jour **la plus utilisée** à travers le monde pour mesurer la tendreté de la viande. Elle fait même office de référence pour de nombreuses équipes de recherche, dans les pays anglo-saxons notamment.

La cellule de Warner-Bratzler est composée d'un plateau de base rainuré équipé de guides au travers desquels passent la lame de cisaillement (pleine ou percée) (**Figure 6**). L'échantillon est placé à 90° en travers de la rainure. La lame passe au travers de l'échantillon et la tendreté est déterminée par le pic de force enregistré au cours du test.

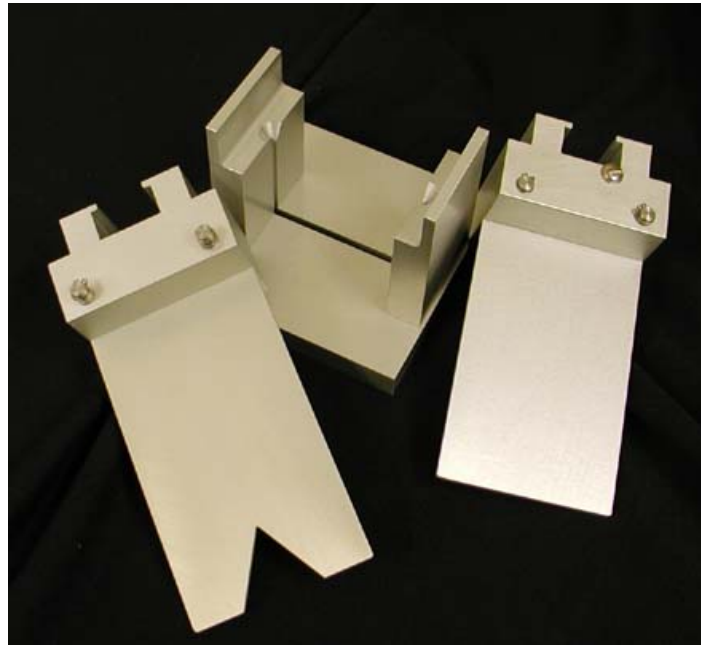


Figure 6 : Cellule de type Warner-Bratzler avec les 2 lames utilisables

3.1.1.2 Exemples d'autres méthodes

La bibliographie fait état d'autres systèmes pour mesurer les forces de cisaillement, comme par exemple l'appareil de Salé (ou salémètre) développé au début des années 70 (SALE, 1971) ou le tendéromètre MIRINZ mis au point par les Néo-Zélandais (MacFARLANE et MARER, 1966). De même que l'appareil de Warner-Bratzler, le salémètre n'est quasiment plus utilisé en l'état aujourd'hui. Cela dit, les cellules mises au point étaient utilisées avec les machines à essais universelles il y a encore une dizaine d'années. Le tendéromètre MIRINZ quant à lui est très peu utilisé sur la viande bovine, son application principale étant sur la viande ovine. Ces méthodes ne sont pas innovantes et encore moins révolutionnaires par rapport à celle de Warner-Bratzler, ce que traduit d'ailleurs leur faible utilisation.

3.1.2 Performances de la mesure des forces de cisaillement

L'essentiel des performances de la mesure des forces de cisaillement pour évaluer la tendreté est présentée à partir de données acquises selon la méthode Warner-Bratzler, et ce pour 2 raisons :

- il s'agit de la méthode qui présente le plus d'intérêt car elle est utilisée de façon largement majoritaire dans l'ensemble des travaux de recherche concernant la tendreté de la viande.
- de fait, il s'agit de la méthode la plus renseignée, et de loin, les autres méthodes ayant été beaucoup moins étudiées en soi.

3.1.2.1 Intensité de la liaison

Selon les études, l'intensité de la liaison potentielle existant entre les forces de cisaillement et d'autres méthodes de mesure de la tendreté est évaluée soit au travers du calcul des coefficients de corrélation (**Tableau 5**), soit le pourcentage d'échantillons bien classés au sein de classes définies selon des seuils. Quelques exemples de protocoles de mesure des forces de cisaillement observés dans les études analysés sont disponibles en **Annexe 5**.

Méthodes	Paramètres	Cisaillement par WB		Caractéristiques des études	Références
		Force max	Energie		
Electromyographie	aire séquence complète	0,74	-	n = 6 SM ; 18j	MATHEVON et al, 1995
Analyse sensorielle	dureté	0,72	-		
		note de tendreté	- 0,39	- 0,31	n = 2370 LD ; 7j
Time-intensité	dureté initiale	0,793	-	n = 9 ST ; 21j	SHEEHAN et al, 1997
	dureté milieu de séquence	0,809	-		
	dureté fin de séquence	0,799	-		
Forces de compression	K à 20%	0,04	0,11	n = 42 LD ; 1, 3, 7, 10, 14 et 21j	CAMPO et al, 2000
	K à 80%	0,11	0,19		
Dosage collagène	total	0,03	0,02		
	insoluble	0,02	-0,02		
	solubilité	0,01	0,09		

Tableau 5 : Exemples de corrélations r entre la mesure des forces de cisaillement et d'autres méthodes de mesure de la tendreté

SM = semimembraneux ; ST = semitendineux ; LD = long dorsal
 n = nombre de modalités étudiées sans inclure les répétitions de mesures.
 21 j = nombre de jours de maturation

Les **coefficients de corrélation** observés entre les mesures des forces de cisaillement et certaines autres méthodes de mesure instrumentales de la tendreté (mesure des forces de compression, dosage du collagène) ne montrent pas de lien entre ces différentes méthodes. Ces résultats sont décevants, particulièrement pour la compression à 80% et les dosages du collagène, puisque ces méthodes sont réputées pour refléter majoritairement la composante conjonctive de la tendreté (voir dans l'analyse de chaque méthode), de même que les forces de cisaillement. Ces mauvais résultats peuvent s'expliquer en partie par le protocole puisque les modalités étudiées sont éloignées sur le plan de la tendreté fibrillaire (1 à 21 jours de maturation) mais pas conjonctive (même muscle).

En revanche, les r observés avec les méthodes sensorielles traduisent une liaison intéressante avec la mesure des forces de cisaillement. Cela dit, ils n'expliquent au final que 50 à 65% de la variabilité. De plus, ces résultats sont obtenus dans le cas d'études mettant en jeu de très faibles effectifs animaux. Sur ce point, le travail qui peut être considéré comme probant est l'étude Qualvigène⁹ réalisée sur plus de 2300 animaux. Sur de tels effectifs, les coefficients de corrélation entre les paramètres de mesure des forces de cisaillement et la note de tendreté par analyse sensorielle ne sont que de -0,31 et -0,39 ; soit des R^2 compris entre 0,12 et 0,23.

⁹ L'objectif du programme Qualvigène était de rechercher des prédicteurs génétiques des caractéristiques musculaires et des qualités de la viande chez 3 races bovines allaitantes françaises (charolaise, limousine, blonde d'aquitaine).

Ces résultats sont décevants car, *a priori*, insuffisants pour considérer les forces de cisaillement comme de bon prédicteurs de la tendreté. Cela dit, il faut néanmoins prendre en compte 2 informations de taille :

- D'une part, l'étude Qualvigène a porté sur le même muscle (long dorsal) pour tous les animaux et sur des animaux du même type (taurillons de race à viande). Ainsi, il n'est pas surprenant d'observer une corrélation si faible, les modalités comparées étant très proches.
- D'autre part, dans cette étude, 9 paramètres de mesure¹⁰ instrumentaux réputés pour être des indicateurs de la tendreté de la viande bovine ont été comparés aux notes de tendreté issue de l'analyse sensorielle. Les forces de cisaillement sont les seules pour lesquelles une liaison a été mise en évidence¹¹. Ces résultats sont en accord avec l'ensemble des études et confirment que, parmi les variables considérées ici, les forces de cisaillement sont celles qui permettent d'évaluer la tendreté au plus proche de ce qu'estime un jury de dégustateurs.

Dans beaucoup de travaux, les performances des forces de cisaillement pour estimer la tendreté ne sont pas évaluées aux travers des coefficients de corrélation. En effet, certains auteurs (SHACKELFORD et al, 1991 ; 1997a ; 1999 ; WHEELER et al, 1997b ; MILLER et al, 1995) estiment qu'il est plus intéressant d'étudier dans quelle mesure les forces de cisaillement permettent de **classer les muscles dans 2 ou plusieurs classes de tendreté** définies à partir de seuils déterminés par analyse sensorielle. Le nombre et la valeur de ces seuils sont divers et variés selon la bibliographie qui fait également état de performances de classement plus ou moins bonnes selon ces seuils et le degré de précision des prédictions.

3.1.2.2 Précision de la mesure des forces de cisaillement

La mesure des forces de cisaillement n'est pas aussi sensible que l'analyse sensorielle puisque, comme le montre la **Figure 7**, elle ne permet pas de mettre en évidence les mêmes différences de tendreté entre muscles que ne le fait l'analyse sensorielle (HARRIS et SHORTHOSE, 1988 ; SHACKELFORD et al, 1995). Par contre, pour un même muscle sur lequel différentes modalités sont étudiées (2 types de cuisson par exemple), la mesure des forces de cisaillement fournit des résultats de précision équivalente à ceux d'un jury d'analyse sensorielle (SHACKELFORD et al, 1997b).

Cela dit, au-delà de l'expérimentation mise en œuvre (choix des éventuels facteurs de variation, des animaux, des muscles...), la précision de cette méthode peut largement varier en fonction de la façon de réaliser le protocole de mesure. La préparation des échantillons par exemple influe particulièrement sur les performances de répétabilité (**Tableau 6**). En effet, toutes choses égales par ailleurs, cette dernière peut varier dans de larges proportions (performances pouvant aller du simple au double) selon l'orientation des fibres, la température et le temps de cuisson des échantillons, les instruments de cuisson utilisés, ou encore le nombre de répétitions réalisées.

¹⁰ Les paramètres étudiés étaient : pH, teneurs en humidité, lipides, collagène total et insoluble, nombre et taille des fibres musculaires, énergie et contrainte maximale de cisaillement.

¹¹ La valeur seuil de 0,15 a été prise pour r , considérant qu'en deçà de ce seuil il y a absence totale de corrélation entre les paramètres considérés.

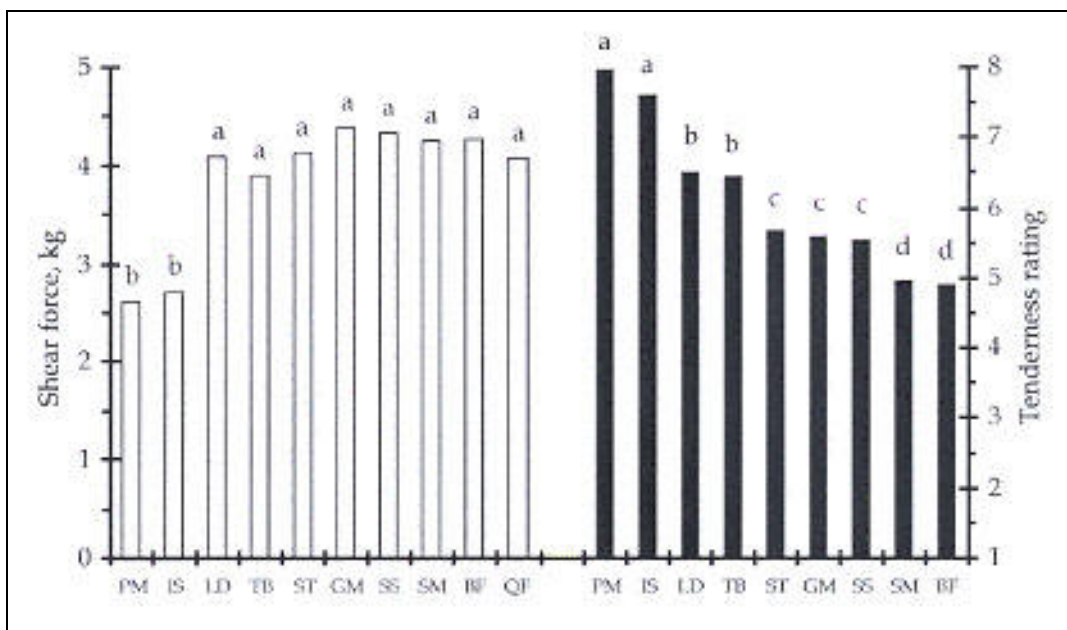


Figure 7 : Comparaison des différences de tendreté entre muscles selon la mesure des forces de cisaillement par Warner-Bratzler (en blanc) et l'analyse sensorielle (en noir)

PM = psoas major ; IS = infraspinatus ; TB = triceps brachii ; LD = longissimus dorsi ; ST = semitendinosus ; GM = gluteus medius ; SS = supraspinatus ; BF = biceps femoris ; SM = semimembranosus ; QF = quadriceps femoris

Facteur	Muscle	Effectifs	Répétabilité de la mesure	Référence
<u>Orientation des fibres</u> - parallèle - perpendiculaire	longissimus et semitendinosus	29-32	0,66-0,70 0,12- 0,45	WHEELER et al, 1994 WHEELER et al, 1996
<u>Température et temps de cuisson</u> Température = 70°C Temps = 30 min	longissimus	54 56	0,79 0,53	WHEELER et al, 1996
<u>Instruments de cuisson</u> Grill électrique à foyer ouvert Four à convection Grill double à tapis roulant	longissimus	360-34 34 360	0,64-0,74 0,68 0,85	WHEELER et al, 1996 WHEELER et al, non publié
<u>Taille et nombre des répétitions</u> - 6 « frites » - 1 tranche	longissimus	180 204	0,85 0,89	SHACKELFORD et al, 1999

Tableau 6 : Influence de la préparation des échantillons sur la répétabilité des mesures de cisaillement par Warner-Bratzler

La même observation a été faite, tant sur la valeur moyenne des forces de cisaillement que sur leur répétabilité, entre plusieurs institutions appliquant chacune son propre protocole (**Tableau 7**). Selon les centres de recherche, les valeurs de répétabilité des mesures sont de médiocres (0,39) à bonnes (0,73), avec des institutions présentant des performances intermédiaires. Lorsque toutes les institutions ont mis en œuvre le même protocole standardisé, non seulement les différences ont été quasiment gommées, mais les performances sont largement supérieures, avec des valeurs de répétabilité s'étalant de 0,67 à 0,87 (WHEELER et al, 1997a).

Institution	Moyenne force WB \pm écart-type (kg)	Répétabilité
Avec protocole habituel		
A	4,7 \pm 1,1	0,73
B	2,9 \pm 0,5	0,39
C	3,2 \pm 0,8	0,72
D	3,4 \pm 0,9	0,63
E	3,4 \pm 0,7	0,44
Avec protocole standard		
A	5,1 \pm 1,7	0,87
B	4,3 \pm 1,2	0,81
C	4,6 \pm 1,5	0,67
D	4,2 \pm 1,3	0,75
E	3,7 \pm 1,5	0,80

Tableau 7 : Différences entre institutions sur les résultats et la répétabilité de mesures de forces de cisaillement Warner-Bratzler selon le protocole appliqué

3.1.3 Fiche synthétique de la mesure des forces de cisaillement

Caractérisation de la méthode	
<p>Nom</p> <p>Critère(s) mesuré(s)</p> <p>Composante(s) évaluée(s)</p> <p>Type de méthode</p> <p>Méthode directe</p> <p>Caractéristiques techniques</p> <ul style="list-style-type: none"> - outil de mesure - portabilité - encombrement - résistance - automatisation <p>Coût</p>	<p>WARNER-BRATZLER (WBSF)</p> <p>force de cisaillement</p> <p>principalement conjonctive¹</p> <p>évaluation du niveau de tendreté</p> <p>oui - mesure de la résistance de la viande</p> <p>machines à essai universelles type instron</p> <p>non - nécessité d'un opérateur</p> <p>en moyenne cubes de 50 x 30 x 30 cm</p> <p>pour labo - probable en industrie²</p> <p>automatisation impossible</p> <p>modéré - 25 €/échantillon³</p>
Conditions de mise en oeuvre	
<p><u>Niveau d'application</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - terrain / laboratoire - animal / carcasse / découpe - type muscle - taille, poids, volume échantillon <p><u>Etat de l'échantillon</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - frais / congelé - cru / cuit - broyé / en l'état <p><u>Mise en oeuvre</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - destructive / non - délais prélèvement/mesure - prélèvement/préparation échantillons - niveau de facilité - durée mesure - délais de réponse - nombre de répétitions - dangerosité - multi-usage 	<p>méthode de laboratoire</p> <p>sur muscle après découpe</p> <p>long dorsal - applicable aux autres mais</p> <p>fiabilité variable selon le muscle</p> <p>1 tranche/échantillon</p> <p>frais - congélation possible⁴</p> <p>cuits (quelques études sur cru)</p> <p>coupé en cubes ou « frites » de quelques cm⁵</p> <p>méthode destructive</p> <p>aucun mais éviter le dessèchement des fibres musculaires quand cubes préparés</p> <p>découpe rigoureuse⁶ et cuisson</p> <p>facile mais longue et être très soigné</p> <p>30 min/échantillon⁷</p> <p>instantané mais traitements statistiques (au moins 24h)</p> <p>6 à 10 selon les protocoles⁸</p> <p>non</p> <p>non - possibilité d'utiliser d'autres cellules de mesure sur les machines universelles</p>
Caractérisation du résultat	
<p><u>Performances - pouvoir prédicteur</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - intensité de liaison - précision - fiabilité - effectifs utilisés pour le calcul de r <p><u>Expression du résultat</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - sensoriel / instrumental - absolu / relatif - objectif / subjectif - interprétation facile 	<p>r = - 0,31 à - 0,39 avec ASC (note)</p> <p>précision suffisante - bonne fiabilité mais</p> <p>très sensible aux variations de protocole</p> <p>très grands - n = 2370</p> <p>Instrumental</p> <p>absolu</p> <p>objectif</p> <p>simple mais à relier aux attentes consos⁹</p>

Précisions sur la mesure des forces de cisaillement par Warner-Bratzler

¹ La mesure des forces de cisaillement est un très mauvais indicateur du niveau de maturation d'une viande puisqu'elle apprécie **principalement la composante conjonctive** de la tendreté, en particulier sur des échantillons maturés.

² Ils seraient certainement **résistants** aux conditions d'ambiance particulières rencontrées en industrie, mais leur utilisation dans ce contexte n'est pas envisageable, principalement en raison de la préparation des échantillons nécessaire (voir plus loin).

³ L'investissement initial est de l'ordre de 20000 euros (instron, cellule et logiciel). La cellule de mesure Warner-Bratzler et le dispositif pour l'adapter sur une machine à essai « universelle » coûtent à eux seuls autour de 6000 euros. Une fois le matériel acquis, le prix de revient de la mesure pour un échantillon se situe autour de 25 euros.

⁴ La **congélation** des échantillons avant leur préparation ne pose **pas de problème en soit**, mais il faut être homogène sur le mode de décongélation choisi, de même que sur la cuisson des échantillons.

⁵ Les dimensions de ces découpes sont variables selon les protocoles mis en œuvre mais en général une tranche est suffisante pour découper le nombre nécessaire de cubes ou de « frites » correspondant aux répétitions assurant la représentativité de l'échantillon.

⁶ Outre la cuisson, la mesure des forces de cisaillement demande une **préparation soignée** des échantillons. Les tranches de muscles doivent être prélevées dans le sens des fibres, puis les cubes (ou « frites ») découpés perpendiculairement aux fibres de façon à ce que la lame coupe les échantillons également perpendiculairement aux fibres musculaires.

⁷ La durée de la mesure dure environ une minute par cube ou « frite ». Avec la préparation des « frites » et les répétitions il faut compter environ **30 minutes par échantillon**.

⁸ Dans les travaux de recherche, le **nombre de répétitions** par échantillon se situe entre 6 et 10. L'AMSA (1995) recommande de mesurer au moins 6 cubes ou « frites » par échantillon, la répétabilité de la mesure étant peu améliorée au-delà. En France, on mesure généralement 10 « frites » par échantillon, l'objectif étant d'avoir une bonne représentativité du morceau considéré. Mais davantage que le nombre, c'est la qualité des « frites » qui est importante. Il faut donc porter une attention particulière à leur préparation (sens des fibres, fibres intactes, non sèches...), ce qui constitue une des étapes délicates du protocole de mesure. Pour palier cette difficulté, et envisager une mesure de la tendreté par cisaillement plus opérationnelle sur le terrain, SHACKELFORD et al (1999) ont étudié les résultats obtenus en mesurant la force de cisaillement sur 1 tranche (5 cm de long, 1 cm d'épaisseur, prélèvement parallèle à l'orientation des fibres). Les performances de répétabilité des mesures sont les mêmes, voire meilleurs, que celles obtenus avec les « frites ».

⁹ Plus la force nécessaire pour cisailer l'échantillon est grande, plus le muscle est résistant donc dur. Cela dit, son expression en kg (ou Newton) doit être reliée aux attentes des consommateurs en terme de tendreté ; c'est sur ce point que réside la difficulté. Dans cet objectif nombre d'auteurs ont tenté de définir des **seuils d'acceptabilité** de tendreté en reliant des analyses sensorielles à des mesures de forces de cisaillement. Mais ces seuils sont évidemment largement variables selon le contexte dans lequel les essais ont été mis en place.

Remarque : Le Newton (N) est l'unité de force selon le Système International (SI). 1 N correspond à la force capable de communiquer à une masse de 1 kg une accélération de 1m/s^2 . Sachant qu'1 kg pèse environ 10 N sur Terre (exactement 9,81 N si on prend la valeur usuelle de l'accélération de la pesanteur $g = 9,81\text{ m/s}^2$), il est admis qu'une force de 1 kg (équivalent à 1 kg-force : ancienne unité de poids source de confusion) est égal à 1décaN.

3.1.4 Perspectives

Ce n'est pas un hasard si pour beaucoup la mesure des forces de cisaillement pour évaluer la tendreté est considérée comme incontournable. Bien qu'elle soit de laboratoire et destructive, il s'agit en effet d'une méthode opérationnelle car objective, rapide, facile à interpréter, peu coûteuse... Ses inconvénients majeurs sont la rigueur avec laquelle elle doit être mise en œuvre concernant la préparation des échantillons (pas trop tôt avant l'analyse, dimensions égales), ainsi que l'absence de protocole normalisé. En effet, les performances de cette méthode sont particulièrement sensibles à ces variations. De plus, bien qu'elle soit parfois mise en œuvre sur muscles crus, les échantillons doivent théoriquement être cuits pour refléter la résistance du produit tel que consommé, ce qui rajoute une source de variations.

La mise en œuvre de la mesure des forces de cisaillement n'est pas envisageable en routine en entreprise, notamment en raison de son caractère destructif. Par contre, dans un contexte expérimental, la mesure des forces de cisaillement est une méthode de détermination de la tendreté intéressante car universelle et opérationnelle. Il faut toutefois garder à l'esprit que cette méthode ne mesure pas la tendreté dans son ensemble, mais la résistance de la viande, celle-ci étant davantage liée à la composante conjonctive du muscle ; sa précision est donc inadaptée à certains dispositifs expérimentaux. En terme de perspectives, la filière française gagnerait à standardiser le protocole de mise en œuvre de cette méthode, au moins sur le plan national, voire même à « cartographier » les différences imputables aux variations de protocole.

3.2 *Mesure des forces de compression*

3.2.1 Principe de la mesure des forces de compression

La force de compression correspond à la contrainte nécessaire pour déformer un échantillon jusqu'à un degré défini. Selon la configuration choisie (longitudinale, transversale ou axiale) la déformation appliquée et la déformation latérale de l'échantillon peuvent être perpendiculaires ou dans le sens des fibres musculaires (LEPETIT, 1988). La contribution respective des myofibrilles et du tissu conjonctif à la tendreté de la viande peuvent être mesurés en fonction de l'orientation de l'échantillon et du taux de compression appliqué au cours du test (LEPETIT et CULIOLI, 1994).

De même que pour les forces de cisaillement, la mesure des forces de compression est aujourd'hui principalement réalisée avec des machines à essais « universelles » sur lesquelles sont installées des cellules de mesure spécifiques ; elles varient sur la forme ou l'épaisseur du piston, la force et le pourcentage de compression appliqués, le réceptacle dans lequel est positionné l'échantillon à compresser... Au delà de cellules de mesure parfois différentes, la méthode utilisée peut différer par le nombre de cycles de compression. Dans les publications, ce point est source de confusion, d'autant plus que les auteurs regroupent souvent des méthodes différentes sous un unique nom : l'analyse du profil de la texture ou TPA. Après une analyse plus fine, il semble que dans la majorité des cas ce soit en fait la méthode INRA qui soit mise en oeuvre (ou l'équivalent de cette méthode). L'analyse du profil de la texture en tant que tel est plus généralement utilisée dans les études anglo-saxonnes.

3.2.1.1 *La méthode INRA*

Cette méthode (SALE et al, 1984 ; LEPETIT et SALE, 1985) consiste à comprimer l'échantillon à 20 et 80% de l'épaisseur de l'échantillon sur 1 cycle de compression. La cellule de mesure (**Figure 8**) limite la tension de l'échantillon dans une direction, ce qui rend possible une analyse sélective bien perpendiculaire (configuration transversale) ou parallèle (configuration longitudinale) aux myofibrilles. Les résultats des études menées par l'INRA ont montré que ces 2 niveaux de compression sont respectivement représentatifs de la résistance myofibrillaire et de la résistance collagénique. Les paramètres déterminés sont la tension maximale exercée durant la compression et le facteur d'élasticité. Ce principe de mesure est très utilisé pour la mesure des forces de compression, et particulièrement en France puisqu'il s'agit d'une méthode développée par l'INRA

3.2.1.2 *L'analyse du profil de la texture (TPA)*

Cette méthode consiste à comprimer l'échantillon selon un certain pourcentage de sa hauteur (entre 60 et 90%) sur 2 cycles de façon à simuler la mastication. Le piston applique la force nécessaire pour compresser l'échantillon une première fois (cycle n°1) selon les caractéristiques définies, il est relâché puis enfoncé une seconde fois (cycle n°2) jusqu'à la même profondeur que lors du cycle n°1. Le type de cellule majoritairement utilisé est constitué de 2 plaques parallèles striées, proches l'une de l'autre mais ne se touchant pas (**Figure 9**). Une courbe (**Figure 10**) représente la force appliquée en fonction du temps et permet de calculer diverses propriétés du produit, présentées et définies dans le **Tableau 8**. Pour la mesure de la tendreté, les plus utilisées sont la dureté (N), la fracturabilité ou force de rupture (N), la cohésion, l'élasticité (mm), la masticabilité (J) et l'adhésivité (10^3 J).

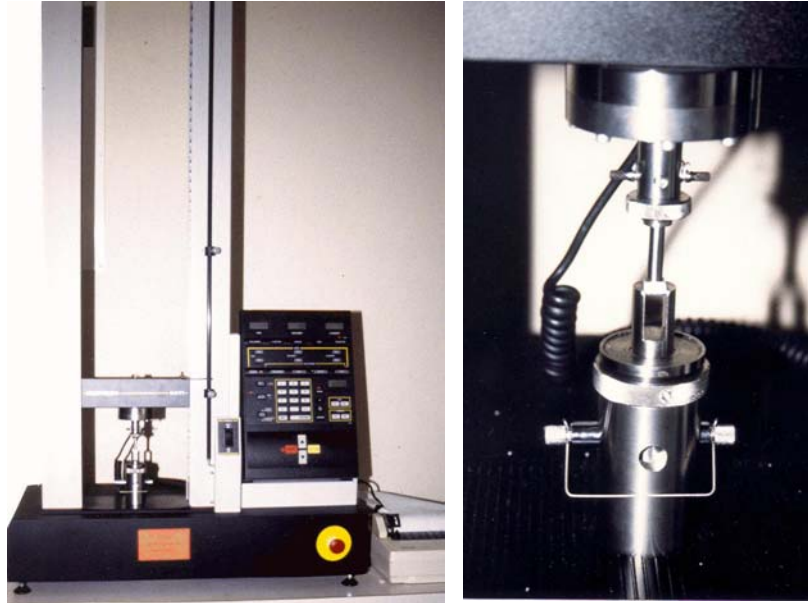


Figure 8 : Texturomètre et cellule pour la mesure des forces de compression selon la méthode INRA



Figure 9 : Type de cellule majoritairement utilisée pour l'analyse du profil de texture

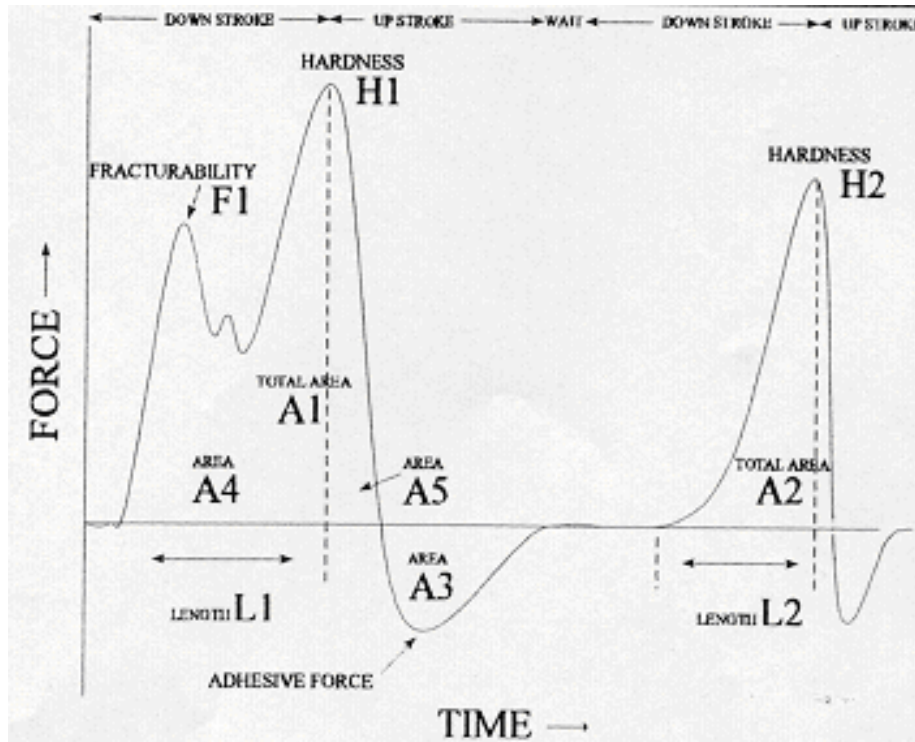


Figure 10 : Courbe de profil de la texture d'un échantillon

Dureté (hardness)	Force maximale de compression. H1 pour le pic de la première compression, H2 pour le pic de la seconde. C'est la force nécessaire pour atteindre une déformation donnée.
Aire (area)	Représente l'énergie sur une partie définie du test. A1 pour le premier pic de compression, A2 pour le second, et A3 pour le premier retrait.
Cohésion (cohesiveness)	$A2 \div A1$. Quantité pour simuler la teneur des liens internes qui constitue le corps de l'échantillon. Une valeur de 1 indique que l'échantillon est totalement élastique, tandis qu'une valeur de 0 indique qu'il ne récupère pas ses propriétés initiales.
Elasticité (springiness)	Hauteur à laquelle revient un échantillon déformé après retrait de la force d'écrasement (entre la première et la seconde compression).
Index d'élasticité (springiness index)	Elasticité X Déformation maximale. Donnée qui permet de comparer des échantillons de poids différents.
Collant (guminess)	Dureté X Cohésion. Quantité pour simuler l'énergie nécessaire pour détruire un état mi-solide vers un état de déglutition.
Masticabilité (chewiness)	Dureté X Cohésion X Elasticité. Quantité pour simuler l'énergie nécessaire pour mastiquer un produit mi-solide vers un état de déglutition. Utilisable uniquement pour comparer des échantillons de même poids.
Force de rupture (fracture force)	F1. Pic de force initial durant la première phase de compression du test.
Module (modulus)	$H1 \div L1$
Force d'adhésion (adhesive force)	Force maximum nécessaire pour retirer la sonde de l'échantillon après avoir appliqué une force de compression.
Adhésion (adhesiveness)	A3. Energie nécessaire pour retirer la sonde de l'échantillon après avoir appliqué une force de compression.
Adhésivité	Aire négative de la première compression

Tableau 8 : Définitions des différentes propriétés du produit calculables à partir de la courbe du profil de la texture de l'échantillon

3.2.2 Performances de la mesure des forces de compression

Aujourd'hui, la mesure des forces de compression pour évaluer la tendreté d'une viande est très peu utilisée. En effet, les méthodes qui priment sont soit l'analyse sensorielle, soit la mesure des forces de cisaillement selon Warner-Bratzler, même en France. Etant largement moins renseignée, notamment en données récentes, l'analyse des performances de la mesure des forces de compression est peu précise. Certaines études utilisent encore cette méthode. Les coefficients de corrélation entre la mesure de compression et les paramètres d'autres méthodes de mesure ont été calculés. Ils sont présentés dans les **Tableaux 9 & 10** selon la méthode de compression utilisée. Quelques exemples de protocoles de mesure des forces de compression observés dans les études analysés sont disponibles en **Annexe 6**.

3.2.2.1 Méthode de compression INRA

Méthodes	Paramètres	Compression méthode INRA			Caractéristiques des études	Références
		module à 20%	stress 20%	stress à 80%		
Electromyographie	aire séquence complète	0,73	-	-	n = 6 SM ; 18j	MATHEVON et al, 1995
	dureté	0,73	-	-		
Analyse sensorielle	note de tendreté	- 0,80	-	-	n = 18 LD ; 1, 4 et 14j	TOURAILLE et al, 1990
	descripteurs de tendreté	0,94			n = 2 LD, ST, TB ; 2, 6 et 10j	ADIV, 2002 ; FRENCIA et al, 2002
Time-intensité	dureté initiale	0,75	-	-	n = 9 ST ; 21j	SHEEHAN et al, 1997
	dureté milieu de séquence	0,77	-	-		
	dureté fin de séquence	0,73	-	-		
Forces de cisaillement	Force max	-	-	-	n = 42 LD ; 1, 3, 7, 10, 14 et 21j	CAMPO et al, 2000
	énergie	-	-	0,19		
Dosage collagène	total	-	0,21	0,19		
	solubilité	-	0,30	0,13		
Surface des fibres	à 2j	-	0,31	-	n = 106 LT ; 2, 7 et 21j	RENAND et al, 2001
	à 7j	-	0,27	-		
	à 21j	-	0,16	-		

Tableau 9 : Exemples de corrélations r entre la mesure de la force de compression selon la méthode INRA et d'autres méthodes de mesure de la tendreté

SM = semimembraneux ; ST = semitendineux ; LD = long dorsal
n = nombre de modalités étudiées sans inclure les répétitions de mesures.
21 j = nombre de jours de maturation

De même que pour les forces de cisaillement, les coefficients de corrélation montrent une absence de lien entre la mesure des forces de compression selon la **méthode INRA** et les méthodes de mesure de la tendreté non sensorielles pour lesquelles des données sont disponibles. Encore une fois, le résultat le plus décevant est celui entre le dosage du collagène et les forces à 80% de compression, pourtant censées refléter la composante

conjonctive de la tendreté selon l'INRA. Ces résultats ne sont pourtant pas surprenants : les échantillons ne sont certainement pas suffisamment éloignés en terme de tendreté (analyse uniquement sur le long dorsal). En effet, des différences significatives peuvent être observées lorsque les muscles sont éloignés sur le plan de la tendreté (faux-filet vs paleron), aussi bien au niveau de la mesure de la composante myofibrillaire que de la composante collagénique (ADIV, 2000). La différenciation de l'état des myofibrilles par la mesure des forces de compression est variable selon les études : les différents niveaux de cuisson (saignant, à point et bien cuit) sont souvent bien discriminés alors que les résultats sont plus mitigés pour les temps de maturation (MATHEVON et al, 1995 ; MATHONIERE et al, 1996 ; SHEEHAN et al, 1997).

Les corrélations observées avec les méthodes sensorielles montrent une liaison de 0,73 à 0,80 avec le module à 20% de compression, qui est le paramètre souvent le plus informatif. Or, cela explique seulement un peu plus de 50% de la variabilité de la tendreté. Ces résultats sont du même ordre que ceux observés avec la mesure des forces de cisaillement, et ont également été obtenus sur des effectifs limités et sur des types musculaires similaires.

3.2.2.2 Méthode de compression TPA

Méthode	Paramètres	Compression TPA				Caractéristiques des études	Références
		dureté 1er	dureté 2d	cohésion	masticabilité		
Time-intensité	lmax	-	-	0,83	0,75	n = 5 LD ; 7j	DUIZER et al, 1996
	DUR	-	-	0,78	0,70		
	Inc Angle	-	-	0,79	0,90		
	Inc Area	0,78	0,87	-	-		
	Dec Angle	0,89	0,86	-	-		
	Dec Area	-	-	0,86	0,78		
	AUC	-	-	0,82	-		

Tableau 10 : Exemples de corrélations r entre l'analyse du profil de la texture et d'autres méthodes de mesure de la tendreté

Avec l'**analyse du profil de la texture**, les paramètres principalement discriminants sont les duretés de 1^{ère} et de 2^{ème} compression. Or, les corrélations observées avec les paramètres les plus discriminants du time-intensité (AUC, lmax) sont négligeables. Cela peut s'expliquer par la différence entre les taux de déformation des humains et des instruments (VOISEY, 1975), ceux des instruments étant moins importants que ceux présents dans la bouche (SHAMA et SHERMAN, 1973), même après augmentation des taux de compression instrumentaux (VOISEY et LARMOND, 1977). Bien que les résultats soient sur des effectifs limités, les bonnes corrélations observées (0,78 à 0,90) avec la cohésion et la masticabilité confirment l'existence d'une liaison correcte entre l'analyse du profil de la texture par compression et une analyse de type sensorielle. Cependant, cette méthode instrumentale reste moins sensible qu'une analyse sensorielle pour mettre en évidence les différences de tendreté entre les morceaux (DUIZER et al, 1996). Ce constat vient du fait qu'il focalise sur la mastication initiale (évaluation des 2 premières compressions uniquement) alors que l'intensité maximale de perception de la tendreté peut avoir lieu n'importe quand entre le premier et le quatrième coup de dent, ce que reflète davantage une analyse sensorielle (mastication dans son ensemble).

3.2.3 Fiche synthétique de la mesure des forces de compression

Caractérisation de la méthode	
Nom Critère(s) mesuré(s) Composante(s) évaluée(s) Type de méthode Méthode directe Caractéristiques techniques - outil de mesure - portabilité - encombrement - résistance - automatisation Coût	METHODE DE COMPRESSION INRA force de compression fibrillaire (à 20% de compression) et conjonctive (à 80% de compression) évaluation du niveau de tendreté et/ou de maturation oui - mesure de la résistance de la viande machines à essai universelles type instron non - nécessité d'un opérateur instrument d'environ 1 m x 50 cm x 50 cm pour labo - probable en industrie ¹ automatisation impossible modéré - 25 €/échantillon ²
Conditions de mise en oeuvre	
<u>Niveau d'application</u> - terrain / laboratoire - animal / carcasse / découpe - type muscle - taille, poids, volume échantillon <u>Etat de l'échantillon</u> - frais / congelé - cru / cuit - broyé / en l'état <u>Mise en oeuvre</u> - destructive / non - délais prélèvement/mesure - prélèvement/préparation échantillons - niveau de facilité - durée mesure - délais de réponse - nombre de répétitions - dangerosité - multi-usage	méthode de laboratoire sur muscle après découpe long dorsal - applicable aux autres 1 tranche/échantillon ³ frais - congélation possible ⁴ cru coupé en cubes ou « frites » de quelques cm ⁴ méthode destructive aucun mais éviter le dessèchement des fibres musculaires quand cubes préparés découpe rigoureuse ⁵ facile mais longue et être très soigné 30 min/échantillon ⁶ instantané mais traitements statistiques (au moins 24h) 10 non non - possibilité d'utiliser d'autres cellules de mesure sur les machines universelles
Caractérisation du résultat	
<u>Performances - pouvoir prédicteur</u> - intensité de liaison - précision - fiabilité - effectifs utilisés pour le calcul de r <u>Expression du résultat</u> - sensoriel / instrumental - absolu / relatif - objectif / subjectif - interprétation facile	à 20% de compression $r = - 0,80$ avec ASC (note de tendreté) précision suffisante - fiabilité modérée moyens - $n = 18$ Instrumental absolu objectif simple mais à relier aux attentes consos ⁷

Précisions sur la mesure des forces de compression

¹ Ils seraient certainement **résistants** aux conditions d'ambiance particulières rencontrées en industrie, mais leur utilisation dans ce contexte n'est pas envisageable, principalement en raison de la préparation des échantillons nécessaire (voir plus loin).

² L'investissement initial est de l'ordre de 15000 à 20000 euros (texturomètre, cellule et logiciel). Une fois le matériel acquis, le prix de revient de la mesure pour un échantillon se situe autour de 25 euros.

³ Pour un animal, prélèvement d'une tranche de long dorsal d'au moins 5 cm d'épaisseur pour obtenir des « frites » dans le sens des fibres suffisamment longues (3 à 5 cm) (**Figure 11**).

⁴ La **congélation** des échantillons avant leur préparation ne pose **pas de problème en soit**, mais il faut être homogène sur le mode de décongélation choisi.

⁵ De même que pour le cisaillement, la mesure par compression demande une **préparation soignée** des échantillons. Les tranches de muscles doivent être prélevées dans le sens des fibres, puis les cubes (ou « frites ») découpés perpendiculairement aux fibres de façon à ce que la lame coupe les échantillons également perpendiculairement aux fibres musculaires.

⁶ La durée de la mesure dure environ une minute par cube ou « frite ». Avec la préparation des « frites » et les répétitions il faut compter environ **30 minutes par échantillon**.

⁷ Plus la force appliquée pour compresser l'échantillon est importante, plus l'échantillon est dur. Selon la méthode utilisée, d'autres paramètres plus explicites que la force de compression peuvent être calculés (dureté, cohésion, élasticité...). Leur obtention est facile car aujourd'hui les instruments de mesure sont associés à des logiciels spécifiques qui les calculent automatiquement. Cela dit, de même que pour les forces de cisaillement, ses paramètres doivent être reliés aux attentes des consommateurs.

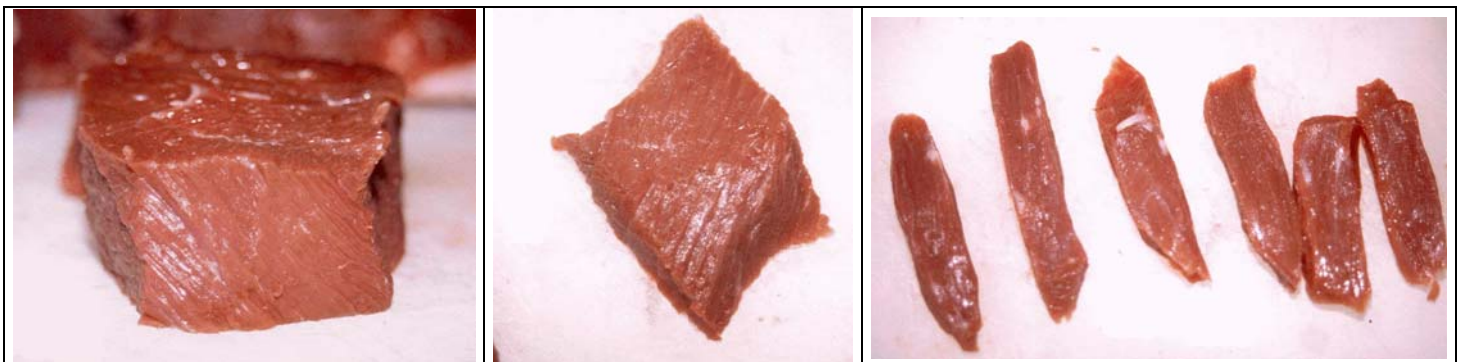


Figure 11 : Tranche de long dorsal et « frites » préparées pour la mesure des forces de compression selon la méthode INRA

3.2.4 Perspectives

Sur le plan technique, la mesure des forces de compression est très proche de la mesure des forces de cisaillement. Elle présente donc globalement les mêmes avantages (objective, rapide, facile...) et inconvénients (de laboratoire, destructive, délicate...). Alors pourquoi n'est-elle que rarement utilisée dans les travaux de recherche ? Tout simplement car, à caractéristiques et performances comparables, la mesure des forces de cisaillement lui est préférée du fait de son universalité dans les travaux internationaux. Cela dit, la mesure des forces de compression affiche deux différences de taille particulièrement intéressantes dans certains cas : elle permet d'évaluer les composantes fibrillaires et conjonctives en les dissociant, et elle se pratique sur viande crue, ce qui limite les biais éventuels dus à la cuisson. Etant donné les changements biochimiques que la cuisson peut induire, notamment au niveau de la dénaturation protéique, cette caractéristique de la mesure des forces de compression rend cette méthode particulièrement adaptée pour étudier le lien entre tendreté et paramètres biochimiques. C'est d'ailleurs majoritairement dans ce cas que cette méthode est mise en œuvre, préférentiellement à la mesure des forces de cisaillement.

De même que la mesure des forces de cisaillement, la mesure des forces de compression n'est pas envisageable en routine. Elle est adaptée pour déterminer la tendreté dans un contexte expérimental car opérationnelle. Logiquement moins sensible qu'une analyse sensorielle classique, comme toute méthode instrumentale, elle permet néanmoins d'obtenir une information sur la résistance de la viande plus complète que les forces de cisaillement. Cela dit, comparativement à cette dernière méthode, cette résistance est théoriquement moins représentative de celle perçue par le consommateur puisque réalisée sur viande crue. En terme de perspectives, cette méthode est relativement bien normalisée en France mais peu utilisée dans les travaux étrangers. Une correspondance entre les performances de mesure de la résistance de la viande selon les forces de cisaillement et les forces de compression pourrait être un outil intéressant pour positionner nos viandes par rapport aux travaux étrangers.

3.3 Les autres tests de mesures rhéologiques

Au-delà des traditionnels tests de cisaillement et de compression, de nombreux chercheurs ont tenté de développer d'autres tests destinés à évaluer la texture des aliments en évaluant leurs propriétés rhéologiques. Ils font intervenir simultanément diverses forces (compression, cisaillement, pénétration, extrusion, torsion...), d'où la difficulté de les classer puisqu'il n'existe pas une unique classification.

Ainsi, nombre d'instruments ont vu le jour, notamment autour des années 70. En ce qui concerne plus précisément la mesure de la tendreté de la viande, aucun de ces outils n'est utilisé aujourd'hui (ou très rarement) dans les travaux de recherche sur la viande bovine, et *a fortiori* en routine sur le terrain. Ce constat s'explique par le fait qu'aucun ne s'est révélé à ce jour efficace pour mesurer la tendreté. Les informations concernant ces méthodes de mesure sont, de fait, souvent anciennes et parcellaires ; c'est pourquoi elles n'ont pu être présentées dans le détail mais sont néanmoins évoquées dans ce travail afin de montrer l'ampleur des pistes qui ont été explorées pour mesurer la tendreté de la viande.

3.3.1 Tests de mastication

Certaines méthodes de mesure ont été développées de façon à reproduire le phénomène de mastication. Elles sont généralement basées sur des mesures de forces de compression sinusoïdales, la pièce de compression imitant plus ou moins bien une dent dans sa forme et son mouvement (TOURAILLE et SALE, 1977). Ce sont des tests dits imitatifs, donc logiquement utilisés sur viande cuite.

VOLODKEVICH (1938) avait imaginé un appareil de ce type relativement simple qui imitait l'action des incisives pendant la mastication à l'aide de 2 surfaces arrondies, une étant fixe et l'autre mobile se déplaçant vers la précédente. Aujourd'hui, cet instrument existe au travers de l'attache Volodkevitch qui s'installe sur les machines à essai universelles (**Figure 12**). L'échantillon est posé sur la dent inférieure et le résultat pris en compte est la force maximale nécessaire pour que la dent supérieure traverse l'échantillon. Cette attache est aujourd'hui traditionnellement utilisée pour déterminer le craquant et le croustillant des produits. Aucune étude récente consultée sur la mesure de la tendreté de la viande bovine n'a mentionné l'utilisation de cette attache.

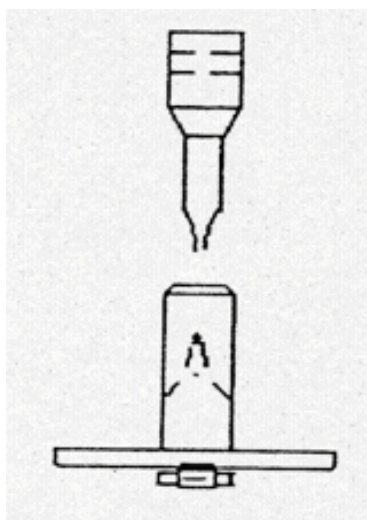


Figure 12 : Attache Volodkevitch

PROCTOR et al (1956) avaient mis au point un appareil plus complexe, le texturomètre denture, représentant des mandibules humaines montées sur une articulation motorisée avec une cavité buccale artificielle. Cette idée a été développée par une équipe de l'INRA qui a récemment mis au point un premier prototype de masticateur très perfectionné quasiment unique dans le monde. Certes, cette « bouche artificielle » est encore très loin de posséder toutes les caractéristiques et les fonctionnalités de son homologue naturelle, mais elle n'en comporte pas moins des dents, une langue, et est alimentée en salive artificielle. Cependant, ce prototype a été développé dans l'objectif d'étudier la perception de la flaveur des aliments, et non leur texture, et encore moins la tendreté en soi. L'équipe impliquée dans ce projet cherche aujourd'hui à optimiser et à améliorer ce prototype en vue d'étudier l'ensemble de la chaîne de déstructuration de l'aliment (ajout d'un système de déglutition, de digesteurs...). A ce jour, les performances de ce prototype pour évaluer la tendreté de la viande n'ont pas été étudiées.

3.3.2 Tests de pénétration

Le principe de ces tests est le même que celui de la pression du pouce ; il consiste à déterminer la force requise pour enfoncer une sonde (poinçon ou aiguille) dans ou à travers un échantillon. Selon la taille de la sonde, ils peuvent fournir une lecture relative à la compressibilité de l'échantillon et/ou à la force nécessaire pour rompre la cohésion entre les fibres musculaires.

Dans les années 70, les tests de pénétration étaient populaires en raison de leur simplicité. Plusieurs appareils ont été développés comme le tensomètre Nip (SMITH et CARPENTER, 1973), le tensomètre à couteau rotatif (ANDERSON et al, 1972) mesurant la profondeur de pénétration dans la viande d'un couteau rotatif à pression constante, le tensomètre Armour (HANSEN, 1972) mesurant la force nécessaire pour introduire des aiguilles (5 cm) dans la viande ou encore le poinçon (SEGARS et al, 1975).

Aujourd'hui, les tests de pénétration ne sont pas utilisés pour évaluer la tendreté de la viande bovine car ils se sont avérés inadaptés. Par contre, ils sont largement mis en œuvre pour étudier la texture des aliments transformés mous ou semi-fluides comme par exemple certains fromages, le beurre, ou la crème.

3.3.3 Tests de hachage et d'extrusion

Ces tests combinent simultanément des forces de compression, tension et cisaillement pour rompre l'échantillon. Ils peuvent être réalisés à l'aide de 2 types d'instruments :

3.3.3.1 Des machines à essais sur lesquelles sont installées des cellules d'extrusion

Dans ce cas, 2 types de cellules sont principalement utilisés aujourd'hui pour étudier la texture des aliments. L'attache Ottawa (**Figure 13**) est un montage composé d'un réceptacle carré robuste, ouvert sur le haut, et de plateaux (ou pistons) soit rainurés, soit percés. Un poids précis de produit est introduit dans le réceptacle, puis comprimé par le plateau, et on mesure la force nécessaire à l'extrusion du produit au travers du plateau. Cette cellule, adaptée de la méthode développée par VOISEY (1971), est aujourd'hui principalement utilisée pour les produits de snack et semi-liquides (yaourts par exemple), et ne sert pas à mesurer la tendreté de la viande.

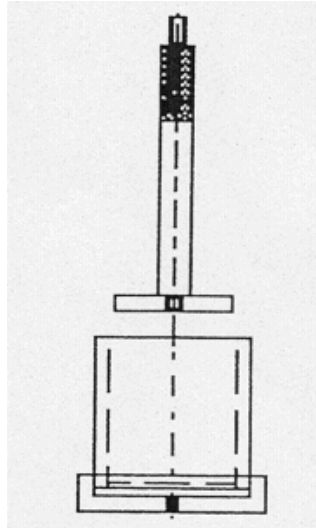


Figure 13 : Attache Ottawa

La cellule de Kramer (**Figure 14**) est composée d'un réceptacle et d'une partie en forme de peigne destinée à la compression du produit. Dans un premier temps l'échantillon est comprimé, puis une portion de produit est extrudée au travers des rainures de l'attache supérieure, et enfin les lames traversent l'aliment. Le résultat est exprimé par la courbe des forces exercées au cours de ces 3 phases. La cellule de Kramer est principalement utilisée pour les produits à texture variable dans la mesure où elle permet une compression uniforme. Il s'agit surtout des fruits, des légumes et des céréales, pour lesquels elle est considérée comme l'outil de référence dans les pays anglo-saxons (FOOD TECHNOLOGIE CORPORATION, 2008).



Figure 14 : Cellule de Kramer

3.3.3.2 Des instruments de type hachoir avec capteur de consommation électrique

Cette méthode, appelée « grinding », ne nécessite pas d'appareil perfectionné : un simple hachoir de type domestique avec capteur de la consommation électrique suffit. L'indice de tendreté est évalué en fonction de la consommation d'énergie nécessaire pour hacher l'échantillon. Il s'agit d'une méthode empirique, testée dans les années 70 (VOISEY, 1976), et qui n'est pas utilisée aujourd'hui pour mesurer la tendreté. Contrairement aux précédents instruments, elle offrait l'avantage de fonctionner en continu, ce qui donnait un résultat moyen pour plusieurs opérations et limitait les variations entre échantillons. Cependant, la préparation des échantillons (viande coupée en morceaux de façon standard) pouvait introduire un biais non négligeable. KENMEGNE KAMDEM et HARDY (1995) ont plus récemment testé de nouveau ce type de méthode pour évaluer la texture de la viande, mais aucune des méthodes comparées n'est communément utilisée ou peut être considérée comme représentative de la tendreté d'un muscle. Il est par conséquent difficile d'évaluer ces résultats. On peut toutefois noter qu'aucun lien n'a été mis en évidence entre le « grinding » et les caractéristiques biochimiques des échantillons (notamment les taux de collagène total et soluble).

3.3.4 Tests d'extension et de torsion

Les tests d'extension consistent à mesurer la capacité d'étirement de la viande, c'est-à-dire son élasticité et/ou la force de rupture. La mesure est réalisée sur viande crue, soit dans le sens des fibres musculaires, soit perpendiculairement. La force de rupture représente plus particulièrement la résistance du tissu conjonctif, celle des fibres musculaires étant négligeable, alors que c'est l'inverse pour la mesure d'élasticité.

Dans les années 70, les tests d'extension ont été utilisés pour étudier l'influence de la maturation et du raccourcissement des fibres musculaires sur la tendreté. STANLEY et al (1971) ont notamment déterminé des paramètres d'élasticité et de relaxation en fonction de la maturation et du degré de contraction des sarcomères. CHRYSTALL et al (1970) ont également décrit un appareil simple pour mesurer l'extensibilité post-mortem du muscle. Pour certains auteurs (STANLEY, 1972 ; VOISEY, 1976) les mesures d'extensions semblaient les plus logiques pour étudier la texture de la viande étant donné que ce type de déformation joue un rôle déterminant au cours de la mastication (les contraintes de tension prédominent dans la résistance à la mastication).

Aujourd'hui, ce sont plutôt des tests de torsion qui sont utilisés dans les études. Ils correspondent à la mesure de la viscoélasticité¹² de la viande (MATHEVON et al, 1995 ; MATHIONIÈRE et al, 1996), plutôt sensible à la composante collagénique de la viande. Le comportement rhéologique de la viande est mesuré au moyen d'un rhéomètre en mode oscillatoire. Les échantillons cylindriques sont collés à la plaque parallèle de la cellule de mesure. Les distorsions maximales appliquées correspondent aux conditions sous lesquelles il est assuré que la viande possède un comportement de viscoélasticité linéaire. En terme de performances, le **Tableau 11** présente les quelques corrélations retrouvées entre la mesure de la viscoélasticité de la viande et les autres méthodes de mesure de la tendreté avec lesquelles elle a été comparée.

¹² Réaction à la contrainte d'une matière se comportant comme si elle était composée d'un solide élastique et d'un fluide visqueux où l'écoulement serait dépendant de certains paramètres (cuisson, charge exercée...).

Les corrélations observées montrent que le paramètre de viscoélasticité pourrait expliquer jusqu'à 56% de la dureté perçue par les dégustateurs. Ces résultats sont plutôt satisfaisants par rapport aux autres méthodes évaluées jusqu'à présent. Pourtant, ils sont à relativiser, d'une part car ils ont été obtenus sur de faibles effectifs, et d'autre part car ces mesures n'ont permis de discriminer les échantillons ni selon leur statut myofibrillaire, ni selon le type musculaire, mais uniquement selon leur degré de cuisson (MATHEVON et al, 1995 ; MATHONIERE et al, 1996). La sensibilité de cette méthode est donc limitée. Comme nous l'avons bien souligné dans la méthodologie de ce travail, les corrélations ne peuvent refléter à elles seules les performances d'une méthode.

Méthodes	Paramètres	Rhéomètre oscillatoire	Caractéristiques des études	Références
		Angle de phase		
Electromyographie	aire séquence complète	- 0,77	n = 6 SM ; 18j	MATHEVON et al, 1995
Analyse sensorielle	dureté	- 0,75		

Tableau 11 : Corrélations r entre la mesure de la viscoélasticité et d'autres méthodes de mesure de la tendreté

Méthodes physico-chimiques

Les méthodes physico-chimiques correspondent aux techniques physiques permettant de mesurer la quantité d'un ou plusieurs éléments chimiques dans une matière. Or, bien que ce ne soit pas la seule composante à prendre en compte, la composition chimique d'une viande conditionne sa tendreté. De même, il est reconnu que certaines molécules chimiques sont caractéristiques du niveau de maturation d'une viande. Ainsi, de nombreuses techniques de mesure physico-chimiques ont été investiguées pour prédire la tendreté et/ou le niveau de maturation de la viande. Par définition, toutes ces méthodes sont indirectes.

Dans ce domaine, les techniques les plus investiguées sont celles basées sur la spectroscopie, ou spectrométrie. Il s'agit de l'étude du spectre d'un phénomène, c'est-à-dire de la répartition d'une onde ou d'un faisceau de particules en fonction de la fréquence ou de l'énergie. Bien qu'elles reposent sur le même principe, on parle de méthodes spectroscopiques ou spectrométriques¹³ selon l'expression du résultat. Le suffixe « scopie » fait référence à l'observation visuelle, comme par exemple la projection sur un écran ou l'utilisation d'une sonde optique. C'est pourquoi le terme d'analyse d'image est également employé dans le cas de méthodes spectroscopiques. Le suffixe « métrie », quant à lui, fait référence à l'enregistrement d'un signal par un appareil.

¹³ Pour simplifier, étant donné que le principe est identique, nous emploierons (sauf exception) le terme spectroscopie dans l'ensemble du rapport.

4 Méthodes physico-chimiques

4.1 Principe des méthodes spectroscopiques

Il existe 3 classes de spectroscopie selon le type d'objet mesuré :

- la **spectroscopie acoustique** ou **mécanique dynamique** étudie les vibrations macroscopiques d'un milieu,
- la **spectrométrie de masse** étudie les ions accélérés dans un champ électromagnétique,
- et la **spectroscopie électromagnétique** étudie les radiations électromagnétiques émises ou absorbées. C'est le cas des appareils de mesure utilisés sur la viande.

4.1.1 La spectroscopie électromagnétique

La spectroscopie (ou spectrométrie) électromagnétique est une technique basée sur l'excitabilité des molécules organiques par un rayonnement lumineux. L'absorption de la lumière par la matière organique produit la vibration de certaines liaisons moléculaires (OH, NH, CH...). Lorsqu'une radiation frappe une molécule, il se produit pour certaines longueurs d'ondes une absorption sélective du rayonnement correspondant aux fréquences de vibration des différentes liaisons moléculaires. La quantité d'énergie absorbée est proportionnelle au nombre de groupements chimiques et donc à la quantité du constituant correspondant.

Les appareils permettant les mesures spectroscopiques sont des spectromètres. Ils sont constitués d'une source lumineuse qui envoie son rayonnement sur un filtre (ou un réseau holographique) permettant de séparer la lumière en différentes longueurs d'ondes. Une partie de cette lumière émise est absorbée par les molécules organiques, suivant les longueurs d'ondes de vibration des liaisons. Des capteurs photosensibles permettent de quantifier la quantité de lumière (énergie) non absorbée aux différentes longueurs d'ondes.

On distingue 2 types de méthodes selon l'emplacement de ces capteurs (**Figure 15**) :

- la spectroscopie de **transmission** : on mesure la quantité de lumière qui est transmise après avoir traversé l'échantillon. Cette méthode est adaptée pour des échantillons fins.
- la spectroscopie de **réflexion** : on mesure la quantité de lumière qui est réfléchi par l'échantillon. On parle de réflectance, ce qui correspond à la proportion du rayonnement émis qui est réfléchi par la surface de la matière à mesurer. Cette méthode est la plus adaptée pour des échantillons épais tels que la viande.

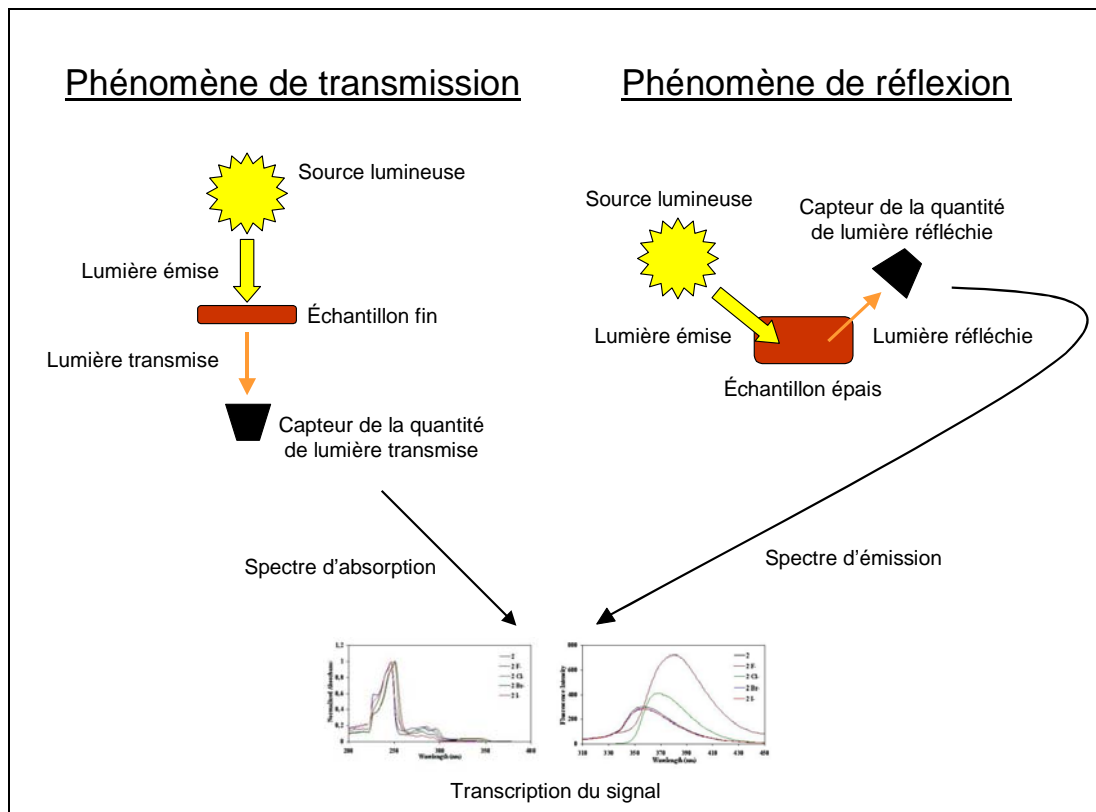


Figure 15 : Principe de fonctionnement de la spectrométrie de transmission et de la spectrométrie de réflexion

4.1.2 Des mesures possibles sur tout le spectre électromagnétique

Les mesures par spectroscopie peuvent se faire à toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique (**Figure 16**). Dans le cas de la mesure de la tendreté de la viande, les longueurs d'onde dans les spectres **visibles** et **proche infrarouge** sont celles qui présentent le plus d'intérêt. Les longueurs d'onde délimitant le spectre visible vont de 400 à 700 nm, et l'infrarouge se situe entre 700 nm et 1000 μm , sachant qu'il est délimité en 3 zones : le proche infrarouge (700 à 1400 nm), le moyen (1500 à 3000 nm) et le lointain (3 μm à 1000 μm) (**Figure 17**).

Dans le cas de la mesure de la tendreté, la spectrométrie de **fluorescence** a également été investiguée. Le spectre concerné est celui des rayons X, situé entre 5 pm et 10 nm. Lorsque l'on bombarde de la matière avec des rayons X, les molécules présentant des doubles liaisons conjuguées sont excitées et absorbent des photons pour certaines longueurs d'onde. Lorsque ces molécules reviennent à leur état de repos, elles émettent des photons de longueur d'onde supérieure à la longueur d'onde d'excitation et réémettent de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X : c'est le phénomène de fluorescence. Il existe la spectroscopie de fluorescence à angle droit, qui mesure la fluorescence d'éléments en suspension dans une solution, et la spectroscopie de fluorescence frontale ou de surface qui mesure la fluorescence d'éléments d'un échantillon solide. C'est cette dernière qui a été étudiée pour mesurer la tendreté de la viande.

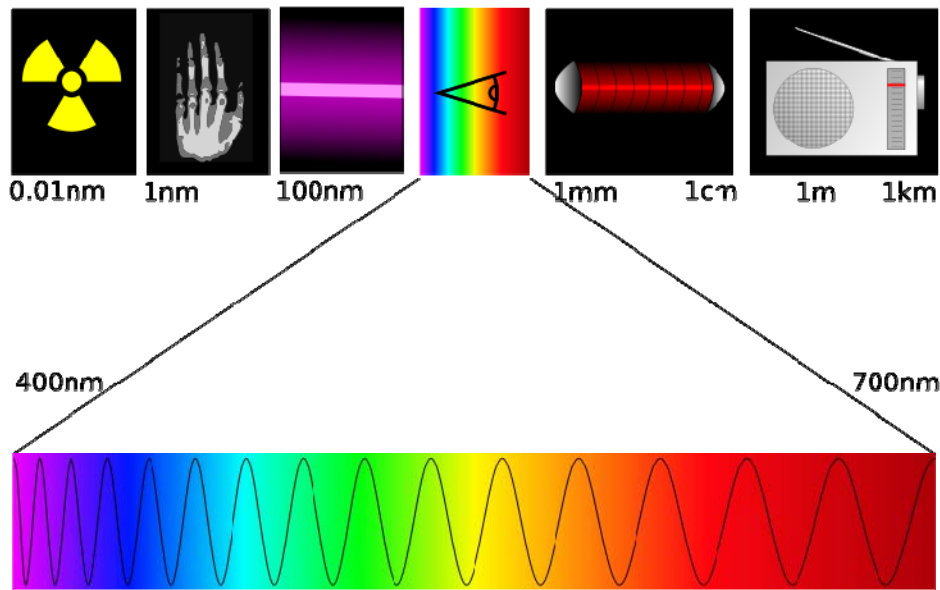


Figure 16 : Domaine visible sur spectre électromagnétique

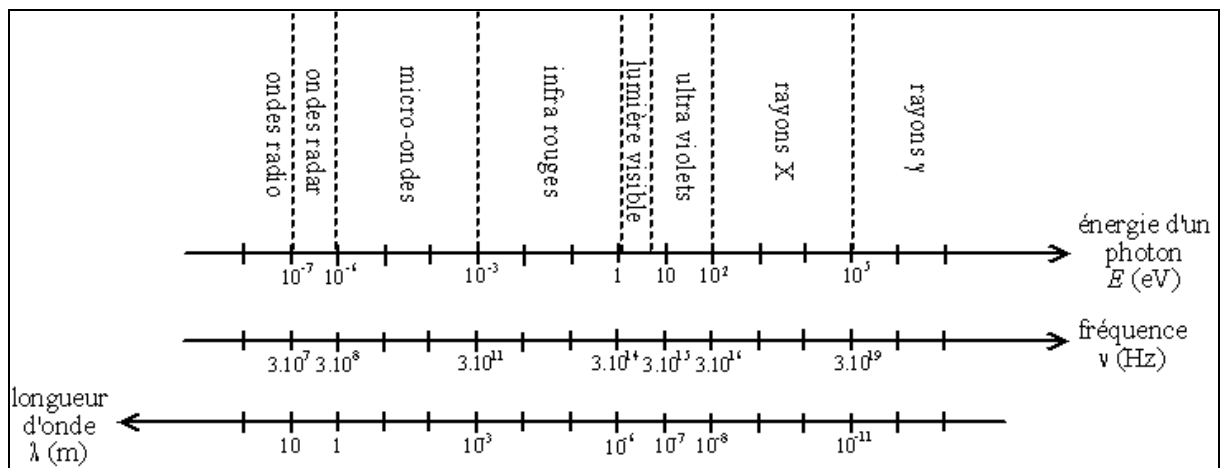


Figure 17 : Domaines du spectre électromagnétique en fonction de la longueur d'onde, de la fréquence ou de l'énergie des photons

4.1.3 Expression des mesures spectroscopiques

Les mesures spectroscopiques sont exprimées par les **spectres d'absorption** ou **d'émission**. L'interprétation de ces spectres est difficile car ils regroupent plusieurs informations simultanément, difficiles à dissocier. En effet, en pratique, tous les constituants de la viande sont susceptibles d'absorber la lumière à différentes longueurs d'ondes (protéines, lipides, collagène, eau...) et le spectre d'un échantillon est la somme de toutes ces absorptions élémentaires. Etant donné un certain chevauchement des bandes spectrales des différents constituants (2 molécules peuvent absorber la lumière aux mêmes longueurs d'onde) et la variabilité inhérente à l'échantillon (granulométrie, température...), de nombreuses interférences peuvent intervenir. Il est donc nécessaire de traiter ces spectres pour obtenir l'information désirée.

Le traitement des spectres consiste dans un premier temps à éliminer les bruits éventuels (comparaison des spectres obtenus avec les spectres des composants purs, soustraction de spectres...). La seconde phase du traitement doit permettre de quantifier le paramètre recherché : elle nécessite une phase préalable de calibration du système de mesure. La **calibration** (ou étalonnage) revient à établir une relation entre le paramètre mesuré par l'appareil (les spectres) et le paramètre recherché (la tendreté). Pour cela, des échantillons représentatifs de la population (la viande consommée) doivent être mesurés par l'appareil et par la méthode de référence de la tendreté, puis les résultats des 2 méthodes sont comparés statistiquement de façon à développer un modèle mathématique prédictif de la tendreté par le paramètre issu de la mesure (spectres).

Les mesures spectroscopiques électromagnétiques permettent de mesurer simultanément différents constituants chimiques de la viande. Ainsi, les **2 composantes** de la tendreté sont concernées : la composante **conjonctive** au travers du collagène, et la composante **musculaire** au travers de certaines molécules constitutives des fibres qui influent sur la tendreté, même de façon minime (protéines, lipides, eau...). Cela dit, la mesure de ces 2 composantes est indissociable. Du fait de leur calibration préalable obligatoire, les appareils spectroscopiques peuvent théoriquement mesurer n'importe quel paramètre avec lequel un lien peut être mis en évidence. Dans la pratique, toutes les études basées sur la spectroscopie ont tenté de développer des méthodes de mesure de la **tendreté**, plusieurs composantes de cette dernière étant simultanément reflétés par la spectroscopie (collagène, lipides, protéines...). La mesure du niveau de maturation, en revanche, ne semble pas avoir été explorée. Les spectres obtenus suite aux mesures doivent être analysés et convertis pour obtenir le critère de tendreté ; il s'agit donc toujours de **méthodes indirectes**.

4.2 Mesures spectroscopiques dans le visible et/ou le proche infrarouge

Parmi les « nouvelles technologies », la spectroscopie dans le visible et/ou le proche infrarouge est celle qui a été la plus investiguée pour mesurer la tendreté de la viande bovine tant ses avantages sont recherchés en industrie. Ainsi, une multitude de spectromètres ont été testés selon diverses combinaisons techniques (réflectance ou absorbance, domaine de longueurs d'onde, surface mesurée...). Dans la majorité des cas, il s'agissait de spectromètres de laboratoire, l'objectif de ces travaux étant de tester dans un premier temps la technique de mesure et de définir ses caractéristiques techniques optimales avant de développer un appareil de terrain spécifique à la filière viande.

Suite à ces travaux, de nombreux instruments de mesure des qualités de la viande (collagène, lipides...) basés sur cette technique ont vu le jour, mais à notre connaissance le seul mis au point pour mesurer la tendreté de la viande bovine est le QualitySpect® Beef Tenderness (QS®BT). Cet appareil, développé par une société américaine (ASD Inc, Colorado) en collaboration avec des scientifiques de l'USDA, fonctionne déjà en routine chez un gros opérateur de viande américain (Cargill - Texas). Il est basé sur la réflectance par spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge (VISNIR)¹⁴.

¹⁴ Mesures à des longueurs d'ondes comprises entre 350 et 2500 nm.

4.2.1 Performances des mesures spectroscopiques dans le visible et/ou le proche infrarouge

4.2.1.1 Ensemble des méthodes spectroscopiques VISNIR

Quel que soit l'appareil, l'intensité de la liaison entre le paramètre mesuré et le paramètre recherché est dépendante de la calibration de l'appareil. C'est sur ce point que réside la principale difficulté de cette technique. En effet, la mise au point du modèle prédictif va varier selon une multitude de paramètres (méthode prise pour référence, conditions de mesure, protocole expérimental, traitements statistiques...), de même que sa robustesse, c'est-à-dire sa capacité à être resté fiable dans la plupart des situations.

Les **Tableaux 12 et 13** présentent les coefficients de corrélation obtenus entre les mesures spectroscopiques dans le visible et le proche infrarouge et les 2 méthodes communément admises comme références pour la tendreté de la viande : l'analyse sensorielle et les forces de cisaillement selon Warner-Bratzler.

Les résultats de ces travaux sont contradictoires, certains faisant apparaître des coefficients de corrélation plutôt encourageants en vue d'utiliser cette technique pour prédire la tendreté de la viande, alors que d'autres semblent inadaptés. Ce constat est logique et s'explique en premier lieu par les énormes variations de protocoles mis en œuvre.

En effet, d'une part la spectroscopie est une méthode de mesure très sensible, et d'autre part elle nécessite une calibration. De fait, ses performances vont énormément varier selon les caractéristiques techniques de la mesure : longueurs d'onde de travail, sonde de mesure, surface mesurée, intervalles de mesure, nombre de spectres considérés, modèle statistique de calibration... Le **Tableau 14** montre quelques exemples de l'impact de certains paramètres du protocole sur la répétabilité des mesures (SHACKELFORD et al, 2004). Dans le cadre d'une utilisation de la spectroscopie infrarouge comme prédicteur de la tendreté, il apparaît nécessaire de standardiser la mesure. Concernant ce point, les choix techniques qui ressortent les plus prometteurs en proche infrarouge sont ceux fait par l'équipe de SHACKELFORD et WHEELER en vue du développement du QualitySpect® BT.

Paramètre	Mesure en réflexion	Mesure en transmission	Caractéristiques des études	Références
dureté	0,59 à 0,90	non concluant	n = 10 LD ; 1, 8 et 14j	HILDRUM et al, 1994
tendreté	moy = 0,79 0,54 à 0,89			
dureté	0,60 à 0,74	-	n = 120 LD	HILDRUM et al, 1995
tendreté	0,58 à 0,70			
masticabilité	moy = 0,76	-	n = 24 LD ; 2, 4, 8, 14 et 21j	LIU et al, 2003
tendreté	non concluant	-	n = 127 LD ; 2 à 30h post-mortem	RODBOTTEN et al, 2000
tendreté	0,41 à 0,46	-	n = 39 LD ; 1, 2, 7, et 14j	BYRNE et al, 1997
tendreté	moy = 0,53 0,67 à 0,72 si ségrégation	-	n = 70 LD ; 1, 2, 7 et 14j	BYRNE et al, 1998

Tableau 12 : Corrélations r entre les mesures spectroscopiques et l'analyse sensorielle

Mesure en réflexion	Mesure en transmission	Caractéristiques des études	Références
moy = 0,70 0,41 à 0,85 classement en tendre et dur (limite : 6 kg) = 83 à 96% bien classés	-	n = 24 LD ; 2, 4, 8, 14 et 21j	LIU et al, 2003
0,35 à 0,50	0,39 à 0,64	n = 189 LT ; 2 et 8j	LEROY et al, 2003
0,47 à 0,55	-	n = 127 LD ; 2 à 30h post-mortem	RODBOTTEN et al, 2000
moy = 0,51 0,54 à 0,72 si ségrégation des animaux	-	n = 75 LD et SM ; 14j	VENEL et al, 2001
0,40 à 0,79	-	n = 39 LD ; 1, 2, 7, et 14j	BYRNE et al, 1997
0,61 à 0,82	-	n = 70 LD ; 1, 2, 7 et 14j	BYRNE et al, 1998
moy = 0,84	-	np	DEVINE et McGLONE, 1998
-	0,52 à 0,85 classement en 2 ou 3 classes de tendreté : 63 à 98% bien classés	n = 48 LD ; 2, 9 et 21j	RODBOTTEN et al, 2001
moy = 0,79 classement en tendre et dur (limite : 6 kg) = 75 à 89% bien classés	-	n = 119 LD	PARK et al, 1998

Tableau 13 : Corrélations r entre les mesures spectroscopiques et les forces de cisaillement par Warner-Bratzler

Facteur	Caractéristiques étude	Répétabilité
Caractéristiques de la sonde de mesure - diamètre 3 mm vs 35 mm (50 pour bovins)	agneaux n = 12 ; long dorsal ; 14j de maturation	< 0,55 à 3 mm vs > 0,88 à 35 mm
Longueur d'onde de mesure - entre 462 et 1371 nm - toutes les longueurs d'onde (350-2500 nm)	bovins - n = 72 ; long dorsal ; 36h post-mortem	> 0,90 > 0,75
Nombre de spectres moyennés par observation - 10, 20, 30, 40 ou 50 spectres		0,94 à 0,99 meilleure répétabilité avec moyenne de 20 spectres
Temps d'exposition à l'air de la viande 2 min vs 60 min	bovins - n = 131 ; long dorsal ; 48h post-mortem	> 0,75 à 2 min > 0,88 à 60 min
Demi-carcasse - gauche vs droite	bovins - n = 54 ; long dorsal ; 48h post-mortem	> 0,88

Tableau 14 : Influence des caractéristiques technique de mesure sur la répétabilité des mesures par spectroscopie proche infrarouge

Au-delà des caractéristiques techniques de la mesure, le choix des échantillons étudiés influe comme toujours sur les performances de prédiction. Par exemple, les mauvais coefficients de corrélation obtenus dans l'étude de LEROY et al (2003) obligent les auteurs à conclure que la réflectance dans l'infrarouge présente de faibles potentialités à prédire la tendreté. Cela dit, il est important de préciser que dans cette étude les carcasses étudiées ont été choisies au hasard, contrairement à de nombreuses études qui sélectionnent les échantillons selon leur variabilité en terme de tendreté (basée sur les forces de cisaillement). Ainsi, de nombreux travaux doivent leurs meilleurs résultats à un échantillonnage plus varié, notamment sur les temps de maturation, les différences spectrales étant significatives entre des steaks à 14 et 21 jours de maturation, vs ceux à moins de 8 jours de maturation (LIU et al, 2003). De plus, sauf exception, les prédictions de tendreté sont toujours améliorées lorsque les échantillons sont ségrégués par groupe de même nature (classement des animaux, sexe, pH ultime...) (BYRNE et al, 1998 ; VENEL et al, 2001). Un modèle pour tous les échantillons peut rester acceptable, mais les corrélations s'en ressentent. La mise au point du modèle demeure la principale difficulté qui conditionne les performances de cette technique.

Plusieurs auteurs ont conclu que les performances de la spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge permettraient son utilisation pour prédire la tendreté de la viande (HILDRUM et al, 1994 ; 1995 ; PARK et al, 1998 ; BYRNE et al, 1998). S'il est vrai que la technique est prometteuse, ces travaux présentent néanmoins des inconvénients de taille qui remettent en cause soit les performances de mesure, soit son intérêt : effectifs limités, protocoles destructifs (car nécessitant un prélèvement de muscle) ou peu représentatifs du muscle (surface de mesure de 4 cm²), modalités étudiées très éloignées... Dans tous les cas, la spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge est aujourd'hui uniquement applicable sur le long dorsal.

A l'heure actuelle, les travaux qui sont apparus a priori les plus encourageants sont ceux de l'équipe de SHACKELFORD et WHEELER sur le QualitySpect® BT.

4.2.1.2 QualitySpec® Beef Tenderness

La calibration du QualitySpect® BT a été réalisée par l'équipe américaine qui a développé cet appareil. Une première phase (SHACKELFORD et al, 2005) a consisté à étudier la possibilité de prédire les forces de cisaillement selon Warner-Bratzler à 14 jours de maturation par la mesure avec le QS®BT sur des longs dorsaux maigres issus de 292 carcasses. Un R² de 0,38 a été obtenu sur l'échantillonnage de calibration (la moitié des effectifs), ce R² n'étant plus de que 0,22 sur l'échantillonnage de prédiction (l'autre moitié des effectifs). Les auteurs ont estimés, à juste titre, que ces résultats étaient trop moyens pour envisager une prédiction précise de la tendreté, notamment car les forces de cisaillement prédites ne sont pas fiables dans les valeurs hautes (c'est-à-dire correspondant à des viandes plutôt dures).

Cela dit, la prédiction étant relativement bonne dans les valeurs basses, les auteurs ont considéré que le QS®BT pourrait permettre de différencier les carcasses « à potentiel de tendreté assuré ». Des études complémentaires (WHEELER et al, 2007) ont été réalisées sur des effectifs importants (longs dorsaux de plus de 3000 carcasses) de façon à définir la valeur de force de cisaillement seuil séparant les 2 classes de tendreté (« tendre » et « dure ») tout en couvrant la variabilité animale rencontrée aux Etats-Unis et en limitant les biais liés au moment de réalisation de la mesure par le QS®BT. Globalement, 16,3 % des échantillons avaient des forces de cisaillement réelles supérieures à 25 kg contre seulement 6,8% parmi les échantillons classés « tendres » par le QS®BT (avec un seuil de 18,2 kg défini lors de la première étude). Les auteurs ont donc conclu à la fonctionnalité du QS®BT, mais en élevant le seuil de « tendreté » à 21,4 kg sur la base de considérations commerciales : 80% des carcasses mesurées se situent en dessous de ce seuil ; ainsi les 20% de carcasses les plus dures sont écartées quasiment à coup sûr, et 80% des carcasses

peuvent être valorisées sous un label commercial de type « tendreté assurée » permettant de les vendre plus chères. L'utilisation du QualitySpect® BT est recommandée uniquement dans ce cadre (SHACKELFORD, 2005).

Etant donné l'intérêt apparent de ce type d'appareil mais l'importance des différences existants entre le contexte américain et le notre, le QualitySpect® BT a tout récemment fait l'objet d'une étude réalisée par l'Institut de l'Élevage de façon à tester ses performances à prédire la tendreté de la viande bovine française (ROZE, 2008). Les essais, conduits sur 48 animaux, n'ont montré aucune concordance entre les forces de cisaillement prédites par le QS®BT, ni avec les notes de tendreté données par notre jury d'analyse sensorielle (R^2 médiocres compris entre 0,06 et 0,09), ni avec les forces de compression mesurées à 20% de compression (R^2 autour de 0,1). Malgré ces mauvais résultats en terme de corrélation, la capacité du QS®BT à classer les carcasses selon 2 lots, un « tendre » et l'autre « dur », a été observée. Cela dit, ces résultats sont à confirmer, notamment sur des effectifs plus importants qui permettraient peut-être d'avoir une population plus homogène entre les 2 classes. En effet, la population animale française est bien différente de la population américaine : 80% des carcasses américaines présentent une valeur de force de cisaillement prédite par le QS®BT inférieure au seuil de 21,4 kg, contre seulement 8% de nos carcasses ! Cela signifie qu'il y aurait trop peu d'animaux « tendres » parmi notre effectif testé. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces mauvais résultats comparés aux résultats américains :

- les écarts du protocole mis en oeuvre par rapport à celui préconisé par les américains (en raison des contraintes techniques rencontrées sur le terrain dans notre contexte).
- les problèmes de répétabilité de la mesure observés dans le contexte de l'étude.
- la mauvaise fiabilité des mesures dans les valeurs hautes de force de cisaillement prédite ; problème peu important sur la population américaine mais qui à l'inverse ne cadre pas avec notre population.
- les différences, notamment au niveau de la cuisson, entre les échantillons américains sur lesquels la calibration a été réalisée et les échantillons de notre étude.

Finalement, si la calibration qui ne correspond pas au contexte français pose un réel problème, la technique de mesure ne semble également pas pleinement au point, notamment au regard de la très mauvaise répétabilité des mesures.

4.2.2 Fiche synthétique des mesures spectroscopiques dans le visible et le proche-infra-rouge (VISNIR)

Caractérisation de la méthode	
Nom	SPECTROSCOPIE VISN IR
Critère(s) mesuré(s)	spectres de réflectance ou d'absorbance
Composante(s) évaluée(s)	fibrillaire et conjonctive sans dissociation
Type de méthode	évaluation du niveau de tendreté
Méthode directe	non
Caractéristiques techniques	spectromètres de laboratoire
- outil de mesure	non majoritairement - oui pour certains
- portabilité	en moyenne appareil de 15 à 30 kg
- encombrement	pour labo - adaptables pour l'industrie ¹
- résistance	automatisation inenvisageable en l'état ²
- automatisation	coûteux ³
Coût	
Conditions de mise en oeuvre	
<u>Niveau d'application</u>	méthode de laboratoire
- terrain / laboratoire	sur muscle après découpe
- animal / carcasse / découpe	long dorsal ⁴
- type muscle	quelques cm ² à 1 tranche/échantillon ⁵
- taille, poids, volume échantillon	
<u>Etat de l'échantillon</u>	
- frais / congelé	frais - congélation possible ⁶
- cru / cuit	cru
- broyé / en l'état	en l'état ou coupé à la taille des cellules de mesure
<u>Mise en oeuvre</u>	
- destructive / non	méthode théoriquement non destructive
	sauf si prélèvement nécessaire
- délais prélèvement/mesure	aucun mais respecter le protocole mis en oeuvre lors de la calibration
- prélèvement/préparation échantillons	oui, sauf pour instruments portables
- niveau de facilité	facile
- durée mesure	quelques secondes
- délais de réponse	instantané mais traitements statistiques
- nombre de répétitions	0 à 5 selon le contexte et le spectromètre
- dangerosité	non
- multi-usage	oui (protéines, lipides, collagène...) mais calibrage nécessaire pour ces critères ⁷
Caractérisation du résultat	
<u>Performances - pouvoir prédicteur</u>	
- intensité de liaison	r = 0,41 à 0,89 avec ASC (note)
- précision - fiabilité	très sensible - fiabilité variable selon le protocole et la qualité de la calibration
- effectifs utilisés pour le calcul de r	petits à grands - n = 10 à 120
<u>Expression du résultat</u>	
- sensoriel / instrumental	instrumental
- absolu / relatif	relatif puis absolu après transformation via la calibration ⁸
- objectif / subjectif	objectif puis partiellement subjectif après transformation via la calibration
- interprétation facile	simple après transformation ⁹

Précisions sur les mesures spectroscopiques VISNIR

¹ Adaptés pour le laboratoire, ces appareils **résistent en général aux conditions standard**, à savoir des températures de 5 à 40°C, et une hygrométrie allant jusqu'à 80% d'humidité (sans condensation). Bien que relativement robustes, des adaptations seraient nécessaires pour envisager leur fonctionnement en conditions industrielles telles que rencontrées en abattoir.

² Même lorsqu'ils sont portables, ces appareils **nécessitent toujours l'intervention d'un opérateur**, soit pour positionner l'échantillon à mesurer dans la machine, soit pour positionner la tête de lecture de l'appareil sur l'échantillon à mesurer. Leur **automatisation est donc inenvisageable en l'état**.

³ En terme d'investissement, un spectromètre infrarouge coûte en moyenne entre 15000 et 30000 €. Le plus cher reste comme toujours la main d'œuvre nécessaire à l'utilisation de cette technique.

⁴ Les quelques études traitant d'autres muscles que le long dorsal (LEROY et al, 2003 ; VENEL et al, 2001) n'ont pas mis en évidence des performances concluantes.

⁵ Les dimensions des échantillons ainsi que leur préparation (découpe particulière, broyage éventuel...) sont variables selon le spectromètre utilisé (**Annexe 8**).

⁶ A priori, il est possible de réaliser les mesures sur des muscles congelés ou ayant été congelés. Cependant, HILDRUM et al (1994) ont montré que les spectres de réflectance diffèrent entre la viande fraîche et la viande congelée. Or, un spectromètre est calibré pour des mesures dans des conditions bien définies. Pour utiliser cette technique sur viande congelée il faut donc que le spectromètre ait été spécifiquement calibré pour ces conditions. Il en est de même pour le délai entre le prélèvement et la mesure puisque, par exemple, les conditions de ré-oxygénation du muscle (SHACKELFORD et al, 2004 ; 2005) peuvent induire des différences entre spectres et donc biaiser les résultats.

⁷ La spectroscopie permet de mesurer potentiellement plusieurs constituants d'une même matière. Cependant pour chaque constituant elle nécessite une calibration préalable. Or, la calibration étant déjà très complexe pour **estimer la tendreté** de la viande, toutes les études utilisant la spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge dans ce but se sont **focalisées uniquement sur la mesure de ce paramètre**.

⁸ La conversion des spectres *via* la calibration mise au point pour obtenir le paramètre recherché (tendreté, teneur en lipides, teneur en collagène...) permet d'obtenir un résultat **absolu**. L'objectivité de ce résultat va dépendre des critères pris en compte pour réaliser la calibration : si ces critères ne font intervenir aucun jugement susceptible de varier selon les individus ou le contexte, alors il demeure objectif. Dans le cas inverse, il devient subjectif.

⁹ Un résultat spectroscopique est, de prime abord, difficile à interpréter : une calibration est obligatoire et peut s'avérer complexe, voire impossible si le lien entre les spectres mesurés et le critère recherché ne répond pas à une loi définissable par une équation. Par contre, une fois la calibration réalisée, le résultat est **très simple d'interprétation** car il donne soit directement le critère recherché (la plupart des cas), soit un autre critère facile à relier au critère recherché.

4.2.3 Fiche synthétique des mesures avec le QualitySpec® BT

Caractérisation de la méthode	
<p>Nom Critère(s) mesuré(s) Composante(s) évaluée(s) Type de méthode</p> <p>Méthode directe Caractéristiques techniques</p> <ul style="list-style-type: none"> - outil de mesure - portabilité - encombrement - résistance - automatisation <p>Coût</p>	<p>QUALITYSPEC® BT spectres de réflectance fibrillaire et conjonctive sans dissociation évaluation du potentiel de tendreté à 14 jours de maturation non</p> <p>spectromètre LabSpec pro non mais tête de lecture portative¹ appareil d'environ 30 kg - acceptable en industrie oui aux conditions industrielles² non, mais systématisation possible avec l'intervention d'un opérateur coûteux³</p>
Conditions de mise en oeuvre	
<p><u>Niveau d'application</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - terrain / laboratoire - animal / carcasse / découpe - type muscle - taille, poids, volume échantillon <p><u>Etat de l'échantillon</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - frais / congelé - cru / cuit - broyé / en l'état <p><u>Mise en oeuvre</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - destructive / non - délais prélèvement/mesure - prélèvement/préparation échantillons - niveau de facilité - durée mesure - délais de réponse - nombre de répétitions - dangerosité - multi-usage 	<p>méthode de terrain sur carcasse, sur muscle accessible après fente de la carcasse long dorsal (noix entre 12 et 13^{èmes} côtes) au moins 14 cm² homogènes⁴</p> <p>frais cru en l'état</p> <p>non destructive fin de chaîne d'abattage - juste après la coupe primaire⁵ aucun sauf fente de la carcasse très facile⁶ flash de 3 secondes instantané aucune non non</p>
Caractérisation du résultat	
<p><u>Performances - pouvoir prédicteur</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - intensité de liaison - précision - fiabilité - effectifs utilisés pour le calcul de r <p><u>Expression du résultat</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - sensoriel / instrumental - absolu / relatif - objectif / subjectif - interprétation facile 	<p>r US = 0,47 à 0,62 avec WBSF r France = 0,25 à 0,30 avec ASC (note) très précise - peu fiable dans le contexte français, mais capacité encourageante à séparer la viande en classes de tendreté moyens à grands - n = 48 (Fr) à 292 (US)</p> <p>instrumental relatif (force de cisaillement prédite) et absolu (classement) objectif (force de cisaillement prédite) puis partiellement subjectif (classement) très simple⁷</p>

Précisions sur les mesures avec le QS®BT

¹ Le QS®BT est composé de 3 parties (**Figure 18**): une tête de lecture, un spectrophotomètre et un ordinateur indépendant. L'appareil n'est **pas portable**, notamment en raison de son poids (environ 30 kg), mais la tête de lecture qui renferme la sonde de mesure est portable dans une certaine limite : elle est reliée par un câble au corps de l'appareil et son poids (4,5 kg) nécessite un maintien supplémentaire à l'opérateur, une suspension à un enrouleur par exemple.

² Selon le constructeur, le QS®BT résiste aux basses températures jusqu'à -23°C, aux taux d'hygrométrie élevés jusqu'à 95%, et répond à la norme IP65¹⁵.

³ Tel que l'appareil est proposé actuellement, le QS®BT serait dans le contexte français un investissement **relativement coûteux** en raison de son prix initial d'une part (65000 dollars US), mais surtout en terme de main d'œuvre puisque son utilisation en routine obligerait l'intervention d'un nouvel opérateur sur la ligne d'abattage.

⁴ La surface du morceau doit être suffisamment grande pour permettre le positionnement de la tête de lecture (ellipse de 3,8 x 3,6 cm), et homogène sur cette aire d'au moins 14 cm² (pas de nerfs par exemple) pour éviter les erreurs de mesure.

⁵ D'après l'étalonnage du QualitySpect® BT, les mesures doivent être réalisées **juste après la coupe primaire** de la carcasse. Au cours de la mise au point de l'appareil, les études préliminaires ont montré que la mesure était influencée par le temps de ré-oxygénation de la viande au niveau du site de mesure. Des essais complémentaires, sur de plus gros effectifs, ont permis de développer de nouvelles équations de prédiction a priori indépendantes de ce biais. Il reste néanmoins préférable de limiter le temps entre la « mise à l'air » du muscle et la mesure.

L'Institut de l'Élevage a récemment étudié les potentialités du QS®BT à mesurer la tendreté de la viande dans le contexte français (ROZE, 2008). Lors de cette **expérimentation**, les choix du muscle et du moment de la mesure ont été légèrement modifiés par rapport au protocole américain (tout en essayant d'y coller au plus près) en raison des contraintes pratiques rencontrées sur le terrain. Dans ce cadre, les mesures ont été réalisées **20 à 40 min post-mortem sur la noix d'entrecôte** entre les 10 et 11^{èmes} côtes. Pour cela, les carcasses ont du être **préparées spécifiquement**, à savoir séparation du train de côte après la coupe en ART8 (**Figure 19**).

⁶ Des aménagements pour son installation en industrie devraient être réalisés mais restent minimales : par exemple mise en place d'une poulie soutenant la tête de lecture, ou raccordement de l'appareil au système informatique de l'abattoir pour assurer la traçabilité des animaux. La prise de mesure en soi est très simple : il suffit de positionner la tête de lecture sur le muscle et d'appuyer sur la gâchette. Il faut néanmoins faire attention de bien positionner la tête de lecture sur une partie homogène du muscle.

⁷ Le QualitySpect® BT affiche 2 types de résultats. La tête de lecture donne un résultat binaire sous forme de diodes qui s'allument : une diode classe les carcasses comme « tendres », l'autre comme « dures ». L'ordinateur affiche ce même résultat, et en plus la valeur de force de cisaillement Warner Bratzler prédite selon l'équation de prédiction mise au point pour calibrer l'appareil.

¹⁵ Norme requise pour la protection des matériels électriques sur site industriel.

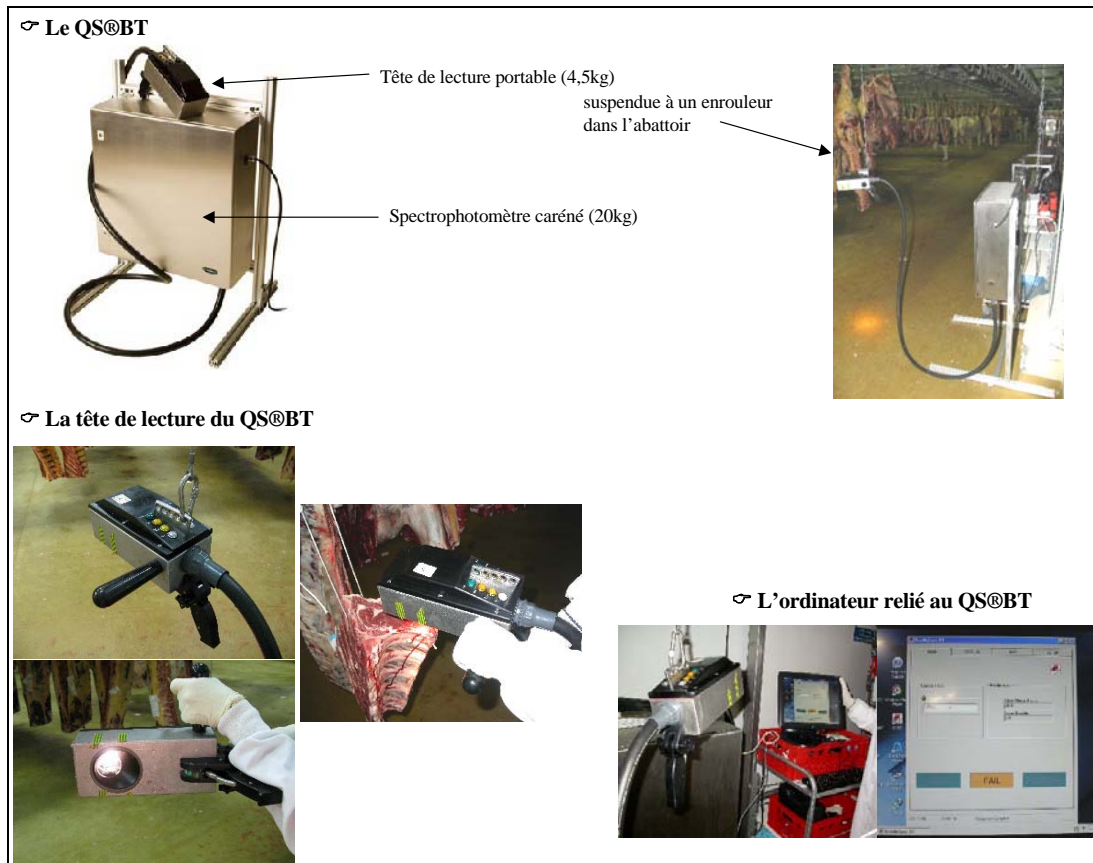


Figure 18 : Les différentes parties du QualitySpec® BT

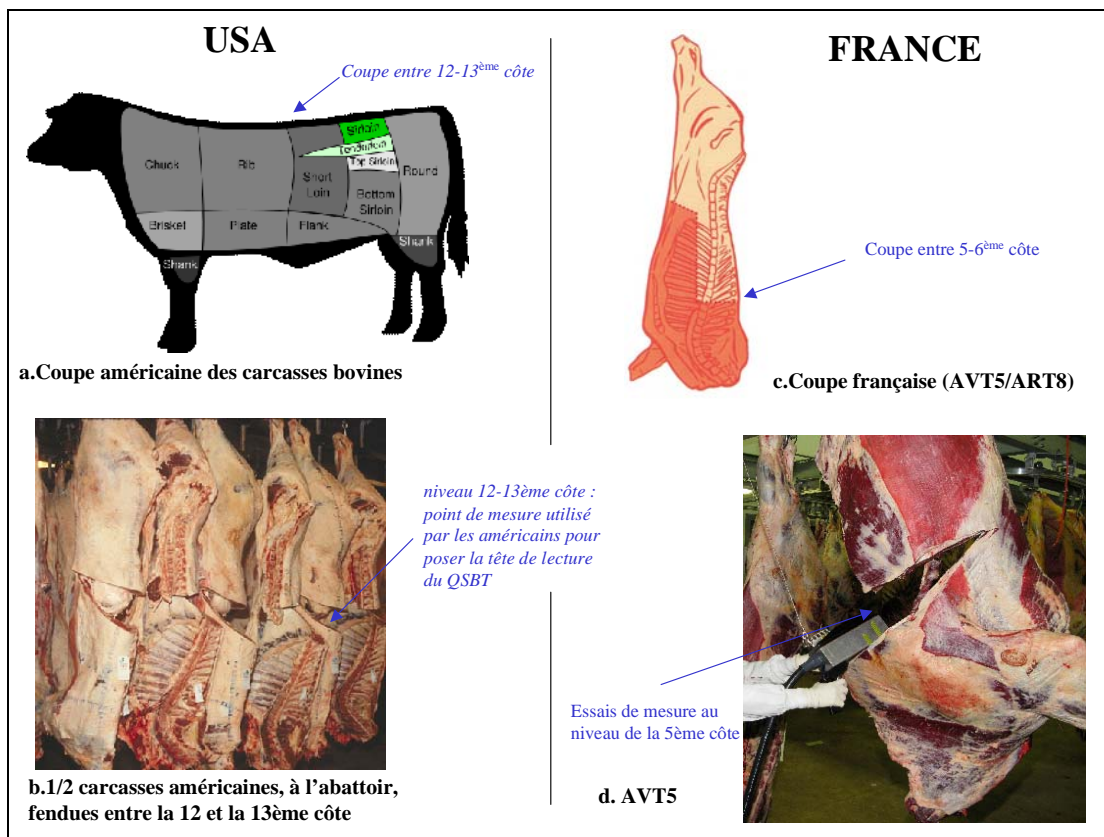


Figure 19 : Réalisation de la mesure aux Etats-Unis et lors de l'expérimentation en France

4.2.4 Perspectives

Bien que ses performances soient variables selon les études, la mesure de la tendreté par spectroscopie dans le visible et/ou le proche infrarouge est prometteuse et offre des avantages recherchés en industrie. A notre connaissance, l'outil de mesure dans ce domaine le plus abouti à ce jour est le QualitySpec® Beef Tenderness. *A priori* il est performant pour séparer les carcasses « tendres » et « dures » dans le contexte américain et fonctionne déjà en routine dans ce cadre. Testé dans le contexte français, le QS®BT n'a pas montré les mêmes potentialités pour estimer la tendreté *via* la prédiction de forces de cisaillement. Néanmoins, des résultats encourageants ont été observés concernant la capacité de cet appareil à classer les carcasses selon un potentiel de tendreté. Les mauvaises performances de prédiction sont en partie inhérentes à la méthode de mesure, mais surtout au problème récurrent qui se pose pour toutes les méthodes de mesure indirectes de la tendreté : la calibration. Le QS®BT est fonctionnel pour le contexte dans lequel il a été établi. Or, il est plus facile de développer un modèle de calibration valide pour l'ensemble d'une population lorsque celle-ci est homogène (notamment sur la surface du muscle mesuré) ce qui est le cas aux Etats-Unis. A l'inverse, le cheptel bovin français se caractérise par sa diversité, en particulier sur les catégories d'animaux produits (âges, races, systèmes de production...) ; alors est-il possible dans ces conditions de développer un modèle prédictif basé sur la spectroscopie VISNIR pour tous les bovins ? Sans réponse actuelle à cette question, la spectroscopie VISNIR, et notamment le QS®BT n'offrent que peu de perspectives pour la filière pour le moment.

4.3 La spectroscopie de fluorescence

Pendant longtemps, la spectroscopie de fluorescence a souffert d'un manque d'intérêt du fait de certains inconvénients, notamment : la difficulté d'analyse et d'interprétation des données due à la complexité des produits, et l'existence de nombreux facteurs perturbant les résultats, comme la température ou la couleur de l'échantillon (WOLD, 2000). Les évolutions dans la maîtrise de cette technique, associée à ses avantages certains pour l'industrie, ont conduits les chercheurs à s'y intéresser.

Dans le cas de la viande, l'essentiel des travaux étudiant la spectroscopie de fluorescence ont été entrepris par SWATLAND dès les années 80 (1987a, b et c) et jusqu'à la fin des années 90 (1993 ; 1997 ; 2000 ; SWATLAND et al, 1991 ; 1996). Ses investigations ont essentiellement porté sur les propriétés de fluorescence du tissu conjonctif, ce qui a conduit les chercheurs à tester cette technique pour mesurer d'autres critères de qualité de la viande comme la quantité de gras intramusculaire (EGELANDSDAL et al, 1996 ; WOLD, 2000), le goût, et enfin la tendreté de la viande bovine.

A l'image de la spectroscopie VISNIR, les combinaisons techniques testées ont été nombreuses et ont mené à des résultats variés et parfois décevants (SWATLAND et al, 1998 ; EGELANDSDAL et al, 2002). Ces travaux, de type expérimental, ont pour la plupart été conduits avec des spectrofluorimètres de laboratoire plus ou moins adaptés pour optimiser la mesure de la tendreté dans l'objectif de développer un appareil de terrain.

Les performances mitigées des spectrofluorimètres pour évaluer la tendreté de la viande ne sont pas surprenantes étant donné que la mesure d'une seule composante de la tendreté (le collagène) peut difficilement refléter la complexité de la tendreté. Cela dit, des travaux complémentaires ont mis en évidence d'autres éléments fluorophores dans la viande, comme par exemple les tryptophanes des protéines ou les nucléotides, et la fluorescence de ces molécules s'est révélée fortement corrélée à la texture de certains fromages (HERBERT, 1999 ; DUFOUR et al, 2001 ; LEBECQUE et al, 2001). Une équipe française (ADIV et ENITA de Clermont-Ferrand) à vu dans ces résultats la possibilité de faire des observations similaires sur la viande, et a entrepris à la fin des années 90 un large travail destiné à développer un appareil de terrain mesurant la tendreté par spectroscopie de fluorescence frontale. D'après nos connaissances, il s'agit à ce jour de l'instrument basé sur cette technique le plus abouti pour cette mesure dans le contexte français.

4.3.1 Principe de la spectroscopie de fluorescence

La spectroscopie de fluorescence est basée sur la capacité de certaines molécules à fluorescer suite à une excitation par la lumière. Les molécules qui possèdent cette propriété présentent des doubles liaisons conjuguées qui absorbent les photons de longueurs d'onde spécifiques. Lorsqu'une telle molécule excitée revient à son état de repos, elle émet un rayonnement de longueur d'onde supérieure : c'est la fluorescence.

Il existe 2 types de méthodes de spectroscopie de fluorescence : celle à angle droit permet de mesurer la fluorescence d'éléments en suspension dans une solution, la frontale (ou de surface) permet de mesurer la fluorescence d'un milieu solide.

4.3.2 Performances des mesures spectroscopiques de fluorescence

4.3.2.1 Ensemble des méthodes spectroscopiques de fluorescence

A l'image de la spectroscopie VISNIR, de nombreuses investigations ont été conduites sur la possibilité de prédire la tendreté de la viande par spectroscopie de fluorescence. Pour en discuter, le **Tableaux 15** présente quelques résultats obtenus entre les mesures spectroscopiques de fluorescence et d'autres méthodes de mesure de la tendreté.

Méthodes	Paramètres	Spectrofluorimètre frontal	Caractéristiques des études	Références
Analyse sensorielle	dureté	0,66 à 0,73	n = 20 LD et ST	SWATLAND et al, 1995a
Analyse sensorielle	masticabilité	-0,47 à -0,86	n = 167 LD et ST	SWATLAND et al, 1995b
Analyse sensorielle	tendreté	0,57	n = 16 morceaux du commerce	SWATLAND et FINDLAY, 1997
	masticabilité	- 0,61		
discrimination à partir des spectres du collagène seul		non concluant	n = 1 LD et SE ; 2, 9 et 16j	ADIV, 2000 ; DUFOUR et FRENCIA, 2001
discrimination à partir des spectres des tryptophanes		82 à 85% des échantillons discriminés selon le muscle ou le temps de maturation		
Force de cisaillement par WB	force max	0,45 à 0,84	n= 151 LD ; 2, 7 et 14j	EGELANDSDAL et al, 2002
		non concluant	n = 45 LD ; 2j en routine	
Analyse sensorielle	8 descripteurs combinés	0,57	n = 25 ST ; 7 et 12j	LEBECQUE et al, 2003.

Tableau 15 : Exemples de résultats (discrimination ou corrélation r) entre la mesure par spectrofluorescence et d'autres méthodes de mesure de la tendreté

LD = long dorsal ; SE = sous-épineux ; TF = tenseur facial ; ST = semi-tendineux ; TB = triceps brachii

Un grand nombre d'études ont porté sur les propriétés de fluorescence du tissu conjonctif, notamment l'une des principales molécules assurant la liaison entre les fibres de collagène et d'élastine. SWATLAND a mis en évidence une bonne relation (R^2 de 0,72) entre la quantité de collagène déterminée par la méthode de référence (dosage chimique) et par fluorescence, laissant entrevoir des perspectives intéressantes pour la mesure de la tendreté. Cela dit, les travaux suivants ont mis en évidence des coefficients de corrélation insuffisants entre les paramètres sensoriels et la mesure par spectroscopie de fluorescence, menant à la conclusion sans surprise que le dosage de la composante collagénique n'est pas suffisant pour estimer la tendreté de la viande (SWATLAND et al, 1995a ; b ; SWATLAND et FINDLAY, 1997).

Les travaux de l'ADIV (2000, 2001) ont confirmé que les spectres du collagène seul ne permettent pas de discriminer les échantillons selon la durée de maturation et/ou le muscle. Ce constat est lié à la très mauvaise répétabilité des spectres imputables aux caractéristiques du tissu conjonctif, à la faible surface de mesure de la viande (7 x 0,5 mm) et à la faible intensité d'émission du spectre, donc un rapport signal/bruit plus défavorable.

En revanche, les spectres d'émission des tryptophanes des protéines ont permis de discriminer les échantillons selon leur dureté de base (types musculaires très différents) et la durée de maturation avec un taux de réussite de 82 à 85%. Ces résultats étaient relativement prévisibles du fait de la variabilité intrinsèque des modalités choisies ; en effet, la différence de tendreté entre un faux-filet et un paleron, ou entre 2 et 14 jours de maturation, est tellement marquée qu'il est aisé de les discriminer. Par ailleurs, ils ont été acquis sur un seul animal, et étaient mal corrélés aux mesures texturométriques réalisées (à 20 et 80% de compression). Une nouvelle étude destinée à développer un appareil de mesure de terrain, le système modulaire ADIV-ENITAC.

Dans l'étude de EGELANDSDAL et al (2002), si les corrélations obtenues en conditions expérimentales sont intéressantes, les essais en routine n'ont pas permis de retrouver cette relation entre les spectres de fluorescence et les forces de cisaillement mesurées selon Warner-Bratzler. Ces résultats s'expliquent entre autres par les grandes variations pouvant intervenir entre muscles et carcasses juste après l'abattage lorsque l'on se situe en conditions industrielles, notamment au niveau du ressuyage des carcasses. De plus, il semblerait que les phénomènes impliqués dans la tendreté de la viande soient insuffisamment avancés à ce stade, et donc peu visibles au travers des spectres de fluorescence.

A l'inverse, LEBECQUE et al (2003) concluent que la spectroscopie de fluorescence frontale peut servir de moyen de mesure de la tendreté suite à la corrélation de 0,57 obtenue entre les mesures spectrales et la combinaison des 8 descripteurs notés par des dégustateurs (persillé, filandreux, humide, élasticité, tendreté initiale, jutosité, tendreté globale, résidu en bouche). Or, à la vue de ces descripteurs, il semble qu'il s'agisse davantage d'une appréciation globale du morceau que de l'évaluation de sa tendreté. De plus, les effectifs testés sont faibles.

4.3.2.2 Mesure avec le spectrofluorimètre modulaire frontal ADIV-ENITAC

Le **Tableau 16** présente les coefficients de corrélation obtenus entre l'appareil modulaire mis au point et les autres méthodes de mesure de la tendreté auxquelles il a été comparé (ADIV, 2002 ; FRENCIA et al, 2002).

Caractéristiques de l'étude : n = 2 ; LD, ST, TB ; 2, 6 et 10j	Analyse sensorielle	Forces de compression INRA (à 20%)	Spectro de laboratoire	Spectro de laboratoire avec fibre optique
Méthodes				
Forces de compression INRA (à 20%)	0,94	-	-	-
Spectro de laboratoire	0,93	0,95	-	-
Spectro de laboratoire avec fibre optique	0,96	0,91	0,97	-
Spectro modulaire ADIV-ENITAC	0,77	0,52	0,81	0,83

Tableau 16 : Corrélations r entre le spectrofluorimètre modulaire ADIV-ENITAC et d'autres méthodes de mesure de la tendreté

Les 4 dispositifs instrumentaux ont permis de discriminer les échantillons selon le type musculaire et surtout leur durée de maturation. Sur la base de ces résultats, associés aux bons coefficients de corrélation observés avec l'analyse sensorielle, les auteurs ont conclu à l'efficacité de la spectroscopie de fluorescence frontale pour séparer les échantillons selon leur niveau de tendreté. L'appareil modulaire est néanmoins à perfectionner car ses performances sont insuffisantes comparées aux méthodes de référence. Il convient de rester prudent quant à ces conclusions, notamment car chaque expérimentation n'a concerné que 2 animaux. De plus, les modalités comparées étaient éloignées en terme de tendreté. Au cours de cette même étude, des mesures ont été réalisées sur le faux-filet de 70 animaux (génisses, vaches et bœufs) avec le spectrofluorimètre modulaire ADIV permettant de confirmer les conclusions faites précédemment.

Ces résultats complémentaires ont conduit à la mise en œuvre d'une nouvelle étude (ADIV, 2005) destinée à calibrer le spectrofluorimètre portable développé et définir ses conditions d'utilisation. Or, ce travail n'a pas permis d'aboutir de façon concluante. En effet, la calibration de l'appareil par rapport à la méthode de référence (analyse sensorielle) n'a pas été techniquement possible (impossibilité de rapprocher les données, notes dégustateurs trop dispersées...). L'équipe a donc choisi de calibrer l'appareil par rapport aux mesures texturométriques à 20% de compression. Le R^2 obtenu entre ces 2 méthodes est de 0,79. Il s'agit d'un bon résultat, qu'il faut toutefois relativiser car calculé en prenant 2 des 3 répétitions du spectrofluorimètre, et validé avec la 3^{ème} répétition. Ce bon résultat est donc en partie lié à la très bonne répétabilité du spectrofluorimètre. D'ailleurs, les mesures réalisées sur de nouveaux échantillons de viande ne faisant pas partie de la calibration ont donné des résultats non satisfaisants.

4.3.3 Fiche synthétique des mesures par spectroscopie de fluorescence

Caractérisation de la méthode	
Nom	SPECTROFLUORIMETRE
Critère(s) mesuré(s)	spectres de fluorescence
Composante(s) évaluée(s)	fibrillaire et conjonctive
Type de méthode	évaluation de la tendreté
Méthode directe	non
Caractéristiques techniques	
- outil de mesure	spectrofluorimètre à angle droit ou frontal
- portabilité	non - nécessité d'un opérateur
- encombrement	appareil d'environ 60 x 30 x 30 cm
- résistance	pour labo
- automatisation	impossible
Coût	modéré passé l'investissement initial ¹
Conditions de mise en oeuvre	
<u>Niveau d'application</u>	
- terrain / laboratoire	méthode de laboratoire
- animal / carcasse / découpe	sur muscle après découpe
- type muscle	tous
- taille, poids, volume échantillon	variable - cubes de 2 x 1 x 0,5 cm (frontal)
<u>Etat de l'échantillon</u>	
- frais / congelé	frais - congélation possible
- cru / cuit	cru ou cuit selon le protocole
- broyé / en l'état	broyé et mis en suspension (angle droit) ou en l'état (frontal)
<u>Mise en oeuvre</u>	
- destructive / non	destructive
- délais prélèvement/mesure	aucun
- prélèvement/préparation échantillons	découpe, voire broyage du muscle
- niveau de facilité	facile
- durée mesure	2 min/spectre (frontal) - plus long pour les instruments à angle droit ² – traitements statistiques
- délais de réponse	
- nombre de répétitions	3 à 8 selon les protocoles
- dangerosité	non
- multi-usage	oui (collagène)
Caractérisation du résultat	
<u>Performances - pouvoir prédicteur</u>	
- intensité de liaison	r = 0,57 avec ASC (note)
- précision - fiabilité	extrêmement précise ³ - fiabilité mitigée et très variable selon le contexte
- effectifs utilisés pour le calcul de r	petits - n = 16
<u>Expression du résultat</u>	
- sensoriel / instrumental	instrumental
- absolu / relatif	relatif
- objectif / subjectif	objectif
- interprétation facile	simple après calibration

4.3.4 Fiche synthétique de la mesure par l'appareil modulaire de spectrofluorescence frontale ADIV - ENITAC

Caractérisation de la méthode	
Nom	SPECTROFLUORIMETRE MODULAIRE FRONTAL ADIV-ENITAC
Critère(s) mesuré(s)	spectres de fluorescence
Composante(s) évaluée(s)	fibrillaire et conjonctive
Type de méthode	évaluation de la tendreté
Méthode directe	non
Caractéristiques techniques	
- outil de mesure	spectrofluorimètre ADIV-ENITAC ¹
- portabilité	oui mais limitée
- encombrement	8 kg - acceptable sur le terrain
- résistance	oui
- automatisation	non, mais systématisation possible avec l'intervention d'un opérateur
Coût	modéré - coûteux si systématisation
Conditions de mise en oeuvre	
<u>Niveau d'application</u>	
- terrain / laboratoire	méthode de terrain
- animal / carcasse / découpe	sur carcasse, sur muscle accessible
- type muscle	choisir 1 muscle de référence
- taille, poids, volume échantillon	sonde optique de 1 cm ²
<u>Etat de l'échantillon</u>	
- frais / congelé	frais
- cru / cuit	cru
- broyé / en l'état	en l'état
<u>Mise en oeuvre</u>	
- destructive / non	non destructive
- délais prélèvement/mesure	fin de chaîne d'abattage
- prélèvement/préparation échantillons	aucun sauf accessibilité du muscle
- niveau de facilité	très facile
- durée mesure	1 à 3 secondes
- délais de réponse	instantané mais traitements statistiques
- nombre de répétitions	3 répétitions à 3 endroits différents du muscle
- dangerosité	non
- multi-usage	oui théoriquement mais non car pas de calibration pour d'autres critères
Caractérisation du résultat	
<u>Performances - pouvoir prédicteur</u>	
- intensité de liaison	r = 0,77 avec ASC
- précision - fiabilité	très précis - peu fiable pour prédire, plus adapté pour discriminer
- effectifs utilisés pour le calcul de r	petits - n = 2
<u>Expression du résultat</u>	
- sensoriel / instrumental	instrumental
- absolu / relatif	relatif
- objectif / subjectif	objectif
- interprétation facile	simple - discrimination

Précisions sur l'ensemble des mesures spectroscopiques de fluorescence

¹ En terme d'investissement, un spectrofluorimètre est l'instrument le plus cher parmi les techniques spectroscopiques. Il coûte en moyenne 25000 €, la fourchette pouvant largement varier selon le modèle et le logiciel d'acquisition des données associé. Par ailleurs, il nécessite un opérateur pour préparer et positionner les échantillons.

² Les appareils à angle droit fonctionnent souvent en mode balayage, cela signifie que l'acquisition des spectres se fait successivement aux différentes longueurs d'ondes et nécessite par conséquent un certain temps, incompatible avec les cadences d'abattage.

³ La spectroscopie de fluorescence est 100 à 1000 fois plus sensible que les autres techniques spectroscopiques, notamment celle dans le visible et/ou le proche infrarouge (STRASBURG et al, 1995 ; DUFOUR et al, 2001). Cela dit, sa haute sensibilité la rend plus sujette aux variations de l'environnement du milieu mesuré.

Précisions sur la mesure par l'appareil modulaire de spectrofluorescence frontale ADIV-ENITAC

¹ L'appareil modulaire spectroscopique développé par l'ADIV et l'ENITAC a été mis au point à partir d'un spectrofluorimètre de laboratoire sur lequel une fibre optique coaxiale a été adaptée de façon à s'affranchir du prélèvement. Cette adaptation a également permis de diminuer considérablement le temps de mesure (1,5 seconde vs 2 minutes). Enfin, des aménagements ont été réalisés de façon à rendre l'appareil facilement transportable et simple d'utilisation, d'où ses éléments modulaires.

4.3.5 Perspectives

Les spectrofluorimètres de laboratoire, qu'ils soient à angle droit ou à mesure frontale, offrent l'avantage d'être très précis et polyvalents. Cependant, ils ne sont pas du tout adaptés à une application telle que recherchée par l'industrie de la viande. En effet, ils sont encombrants et obligent à réaliser *a minima* un prélèvement de viande puisque le capteur est intégré à l'appareil. Dans le cas de spectrofluorimètres à angle droit, il y a même une contrainte supplémentaire : la préparation de l'échantillon (broyage, extraction, mise en suspension...). D'autre part, ces appareils fonctionnent souvent en mode balayage, cela signifie que l'acquisition des spectres se fait successivement aux différentes longueurs d'ondes et nécessite par conséquent un certain temps, incompatible avec les cadences d'un site industriel.

Grâce à l'apparition des fibres optiques, permettant de mesurer directement l'échantillon, rapidement et sans préparation préalable, la spectroscopie de fluorescence est apparue comme une technique intéressante à investiguer sur la viande, à l'image d'essais concluants acquis pour la mesure de la texture sur d'autres produits. A notre connaissance, l'outil le plus abouti à ce jour adapté pour une utilisation en routine est le spectrofluorimètre modulaire frontal développé par l'ADIV et l'ENITAC. Cependant, les résultats obtenus à ce jour sont insuffisants pour envisager son utilisation pour une mesure de la tendreté, la relation des mesures avec les méthodes de références étant faible, voire inexistante. Ces mauvaises performances sont peut être liées à une trop haute sensibilité de la spectroscopie de fluorescence. En effet, les mesures peuvent être perturbées par de nombreux facteurs de l'environnement (pour exemple, l'intensité de fluorescence d'un échantillon varie fortement en fonction de sa température ou de sa couleur), ce qui rend certainement d'autant plus difficile la calibration d'un appareil basé sur ce principe. En l'état actuel, cette technologie n'offre que peu de perspectives pour la filière française.

4.4 Impédance électrique

Une équipe française (INRA) s'intéresse depuis plus d'une dizaine d'années aux propriétés électriques de la viande en vue de développer un appareil de mesure de l'état de maturation. En effet, une mesure de la tendreté n'est pas possible étant donné que le tissu conjonctif, qui a un rôle décisif dans la tendreté, a une impédance semblable à celle des fibres musculaires (SWATLAND, 1980) et donc ne peut pas être détecté par des mesures électriques. BYRNE et al, (2000) ont d'ailleurs tenté de mettre en relation des propriétés électriques du muscle avec la résistance mécanique de la viande après chauffage ; sans succès. En revanche, LEPETIT et al (1996) ont montré qu'une mesure précoce de l'état de maturation d'une viande peut présager de son niveau de maturation ultérieur. Ils ont alors entrepris plusieurs études destinées voir dans quelles mesures il était possible d'exploiter les propriétés électriques du muscle (LEPETIT et al, 2002a, b ; DAMEZ et al, 2006a, b).

4.4.1 Principe de la mesure par impédance électrique

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 on parle d'impédance ; c'est le cas des tissus biologiques comme la viande. L'impédance comprend une composante résistive, et une composante capacitive qui traduit les propriétés diélectriques du milieu, c'est-à-dire les propriétés régissant l'interaction de ce milieu 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). Ces 2 grandeurs traduisent la capacité d'un matériau à stocker et à dissiper l'énergie électromagnétique selon sa structure. On peut étudier ces propriétés à de très basses fréquences, qui permettent d'atteindre les niveaux de structure grossière, jusqu'aux hyperfréquences, qui permettent au contraire d'observer les niveaux de structure correspondants aux éléments plus fins.

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 au cours de la maturation affectent donc non seulement les propriétés mécaniques du muscle, mais également ses propriétés électriques. On assiste ainsi à une évolution de l'impédance (DAMEZ et al, 2005a) et du caractère anisotrope de la viande, observables à l'aide d'un capteur basé sur l'émission d'une onde polarisée (FELBACQ et al, 2002).

4.4.2 Performances de mesure par impédance électrique

Au cours des premiers travaux de test de cette technique de mesure et de mise au point de la méthode, les auteurs ont mis en évidence que n'est pas l'impédance en tant que telle qui est intéressante pour mesurer le degré de maturation d'une viande, mais l'anisotropie de l'impédance. En effet, l'impédance est beaucoup trop variable d'un muscle à l'autre, et d'un animal à l'autre, d'où l'impossibilité de mettre au point des règles de calibration généralisables. En revanche, à partir de mesures sur 43 muscles (semimembraneux et pectoralis profonds) une corrélation r de 0,59 a été obtenue entre l'anisotropie électrique et la résistance des fibres mesurées par la méthode de compression INRA (LEPETIT et al, 2002 ; DAMEZ et al, 2002). Face à cette faible corrélation, les auteurs ont souhaité perfectionner la mise au point d'une telle méthode de mesure, notamment en développant

des sondes mesurant l'impédance dans toutes les directions, contrairement aux sondes testées dans cette première étude.

Le **Tableau 17** présente les résultats obtenus avec les nouvelles électrodes à géométrie circulaires mises au point (DAMEZ et al, 2006a ; b). Des problèmes spécifiques liés à l'interface électrode-produit ont rendu les mesures difficilement exploitables. Même avec le capteur « 4 points », technique sensée améliorer les résultats, l'anisotropie d'impédance a été moins mise en valeur, certainement en raison d'une dimension du capteur et d'un écartement des électrodes plus petits. Les problèmes d'impédance de contact et de polarisation d'électrodes lient la fiabilité des mesures aux conditions d'application du capteur : l'opérateur doit appliquer le capteur avec soin dans le sens longitudinal et transversal aux fibres musculaires. Une imprécision de la mesure d'impédance, même petite, induit rapidement des écarts importants dans l'évaluation de l'anisotropie. Les résultats n'ont donc pas mis en évidence le lien avec l'état de maturation sur tous les muscles étudiés. Il faut néanmoins préciser que la gamme d'état de maturation était relativement faible. Malgré ces corrélations mitigées, la mesure par impédance électrique avec les sondes mises au point permet de classer relativement correctement (taux entre 80 et 85%) les carcasses « maturées » et « non maturées ». 3 classes de maturation ont été définies sur la base des forces de compression (« mûré » de 0 à 10 N/cm², « intermédiaire » de 10 à 20 N/cm², et « pas mûré » de 20 à 30 N/cm²), et c'est la catégorie intermédiaire qui est la moins bien discriminée (taux autour de 65%).

Caractéristiques étude : 2, 3, 6 et 14j	Effectifs n	Sonde circulaire 20 électrodes « 2 points »	Sonde circulaire couronne « 4 points »
Sonde utilisée			
Rectus Abdominis (RA)	28	0,91	0,74
Semimembraneux (SM)	48	0,76	0,33
Semitendineux (ST)	28	0,42	0,76
Combinaison des 2 meilleurs	-	0,89 (RA et SM)	0,74 (RA et ST)
Combinaison des 3 muscles	-	0,70	0,59
% de bien classés	-	64 à 89%	60 à 87%

Tableau 17 : Corrélations r entre les mesures d'impédances sur différents muscles et les mesures de compression à 20% selon la méthode INRA

4.4.3 Fiche de synthèse sur la mesure par impédance électrique

Caractérisation de la méthode	
<p>Nom</p> <p>Critère(s) mesuré(s)</p> <p>Composante(s) évaluée(s)</p> <p>Type de méthode</p> <p>Méthode directe</p> <p>Caractéristiques techniques</p> <ul style="list-style-type: none"> - outil de mesure - portabilité - encombrement - résistance - automatisation <p>Coût</p>	<p>IMPEDANCE ELECTRIQUE</p> <p>anisotropie électrique fibrillaire¹</p> <p>évaluation du niveau de maturation non</p> <p>analyseur d'impédance muni de sondes avec capteurs (un capteur breveté) non mais sonde de mesure portative²</p> <p>appareil d'environ 20 kg mais sonde légère³</p> <p>adaptable, oui pour capteurs⁴</p> <p>non, pas en l'état</p> <p>peu coûteuse en l'état mais possibilité de le devenir⁵</p>
Conditions de mise en oeuvre	
<p><u>Niveau d'application</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - terrain / laboratoire - animal / carcasse / découpe - type muscle - taille, poids, volume échantillon <p><u>Etat de l'échantillon</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - frais / congelé - cru / cuit - broyé / en l'état <p><u>Mise en oeuvre</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - destructive / non - délais prélèvement/mesure - prélèvement/préparation échantillons - niveau de facilité - durée mesure - délais de réponse - nombre de répétitions - dangerosité - multi-usage 	<p>méthode de laboratoire à ce stade sur carcasse, sur muscle accessible tous théoriquement⁶</p> <p>surface 12,5 à 50 cm² selon la sonde</p> <p>frais cru en l'état</p> <p>non destructive mais invasive⁷</p> <p>aucun</p> <p>aucun mais accessibilité du muscle délicat car dextérité de l'opérateur</p> <p>rapide</p> <p>rapide mais traitements statistiques</p> <p>1 application du capteur⁸</p> <p>non</p> <p>non</p>
Caractérisation du résultat	
<p><u>Performances - pouvoir prédictif</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - intensité de liaison - précision - fiabilité - effectifs utilisés pour le calcul de r <p><u>Expression du résultat</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - sensoriel / instrumental - absolu / relatif - objectif / subjectif - interprétation facile 	<p>r = 0,42 à 0,91 avec compression INRA</p> <p>très précise - fiabilité liée à la dextérité de l'opérateur pour faire la mesure</p> <p>grands - n = 104</p> <p>instrumental</p> <p>relatif</p> <p>objectif</p> <p>compliquée⁹</p>

Précisions sur la mesure de l'impédance électrique

¹ 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 (DAMEZ et al, 2006b).

² Au cours des différentes études menées, une multitude de types de sonde et de montage électrique ont été testés (**Figures 20, 21 & 22**). Les prototypes les plus prometteurs sont les sondes circulaires.

³ L'ensemble de l'appareil de mesure est relativement encombrant (analyseur d'impédance, ordinateur, amplificateur, connecteurs) car encore à l'état de prototype (mis au point à partir d'instruments de laboratoire). Cela dit, les sondes de mesure développées ont été conçues de façon à être aisément manipulables, donc légères et peu encombrantes (comparables à un pommeau de douche).

⁴ Encore à l'état de prototype, l'appareil dans son ensemble n'est pas spécialement adapté aux conditions industrielles. Cela dit, des adaptations seraient réalisables (comme par exemple intégration des systèmes de mesure dans des caissons de protection) dans la mesure où les sondes de mesure ont été conçues avec des matériaux compatibles avec les contraintes industrielles sur le plan des propriétés électriques (conducteurs ou isolants parfaits) et de la robustesse.

⁵ La technique de mesure est peu coûteuse en l'état. Cela dit, qu'en serait-il d'un appareil adapté spécifiquement ? Par ailleurs, la mesure nécessite l'intervention d'un opérateur pour prendre la mesure, donc comme la plupart des méthodes sa systématisation en entreprise serait coûteuse.

⁶ 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 (LEPETIT et al, 2002), mais cette relation diffère selon les muscles. En revanche, l'évolution de l'anisotropie en fonction de la résistance des fibres est théoriquement indépendante du muscle, d'où l'utilisation de cette mesure. Cela dit, les performances sont mitigées selon le type de muscle parmi les 3 testés (voir performances).

⁷ Bien que la mesure de l'impédance ne soit pas destructive en soi, les électrodes de mesure sont plus ou moins invasives selon le capteur, ce qui peut détériorer la qualité du muscle mesuré d'un point de vue visuel d'une part, mais également sur le plan hygiénique.

⁸ Ce n'est pas le cas de tous les capteurs testés mais un des capteurs de géométrie circulaire (breveté) ont été développés de façon à mesurer les propriétés d'anisotropie d'impédance en 1 seule application du capteur (il réalise une multitude de mesures simultanément dans toutes les directions des fibres). Par contre, 3 répétitions ont été réalisées dans le cadre de l'expérimentation.

⁹ Une observation consiste en l'acquisition d'un spectre d'impédance fréquentielle sur 80 fréquences (entre 100 Hz et 1,5 MHz). Un logiciel spécifique extrait alors toutes les valeurs d'impédance min et max. 8 variables ont été retenues pour l'étude : module et partie réelle de l'impédance transversale, module et partie réelle de l'impédance longitudinale, rapport et différence de ces 2 modules, et rapport et différence ces 2 parties réelles. Les résultats peuvent être représentés au travers de diagrammes polaires d'impédances, dont la forme varie selon la sonde de mesure utilisées (**Figure 23**). Des équations paramétriques mises au point avec toutes les variables permettent d'obtenir une valeur de mesure électrique (sans dimension), cette dernière étant celle qui est reliée aux autres mesures de référence.

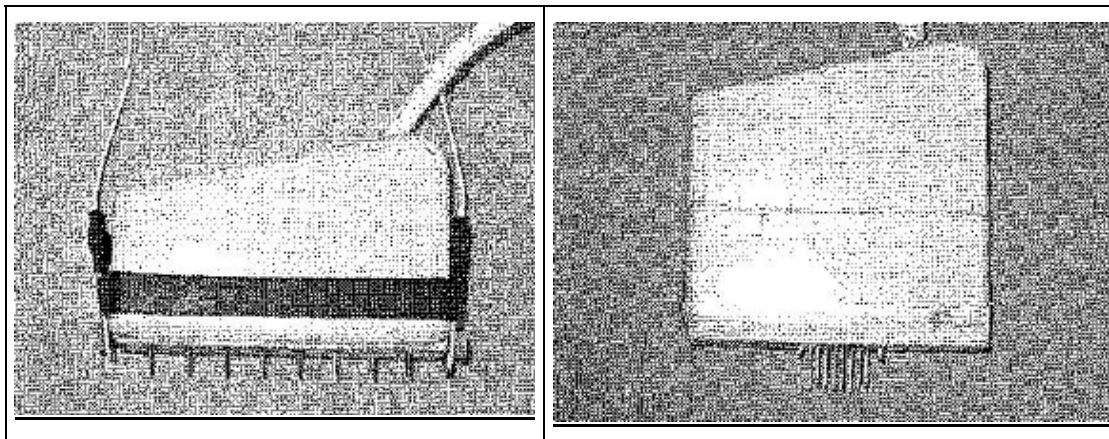


Figure 20 : Capteur 8 électrodes dorées 4 points et capteur 8 électrodes 4 points à aiguilles hypodermiques

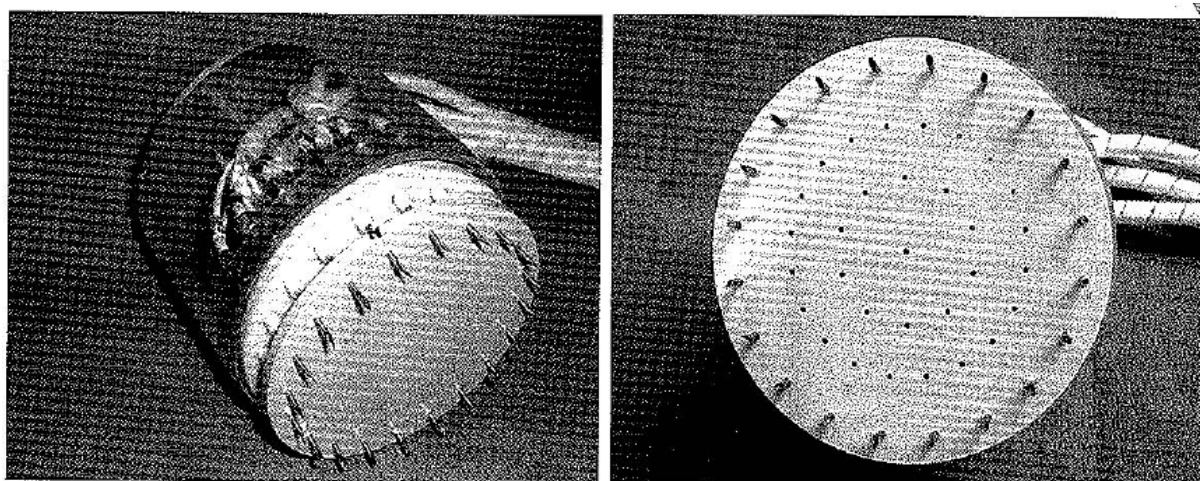


Figure 21 : sonde circulaire 20 électrodes en configuration 2 points

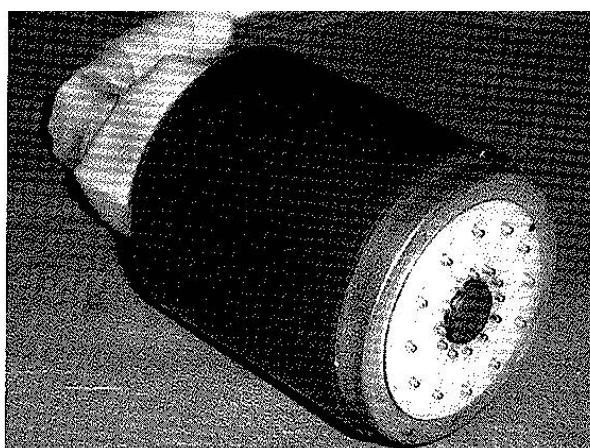
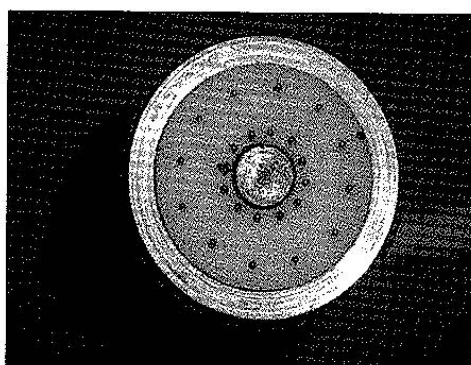


Figure 22 : Sonde circulaire couronne

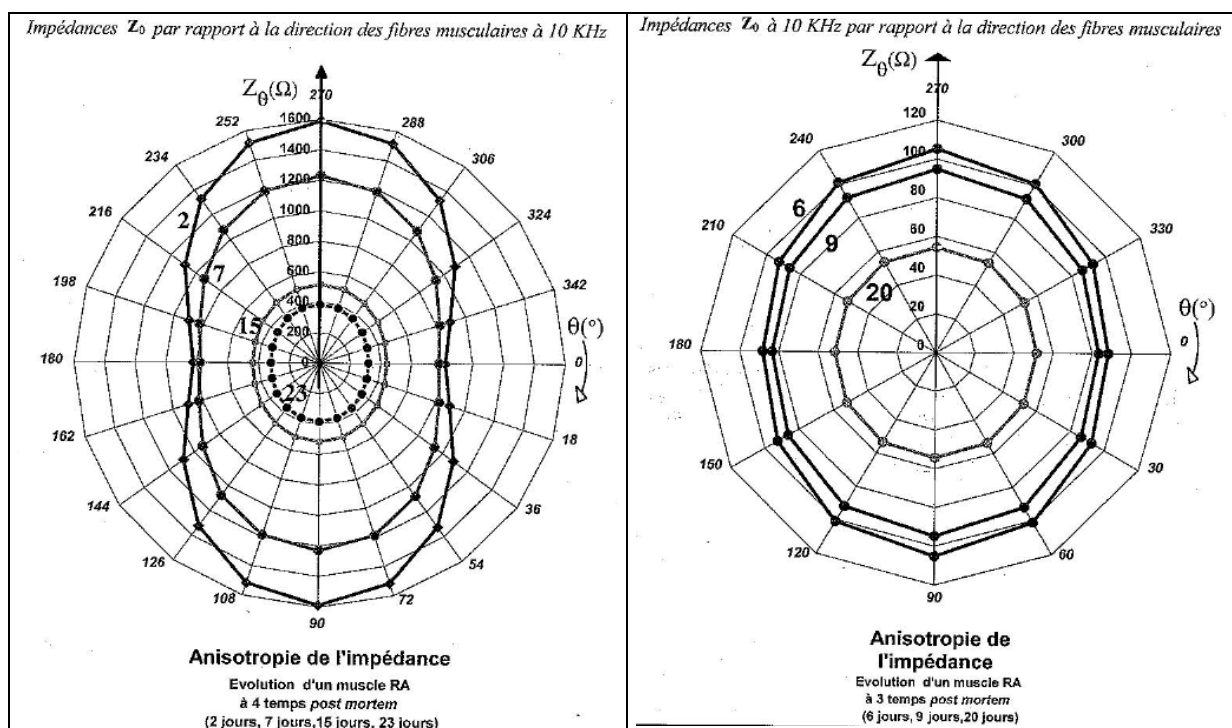


Figure 23 : Diagrammes polaires des impédances obtenues avec la sonde circulaire 20 électrodes 2 points et avec la sonde circulaire couronne

4.4.4 Perspectives

Les travaux réalisés ont permis de mettre au point des capteurs répondants aux contraintes d'utilisation industrielles, et fiables pour mesurer l'impédance de l'anisotropie de la viande. Cela dit, dans quelle mesure cette mesure reflète-t-elle l'état de maturation de la viande ? Les performances de cette technique de mesure sont mitigées, notamment en fonction du type de muscle et de la dextérité dans la réalisation de la mesure. Ce dernier point est particulièrement problématique si l'on se situe en condition de terrain, et ce d'autant plus qu'il s'agit d'une méthode de mesure très sensible aux manipulations de l'échantillon, et que le capteur a priori le plus performant (capteur 20 électrodes « 2 points ») est plus difficile à manier et possède des électrodes plus invasives que le capteur couronne « 4 points ».

En l'état actuel, la mesure de l'anisotropie de l'impédance ne peut être envisagée comme une méthode d'évaluation de l'état de maturation sur le terrain. Des compléments seraient nécessaires concernant les performances de l'anisotropie de l'impédance selon des conditions de terrain, ainsi que sur les conditions d'utilisation d'un tel système.

Méthodes explicatives

Au delà des méthodes de mesure de la tendreté ou de la maturation présentées précédemment, on distingue d'autres méthodes souvent mises en avant comme méthodes de mesure de la tendreté mais qui n'en sont pas réellement. En effet, ces méthodes ne mesurent pas la tendreté en tant que telle, mais des paramètres pouvant influencer sur la tendreté et dont les variations pourraient éventuellement permettre d'expliquer des différences de tendreté observées. C'est pourquoi certaines de ces méthodes sont fréquemment mises en œuvre dans les travaux de recherche sur la tendreté, d'où une certaine confusion sur ce qu'elles mesurent en réalité.

Bien que ce travail concerne exclusivement les méthodes de mesure de la tendreté, cette dernière partie est importante afin de bien faire la distinction entre méthodes de mesure de la tendreté (ou du niveau de maturation) et méthodes explicatives de la tendreté. Ces dernières concernent la mesure d'éléments chimiques ou moléculaires *via* la génomique. Avec le développement des nouvelles technologies, certains éléments chimiques, comme le collagène par exemple, peuvent aujourd'hui être quantifiés et/ou qualifiés par des méthodes physico-chimiques, notamment les appareils spectroscopiques. Dans ce cas, seules les méthodes de référence, à savoir les dosages chimiques traditionnels, ont été étudiées. En effet, l'objectif de cette partie n'est pas de s'intéresser à l'ensemble des méthodes existantes pour mesurer les différents constituants indicateurs ou explicatifs de la tendreté.

5 Méthodes explicatives

5.1 Dosage du collagène

5.1.1 Principe du dosage du collagène

Le tissu conjonctif, une des 2 composantes de la tendreté, est constitué de 2 protéines fibreuses : le collagène et l'élastine. Le collagène représente environ 80% du poids du tissu conjonctif. Dans sa composition, 3 acides aminés prennent une part assez importante : la glycine pour 35%, la proline pour 7 à 9%, et l'hydroxyproline pour 12 à 14% selon les types de collagène. L'hydroxyproline peut être considérée comme un marqueur spécifique du tissu conjonctif ; c'est pourquoi son dosage est la méthode de référence qui est communément admise pour déterminer la quantité de collagène d'un échantillon de viande.

5.1.1.1 Dosage du collagène total

En France, le dosage de la L-hydroxyproline et le calcul de la teneur en collagène total sont décrits dans la norme NF V 04-415 (AFNOR, 2002). Il s'agit d'un dosage réalisé selon les techniques chimiques traditionnelles d'après la méthode de BERGMAN et LOXLEY (1963). La L-hydroxyproline est libérée par une hydrolyse à chaud des protéines de la viande, suivi d'une oxydation en milieu neutre. Les produits de cette oxydation forment des dérivés qui réagissent avec le réactif d'Ehrlich pour donner un composé absorbant à une longueur d'onde de 550 nm. La mesure de cette absorbance avec un spectrophotomètre permet d'obtenir la concentration en hydroxyproline en mg. Le pourcentage de collagène est obtenu par calcul, considérant que 1 mg d'hydroxyproline est égal à 8 mg de collagène.

5.1.1.2 Dosage du collagène insoluble

Ce n'est pas uniquement la quantité totale de collagène qui limite la tendreté d'un morceau : le degré de polymérisation, ou réticulation, des fibres de collagène est également un facteur important. Cette propriété est estimée par la mesure du collagène dit soluble. En effet, la part du collagène de la viande qui n'est pas solubilisé par une cuisson standard, c'est-à-dire le collagène insoluble, est une indication sur son degré de polymérisation. Plus cette part est importante, plus une quantité de collagène donné agira de façon négative sur la tendreté des morceaux. En France, il n'existe pas de méthode normalisée pour le dosage du collagène soluble. La méthode utilisée est celle développée par l'INRA, qui a également adapté la méthode normalisée pour le dosage du collagène total (BONNET et KOPP, 1986). Le dosage du collagène insoluble consiste à soumettre l'échantillon de viande à un traitement thermique en milieu aqueux, puis à déterminer la teneur résiduelle en collagène de l'échantillon selon le protocole de détermination du collagène total.

Sauf exception, l'essentiel des auteurs met en œuvre la même méthode de dosage pour le collagène total. Pour le collagène insoluble, les méthodes diffèrent uniquement sur le temps et la température du traitement thermique. Ils sont généralement de 2h à 90°C ou 4h à 100°C.

5.1.2 Performances du dosage du collagène

Le **Tableau 18** montre quelques exemples de corrélations obtenues entre le dosage du collagène et la tendreté, évaluée par analyse sensorielle ou par mesure de résistance.

Méthodes	Paramètres	Teneur en collagène total	Teneur en collagène insoluble	Caractéristiques des études	Références
Analyse sensorielle	note de tendreté	- 0,06 à - 0,12	0 à - 0,08	n = 2370 LD ; 7j	Etude Qualvigène
		- 0,70	-	modalités éloignées	DRANSFIELD, 1977
		- 0,35	-	nc	TORRESCANO et al, 2000
		- 0,18 à - 0,22	solubilité : 0,07 à 0,24	n = 106 LT ; 2,7 et 21j	RENAND et al, 2001
		- 0,41	-	ST et GB	NGAPO et al, 2002
		- 0,13 à - 0,27	- 0,13 à - 0,30	n = 168 LT, ST et TB ; 14j	DRANSFIELD et al, 2003 ; PICARD et al, 2006
Forces de cisaillement par WB	force max	non concluant	-	n = 108 LD ; 13j	JEREMIAH et MARTIN, 1981
		0,03	0,02	n = 42 LD ; 1, 3, 7, 10, 14 et 21j	CAMPO et al, 2000
		0,723	0,661	n = 4 14 muscles* ; 1j	TORRESCANO et al, 2003
		0,02 à 0,09	0 à - 0,04	n = 2370 LD ; 7j	Etude Qualvigène
		0,23 à 0,31	0,19 à 0,29	n = 168 LT, ST et TB ; 14j	DRANSFIELD et al, 2003 ; PICARD et al, 2006

Tableau 18 : Exemples de corrélation r entre le dosage du collagène et d'autres méthodes de mesure de la tendreté

LD = long dorsal ; LT = longissimus thoracis ; ST = semitendineux ; TB = triceps brachii

* BF = biceps femoris ; CF = quadriceps femoris ; DI = diaphragm ; FD = flexor digitorum ; GM = gluteus medius ; IE = infraspinatus ; LL = longissimus lumborum ; LT = longissimus thoracis ; PM = psoas major ; PP = pectoralis profundus ; SM = semimembraneux ; ST = semitendineux ; STER = sternomandibularis ; et TB = triceps brachii

Comme l'a souligné LEPETIT (2004), on s'aperçoit que l'influence de la teneur en collagène sur la tendreté de la viande est remarquable uniquement lorsque l'on a des variations importantes sur les teneurs en collagène, c'est-à-dire principalement lorsque les modalités étudiées concernent différents types de muscles. Dans ce cas, des corrélations élevées peuvent être observées (DRANSFIELD, 1977 ; TORRESCANO et al, 2003), mais elles restent le plus souvent faibles (TORRESCANO et al, 2000 ; NGAPO et al, 2002 ; DRANSFIELD et al, 2003, HOCQUETTE et al, 2005 ; PICARD et al, 2006). Ce constat est en partie lié à l'énorme variabilité de la quantité de collagène au sein d'un même muscle (ADIV, 2000), ce qui limite les possibilités de discriminer les muscles entre eux. Très logiquement, la teneur en collagène est peu déterminante lorsqu'il s'agit d'expliquer les variations de tendreté sur un muscle donné (JEREMIAH et MARTIN, 1981 ; Etude Qualvigène, OURY et al, 2006) ou à différents temps de maturation (CAMPO et al, 2000 ; RENAND et al, 2001).

Les contradictions observées entre les études peuvent également s'expliquer par l'impact de la cuisson sur le réseau collagéniques. En effet, la cuisson engendre des modifications simultanées au niveau du tissu conjonctif et des fibres musculaires, ainsi que des interactions mécaniques entre ces 2 composantes, notamment au delà de 55°C (LEPETIT et al, 2000). Bien que la contribution de chacune de ces transformations ne soit pas connue, il n'y a aucun doute que les différences quantitatives et qualitatives du collagène sont minimisées par sa dénaturation aux hautes températures (au delà de 60-65°C). Or, dans la plupart des études, notamment anglo-saxonnes, les échantillons sont cuits à des températures supérieures à 70°C, alors qu'à l'extrême il n'y a pas de cuisson dans certaines études (TORRESCANO et al, 2003).

5.1.3 Fiche de synthèse du dosage du collagène

Caractérisation de la méthode	
Nom Critère(s) mesuré(s) Composante(s) évaluée(s) Type de méthode Méthode directe Caractéristiques techniques <ul style="list-style-type: none"> - outil de mesure - portabilité - encombrement - résistance - automatisation Coût	DOSAGE DU COLLAGENE Teneur en hydroxyproline conjonctive évaluation du niveau de tendreté de base non matériel de chimie et spectrophotomètre non laboratoire - impossible relativement coûteuse car longue
Conditions de mise en oeuvre	
<u>Niveau d'application</u> <ul style="list-style-type: none"> - terrain / laboratoire - animal / carcasse / découpe - type muscle - taille, poids, volume échantillon <u>Etat de l'échantillon</u> <ul style="list-style-type: none"> - frais / congelé - cru / cuit - broyé / en l'état <u>Mise en oeuvre</u> <ul style="list-style-type: none"> - destructive / non - délais prélèvement/mesure - prélèvement/préparation échantillons - niveau de facilité - durée mesure/délais de réponse - nombre de répétitions - dangerosité - multi-usage 	méthode de laboratoire sur morceau de muscle après découpe tous 3g issus d'un morceau de 100 à 200g frais, congélation possible cru ou cuit broyé destructive aucun car congélation possible parage, découpe et broyage facile mais long et nécessité d'avoir une bonne organisation 3 jours ¹ 2 à 5 par échantillon (3 selon NF) possible ² non
Caractérisation du résultat	
<u>Performances - pouvoir prédicteur</u> <ul style="list-style-type: none"> - intensité de liaison - précision - fiabilité - effectifs utilisés pour le calcul de r <u>Expression du résultat</u> <ul style="list-style-type: none"> - sensoriel / instrumental - absolu / relatif - objectif / subjectif - interprétation facile 	r = - 0,06 à - 0,70 avec ASC précision modérée - peu fiable prise individuellement car information sur la tendreté trop partielle grands - n = 106 à 2370 instrumental absolu objectif facile

Précisions sur le dosage du collagène

¹ Le temps minimum pour réaliser le dosage du collagène est de 3 jours puisqu'il faut laisser agir les réactifs une nuit pour l'hydrolyse acide et une autre pour la neutralisation des hydrolysas. Le dosage du collagène insoluble est toujours couplé à celui du collagène total.

² Le dosage du collagène nécessite la manipulation de produits dangereux (acide perchlorique à 70%). Le port des lunettes et des gants de protection est obligatoire.

5.1.4 Perspectives

Aujourd'hui, il reste certain que la teneur en collagène, ainsi que son degré de réticulation, ont une influence sur la tendreté de la viande. Pourtant, le dosage du collagène, total comme insoluble, ne représente pas une méthode fiable pour évaluer la tendreté de la viande. En effet, la composante myofibrillaire n'est pas évaluée par cette technique, et la composante collagénique mesurée *via* le collagène apporte trop peu de renseignements par rapport à la complexité de la tendreté et l'imbrication des facteurs les uns aux autres. Par exemple, la solubilité du collagène, qui participe à la tendreté du muscle, serait conditionnée simultanément par la réticulation des fibres de collagène, l'importance des liaisons intra et inter-fibres (McCORMICK, 1999), les taux de collagènes I et III (BAILEY et LIGHT, 1989), voir même d'autres éléments tels que les protéoglycanes (PEDERSEN et al, 2001). Les interactions entre les différents composants ne sont jamais prises en compte car très compliquées et pour la plupart inconnues à ce jour. D'autre part, la teneur en collagène est très variable au sein d'un même muscle. Il est donc délicat de vouloir estimer la tendreté de muscles les uns par rapport aux autres uniquement sur la base de ce critère.

Malgré tout, le dosage du collagène est une méthode de mesure qui peut s'avérer intéressante pour caractériser un ou plusieurs produits sur leur tendreté basale, ou expliquer, en association avec d'autres critères, des différences de tendreté observées entre groupes d'animaux. Bien que longue et, de fait, coûteuse, elle peut se justifier dans ce genre de contexte expérimental et exploratoire ; C'est d'ailleurs dans ces conditions qu'elle est aujourd'hui mise en œuvre dans l'essentiel des travaux.

5.2 Mesures sur les myofibrilles

Les méthodes impliquant des mesures sur les myofibrilles sont caractéristiques des études européennes, et plus particulièrement françaises (INRA). Les récents travaux étrangers consultés ne font pas ou peu état de l'utilisation de telles méthodes pour mesurer la tendreté de la viande, car certainement jugées trop expérimentales dans le contexte actuel.

Si la tendreté de la viande dépend des propriétés du muscle à l'abattage, elle est aussi fortement dépendante de la phase de maturation. C'est un processus multifactoriel très complexe affectant principalement la structure myofibrillaire et dépendant de plusieurs facteurs *ante* et *post-mortem*. Au delà de l'impact majoritaire des enzymes (voir ci après), cette phase de maturation est conditionnée par des facteurs physico-chimiques (concentration en calcium du muscle, pression osmotique, température, processus de peroxydation...) liés aux propriétés contractiles et métaboliques des fibres. OUALI (1992) a par exemple démontré que la maturation est plus rapide dans les muscles rapides glycolytiques que dans les muscles oxydatifs. D'où l'intérêt de connaître la proportion de chaque type de fibre, ainsi que leur taille, et de voir dans quelle mesure ces indications permettent de prédire la tendreté finale d'un muscle.

5.2.1 Typage des fibres

5.2.1.1 Principe de mesure

Les fibres musculaires, qui occupent la majorité du volume du muscle (environ 85%), sont classées sur la base de leurs propriétés contractiles (vitesse de contraction lente ou rapide) et métaboliques (métabolisme glycolytique, qui utilise principalement les glucides comme source d'énergie, et métabolisme oxydatif qui utilise préférentiellement les acides gras). Dans le muscle de bovin adulte, on distingue ainsi 3 types de fibres présentes en proportions variables selon les muscles de la carcasse (PICARD et al, 2003) :

- les lentes oxydatives (SO), dites isoformes de myosine I (β -rouge)
- les rapides oxydo-glycolytiques (FOG), dites isoformes de myosine IIa (α -rouge)
- et les rapides glycolytiques (FG), dites isoformes de myosine IIX (α -blanche).

Le typage des fibres est réalisé en dosant les molécules caractéristiques des propriétés contractiles et métaboliques des muscles, et/ou en dosant directement les isoformes de myosine.

5.2.1.1.1 Dosage de l'ATPase myofibrillaire

Le dosage de l'ATPase myofibrillaire donne une indication sur la vitesse de contraction des fibres. Elle est mesurée selon des méthodes histo-chimiques décrites par GUTH et SAMAHA (1972), et plus récemment par OUALI et VALIN (1981). L'activité ATPasique est exprimée en μ équivalents de KOH/min/mg de protéines myofibrillaires.

5.2.1.1.2 Dosage des diverses enzymes caractéristiques du métabolisme

L'activité de plusieurs enzymes donne une indication sur le type métabolique. Celles qui sont le plus fréquemment dosées sont :

- la **lactate déhydrogénase (LDH)**, qui caractérise le métabolisme glycolytique, est dosée par la méthode spectrophotométrique décrite par ANSAY (1974).

- **l'isocitrate déshydrogénase (ICDH)**, qui caractérise le métabolisme oxydatif, est dosée par la méthode spectrophotométrique décrite par BRIAND et al (1981).

D'autres enzymes sont parfois dosées en supplément des 2 précédentes, notamment celles donnant des indications sur le métabolisme oxydatif comme la citrate synthétase (CS) intervenant dans le cycle de Krebs, la succinate déshydrogénase, le cytochrome-c oxydase (COX) intervenant dans la chaîne respiratoire, ou la β -hydroxyacyl-COA déshydrogénase (HAD) intervenant dans l'oxydation des acides gras. Ces enzymes peuvent être dosées par les méthodes décrites par SRERE (1969) et PEARSE (1968), et plus récemment GONDRET et al (2004) et CASSAR-MALEK et al (2004).

Toutes ces enzymes sont exprimées en μ mole de substrat utilisé ou de produit formé par seconde (ou par minute) et par gramme de muscle frais.

5.2.1.1.3 Dosage des isoformes de myosine

La teneur en Isoforme de myosine I est dosée par la technique ELISA¹⁶ développée par PICARD et al (1994). La quantification des 3 isoformes simultanément peut être réalisée soit par analyse densitométrique après séparation par électrophorèse monodimensionnelle décrite par PICARD et al (1999), soit par analyse d'image (observation sur 2 zones du muscle d'une centaine de fibres). La composition du muscle en différentes fibres est donnée par le nombre relatif et la surface relative occupée par chaque type de fibre. Les résultats sont exprimés en pourcentage.

5.2.1.2 **Performances de mesure**

Il est aujourd'hui reconnu que le type de fibre a un impact sur la tendreté finale de la viande. Cependant, les résultats des travaux menés sur la liaison entre type de fibre, métabolisme, et tendreté sont contradictoires. D'après certaines études (ZAMORA et al, 1995 ; 1996 ; OZAWA, 2000 ; RENAND et al, 2001), les muscles dont le type est plus oxydatif seraient plus durs alors que DRANSFIELD et al (2003) et PICARD et al (2006) observent l'inverse. Généralement, les corrélations observées entre les enzymes du métabolisme et la tendreté sont nulles à faibles (**Tableau 19**), les r acceptables étant obtenus uniquement pour certaines catégories d'animaux et en combinant les résultats acquis sur différents muscles. C'est notamment le cas des résultats de ZAMORA et al (1995 ; 1996) selon lesquels l'activité de la citrate synthétase expliquerait jusqu'à 50% des variations de dureté finale (force max de compression à 20%). Cela dit, ces observations ont été faites sur un effectif animal restreint. Les pourcentages de fibres reflètent les mêmes contradictions.

¹⁶ Enzyme Linked ImmunoSorbent Assay : technique immunochimique

Méthodes	Paramètre	% par type de fibre	Activités enzymatiques	Caractéristiques des études	Références
Analyse sensorielle	note de tendreté	SO : - 0,05 à 0,10	LDH : - 0,03 à 0,16 ICDH : - 0,02 à - 0,22	n = 106 LT ; 2,7 et 21j	RENAND et al, 2001
		FOG : - 0,28 SO : 0,23 à 0,25	non concluant	n = 168 LT, ST et TB ; 14j	DRANSFIELD et al, 2003 ; PICARD et al, 2006
		-	LDH : - 0,08 à - 0,20 ICDH : 0,11 à 0,50 CS : 0,05 à 0,13 COX : 0,08 à 0,37	n = 25, puis 14 extrêmes LT ; 14j	BERNARD et al, 2007
Forces de cisaillement par WB	force max	FOG : 0,16 SO : - 0,40 FG : 0,25	ICDH : - 0,24 à - 0,37	n = 168 LT, ST et TB ; 14j	DRANSFIELD et al, 2003 ; PICARD et al, 2006
Forces de compression	force à 20%	-	LDH : - 0,43 à 0,39 CS : 0,22 à 0,73 ATPase : 0,04 à 0,33	n = 11 LT et LL ; 1 à 14j	ZAMORA et al, 1995 ; 1996
		SO : 0,19 à 0,22	LDH : - 0,03 à - 0,30 ICDH : 0,14 à 0,18	n = 106 LT ; 2,7 et 21j	RENAND et al, 2001

Tableau 19 : Exemples de corrélation r entre les critères de typage des fibres et d'autres méthodes de mesure de la tendreté

LT = longissimus thoracis ; ST = semitendineux ; TB = triceps brachii ; LL = longissimus lumborum
LDH = lactate déshydrogénase ; ICDH = isocitrate déshydrogénase ; CS = citrate synthétase ; COX = cytochrome-c oxydase
FOG = fibres rapides oxydo-glycolytiques ; SO = fibres lentes oxydatives ; FG = fibres rapides glycolytiques

5.2.2 Mesure de la taille des fibres

5.2.2.1 Principe de mesure

5.2.2.1.1 Mesure de la surface des fibres

La taille des fibres musculaires a mécaniquement un impact sur leur résistance : plus une fibre est épaisse, plus elle est difficile à rompre, ce qui pourrait se ressentir au niveau de la tendreté du muscle. La mesure de la surface de la section transversale des myofibrilles peut être réalisée simultanément au dosage des différentes isoformes de myosine par analyse d'image (observation sur 2 zones du muscle d'une centaine de fibres). On peut calculer la surface moyenne de l'ensemble des fibres, ou pour chaque type de fibre, ces aires s'exprimant en μm^2 .

5.2.2.1.2 Mesure de la longueur des fibres musculaires

Il est connu depuis longtemps, suite à des observations *post-mortem*, que les myofibrilles se raccourcissent au fur et à mesure de la maturation du fait de leur fragmentation par les protéases, et que ce processus commence relativement précocement. Ainsi, la longueur des

fibres musculaires peut également être un indicateur de la tendreté ou du degré de maturation d'un muscle. La taille des myofibrilles peut être mesurée selon 2 méthodes :

- **La longueur moyenne des myofibrilles**

Elle peut être estimée par comptage, au microscope à contraste de phase, du nombre de sarcomères par myofibrille sur 100 myofibrilles en suspension (MOLLER et al, 1973).

- **La mesure de l'indice de fragmentation myofibrillaire (IFM)**

Elle consiste à mesurer l'absorbance à 400 nm d'un extrait de myofibrilles en suspension. La quantité de lumière absorbée est proportionnelle à la taille relative des myofibrilles et des morceaux de fibres en suspension. L'IFM est obtenu en multipliant la valeur d'absorbance par 200 (OLSON et al, 1976).

5.2.2 Performances de mesure

5.2.2.1 Mesure de la surface des fibres

A l'échelle de la fibre, les animaux aux fibres les plus larges peuvent donner une viande de moindre tendreté (TUMA et al, 1962 ; LEWIS et al, 1977). Pourtant, lorsque le facteur âge des animaux est écarté (les fibres grossissant avec l'âge), il n'y a pas ou peu de relation entre la surface des fibres et la tendreté. Plusieurs études, considérant un ou plusieurs muscles différents, font état de coefficients de corrélation faibles ou non significatifs (GEESINK et al, 1995 ; OZAWA et al, 2000 ; Etude Qualvigène ; DRANSFIELD et al, 2003 ; PICARD et al, 2006 ; OURY et al, 2006), et ce sur de grands effectifs (**Tableau 20**). Lorsqu'une relation est observée, les r se situent en moyenne autour de - 0,30 (SEIDEMAN et al, 1987 ; RENAND et al, 2001), la surface des fibres permettant ainsi d'expliquer au maximum 15% des variations de tendreté observées, ce qui est insuffisant.

Méthodes	Paramètre	Surface moyenne	Surface par type de fibre	Nombre de fibre	Caractéristiques des études	Références
Analyse sensorielle	note de tendreté	- 0,08 à - 0,18	-	0,07 à 0,18	n = 2370 LD ; 7j	Etude Qualvigène
		- 0,32 à - 0,39	-	-	n = 106 LT ; 2,7 et 21j	RENAND et al, 2001
		- 0,17 à - 0,19	FOG : - 0,15 SO : - 0,15 FG : - 0,19 à - 0,23	-	n = 168 LT, ST et TB ; 14j	DRANSFIELD et al, 2003 ; PICARD et al, 2006
		- 0,03 à - 0,18	-	-	n = 25, puis 14 extrêmes LT ; 14j	BERNARD et al, 2007
Forces de cisaillement par WB	force max	0,07 à 0,15	-	- 0,08 à - 0,13	n = 2370 LD ; 7j	Etude Qualvigène
		0,21 à 0,28	FOG : 0,12 SO : 0,16 FG : 0,22 à 0,25	-	n = 168 LT, ST et TB ; 14j	DRANSFIELD et al, 2003 ; PICARD et al, 2006
Forces de compression	force à 20%	0,16 à 0,31	-	-	n = 106 LT ; 2,7 et 21j	RENAND et al, 2001

Tableau 20 : Exemples de corrélation r entre la surface et le nombre des fibres et d'autres méthodes de mesure de la tendreté

LD = long dorsal ; LT = longissimus thoracis ; ST = semi tendineux ; TB = triceps brachii
FOG = fibres rapides oxydo-glycolytiques ; SO = fibres lentes oxydatives ; FG = fibres rapides glycolytiques

5.2.2.2 Mesure de la longueur des fibres musculaires

Aujourd'hui, les auteurs qui souhaitent caractériser les fibres musculaires utilisent majoritairement la mesure de la surface et du nombre de fibres. La mesure de la longueur des fibres est moins utilisée, et lorsqu'elle l'est, c'est la mesure de l'indice de fragmentation myofibrillaire qui est préféré car beaucoup moins fastidieux. Des études anciennes ont mis en évidence des corrélations significatives entre l'IFM et la tendreté mesurée par analyse sensorielle et par forces de cisaillement (OLSON et PARRISH, 1977 ; PARRISH et al, 1979 ; CALKINS et al, 1979 ; CALKINS et DAVIS, 1980 ; HAWKINS et al, 1987) (**Tableau 21**). Bien que ces observations aient été faites sur des effectifs limités et uniquement pour certaines catégories d'animaux (notamment les carcasses les moins bien classées selon la grille USDA), ces auteurs ont conclu que l'IFM était un bon indicateur de la tendreté de la viande cuite, même meilleur que les autres caractéristiques musculaires mesurées (notamment le persillé, le taux de conjonctif ou la longueur des sarcomères) (CULLER et al, 1978). Ainsi, certains chercheurs utilisent parfois cette méthode comme un indicateur de tendreté complémentaire à la force de cisaillement. Cela dit, les récentes études consultées ne montrent pas les mêmes potentialités pour cette méthode (DUFÉY, 2008) puisque l'IFM reste inchangé alors que les méthodes traditionnelles détectent des différences de tendreté entre les échantillons.

Méthodes	Paramètre	IFM	Caractéristiques des études	Références
Analyse sensorielle	note de tendreté	- 0,60 à - 0,75	n = 40 LD ; 10 et 14j	CALKINS et DAVIS, 1980
		- 0,60 à - 0,69	n = 80 LD ; np	CALKINS et al, 1979
Forces de cisaillement par WB	force max	0,36 à 0,73	n = 40 LD ; 10 et 14j	CALKINS et DAVIS, 1980
		0,48 à 0,52	n = 77 LD ; 1, 2 et 10j	HAWKINS et al, 1987
		0,60 à 0,73	n = 80 LD ; np	CALKINS et al, 1979

Tableau 21 : Exemples de corrélation r entre l'indice de fragmentation myofibrillaire et d'autres méthodes de mesure de la tendreté

LD = long dorsal

5.2.3 Mesure de la longueur des sarcomères

5.2.3.1 Principe de mesure

En plus des propriétés du muscle et de son degré de maturation, l'état de contraction des fibres musculaires joue un rôle important sur le comportement mécanique de la viande et donc sa tendreté. Plus un muscle est contracté, plus il est résistant. Ainsi, si le muscle entre en *rigor-mortis* dans un état trop contracté tel que celui obtenu dans le cas de la contracture au froid (cold-shortening), sa résistance sera très élevée, et la maturation ultérieure, quelle que soit sa durée, ne pourra pas attendrir le muscle.

La mesure de l'état de contraction d'un muscle se fait *via* la détermination de la longueur moyenne des sarcomères. Le sarcomère est l'unité contractile du muscle. Il est constitué de filaments d'actine (fins) qui glissent sur les filaments de myosine (épais) en présence d'énergie (ATP). La contraction musculaire provoque ainsi une diminution de la longueur des sarcomères tandis que le relâchement l'augmente.

La longueur des sarcomères peut être mesurée selon 2 méthodes :

- la méthode traditionnelle, encore utilisée bien que longue et fastidieuse (TORRESCANO et al, 2003), est réalisée au microscope à immersion à contraste de phase équipé d'un micromètre. Elle consiste à mesurer la longueur de 10 sarcomères consécutifs sur 10 à 25 fragments de fibres en suspension choisies au hasard parmi l'extrait myofibrillaire (HOWARD et JUDGE, 1968).
- une méthode plus globale et plus rapide repose sur la diffraction d'un laser sur le réseau constitué par la succession régulière des stries Z¹⁷ du muscle, puis la mesure manuelle de la distance entre les arcs de diffraction obtenus sur un grand nombre d'échantillons. Ce principe, découvert par VOYLE (1971), a été successivement amélioré (CROSS et al, 1981 ; WEBER et al, 1988 ; GIF et al, 1995) de façon à diminuer le temps de mesure et les biais dus au manipulateur.

5.2.3.2 Performances de mesure

Le rôle de la longueur des sarcomères sur la tendreté est connu depuis longtemps (MARSH et LEET, 1966) et son impact sur la mesure de la résistance mécanique myofibrillaire (indice de maturation) a été mis en évidence par plusieurs auteurs (LEPETIT, 1989 ; LEPETIT et BUFFIERE, 1993). LUCKETT et al (1975) ont observé que la longueur des sarcomères expliquait 12% des variations de tendreté de longs dorsaux maturés 10 jours, mais cette relation n'était obtenue que pour la partie médiane du muscle. Sur 14 muscles différents, TORRESCANO et al (2003) n'ont trouvé qu'une relation de 1% avec la force de cisaillement selon Warner-Bratler. Il en est de même pour de nombreux auteurs ; DUFEY (2008), par exemple, observe des différences de tendreté par analyse sensorielle et mesure des forces de cisaillement alors que la longueur des sarcomères demeure inchangée. En fait, la longueur des sarcomères ne peut pas permettre de mesurer la tendreté ou la maturation de la viande. Elle donne uniquement une indication sur son degré de contracture, qui va jouer sur sa tendreté de façon certaine uniquement en cas de contracture au froid.

5.2.4 Perspectives

Les mesures sur les myofibrilles ne sont pas des méthodes permettant de prédire à elles seules la tendreté de la viande. En fait, elles sont indicatrices non pas de la tendreté, mais de la maturation de la viande. C'est en ce sens qu'elles peuvent parfois, mais pas nécessairement, aider à identifier ou expliquer certaines différences de tendreté. Ces méthodes peuvent être utiles uniquement dans un contexte expérimental car elles sont exclusivement de laboratoire et longues à mettre en œuvre. En effet, elles nécessitent toutes un prélèvement de muscle et une préparation spécifique et délicate de ce dernier préalablement à la mesure (broyage et extraction des myofibrilles par exemple). Les méthodes basées intégralement sur la chimie (électrophorèse par exemple) sont évidemment plus longues que celles mettant en œuvre des techniques plus modernes (analyse d'image par exemple). De fait, leur précision est variable et dépendante du manipulateur.

Le typage des fibres et la mesure de leur taille peut être utile pour définir un potentiel de maturation. Il faut néanmoins rester prudent, et aucune conclusion n'est à ce jour généralisable, étant donné l'importante variabilité animale, musculaire, et même individuelle des caractéristiques bio-chimiques mesurées. La longueur des sarcomères, quant à elle, est adaptée pour identifier les problèmes de contracture au froid.

¹⁷ Le sarcomère correspond à l'ensemble de la structure myofibrillaire (filaments d'actine et de myosine) comprise entre 2 stries Z successives.

5.3 Dosage des enzymes impliquées dans la maturation

5.3.1 La maturation : un processus principalement enzymatique

La maturation de la viande est un processus principalement enzymatique (OUALI, 1992). Particulièrement complexe, il résulte de l'action des protéases endogènes sur les protéines contractiles et les constituants du cytosquelette (HUFF-LONERGAN et LONERGAN, 1999). Au cours de l'attendrissage de la viande, 3 structures majeures du cytosquelette sont dégradées (TAYLOR et al, 1995) : les filaments intermédiaires reliant les stries Z, les protéines costamériques reliant la strie Z et la ligne M au sarcolème, et les filaments élastiques d'une protéine, la titine (**Figure 24**).

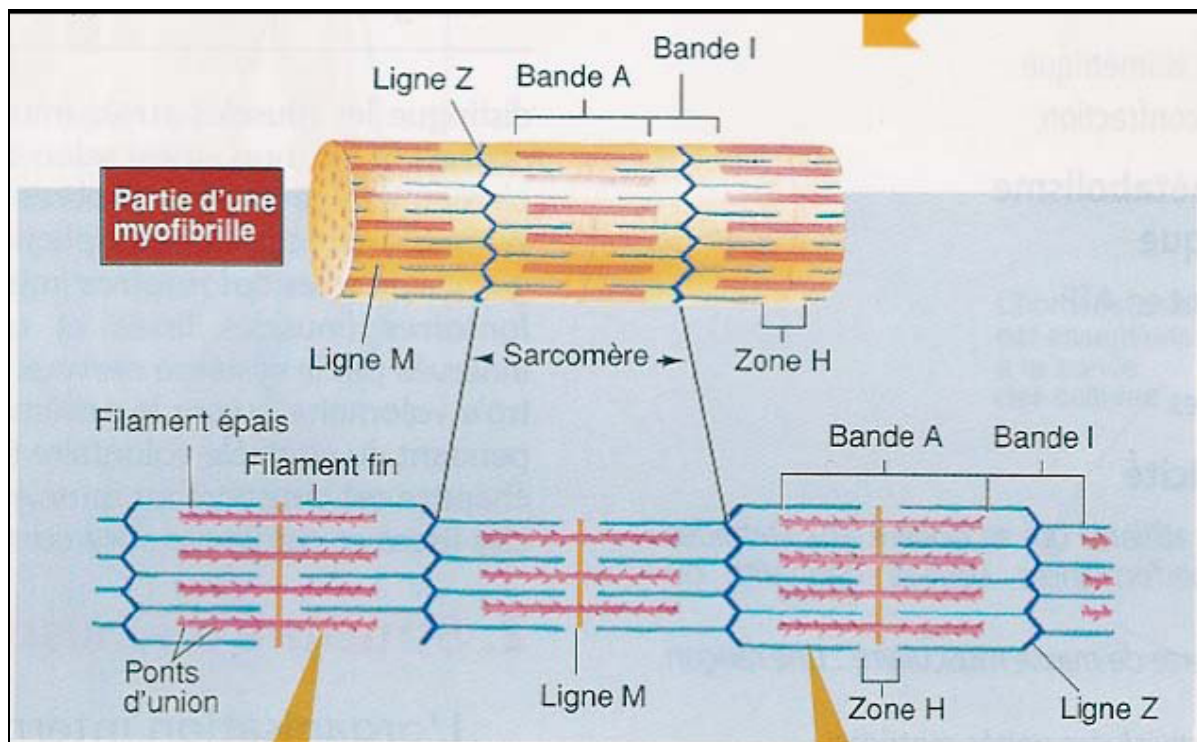


Figure 24 : Organisation des sarcomères

Pour qu'un système protéolytique soit considéré comme impliqué dans les évolutions post-mortem de la viande, il doit remplir 2 conditions (GOLL et al, 1983) : premièrement, les protéases doivent pouvoir accéder au substrat, et deuxièmement elles doivent être capables de reproduire les processus de protéolyse observés après le stockage post-mortem de la viande.

Plusieurs systèmes protéolytiques ont été identifiés dans le muscle pour leur possible rôle dans les processus de maturation. Parmi les plus investigués il y a :

- les cathepsines, système découvert par DE DUVE et al (1955)
- les calpaïnes, peptidases calcium dépendantes mises en évidence par GUROFF (1964)
- le protéasome découvert par WILK et ORLOWSKI (1980)

5.3.2 Principe de la quantification des enzymes

Traditionnellement, la quantification des enzymes protéolytiques et de leurs inhibiteurs est réalisée par mesure de leur activité biologique après fractionnement partiel ou, plus rarement, dans des extraits bruts de muscle cru. Quelle que soit la molécule dosée, ces techniques sont souvent compliquées, imprécises, et nécessitent le plus fréquemment un fractionnement préalable de l'extrait musculaire. Elles ne sont donc pas applicables pour le dosage de systèmes protéolytiques impliquant un fractionnement trop complexe. De plus, ces méthodes ne permettent d'analyser qu'un nombre limité d'échantillons en parallèle (3 à 4 au maximum).

C'est pourquoi certains scientifiques (SENTANDREU et al, 2002b ; AUBRY et al, 2006), ont envisagé l'utilisation de nouvelles techniques plus spécifiques, plus rapides, plus précises, adaptées à l'analyse d'un grand nombre d'échantillons et n'excluant aucun système protéolytique. Il s'agit des outils immunochimiques. Parmi eux, les 2 types de techniques les plus courantes sont :

- **L'immunodiffusion radiale (Mancini)**

Le principe de cette méthode repose sur la capacité de l'anticorps à former un complexe insoluble avec l'antigène cible. L'anticorps dirigé contre la protéine native est incorporé dans une gélose. L'extrait tissulaire est déposé dans cette gélose percée de trous et la migration de l'antigène dans la gélose avant précipitation par l'anticorps est proportionnelle à la concentration de ce dernier. Le diamètre du cercle de précipitation permet, par référence à une gamme étalon, de déterminer la concentration de l'antigène dans l'extrait.

Cette technique est peu coûteuse et facile à mettre en œuvre, ce qui permet l'analyse d'un grand nombre d'échantillons. Par contre, du fait de sa sensibilité moyenne, cette technique n'est adaptée que pour détecter des concentrations d'antigène supérieures ou égales à 10 µg/ml d'extraits tissulaires.

- **La technique ELISA (Enzyme Linked Immunosorbent Assay)**

Pour la quantification d'antigène en milieux complexes, 2 types de techniques ELISA sont communément utilisées :

- ELISA direct : l'extrait brut de tissu dilué est absorbé dans les puits de la plaque de microtitration. L'anticorps spécifique de l'antigène recherché est ajouté. Il se couple à l'antigène et le complexe ainsi formé est révélé grâce à un anticorps dirigé contre une séquence peptidique propre à cette protéine. Cet antipeptide est marqué de façon covalente par une enzyme (peroxydase ou phosphatase) et donne, en présence du substrat spécifique de cette enzyme, une coloration directement proportionnelle à la quantité d'anticorps fixé, et donc d'antigène présente.
- ELISA sandwich : dans ce cas, un premier anticorps hautement spécifique de l'antigène recherché est absorbé dans le puits de la plaque de microtitration. L'extrait tissulaire est ajouté et l'antigène qu'il contient est capturé par l'anticorps. Un second anticorps dirigé contre l'antigène est ajouté et il est révélé par marquage comme précédemment. Cette technique est plus spécifique que l'ELISA direct, et demande une grande rigueur et une formation préalable pour sa mise en pratique.

Les techniques par dosage ELISA sont sensibles et adaptées pour détecter des concentrations d'antigène de l'ordre du ng/ml, voire moins. Leur inconvénient majeur est que leur succès dépend principalement de la qualité des anticorps dirigés contre l'antigène à quantifier.

5.3.3 Plusieurs enzymes identifiées dont l'implication reste encore mal connue

5.3.3.1 Les cathepsines

Les cathepsines, peptidases lysosomiales, représentent le premier système enzymatique qui a été considéré dans le cadre des études sur l'attendrissage des viandes. La cathepsine L serait celle ayant la plus grande capacité hydrolytique vis-à-vis des protéines cibles, c'est pourquoi on lui attribue souvent un rôle important dans les processus d'attendrissage des viandes (SANTENDREUX et al, 2002). Pourtant, l'implication des cathepsines dans la maturation est discutée car les dégradations des protéines myofibrillaires par les cathepsines après incubation sont différentes de celles observées pendant la maturation de la viande (LUCIANO et al, 2007). De plus, il est incertain que les cathepsines soient libérées par les lysosomes dans les muscles après abattage.

5.3.3.2 Les calpaïnes et leur inhibiteur

Les calpaïnes ont retenu beaucoup plus d'attention que les cathepsines principalement en raison de leur capacité à altérer la densité de la strie Z. Cette modification est souvent observée post-mortem, bien qu'elle ne soit pas corrélée à la tendreté.

Les calpaïnes sont des cystéines protéases calcium-dépendantes. A ce jour, ont été identifiés :

- au moins 3 protéases : la μ -calpaïne, la m-calpaïne et la calpaïne p94 ou calpaïne 3, spécifique du muscle squelettique,
- et 1 inhibiteur des μ et m-calpaïnes : la calpastatine.

L'importance du système calpaïnes/calpastatine dans l'attendrissage de la viande a été mise en évidence dans de nombreuses études. Cela dit, on observe d'importantes différences sur les résultats obtenus. Ces différences peuvent s'expliquer en premier lieu par la mesure du paramètre en lui-même puisque le moment, la méthode et le paramètre de mesure influent énormément sur la valeur obtenue. Pour exemple, ZAMORA et al (1995 ; 1996) ont mesuré divers paramètres relatifs aux calpaïnes et à la calpastatine directement après l'abattage, 24 heures post-mortem, puis en fin de maturation (14 jours) : activité des enzymes, vitesse de décroissance de ces activités, et amplitude de décroissance. Les résultats obtenus montrent des corrélations significatives avec la dureté de la viande dans certains cas et une absence totale de relation dans d'autres cas.

D'autre part, les différences de résultat entre les études s'expliquent par l'importante variabilité individuelle observée au niveau des quantités d'enzymes présentes dans le muscle, comme la plupart des paramètres biochimiques. Ainsi, certains auteurs font état de bonnes corrélations ($r = - 0,53$, $r = - 0,46$ et $r = 0,65$) entre la résistance ultime du muscle et respectivement le taux initial de μ -calpaïne, de m-calpaïne, et de calpastatine dans le muscle (ZAMORA et al, 1995 ; 1996) alors que d'autres n'observent que de faibles liaisons ($r = 0,29$ et $0,28$) et uniquement pour un muscle et un seul type animal (PICARD et al, 2006). Enfin, dans d'autres cas, aucune différence de tendreté observée entre des groupes d'animaux distincts ne se retrouve au niveau des caractéristiques enzymatiques des muscles (*rectus abdominis* à 14 jours de maturation), les effectifs animaux étant pourtant conséquents (OURY et al, 2006).

Ainsi, d'une manière générale, il est admis que le système calpaïnes/calpastatine influe sur la maturation de telle sorte que : plus le muscle est riche en calpaïnes, plus il est tendre après maturation, et inversement plus le muscle est riche en calpastatine, plus il est dur après maturation, la vitesse de maturation étant fortement liée à la vitesse de décroissance

de la calpastatine. L'implication de ces enzymes a été prouvée par l'étude de GEESINK et KOOHMARAIE (1999) qui ont observé sur des myofibrilles incubées avec des calpaïnes des processus protéolytiques similaires à ceux observés dans le muscle post-mortem. De plus, l'injection de calcium, activateur des calpaïnes, accélère la maturation tandis qu'elle est inhibée en présence de calpastatine (WHEELER et al, 1992). Cela dit, selon KOOHMARAIE et GEESINK (2006), il semblerait que seule la μ -calpaïne remplisse l'ensemble des caractéristiques confirmant son implication dans les processus de maturation.

5.3.3.3 Les sérines peptidases et leurs inhibiteurs

D'avantage que les protéases elles-mêmes, il semble qu'un rôle prépondérant soit attribué aux inhibiteurs de protéases dans les phénomènes de protéolyse intervenant au cours de la maturation (KOOHMARAIE, 1994). En effet, il a été établi pour certains de ces inhibiteurs que leur activité est fortement corrélée à la tendreté des viandes (WHIPPLE et al, 1990).

Au-delà de la calpastatine, que nous avons vu précédemment, certaines équipes de recherche se sont intéressées aux serpines, inhibiteurs des sérines protéases qui comptent parmi les enzymes agissant sur la dégradation du muscle (GOLL et al, 1999 ; BALCERZAK et al, 2001). Les résultats sur ces molécules sont mitigés, mais des chercheurs de l'INRA (OUALI et al, 2005) ont récemment montré que les serpines seraient un bon marqueur biologique de la tendreté de la viande bovine. En effet, dans un modèle de prédiction de la tendreté incluant 6 variables de type biochimiques, la concentration en serpines est ressortie comme le facteur le plus explicatif de la variabilité observée sur des longs dorsaux à 6 jours post-mortem. Pris individuellement, ce facteur reste insuffisant et trop variable selon les conditions expérimentales (animaux, muscles...). Cependant, ce travail a apporté pour la première fois une preuve concrète de l'intervention de protéases autres que les calpaïnes dans le processus de maturation.

5.3.3.4 Le protéasome

Les travaux concernant le protéasome, ou complexe multicatalytique de protéinases (MCP), et en particulier la sous-unité 20S, sont plus récents. Certains résultats montrent que ce dernier pourrait contribuer à l'attendrissage des viandes en cours de conservation (DUTAUD, 1998 ; SENTANDREU et al, 2002a ; THOMAS et al, 2004 ; DUTAUD et al, 2006). Cependant, les théories entre les différents scientifiques sont contradictoires ; certains estiment que ce postulat est à exclure, les myofibrilles étant de mauvais substrats pour ce système de protéases (KOOHMARAIE, 1992) et les dégradations des protéines myofibrillaires observées avec le MCP étant différentes de celles observées dans le muscle post-mortem (TAYLOR et al, 1995).

5.3.3.5 Les caspases

Récemment, plusieurs auteurs (OUALI et al, 2005 ; HERRERA-MENDEZ et al, 2006 ; LUCIANO et al, 2007) ont évoqué l'implication d'une autre famille d'enzyme dans la maturation : les caspases. Il s'agit de cystéines peptidases qui interviennent dans les processus apoptotiques, c'est-à-dire la mort programmée des cellules (GREEN, 2005). On distingue des caspases initiateuses (8 et 10) de l'apoptose, et des caspases effectrices (3, 6 et 7) (FUENTES-PRIOR et SALVESEN, 2004). L'hypothèse formulée est que les cellules du muscle n'auraient d'autre choix que d'initier leur apoptose en réponse aux conditions nocives induites par l'abattage (privation d'oxygène et de nutriments). Cette théorie est née des similitudes observées entre les processus d'apoptose et ceux de la maturation, tels que l'inversion de polarité des membranes (MARTIN et al, 1995). Ainsi, le calcium, initiateur des

calpaïnes, est également un déclencheur crucial de l'apoptose (HERRERA-MENDEZ et al, 2006). Cette théorie permet d'expliquer l'essentiel des dégradations observées lors de l'attendrissage des viandes. Dans ce cas, les caspases joueraient un rôle prépondérant dans la maturation.

5.3.4 Perspectives

Il est reconnu de façon unanime que l'attendrissage de la viande pendant la maturation est le résultat de processus enzymatiques. Deux courants de pensée majoritaires se dégagent concernant les systèmes protéolytiques en cause : certains scientifiques pensent que les calpaïnes sont les seules protéases responsables de l'attendrissage, tandis que d'autres proposent un processus multi-enzymatique impliquant conjointement les calpaïnes et d'autres enzymes dont les fonctions sont à ce jour moins connues, tels que le protéasome ou les caspases. De plus, certains résultats indiquent que le taux d'inhibiteurs spécifiques de ces systèmes, la calpastatine notamment, constituerait un meilleur indicateur de la maturation que le taux des enzymes cibles elles-mêmes (OUALI et TALMANT, 1990).

Ainsi, si la quantification des enzymes protéolytiques endogènes et des facteurs protéiques (inhibiteurs) contrôlant leur activité peut dans certains cas être un moyen d'expliquer partiellement la variabilité biologique de la tendreté de la viande, elle ne représente en aucun cas une méthode de prédiction de la tendreté, ni même de l'état de maturation de la viande. En effet, il existe une trop grande variabilité des paramètres enzymatiques pour pouvoir les relier à un niveau de tendreté ou de maturation de façon généralisable. Au-delà de la variabilité naturelle, ce constat s'explique notamment par notre méconnaissance des processus d'attendrissage dans leur ensemble. Or, tous les événements interagissent étroitement entre eux et c'est le résultat de ces interactions qui conditionne les propriétés technologiques, sensorielles, voire nutritionnelles, de la viande. En l'état actuel, les méthodes de quantification des enzymes et de leurs inhibiteurs peuvent être intéressantes dans un contexte explicatif et en particulier pour approfondir la connaissance des mécanismes d'attendrissage de la viande. La perspective la plus opérationnelle, et pourtant pas envisageable à court terme, est représentée par les méthodes d'étude dites globales telles que la génomique.

5.4 Génétique et génomique

5.4.1 De la génétique à la génomique, de quoi parle-t-on ?

Le patrimoine génétique à lui seul ne suffit pas au déterminisme des caractères. C'est l'expression des gènes, qui est spécifique des tissus et dépendante des conditions environnementales, qui détermine *in fine* le phénotype. L'objectif de la génomique est d'établir le lien entre ces 2 domaines, à savoir la génétique et la physiologie. Le **Tableau 22** définit les termes spécifiques de génomique.

La science des « omiques » est née des progrès analytiques, et notamment des innovations récentes telles que les « puces à ADN ». Elle génère de très nombreuses données en raison du caractère automatisé et exhaustif de ces techniques. Elle permet une vision intégrée, des gènes au phénotype, en passant par les transcrits, les protéines, les métabolites... c'est pourquoi on parle de biologie intégrative.

Terme	Définition
Génétique	Science de l'hérédité, c'est-à-dire qui s'intéresse aux caractères transmissibles de génération en génération.
Génome	Ensemble des gènes portés par les chromosomes.
Génomique	Science qui étudie l'ensemble des gènes.
Génomique structurale	Anciennement appelée génétique moléculaire, il s'agit de la cartographie physique des génomes et de la structure des gènes (localisation des gènes, nombre d'exons, d'introns, polymorphismes...).
Génomique fonctionnelle	Il s'agit de l'étude de la fonction des gènes.
Génomique expressionnelle	Il s'agit de l'étude des mécanismes d'expression des gènes. Ce domaine connaît un essor considérable grâce aux nouvelles techniques d'études, notamment les « puces à ADN ».
Transcriptome	Etude simultanée de la quasi-totalité des transcrits (ARN messager) d'un tissu à un instant donné. Cette étude est réalisée par séquençage du génome à haut débit, c'est-à-dire avec des techniques de biologie moléculaire automatisées.
Protéome	Etude simultanée de l'ensemble des protéines.

Tableau 22 : Définitions des termes de génomiques

5.4.2 Intérêts de la génomique pour la filière viande

L'application de la génomique est de comprendre la diversité naturelle des mécanismes biologiques à l'origine de la diversité naturelle des phénotypes (HOCQUETTE et al, 2003). Ainsi, quel que soit le domaine, la principale perspective des avancées en génomique est certainement la création d'outils moléculaires qui permettront d'avoir une approche globale des fonctions physiologiques par la signature de l'expression des gènes. Autrement dit, le développement de « puces à ADN » ou de « protéines-chips » ciblée sur les caractères d'intérêt permettront d'avoir une « empreinte génomique » d'un tissu donné, d'un individu donné, à un instant T. Sur le plan technique, ces outils pourraient être développés pour une utilisation automatisée en routine. Cela dit, une standardisation des méthodes d'étude du transcriptome et du protéome serait obligatoire de façon à améliorer leur sensibilité et leur reproductibilité.

5.4.2.1 Etat des lieux des recherches

Il est clair que l'ensemble des qualités sensorielles et nutritionnelles de la viande, et la tendreté notamment, sont variables selon le potentiel génétique de l'animal, son mode d'élevage, ses conditions d'abattage ou les processus de maturation. Chez le bovin, la part de variabilité génétique est de l'ordre de 20-25% pour les tests de dégustation et la mesure des forces de cisaillement (HOCQUETTE et al, 2003). Cette variabilité est considérée comme suffisante pour envisager la sélection d'animaux sur ces critères, mais elle est impossible à ce jour en raison de l'absence de mesures de routine facilement réalisables à faible coût et sur de grands effectifs.

C'est pourquoi de gros programmes de recherche se sont développés ces dernières années avec pour objectif de découvrir de nouveaux gènes polymorphes qui auraient un impact important sur la qualité de la viande bovine de par la présence de leurs polymorphismes. C'est dans ce cadre que s'inscrit notamment le programme QUALVIGENE dont certains résultats ont été discutés précédemment, ainsi que plusieurs études de l'INRA également citées. Ces travaux sont possibles grâce au financement de l'appel d'offre AGENAE / GENANIMAL en partenariat avec la filière bovine française (représentée par APISGENE).

Parmi eux, les travaux de BERNARD et al (2007) et de BOULEY et al (2004) ont consisté à réaliser des analyses de l'expression des gènes dans le muscle, respectivement sous forme de transcrits ou de protéines. Un gène dont le niveau d'expression est négativement corrélé avec la tendreté a été mis en évidence, la fonction biologique de la protéine codée par ce gène restant à préciser (BERNARD et al, 2007). Ce gène, nommé DNAJA1, a permis d'expliquer à lui seul jusqu'à 63% de la variabilité de la tendreté chez les 14 animaux extrêmes de l'étude, c'est-à-dire ceux produisant les viandes les plus dures ou les plus tendres. Le DNAJA1 code pour une protéine, appelée Hsp40, ayant une activité anti-apoptotique¹⁸. Or l'apoptose et ses conséquences seraient largement impliquées dans les processus de maturation de la viande (OUALI et al, 2005). La protéine Hsp40, associée à d'autres Hsp, pourrait ainsi ralentir le processus de mort cellulaire et donc la maturation de la viande, favorable à son attendrissage (HOCQUETTE et al, 2007a). De nouvelles analyses sont envisagées pour valider la relation entre l'expression de DNAJA1 et la tendreté de la viande sur un plus large effectif.

5.4.2.2 Développement de kit de marqueurs génétiques

« L'empreinte génomique » précédemment évoquée permet d'apprécier de façon indirecte, *via* les ARN messager ou les protéines, l'ensemble des caractéristiques musculaires que l'on souhaite identifier. En pratique, cela revient à construire une « puce à ADN » avec les gènes indicateurs d'un composant du muscle (par exemple les fibres, le collagène, les lipides, les enzymes...) dont la présence caractérise la tendreté de la viande.

Dans le domaine de la sécurité alimentaire, il existe déjà des outils moléculaires commercialisés pour la détection de la contamination des viandes. Dans le domaine de la traçabilité raciale ou individuelle des bovins, des kits de marqueurs génétiques (ADN) sont également disponibles.

Pour le critère tendreté, 3 gènes ont jusqu'à présent été découverts en Australie, au Canada et aux Etats-Unis comme présentant un polymorphisme en relation avec la tendreté (CAPN1, CAST et LOX). Ils font l'objet de brevets et différents programmes sont en cours en France, en Europe, et aux Etats-Unis, afin de vérifier la pertinence de ces marqueurs, et d'en rechercher de nouveaux (HOCQUETTE et al, 2007b). Le DNAJA1 découvert récemment par les équipes françaises fait également l'objet d'une demande de brevet.

¹⁸ L'apoptose correspond à un « suicide » cellulaire génétiquement très contrôlé. Il s'agit d'un phénomène de d'élimination sélective des cellules. Cette mort cellulaire programmée se déroule notamment juste après l'abattage.

Suite à la découverte de ces marqueurs de la tendreté, des kits de génotypage ont été développés à l'étranger, notamment par des chercheurs australiens et américains. Certains sont commercialisés, notamment ceux permettant de détecter certaines enzymes impliquées dans la maturation : allèle G du marqueur 316 de la μ -calpaïne (PAGE et al, 2002), allèle T du marqueur 4751 de la μ -calpaïne (WHITE et al, 2005) et allèle C du marqueur de la calpastatine (BARENDSE, 2002). Une étude américaine récente (SHACKELFORD et al, 2007) a testé la capacité de ces marqueurs à prédire la tendreté de la viande sur plus de 2000 carcasses dans 6 abattoirs de façon à couvrir la variabilité de l'ensemble de la population animale du pays (différences de types génétiques, systèmes de production, conditions d'abattage). Des différences de tendreté significatives (mesurées par forces de cisaillement selon Warner-Bratzler) ont été observées entre les différents génotypes identifiés (homozygotes « tendres »¹⁹, hétérozygotes et homozygotes « durs »). Les auteurs ont conclu que ces tests ADN étaient performants et pourraient constituer un élément de prédiction de la tendreté des carcasses. Ces résultats ont été obtenus sur la population animale américaine, ce qui ne permet pas de présager des performances de ces marqueurs sur la population de bovins français. Des études sont en cours dans cet objectif.

5.4.3 Perspectives

Le gros intérêt de l'approche par « empreinte génomique » est la possibilité de l'appliquer muscle par muscle, c'est-à-dire de prendre en compte le facteur muscle dont l'importance est majeure sur la tendreté et la maturation de la viande. Par contre, l'inconvénient de cette technique est que les études pour trouver des marqueurs sont longues et coûteuses, et que ces marqueurs ne sont pas forcément adaptés à toutes les populations de bovins. Ainsi, marqueurs déjà identifiés à l'étranger sont encore à l'étude sur notre population. Par ailleurs, les travaux déjà réalisés en France ont permis d'obtenir plus de 400 signaux exploitables correspondant à 140 gènes (SUDRE et al, 2002). Les premières conclusions montrent que les différences entre muscles concernent des gènes des métabolismes énergétiques et protéiques, et des gènes de l'appareil contractile (isoformes de myosines), alors que les différences entre types génétiques correspondent surtout à des protéines de structure et contractiles (titine...) (HOCQUETTE et al, 2003). L'objectif est de poursuivre ces recherches, avec l'espoir de construire une « puce à ADN » ou une « protéine-chip » avec les gènes ou les protéines les plus informatifs. La découverte récente du DNAJA1 laisse entrevoir une telle possibilité, bien qu'il s'agisse d'une perspective à très long terme.

D'autre part, même dans le cas où une forte relation serait confirmée entre un gène (et/ou une protéine) et la tendreté, il ne faut pas oublier qu'ils ne peuvent expliquer à eux seuls la tendreté (HOCQUETTE, 2008). Ce caractère reste dépendant de multiples facteurs (conditions d'élevage, d'abattage, de maturation, de cuisson) que la génomique ne peut pas intégrer. Demain, une « puce à ADN » disponible pourrait uniquement permettre de détecter les carcasses ayant un certain potentiel pour produire une viande tendre, mais elle ne pourrait pas à elle seule constituer une méthode de mesure de la tendreté du produit.

¹⁹ Le terme homozygote signifie que l'individu porte sur ces 2 chromosomes le même allèle du gène observé. Au contraire, un individu hétérozygote ne possède pas les mêmes allèles.

5.5 Les autres méthodes

Il existe une multitude de facteurs pouvant influencer la tendreté ou le niveau de maturation d'une viande, et il y en a certainement qui demeurent inconnus à ce jour. Parmi ceux déjà identifiés, beaucoup sont liés les uns aux autres, la tendreté ou l'état de maturation étant finalement le résultat de l'interaction de ces facteurs les uns avec les autres et non d'un seul facteur considéré individuellement. Le pH, par exemple, est un paramètre qui joue sur la tendreté de la viande, et en particulier son degré de maturation, puisqu'il conditionne l'activité des enzymes impliquées dans l'attendrissage des viandes. Ainsi, la mesure du pH aurait pu faire l'objet d'un paragraphe spécifique dans ce chapitre, au même titre que les méthodes de mesure d'autres facteurs pouvant intervenir sur la tendreté de la viande, comme la couleur ou les lipides.

Cependant, il n'était pas envisageable de détailler les méthodes de mesure de l'ensemble des paramètres explicatifs de la tendreté ou du niveau de maturation. En effet, ce n'est pas l'objet de ce travail et, à ce jour, aucune relation probante n'a été mise en évidence entre la mesure d'un de ces paramètres et le niveau de tendreté ou de maturation de la viande bovine. C'est pourquoi cette partie s'est limitée à développer uniquement les méthodes de mesure des paramètres explicatifs de la tendreté mises en œuvre fréquemment dans les travaux de recherche et pour lesquelles une certaine confusion règne sur ce qu'elles mesurent en réalité.

**Discussion
conclusive**

6 Discussion conclusive

Sans grande surprise, aucune méthode d'évaluation de la tendreté ou de la maturation étudiée dans ce travail n'est apparue comme révolutionnaire et parfaitement adaptée à la mesure de ces critères.

Sauf exception, la grande majorité des méthodes a pour objectif d'évaluer la tendreté et non l'état de maturation. Ce constat est logique car c'est bel et bien le niveau de tendreté de la viande qui intéresse le consommateur, le niveau de maturation n'étant qu'un paramètre influant sur la tendreté mais ne l'assurant pas. En effet, un morceau très riche en collagène pourra rester dur même après une maturation extrême, alors qu'un muscle pourra être tendre en ayant quasiment pas mûri.

L'évaluation critique d'une méthode de mesure s'avère très délicate, et en particulier lorsque le critère qu'elle mesure est aussi complexe que la tendreté. C'est pourquoi, pour être le plus objectif et le plus complet possible, une grille d'évaluation a été mise au point et appliquée à chaque méthode, dans la limite des informations disponibles. Cette évaluation critique nous a permis de dégager les avantages et les inconvénients de chaque méthode, définis par rapport aux attentes de la filière. Aujourd'hui, le souhait de la filière est de répondre au mieux aux attentes des consommateurs, à savoir leur fournir une viande tendre de façon homogène dans le temps. Pour cela, il faudrait que les opérateurs disposent d'un outil de mesure fiable, rapide, non destructif, facile à mettre en œuvre, adaptable aux conditions industrielles, et abordable financièrement, qui leur permettrait d'orienter les carcasses ou les muscles en temps réel vers des circuits de tendreté définie (« tendreté assurée », « tendreté moyenne »...). Cet outil miracle, alliant simultanément toutes les caractéristiques recherchées, n'existe malheureusement pas encore. Pourtant, nombre de méthodes de mesure de la tendreté ont été investiguées.

La seule méthode qui est aujourd'hui capable de retranscrire tous les paramètres de la tendreté en même temps demeure l'analyse sensorielle. Elle est directe et complète, ce qui en fait pour beaucoup LA référence. Cependant, elle reste inapplicable sur le terrain car elle est coûteuse, en temps comme financièrement, destructive, et sujette à de nombreux biais. Elle ne peut donc être utilisée que dans le contexte d'une étude et non de manière systématique.

Parmi les autres méthodes sensorielles, on distingue les 2 extrêmes :

- Les méthodes sensorielles temporelles (time-intensité et électromyographie) offrent l'avantage de refléter l'ensemble des changements texturaux qui interviennent pendant la mastication de façon continue, contrairement aux autres méthodes, sensorielles comme instrumentales, qui donnent une mesure à un instant T. De fait, les informations obtenues avec ces méthodes sont encore plus complètes que celles d'une analyse sensorielle classique, et leurs performances pour discriminer les muscles selon leur tendreté sont souvent meilleures. Cependant, ces méthodes sont encore plus lourdes à mettre en œuvre qu'une dégustation classique. Elles sont donc à utiliser uniquement dans un contexte expérimental, lorsque l'on souhaite obtenir des informations très précises sur la tendreté des muscles dégustés.
- La pression du pouce est, à l'inverse, LA méthode de terrain par excellence. Elle allie presque tous les avantages recherchés en terme d'opérationnalité pratique mais n'est malheureusement pas suffisamment performante à l'échelle de la carcasse. En effet, c'est une technique beaucoup trop subjective, qui est fiable uniquement pour discerner les parties dures et tendres au sein d'un même muscle. Elle est donc préconisée pour la pratique de l'affranchi exclusivement.

Pour palier les divers inconvénients rencontrés avec les méthodes sensorielles, une multitude de méthodes instrumentales ont été investiguées pour tenter de mesurer la tendreté de la viande. Certaines méthodes instrumentales sont plus sensibles aux variations dans la structure myofibrillaire des muscles alors que d'autres reflètent davantage les modifications du tissu conjonctif, et particulièrement du réseau collagénique. Mais cette interprétation n'est pas aisée à généraliser en raison de l'influence des caractéristiques des échantillons (type de muscle, âge des animaux, niveau de maturation et/ou de cuisson du muscle...) sur les propriétés physiques et chimiques de l'échantillon, et notamment l'initiation et la propagation de sa destruction.

Les premières méthodes instrumentales à avoir été largement explorées pour mesurer la tendreté de la viande ont été celles basées sur les propriétés physiques de la viande en raison de leur simplicité, et par conséquent de leur coût modeste. De fait, une multitude de méthodes a été développée, particulièrement dans les années 70. Ces tests offrent l'avantage de mesurer la résistance de la viande reportée dans des unités définies, ce qui exclut les difficultés d'expression des résultats parfois rencontrés avec les autres méthodes. Par contre, sauf exception, la plupart de ces tests mécaniques nécessitent un prélèvement de viande sur la carcasse et sont destructifs. En effet, la force appliquée excède généralement la résistance de l'échantillon qui est alors détruit ou largement modifié, ce qui exclut non seulement sa consommation ultérieure, mais également la possibilité d'effectuer plusieurs tests sur le même échantillon. Par ailleurs, si le mode opératoire est simple, la préparation des échantillons demande une grande rigueur puisque, pour éviter les biais, les échantillons doivent être intacts, de taille et de forme définies et homogènes.

La méthode la plus utilisée est la mesure des forces de cisaillement selon Warner-Bratzler. Bien que de laboratoire, elle reste à ce jour LA méthode instrumentale de référence pour beaucoup. Ses performances pour mesurer la tendreté de la viande sont reconnues et justifiées au plan international. Pourtant, il n'existe pas de protocole normalisé.

Beaucoup moins populaire, et pourtant pas moins performante, la mesure des forces de compression selon la méthode INRA est quant à elle préférée en France. Elle est autant opérationnelle que la mesure des forces de cisaillement et présente 2 avantages par rapport à cette dernière : elle est pratiquée sur viande crue, ce qui permet de s'affranchir des biais dus à la cuisson, et elle permet de mesurer les 2 composantes de la tendreté séparément. Ces caractéristiques rendent la mesure des forces de compression particulièrement adaptée lorsque l'on souhaite relier les propriétés texturales d'une viande avec ses caractéristiques biochimiques.

Ces 2 méthodes restent évidemment moins sensibles qu'une analyse sensorielle. En effet, l'intensité de la perception de la tendreté de la viande n'est pas nécessairement un événement lié à la première bouchée mais dépend du taux de mastication de chacun. Or, les outils de mesure par cisaillement ou compression modélisent seulement la première, voire la seconde, bouchée.

Au-delà de ces 2 méthodes, il existe de nombreuses autres méthodes physiques. Leur classification dépend de la force et de la déformation appliquées au produit, mais elle n'est pas aisée car de nombreux instruments mettent en jeu plusieurs types de forces simultanément, ou des variantes. Sauf exception, elles présentent les mêmes inconvénients pratiques (de laboratoire, destructives...) et ne sont pas plus performantes pour estimer la tendreté de la viande. Dans beaucoup de cas, elles donnent même des résultats moins sensibles ou peu concluants, bien que beaucoup d'auteurs aient cru à leur efficacité. Ainsi, ces méthodes sont peu ou pas utilisées aujourd'hui pour mesurer la tendreté de la viande bovine, alors que certaines ont été adaptées pour mesurer la texture d'autres catégories d'aliments. Ce constat tient aux propriétés physiques de la viande, bien plus complexes que celles de nombreux autres aliments. En effet, la viande appartient au groupe des demi-solides, qui plus est très hétérogène ; de fait, son comportement lors d'une déformation

dépend de la vitesse de cette déformation, ce qui ne laisse pas la possibilité d'établir des abaques de déformation de la viande sur une large gamme de vitesses.

Si elles ne sont pas parfaites, les méthodes physiques, qu'elles tentent de caractériser la résistance du produit ou de reproduire les conditions de mastication, présentent toutes le même avantage, comme les méthodes sensorielles : elles évaluent directement la tendreté de la viande. Cette caractéristique est un atout non négligeable pour une technique de mesure car elle permet de s'affranchir du problème de calibration qui représente LA difficulté principale rencontrée avec les méthodes de mesure indirectes.

C'est le cas des méthodes physico-chimiques. Parmi elles, la spectroscopie est la technique qui a été la plus investiguée en raison de ces avantages compatibles avec les contraintes du terrain : moyennant des adaptations, elle permet une mesure rapide, précise, et non destructive, ce qui laisse entrevoir la possibilité d'une mesure en ligne. Cependant, quel que soit le domaine du spectre pour lequel sont effectuées les mesures (visible et/ou proche infrarouge, rayons X pour la fluorescence), il est particulièrement délicat de mettre au point un modèle généralisable permettant de transformer ces mesures physico-chimiques en potentiel de tendreté. Cette difficulté est encore plus accrue dans le contexte français puisque, contrairement à certains pays, la population bovine est très diversifiée. Le QualitySpec® Beef Tenderness en est un bon exemple : opérationnel et *a priori* performant dans le contexte américain, il est apparu peu adapté à la mesure de la tendreté sur nos animaux. Ce problème de calibration est également renforcé par la sensibilité de ces techniques de mesure, notamment la spectroscopie de fluorescence frontale. C'est certainement la raison des performances non concluantes de l'appareil modulaire développé expérimentalement par une équipe française ; il est adapté pour une mesure en ligne mais n'est malheureusement pas fiable pour rendre compte de la tendreté d'une carcasse. La mesure de l'anisotropie de l'impédance présente les mêmes avantages mais est également sujette aux mêmes contraintes. Ses performances sont mitigées selon le type de muscle et surtout de la dextérité à réaliser la mesure. Cette méthode est une des seules parmi les physico-chimiques qui n'évalue pas la tendreté mais le niveau de maturation de la viande.

D'autres méthodes physico-chimiques ont été explorées : analyse d'images vidéo, mesure sur le spectre des ultrasons...et à chaque fois le lien entre la tendreté et le paramètre mesuré est limité, non adapté au contexte français, ou alors non généralisable car trop variable ou même obtenu sur des effectifs trop faibles. Ces résultats ne sont pas surprenants : étant donné que la tendreté est la conséquence d'une multitude de critères qualitatifs imbriqués les uns aux autres, comment la mesure d'un seul de ces critères peut refléter à elle seule la complexité de la tendreté ? C'est en ce sens que les techniques de mesure multifactorielles sont encore et toujours prometteuses bien que le problème de calibration demeure. La spectroscopie en est un bon exemple puisque les spectres peuvent être considérés comme une « empreinte digitale » du produit résultant des propriétés d'excitation simultanée de plusieurs constituants de la viande (lipides, myofibrilles, protéines sarcoplasmiques, collagène...) différant selon les longueurs d'onde choisies.

Mais davantage qu'une seule mesure instrumentale rendant compte de plusieurs critères sans qu'une dissociation soit possible, il peut être plus prometteur de combiner chaque mesure instrumentale individuelle d'un grand nombre de critères. C'est souvent dans ce genre d'approche que sont mises en œuvre les méthodes de mesure explicatives de la tendreté : contrairement à une confusion courante, ces méthodes ne mesurent pas la tendreté ou le niveau de maturation en tant que tels mais des paramètres pouvant influencer sur la tendreté ; Il s'agit de caractéristiques biochimiques (taux de collagène, de fibres, d'enzymes...) ou physiques (pH, couleur...) du muscle. Les confusions les plus fréquentes entre mesure de la tendreté (ou de la maturation) et mesure d'indicateurs de tendreté concernent les méthodes de mesure des éléments chimiques musculaires. C'est pourquoi certaines d'entre elles ont été détaillées dans ce travail.

Bien que les conclusions soient parfois contradictoires (notamment pour les types de fibres favorisant la tendreté), il est clair que les éléments chimiques musculaires ont une influence sur la tendreté et la maturation de la viande. Pourtant, ils ne permettent pas de mesurer la tendreté ; pour preuve le faible niveau de prédiction de la tendreté ou de la maturation par chacun de ces critères considérés individuellement. Ce constat peut s'expliquer par l'imprécision des différentes mesures réalisées, par la forte variabilité des caractéristiques musculaires, par la variabilité de la tendreté au sein d'un même muscle, et également par les lacunes demeurant sur les connaissances des processus biologiques déterminant la qualité finale de la viande.

Par contre, beaucoup d'auteurs ont tenté de voir dans quelle mesure la combinaison de plusieurs de ces indicateurs de tendreté (taux de collagène, types de fibres, concentrations en enzymes...) permettrait de prédire la tendreté. A ce jour, aucun modèle exclusivement basé sur la mesure de différentes caractéristiques musculaires ne s'est avéré être un prédicteur de la tendreté de la viande suffisamment bon et généralisable. De plus, les méthodes d'analyses traditionnelles des caractéristiques musculaires sont longues, de fait chères, et supposent la disponibilité d'expérimentateurs confirmés. Elles ne sont donc pas automatisables et pas assez efficaces pour répondre aux contraintes d'une utilisation en industrie. Beaucoup de techniques instrumentales rapides, accessibles financièrement, et non destructives ont été développées pour la détermination de ces éléments chimiques. Il s'agit de méthodes faisant appel aux technologies physico-chimiques (spectroscopie, résonance magnétique nucléaire, capteurs hyperfréquence...) (DAMEZ et LEPETIT, 2001), mais l'évaluation de leurs performances pour chaque constituant chimique pris individuellement ne faisait pas l'objet de ce travail.

Parmi les nouvelles voies explorées concernant la mesure d'indicateurs de la tendreté, la génomique tient aujourd'hui une grande place. L'objectif de la génomique est d'identifier des marqueurs génétiques caractérisant la tendreté ou la maturation pour développer à terme des kits de détermination rapide du potentiel de tendreté d'une viande *via* la présence (ou l'absence) dans le muscle testé de ces marqueurs spécifiques. L'inconvénient majeur de cette approche est que les études pour trouver des marqueurs sont longues et coûteuses, et que ces marqueurs ne sont pas forcément adaptés à toutes les populations de bovins. De plus, même dans le cas idéal où une forte relation serait confirmée entre un gène (et/ou une protéine) et la tendreté, le kit ADN mis au point permettrait uniquement d'identifier les animaux ayant un potentiel de tendreté, mais pas de mesurer leur tendreté, ni de prédire leur tendreté finale.

Ces méthodes de mesure explicatives de la tendreté ne peuvent être utiles que lorsqu'elles sont combinées entre elles et aux autres facteurs indicateurs. Plusieurs études ont tenté de prédire la tendreté de la viande *via* un modèle prenant en compte simultanément différents critères de qualité. La plus prometteuse à ce jour est le Meat Standard Australia. Cette méthode, qui a récemment fait l'objet d'une expertise spécifique (MOEVI, 2008), donne pour chaque muscle un potentiel de tendreté en fonction d'un ensemble de critères qualitatifs concernant la carcasse et les conditions post-mortem (pour exemple : taux de *bos indicus*, ou type de suspension de la carcasse). Le gros inconvénient de ce type de méthode, et notamment le MSA, est qu'elle nécessite la création d'une base de données considérable et adaptée à la population pour laquelle le modèle est développé. Cette base de données permet de choisir les critères qualitatifs pertinents et retenus dans le modèle en fonction de leur impact sur la tendreté. Cette dernière est estimée par des analyses sensorielles, réalisées fréquemment et en grand nombre de façon à actualiser régulièrement le modèle. Le développement d'un tel système de mesure est long, laborieux et coûteux, mais il est totalement opérationnel et peut être commercialement efficace à l'image du MSA mis en place en Australie.

L'intérêt de ce genre d'approche est qu'elle prend en compte le maximum de paramètres influant sur la tendreté de la viande, permettant ainsi d'estimer cette dernière au cas par cas, muscle par muscle. Or, c'est un des problèmes majeurs de la mesure de la tendreté : aucune méthode ne permet d'estimer la tendreté sur l'ensemble de la carcasse. C'est souvent un seul muscle qui est considéré, et même juste quelques cm² de muscle. Dans quelle mesure peut-elle refléter la tendreté de tous les muscles d'une carcasse ? Selon les méthodes, certains chercheurs ont tenté de définir des correspondances entre muscles, de façon à prédire la tendreté d'un muscle à partir de celle d'un autre choisi comme référence. Cependant, cette approche est généralement infructueuse car les muscles n'ont pas tous le même comportement à la déformation physique et n'évoluent pas tous de façon comparable au cours de la maturation. Il est même parfois impossible d'observer un comportement ou des modifications similaires pour un même muscle.

Alors finalement, comment l'ensemble des méthodes investiguées pour mesurer la tendreté de la viande ou sa maturation sont-elles mises à profit ? Toutes ces méthodes sont des indicateurs d'un ou plusieurs paramètres impliqués dans la tendreté, mais ils n'ont de sens que lorsqu'ils sont mis en relation avec les attentes consommateurs, à savoir : quelle est la limite de tendreté de base acceptable lorsqu'ils mangent une viande ? Cette limite est-elle différente lorsqu'ils payent plus cher leur viande, ou à l'inverse sont-ils plus indulgents s'ils ont bénéficiés d'une promotion ? La réponse à ces questions est variable selon le contexte : type de population, goûts et habitudes de consommation, objectif commercial souhaité (par exemple le type de segmentation par niveau de tendreté choisie)...

Ainsi, pour toutes les méthodes de mesure, qu'elles soient sensorielles ou instrumentales, il existe différents seuils d'acceptabilité qui ont été définis dans un contexte spécifique. Ces seuils permettent de positionner les muscles mesurés dans différentes classes de tendreté, dont le nombre est également variable selon le contexte. On distingue dans les cas les plus simples la classe « tendre » et la classe « dur », mais il peut y avoir 3, 4, voire plus, classes définies. Avec cette approche, ce n'est pas la capacité d'une méthode à estimer précisément la tendreté de la viande qui est évaluée, mais sa capacité à discriminer les morceaux selon leur potentiel de tendreté ou de maturation. Utilisées ainsi, les performances des méthodes de mesure sont souvent meilleures que le lien observé au travers des corrélations avec la méthode prise comme référence. Mais ces performances sont totalement dépendantes des seuils fixés, eux même très variables selon le contexte, sans oublier que ce qui est acceptable pour certains ne le sera pas pour d'autres et *vice versa*.

Pour conclure, l'analyse sensorielle demeure à ce jour la seule méthode permettant de rendre compte de la tendreté telle que perçue par le consommateur de manière fiable et complète. D'ailleurs, c'est toujours par rapport à cette méthode que les seuils d'acceptabilité sont définis, même dans les approches globales telles que le MSA. Quelle que soit la méthode de mesure, l'instrument ou le modèle prédictif : il est toujours positionné, au moins la première fois, par rapport à des mesures de tendreté acquises par analyse sensorielle, voire une autre méthode dont la relation avec l'analyse sensorielle est considérée comme connue (les forces de cisaillement selon Warner-Bratzler par exemple).

Au-delà de l'analyse sensorielle, nous avons vu précédemment que certaines méthodes sont plus adaptées, plus prometteuses, plus complètes ou plus efficaces que d'autres pour mesurer la tendreté ou le niveau de maturation. Cela dit, l'opérationnalité d'une méthode pour évaluer la tendreté dépend de ses conditions de mise en œuvre, notamment de la population étudiée et de l'objectif recherché. Cela signifie qu'aucune méthode ne peut être considérée comme « parfaite » ou « médiocre » sur la base de cette évaluation, mais bien que chaque méthode est plus ou moins adaptée à un contexte spécifique (nombre d'animaux étudiés, modalités comparées, temps à disposition...). Les fiches synthétiques réalisées dans ce travail pour chaque méthode de mesure apportent l'ensemble des éléments permettant aux expérimentateurs de choisir la méthode qui convient le mieux à son contexte.

Bibliographie

ACTIA, 1999. Evaluation sensorielle. Guide des bonnes pratiques.

ADIV, 2000. Détermination de la tendreté de la viande de bœuf par une méthode rapide non destructive : la spectroscopie de fluorescence frontale. Programme d'étude INTERBEV, OFIVAL, ADIV, ENITA Clermont-ferrand, juin 2000, 40 pp.

ADIV, 2002. Mesure de la tendreté de la viande par spectroscopie de fluorescence frontale. Programme d'étude INTERBEV, OFIVAL, ADIV, ENITA, janvier 2002, 42 pp.

ADIV, 2005. Mesure de la tendreté par spectroscopie de fluorescence. Calibration de l'appareil portable. Programme d'étude INTERBEV, OFIVAL, ADIV, ENITA, mai 2005, 41 pp.

AFNOR, 1968. Viandes et produits à base de viande, détermination de la teneur en matières grasses totales.

AFNOR, 1999. Norme XP V09-501. Analyse sensorielle, Guide général pour l'évaluation sensorielle : description, différenciation et mesure hédonique.

AFNOR, 2002. Norme NF V 04-415. Viande, produits à base de viande et produits de la pêche, Détermination de la teneur en L(-) hydroxyproline et calcul de la teneur en collagène.

AMSA, 1995. Research guidelines for cokery, sensory evaluation and instrumental tenderness measurement of fresh meat. Chicago, IL : American Meat Science Association and National Live Stock and Meat Board.

ANONYME, 1990. Evaluation sensorielle, manuel méthodologique. Ed Lavoisier, 1990.

ANSAY M., 1974. Individualité musculaire chez le bovin. Etude de l'équipement enzymatique de quelques muscles. Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys., 14, 471-486.

AUBRY L., SENTANDREU M.A., LEVIEUX D., OUALI A. et DUTAUD D., 2006. Bovine muscle 20S proteasome. III : Quantification in tissue crude extracts using ELISA and radial immunodiffusion techniques and practical applications. Meat Science, 74 (2), 345-353.

BAILEY A.J. et LIGHT N.D., 1989. Connective tissue in meat and meat products. London, New-York : Elsevier Applied Science, 355 p.

BALCERZAK D., QUERENGESSER L., DIXON W.T., BARACOS V.E., 2001. Coordinate expression of matrix-degrading proteinases and their activators and inhibitors in bovine skeletal muscle. Journal of Animal Science, 79, 94-107.

BARENDSE W., 2002. DNA markers for meat tenderness. International patent WO 02/064820A1.

BARTON-GADE P.A. et al, 1994. Final version of reference methods for water holding capacity in meat and meat products : procedures recommended by an OECD working group

and presented at the 39th ICOMST in 1993. Proceedings 40th international congress of meat science and technology, 28 août-2 septembre, La Hague, Hollande, S-V.05.

BERGMAN M. et LOXLEY R., 1963. Two improved and simplified methods for the spectrophotometric determination of hydroxyproline. *Analytical Chemistry*, 35 (12), 1961-1965.

BERNARD C., CASSAR-MALEK I., LE CUNFF M., DUBROEUCQ H., RENAND G. et HOCQUETTE J.F., 2007. New indicators of beef sensory quality revealed by expression of specific genes. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 55, 5229-5237.

BERRY B.W. et LEDDY K.F., 1990. Influence of steak temperature at the beginning of broiling on palatability, shear and cooking properties of beef loin steaks differing in marbling. *J. Foodservice Systems*, 5, 287-298.

BONNET M. et KOPP J., 1986. Dosage du collagène dans les tissus conjonctifs de la viande et des produits carnés. *Viandes et Produits Carnés*, 7 (6), 263-266.

BOULEY J., MEUNIER B., CULIOLI J. et PICARD B., 2004. Analyse protéomique du muscle de bovin appliquée à la recherche de marqueurs de la tendreté de la viande. 11^{èmes} Rencontres Recherche Ruminants, Paris, 87-89.

BOURNE M.C., 1966. Measure of shear and compression components of puncture tests. *J. Food Science*, 31, 282-291.

BOURNE M.C., 1977. *J. Texture Stud*, 8, 219.

BRATZLER L.J., 1932. Measuring the tenderness of meat by mechanical shear. M. Sc. Thesis, Kansas State College, Manhattan, USA.

BRATZLER L.J., 1949. Determining the tenderness of meat by use of the Warner-Bratzler method. *Proc. 2nd Reciprocal Meat Conf.*, 117-121.

BRIAND M. et al, 1981. Metabolic types in the sheep : II lactate deshydrogenase activity and LDH isozyme distribution. *European Journal of Applied Physiology*, 46, 359-365.

BUTLER G., POSTE L.M., MACKIE D.A. et JONES A., 1996. Time-intensity as a tool for the measurement of meat tenderness. *Food Qual. and Pref.*, 7, 193-204.

BYRNE C.E, TROY D.J., et BUCKLEY D.J., 2000. Post-mortem changes in muscle electrical properties of bovine m. longissimus dorsi and their relationship to meat quality attributes a pH fall. *Meat Science*, 54, 23-34.

BYRNE C.E. et al, 1997. Near infrared spectroscopy as a meat quality indicator. Proceedings 43th international congress of meat science and technology, Auckland, Nouvelle-Zélande, 44-45.

BYRNE C.E. et al, 1998. Non-destructive prediction of selected quality attributes of beef by near-infrared reflectance spectroscopy between 750 and 1098 nm. *Meat Science*, 49, 399-409.

CALKINS C.R. et DAVIS G.W., 1980. Fragmentation index of raw muscle as a tenderness predictor of steak from US good and US standard steer and bullock carcasses. *Journal of Animal Science*, 50, 1067-1072.

- CALKINS C.R., DAVIS G.W., et SANDERS W.L., 1979. Fragmentation index of raw muscle as a tenderness predictor of steaks from USDA commercial and utility carcasses. *Journal of Food Science*, 45 (1), 111-114.
- CAMPION D.R. et CROUSE J.D., 1975. Predictive value of USDA beef quality grade factors for cooked meat palatability. *Journal of Food Science*, 40, 1125-1128.
- CAMPO M.M., SANTOLARIA P., SANUDO C., LEPETIT J., OLLETA J.L., PANEA B. et ALBERTI P., 2000. Assessment of breed type and ageing time effects on beef meat quality using two different texture devices. *Meat Science*, 55, 371-378.
- CASSAR-MALEK I., HOCQUETTE J.F., JURIE C., LISTRAT A., JAILLER R., BAUCHART D., BRIAND Y. et PICARD B., 2004. *Animal Sciences*, 79, 49-59.
- CHRYSTALL B.B. et al, 1994. Recommendation of reference methods for assessment of meat tenderness. Proceedings 40th international congress of meat science and technology, 28 août-2 septembre, La Hague, Hollande, S-V.06.
- COFRAC, 1994. Norme Programme N°133/00 « Analyse sensorielle ».
- CROSS H.R. et al, 1978. Training and testing of judges for sensory analysis of meat quality. *Food Technology*, 37, 48-54.
- CULLER R.D., PARRISH F.C., SMITH G.C. et CROSS H.R., 1978. Relationship of myofibril fragmentation index to certain chemical, physical and sensory characteristics of bovine longissimus muscle. *Journal of Food Science*, 43 (4), 1177-1180.
- DAMEZ J.L. et LEPETIT J., 2001. Qualité de la viande. Vers des mesures d'évaluation non destructives. *Viandes et Produits carnés*, 22 (3), 69-74.
- DAMEZ J.L., CLERJON S., ALBOUELKARAM S., et LEPETIT J., 2006b. Tendreté de la viande bovine, Vers un système de mesure autonome pour la détermination de l'état de maturation. *Viandes et Produits Carnés*, 25 (4), 111-117.
- DAMEZ J.L., CLERJON S., ALBOUELKARAM S., LEPETIT J., FAVIER R., et DOMINGUEZ B., 2006a. Système de mesure autonome pour la détermination de l'état de maturation. Rapport d'étude INRA, INTERBEV, OFIVAL, 2006.
- DAMEZ J.L., CLERJON S., et ALBOUELKARAM S., 2005. Mesostructure assessed by alternating current spectroscopy during meat ageing, 51th International Congress of Meat Science and Technology, Baltimore, 7-12 août 2005.
- DAMEZ J.L., CLERJON S., LEPETIT J., FAVIER R., et DOMINGUEZ, 2002. Système-non invasif prévisionnel de la durée optimale de maturation des viandes bovines. Rapport d'étude INRA, INTERBEV, OFIVAL, juin 2002.
- DAVID G.W. et al, 1979. Tenderness variations among beef steaks from carcasses of same USDA quality grade. *Journal of Animal Science*, 49 (1), 103-114.
- DENOYELLE C., 1999. Etat des lieux de la recherche sur la tendreté : Perspectives d'application des résultats pour la filière viande bovine française et pistes d'investigation à promouvoir, Programme d'étude INTERBEV, Institut de l'Elevage, Avril 1999.
- DEVINE C.E. et McGLONE V.A., 1998. On-line assessment of meat tenderness. Proceedings 44th international congress of meat science and technology, 30 août-4 septembre, Barcelone, Espagne, 958-959.

- DRANSFIELD E. et al, 1977. Intramuscular composition and texture of beef muscles. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 28, 833-842.
- DRANSFIELD E. et al, 2003. Meat quality and composition of three muscles from french cull cows and young bulls. *Animal Science*, 76, 387-399.
- DUFEY P.A., 2008. Pâturages pour vaches laitières. 1. Modèle d'aide à la gestion du pâturage. *Agrarforschung*, 15 (08), 378-383.
- DUFOUR E. et al, 1998. La spectroscopie de fluorescence frontale : une approche non-invasive de la structure et des interactions entre les constituants des aliments. *Agoral*, 10, 209-215.
- DUFOUR E. et al, 2001. Delineation of the structure of cheeses at the molecular level by fluorescence spectroscopy. Relation with the texture. *Int. Dairy J.*, 11, 465-473.
- DUFOUR E. et FRENCIA J.P., 2001. Les spectres de fluorescence frontale, une empreinte digitale de la viande. *Viandes et Produits Carnés*, 22 (1), 9-14.
- DUIZER L.M., 1992. An assessment of sensory time-intensity and instrumental methods for bovine muscle tenderness measurements. M. Sc. Thesis, University of Guelph, Guelph.
- DUIZER L.M., GULLET E.A. et FINDLAY C.J., 1993. Time-intensity methodology for beef tenderness perception. *Journal of Food Science*, 58 (5), 943-947.
- DUIZER L.M., GULLET E.A. et FINDLAY C.J., 1994. The effect of masticatory patterns as measured by time-intensity and electromyography on the perception of bovine muscle tenderness. *Journal of sensory studies*, 9, 33-46.
- DUIZER L.M., GULLET E.A. et FINDLAY C.J., 1996. The relationship between sensory time-intensity, physiological electromyography and instrumental texture profile analysis measurements of beef tenderness. *Meat Science*, 42 (2), 215-224.
- DUTAUD D., 1998. Quantification et caractérisation du protéasome 20S de muscle de bovin en relation avec l'attendrissage de la viande bovins. Thèse d'Université, Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 154 pp.
- DUTAUD D., AUBRY L., GUIGNOT F., VIGNON X., MONIN G. et OUALI A., 2006. Bovine muscle 20S proteasome. II: Contribution of the 20S proteasome to meat tenderization as revealed by an ultrastructural approach. *Meat Science*, 74 (2), 337-344.
- EGELANDSDAL B. et al, 1996. Determination of the amount of intramuscular fat in beef. A comparison of two spectroscopic techniques. *Proceeding of the 42th ICoMST*, 256-257.
- EGELANDSDAL B. et al, 2002. On attempts to measure the tenderness of longissimus dorsi muscle using fluorescence emission spectra. *Meat Science*, 60, 187-202.
- FELBACQ D., CLERJON S., DAMEZ J.L., et ZOLLA F., 2002. Modelling microwave electromagnetic field absorption in muscle tissues. *Eur. Phys. J.*, AP19, 25-27.
- FIEMS L.O. et al, 2000. Relationship between fat depots in carcasses of beef bulls and effect on meat colour and tenderness. *Meat Science*, 56, 41-47.
- FINDLAY C.J., GULLETT E.A. et GENNER D., 1986. Integrated computerized sensory analysis. *J. Sensory Studies*, 1, 307-314.

- FRENCIA J.P. et al, 2002. Mesure de la tendreté de la viande par spectroscopie de fluorescence frontale, 9^{ème} JSMTV, Clermont-Ferrand, octobre 2002.
- FRENCIA J.P. et DUFOUR E., 2001. Les spectres de fluorescence frontale, une empreinte digitale de la viande. *Viandes Prod. Carnés*, 22 (1), 9-14.
- FUENTES-PRIOR P. et SALVESEN G.S., 2004. The protein structures that shape caspase-activity, specificity, activation and inhibition. *Biochem. J.*, 384, 201-232.
- GEESINK G.H. et KOOHMARAIE M., 1999. Effect of calpastatin on degradation of myofibrillar proteins by I-calpain under post-mortem conditions. *Journal of Animal Science*, 77, 2685-2692.
- GEESINK G.H. KUCHAY S., CHISHTI A.H. et KOOHMARAIE M., 2006. Micro-calpain is essential for postmortem proteolysis of muscle proteins. *Journal of Animal Science*, 84, 2834-2840.
- GEESINK G.H., KOOLMEES P.A., VAN LAACK H.L.J.M. et SMULDERS F.J.M., 1995. Determinants of tenderisation in beef longissimus dorsi and triceps brachii muscles. *Meat Science*, 41, 7-17.
- GIF. P., TOURNAYRE P. et CULIOLI J., 1995. Automatisation d'un banc de mesure de la longueur des sarcomères de la viande par diffraction d'une lumière cohérente (laser). *Viandes et Produits Carnés*, 16 (2), 39-45.
- GOLL D.E., OTSUKA Y., NAGAINIS P.A., SHANNON J.D., SATHE S.K. et MUGURUMA M., 1983. Role of muscle proteinases in maintenance of muscle integrity and mass. *Journal of Food and Biochemistry*, 7, 137-177.
- GOLL D.E., THOMPSON V.F., TAYLOR R.G., OUALI A., CHOU R.G.R., 1999. In *Calpain : pharmacology and toxicology of calcium-dependent protease*, Taylor & Francis, Philadelphie, USA, 127-160.
- GONDRET F., HOCQUETTE J.F. et HERPIN P., 2004. *Reprod. Nutr. Dev.*, 44, 1-16.
- GREEN D.R., 2005. Apoptotic pathways : ten minutes to dead. *Cell*, 121, 671-674.
- GREGORY K.E. et al, 1995. Genetic and phenotypic (co)variances for growth and carcass traits of purebred and composite populations of beef cattle. *Journal of Animal Science*, 73, 1920-1926.
- GUTH H.L. et SAMAHA F.J., 1972. Erroneous interpretations which may result from application of the myofibrillar ATPase histochemical procedure to developing muscle. *Experimental Neurology*, 34, 465-475.
- HARRIS P.V. et SHORTHOSE W.R., 1988. Meat texture. In : LAWRIE R.A. (Ed) *Developments in Meat Science*, 4, 245-286. Elsevier Applied Science Publishers, London.
- HAWKINS R.R., DAVIS G.W., CABLE J.K., et RAMSEY C.B., 1987. Fragmentation index as an early post-mortem predictor of beef tenderness. *Journal of Animal Science*, 64, 171-176.
- HERBERT S., 1999. Caractérisation de la structure moléculaire et microscopique de fromages à pâte molle. Analyse multivariée des données structurales en relation avec la texture. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 120 pp.

- HERRERA-MENDEZ C.H., BECILA S., BOUDJELLAL A. et OUALI A., 2006. Meat-aging : reconsideration of the current concept. *Trend Food Sci. Tech.*, 17, 394-405.
- HILDRUM K.I. et al, 1994. Prediction of sensory characteristics of beef by near-infrared spectroscopy. *Meat Science*, 38, 67-80.
- HILDRUM K.I. et al, 1995. Near infrared reflectance spectroscopy on the prediction sensory properties of beef. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 3, 81-87.
- HILL B.D., JONES S.D.M., ROBERTSON W.M. et MAJOR I.T., 2000. Neural network modelling of carcass measurement to predict beef tenderness. *Canadian Journal of Animal Science*, 311-318.
- HOCQUETTE J.F. et al, 2005. Evolution des recherches sur le muscle des bovins et la qualité sensorielle de leur viande, I. Vers une meilleure connaissance de la biologie musculaire. *Cahiers Agr*, 14 (3), 283-289.
- HOCQUETTE J.F., 2008. La génomique fonctionnelle au service de la qualité de la viande bovine dans une perspective de développement durable. *SpectroSciences*.
- HOCQUETTE J.F., BERNARD C., CASSAR-MALEK I., LEPETIT J., MICOL D., JURIE C., MEUNIER B., RENAND G. et PICARD B., 2007a. Mise en évidence de marqueurs de tendreté de la viande bovine par des approches de génomique fonctionnelle (projet MUGENE). 14èmes Rencontres Recherche Ruminants, Paris, 117-120.
- HOCQUETTE J.F., CASSAR-MALEK I., LISTRAT A. et PICARD B., 2003. « La génomique expressionnelle : une approche globale des fonctions physiologiques par la signature de l'expression des gènes » ; exemple appliqué à la qualité de la viande. *Commission Bovine, Clermont-Ferrand*, 2003.
- HOCQUETTE J.F., LEVEZIEL H., RENAND G. et MALAFOSSE A., 2007b. La révolution génomique au service de la filière viande bovine. *Cahiers Agricultures*, 16, 457-463.
- HOSTETLER R.L. et al, 1982. Effect of electrical stimulation and steak temperature at the beginning of cooking on meat tenderness and cooking loss. *J. Food Sci.*, 47, 687-688.
- HOULBERT J.M. et MORAND J., 1984. Valorisation des jeunes bovins de race laitière ; précision statistique de la mesure professionnelle de la tendreté. *Compte rendu d'étude ITEB, BOCAVIANDE, CANA*.
- HUFF-LONERGAN E. et LONERGAN S.M., 1999. In *Quality attributes of muscle foods*, Kluwer Academic/plenium Publishers, New-York, USA, 229-251.
- HUFFMAN K.L., 1996. Effect of beef tenderness on consumer satisfaction with steaks consumed in the home and restaurant. *J. Anim. Sci.*, 74, 91-97.
- JACK F.R., PIGGOTT J.R. et PATERSON A., 1993. Relationships between electromyography, sensory and instrumental measures of cheddar cheeses texture. *J. Food Sci.*, 58, 1313-1317.
- JEREMIAH L.E. et MARTIN A.H., 1981. *Canadian Journal of Animal Science*, 61, 53-61.
- JONES B.K. et TATUM J.D., 1994. Predictors of beef tenderness among carcasses produced under commercial conditions. *Journal of Animal Science*, 72, 1492-1501.

- KAMOUN M. et CULIOLI J., 1989. Influence of ageing on the mechanical properties of cooked bovine meat. *Science des Aliments*, 9, 3-18.
- KENMEGNE KAMDEM A.T. et HARDY J., 1995. Grinding as a method of meat texture evaluation. *Meat Science*, 39, 225-236.
- KOOHMARAIE M. et GEESINK G.H., 2006. Contribution of post-mortem muscle biochemistry to the delivery of consistent meat quality with particular focus on the calpain system. *Meat Science*, 74, 34-43.
- KOOHMARAIE M., 1992. Ovine skeletal muscle multicatalytic proteinase complex (proteasome) : purification, characterization, and comparison of its effect on myofibrils with m-calpain. *Journal of Animal Science*, 70, 3697-3708.
- KOOHMARAIE M., 1994. *Meat Science*, 36, 93-104.
- KRAMER A. et al, 1951a. The shear press, a device for measuring food quality. *Canner*, 112, 34.
- KRAMER A. et al, 1951b. New shear press predicts quality of canned limas. *Food Eng.*, 23, 112.
- LEBECQUE A. et al, 2001. Delineation of the texture of Salers cheese by sensory analysis and physical methods. *Le lait*, 81, 609-623.
- LEBECQUE A. et al, 2003. La spectroscopie de fluorescence frontale : une alternative pour des mesures rapides et non destructives de la tendreté de la viande. 10^{èmes} Rencontres Recherche Ruminants, 10, 249.
- LEPETIT J. et BUFFIERE C., 1993. Comparaison de 2 méthodes mécaniques de mesure de la résistance myofibrillaire de la viande crue. *Viandes et Produits Carnés*, 14, 39-42.
- LEPETIT J. et CULIOLI J., 1994. Mechanical properties of meat. *Meat Science*, 36, 203-237.
- LEPETIT J. et SALE P., 1985. Analyse du comportement rhéologique de la viande par une méthode de compression sinusoïdale. *Science des Aliments*, 5, 521-540.
- LEPETIT J., 1988. Influence de l'anisotropie et de l'état d'étirement des muscles sur l'analyse des fibres musculaires et conjonctives par une méthode de compression sinusoïdale. *IAA*, 526-529.
- LEPETIT J., 1989. Deformation of collagenous, elastin and muscle fibres in raw meat in relation to anisotropy and length ratio. *Meat Science*, 26, 47-66.
- LEPETIT J., 2004. Rôle des tissus conjonctifs dans le déterminisme de la tendreté de la viande. 10^{èmes} JSMTV, Rennes, France, octobre 2004.
- LEPETIT J., HAMEL C., CANISTRO J., BARDAG F., et KERKEB A., 1996. Etude de la faisabilité d'une classification précoce de la viande bovine sur l'état de maturation. *Viandes et Produits Carnés*, 17 (6), 325-327.
- LEPETIT J., SALE P. et OUALI A., 1986. Post-mortem evolution of rheological properties of the myofibrillar structure. *Meat Science*, 16, 161-174.

- LEPETIT J., SALE P., FAVIER R., et DALLE R., 2002. Electrical impedance and tenderisation in bovine meat. *Meat Science*, 60, 51-62.
- LEROY B. et al, 2003. Prediction of technological and organoleptic properties of beef longissimus thoracis from near-infrared reflectance and transmission spectra. *Meat Science*, 66, 45-54.
- LEWIS P.K., BROWN C.J. et HECK M.C., 1977. Fibre diameter, sarcomere length and tenderness in certain muscles of crossbred beef steers. *Journal of Animal Science*, 45, 254-260.
- LISTRAT A. et al, 2006. Relation entre les caractéristiques du collagène et le persillé de la viande bovine. 11^{ème} JSMTV, Clermont-Ferrand, France, 201-202.
- LIU Y. et al, 2003. Prediction of color, texture and sensory characteristics of beef steaks by visible and near infrared reflectance spectroscopy. A feasibility study. *Meat Science*, 65, 1107-1115.
- LUCKETT R.L., BIDNER T.D, ICAZA E.A. et TURNER J.W., 1975. Tenderness studies in straightbred and crossbred steers. *Journal of Animal Science*, 40, 468-475.
- MARSH B.B. et LEET N.G., 1966. Studies in meat tenderness. III. The effect of cold shortening on tenderness, *Journal of Food Science*, 31, 450-459.
- MARTENS H. et NAES T., 1992. *Multivariate calibration*. New York, John Wiley & Sons.
- MARTIN S.J. et al, 1995. Early redistribution of plasma membrane phosphatidylserine is a general feature of apoptosis regardless of the initiating stimulus: inhibition by over expression of Bcl-2 and Abl., *J. Exp. Med.*, 182, 1545-1556.
- MATHEVON E., MIOCHE L., BROWN W.E. et CULIOLI J., 1995. Texture analysis of beef cooked at various temperatures by mechanical measurements, sensory assessments and electromyography. *Journal of Texture Studies*, 26, 175-192.
- MATHONIERE C., MIOCHE L. et CULIOLI J., 1996. Meat texture assessment by rheology, sensory analysis and electromyography (EMG). *Meat for the consumer*, ICoMST 42nd, 422-423.
- McCORMICK R.J., 1999. Extracellular modifications to muscle collagen : Implications for meat quality. *Poult Sci*, 78, 785-791.
- MILLER M.F. et al, 1995. Consumer acceptability of beef steak tenderness in the home and restaurant. *J. Food Sci.*, 60, 963-965.
- MIOCHE L. et MARTIN J.F., 1996. Influence d'un jugement de texture sur le profil de mastication. *Viandes Prod. Carnés*, 17 (6), 356-358.
- MOODY W.G. et al, 1978. Beef thawing and cookery methods. Effect of thawing and cookery methods, time in storage and breed on the microbiology and palatability of beef cuts. *J. Food Sci.*, 43, 834-838.
- MURRAY A.C. et MARTIN A.H., 1980. Effect of muscle fiber angle on Warner-Bratzler shear values. *J. Food Sci.*, 45, 1428-1429.

- NGAPO T.M. et al, 2002. Perimysial collagen crosslinking in belgian blue double-muscle cattle, *Meat Science*, 61 (1), 91-102.
- OLSON D.G. et PARRISH F.C, 1977. Relationship of myofibril fragmentation index to measures of beefsteak tenderness. *Journal of Food Science*, 42 (2), 506-509.
- OUALI A. et TALMANT A., 1990. Calpains and calpastatin distribution in bovine, porcine and ovine skeletal muscles. *Meat Science*, 28, 331-348.
- OUALI A. et VALIN C., 1981. Effect of lysosomal enzymes and Ca-ANP (Calcium Activated Neutral Proteinase) on the myofibrillar ATPase activities. Relationship with the aging changes. *Meat Science*, 5, 233.
- OUALI A., 1992. Proteolytic and physiochemical mechanisms involved in meat texture development. *Biochimie*, 74, 251-265.
- OUALI A., 2005. Communiqué INRA, d'après ZAMORA F. et al (2005). Serine peptidase inhibitors, the best predictor of beef ageing amongst a large set of quantitative variables.
- OUALI A., HERRERA-MENDEZ C.H., BECILA S., et BOUDJELLAL A., 2005. Une nouvelle donne pour la compréhension de la maturation des viandes. *Viandes et Produits Carnés*, 24 (6), 205-213.
- OURY M.P. et al, 2006. Différenciation de la qualité sensorielle des viandes par le mode de conduite chez la genisse charolaise. *Rencontre Recherche Ruminants*, 13, 313-316.
- OZAWA S. et al, 2000. The characteristics of muscle fibre types of longissimus thoracis muscle and their influences on the quality and quantity of meat from Japanese black steers. *Meat Science*, 54, 65-70.
- PAGE B.T. et al, 2002. Evaluation of single-nucleotide polymorphism in CAPN1 for association with meat tenderness in cattle. *Journal of Animal Science*, 80, 3077-3085.
- PARK B. et al, 1998. Near-infrared reflectance analysis for predicting beef longissimus tenderness. *Journal of Animal Science*, 76, 2115-2120.
- PARRISH F.C., VENDELL C.J., et CULLER R.D., 1979. Effect of maturity and marbling on the myofibril fragmentation index of bovine longissimus muscle. *Journal of Food Science*, 44, 1668.
- PEARSE A.G.E., 1968. *Histochemistry : theoretical and applied*, 1, 3^{ème} édition, Chirchill, Londre.
- PEDERSEN M.E. et al, 2001. Decorin and fibromodulin expression in two bovine muscles (*M. Semitendinosus* and *M. Psoas major*) differing in texture. *J Muscle Foods*, 12, 1-17.
- PICARD B., BARBOIRON C., DURIS M.P., GAGNIERE H., JURIE C. et GEAY Y., 1999. *Meat Science*, 53, 1-7.
- PICARD B., HOCQUETTE J.F., BORNES F., BRAZI S., VERMOREL M. et GEAY Y., 1994. In : *Energy metabolism of farm animals*, Aguilera Editor, EAAP Publication, 76, 97-100.
- PICARD B., JURIE C., CASSAR-MALEK I., HOCQUETTE J.F., 2003. Typologie et ontogénèse des fibres musculaires chez le bovin. *INRA Productions Animales*, 16, 125-131.
- PLESH O., BISHOP B. et Mc CALL Jr W.D., 1985. *Experimental Neurology*, 92, 502-512.

- PURSLOW P.O, 1991. Measuring meat texture and understanding its structural basis. In *Feeding and the Texture of Food*, pp 37-56, Cambridge University Press, New York.
- PURSLOW P.P, 1985. The physical basis of meat texture: observations on the fracture behaviour of cooked bovine M. Semitendinosus. *Meat Science*, 12, 39-60.
- RENAND G., PICARD B., TOURAILLE C., BERGE P. et LEPETIT J., 2001. Relationships between muscle characteristics and meat quality traits of young Charolais bulls. *Meat Science*, 59, 49-60.
- ROBERTSON J., RATCLIFF D., BOUTON P.E., HARRIS P.V., et SHORTHOSE W.R, 1984. Effect of cooking temperature and animal age on the shear properties of beef and buffalo meat. *J. Food Sci.*, 49, 1163-1177.
- RODBOTTEN R. et al, 2000. Prediction of beef quality attributes from early post mortem near-infrared reflectance spectra. *Food chemistry*, 69, 427-436.
- RODBOTTEN R. et al, 2001. Prediction and classification of tenderness in beef from non-invasive diode array detected near spectra. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 9, 199-210.
- ROZE S., 2008. Vérification des performances du QualitySpect® BT à mesurer en ligne la tendreté de la viande bovine. Programme d'étude Institut de l'Elevage, INTERBEV, Office de l'Elevage, CR 170832011, juin 2008.
- SALE P. et al, 1984. A sinusoidal compression system to study rheological properties of foods in transient state. *Journal of Texture Studies*, 15, 103-114.
- SALE P., 1971. Evolution de quelques propriétés mécaniques du muscle pendant la maturation. *Proceeding of the 17th European Meeting of meat research Workers, Bristol*, 6, 11.
- SAVELL J.W. et al, 1987. National consumer retail beef study : palatability evaluations of beef loin steaks that differed in marbling. *J. Food Sci.*, 52, 517-532.
- SAVELL J.W. et al, 1994. Standardized Warner-Bratzler shear force procedures for genetic evaluation [Online]. Available URL : <http://savell-j.tamu.edu/shearstand.html>
- SEGARDS R.A. et al, 1974. Textural characteristics of beef muscles. *Journal of Texture Studies*, 5, 283-297.
- SEIDEMAN S.C., KOOHMARAIE M. et CROUSE J.W., 1987. Factors associated with tenderness in young beef. *Meat Science*, 20, 281-291.
- SENTANDREU M.A., CHANTREAU O., AUBRY L., LEVIEUX D. et OUALI A., 2002b. Quantification des protéases musculaires par immunochimie. *Viandes et Produits Carnés Hors série*, 9èmes JSMTV, Clermont-Ferrand.
- SENTANDREU M.A., COULIS G. et OUALI A., 2002a. Role of muscle endopeptidases and their inhibitors in meat tenderness. *Trends Fd. Sci. Technol.*, 13 (12), 400-421.
- SHACKELFORD S., CASAS E., SMITH T., WHEELER T. et KOOHMARAIE M., 2007. The μ -calpain and calpastatin tenderness markers are predictive of tenderness variation among

samples obtained from commercial US select beef carcasses. 60th Reciprocal Meat Conference, Brookings, 17-20 juin 2007.

SHACKELFORD S.D. et al, 1991. Identification of threshold levels for Warner-Bratzler shear force in beef top loin steaks. J. Muscle Foods, 2, 289-296.

SHACKELFORD S.D. et al, 1994. Heritabilities and phenotypic and genetic correlations for bovine postrigor calpastatin activity, intramuscular fat content, Warner-Bratzler shear force, retail product yield and growth rate. Journal of Animal Science, 72, 857-863.

SHACKELFORD S.D. et al, 1995. Relationship between shear force and trained sensory panel tenderness ratings of 10 major muscles from *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle. J. Anim. Sci., 73, 3333-3340.

SHACKELFORD S.D. et al, 1997a. Tenderness classification of beef : I. Evaluation of beef longissimus Warner-Bratzler shear force at 1 or 2 days post-mortem as a predictor of aged beef tenderness. J. Anim. Sci., 75, 2417-2422.

SHACKELFORD S.D. et al, 1997b. Repeatability of tenderness measurements in beef round muscles. J. Anim. Sci., 75, 2411-2416.

SHACKELFORD S.D. et al, 1999. Tenderness classification of beef : II. Design and analysis of a system to measure beef longissimus shear force under commercial processing conditions. J. Anim. Sci., 77, 1474-1481.

SHACKELFORD S.D. et al, 2001. Consumer impressions of Tender Select beef. Journal of Animal Science, 79, 2605-2614.

SHACKELFORD S.D. et al, 2004. Development of optimal protocol for visible and near-infrared reflectance spectroscopic evaluation of meat quality. Meat Science, 68, 371-381.

SHACKELFORD S.D. et al, 2005. On-line classification of US Select beef carcasses for *longissimus* tenderness using visible and near-infrared reflectance spectroscopy. Meat Science, 69, 409-415.

SHAMA F. et SHERMAN P., 1973. J. Texture Stud., 4, 344.

SHEEHAN E.M., WALSH F.M., MORRISSEY P.A. et DELAHUNTY C.M., 1997. Time-intensity, electromyography and mechanical measurements of roast beef toughness, influenced by cooking rate and degree of doneness. Meat Quality, ICoMST 43rd, 604-605.

SMITH G.C. et al., 1982. Relationship of USDA maturity groups to palatability of cooked beef. J. Food Sci., 47, 1100-1118.

SRERE P.A., 1969. Citrate synthetase. In : Methods in enzymology, 13, Academic Press, New-york, 11-16.

STANLEY D.W. et al, 1971. Evaluation of certain physical properties of meat using a universal testing machine. Journal of Food Science, 36, 256-260.

SUDRE K. JURIE C., LISTRAT A., LEROUX C., AUFRAY C., RENAND G. ? MARTIN P. et HOCQUETTE J.F., 2002. Molecular and biochemical muscle characteristics putatively associated with meat quality in Charolais bulls divergently selected for growth. 53rd Annual meeting of the European Association of Animal Production, Le Caire, Egypte, 8, 148.

- SWATLAND H.J. et al 1996. Fluorimetry of connective tissue in beef, relative to direction measurement. *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.*, 29, 536-541.
- SWATLAND H.J. et al, 1991. Fluorimetry via quartz-glass rod for predicting the skin content and processing characteristics of poultry meat slurry. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 26, 373-380.
- SWATLAND H.J. et al, 1995a. Correlations of mature beef palatability with optical probing of raw meat. *Food Research International*, 28 (4), 403-416.
- SWATLAND H.J. et al, 1995b. UV fiber-optic probe measurements of connective tissue in beef correlated with taste panel scores for chewiness. *Food Research International*, 28 (1), 23-30.
- SWATLAND H.J. et al, 1998. Possibilities for predicting taste and tenderness of broiled beef steak using an optical-electromechanical probe. *Meat Science*, 50, 1-12.
- SWATLAND H.J. et FINDLAY C.J., 1997. On-line probe prediction of beef toughness, correlating sensory evaluation with fluorescence detection of connective tissue and dynamic analysis of overall toughness. *Food Quality and Preference*, 8 (3), 233-239.
- SWATLAND H.J., 1980. Anisotropy and post-mortem changes in the electrical resistivity and capacitance of skeletal muscle. *Journal of Animal Science*, 50 (1), 67-74.
- SWATLAND H.J., 1987a. Fiber optic reflectance and auto-fluorescence of bovine elastin and differences between intramuscular and extramuscular tendons. *J. Anim. Sci.*, 64, 1038-1042.
- SWATLAND H.J., 1987b. Measurement of the gristle content in beef by macroscopic ultraviolet fluorimetry. *J. Anim. Sci.*, 65, 158-164.
- SWATLAND H.J., 1987c. Auto fluorescence of adipose tissue measured with fiber optics. *Meat Science*, 19, 277-284.
- SWATLAND H.J., 1993. An anomaly in the effect of temperature on collagen fluorescence in beef. *Food Res. Int.*, 26, 271-276.
- SWATLAND H.J., 1997. Relationship between the backscatter of polarized light and the fiber-optic detection of connective tissue fluorescence in beef. *J. SciFood Agric.*, 74, 45-49.
- SWATLAND H.J., 2000. Connective and adipose tissue detection by simultaneous fluorescence and reflectance measurements with an on-line meat probe. *Food Res. Int.*, 33, 749-757.
- TAYLOR R.G., GEESINK G.H., THOMPSON V.F., KOOHMARAIE M. et GOLL D.E., 1995. Is Z-disk degradation responsible for post-mortem tenderization ? *Journal of Animal Science*, 21, 1351-1367.
- TORRESCANO G. et al, 2000. 46th International Congress of meat Science and Technology, 2, Argentine, 428-429.
- TORRESCANO G. et al, 2003. Shear values of raw samples of 14 bovine muscles and their relation to muscle collagen characteristics. *Meat Science*, 64, 85-91.
- TOURAILLE C., AURIER B., LEPETIT J. et BAYLE M.C., 1990. Maturation de la viande bovine : évaluation par des méthodes mécaniques et sensorielles et par des

consommations. Viandes et Produits Carnés, 11 (6, 6 bis, 6 ter), Novembre-décembre, 291-292.

TUMA H.J., VENABLE J.H., WUTHIER P.R. et HENRICKSON R.L., 1962. Relationship of fiber diameter to tenderness and meatiness as influenced by bovine age. *Journal of Animal Science*, 21, 33-36.

VAN VLECK L.D. et al, 1992. Estimated breeding values for meat characteristics of crossbreed cattle with an animal model. *Journal of Animal Science*, 70, 363-371.

VENEL C. et al, 2001. Prediction of tenderness and other quality attributes of beef by near infrared reflectance spectroscopy between 750 and 1100 nm ; further studies. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 9, 185-198.

VOISEY P.W. 1971. The Ottawa texture measuring system. *J. Can. Inst. Food Sci. Technol.*, 4, 91-103.

VOISEY P.W. et LARMOND E., 1977. *J. Can. Inst. Food Sci. Technol.*, 10 (4), 307.

VOISEY P.W., 1975. *Journal of Texture Studies*, 6, 253.

VOISEY P.W., 1976. Engineering assessment and critique of instruments used for meat tenderness evaluation. *Journal of Texture Studies*, 7, 11-48.

VOYLE C.H., 1971. Sarcomere length and meat quality. *Proceeding of 17th European Meeting of Meat Research Workers*, Bristol, UK, 95.

WARNER K.F., 1928. Progress report of the mechanical test for tenderness of meat. *Ann. Proc. Amer. Soc. Animal Prod.*, 21, 114.

WARNER K.F., 1952. Adventures in testing meat for tenderness. *Proc. Recip. Meat Conf.*, 5, 156-160.

WEBER A. et al, 1988. Computerized laser refractometer for routine measurements of sarcomere lengths in meat. *Journal of Food Science*, 53, 691-695.

WHEELER T.L. et al, 1994. Effects of cooking and shearing methodology on variation in Warner-Bratzler shear force values in beef. *J. Anim. Sci.*, 72, 2325-2330.

WHEELER T.L. et al, 1996. Sampling, cooking, and coring effects on Warner-bratzler shear force values in beef. *J. Anim. Sci.*, 74, 1553-1562.

WHEELER T.L. et al, 1997a. A comparison of Warner-Bratzler shear force assessment within and among institutions. *J. Anim. Sci.*, 75, 2423-2432.

WHEELER T.L. et al, 1997b. Standardizing collection and interpretation of Warner-Bratzler shear force and sensory tenderness data. *Proc. Recip. Meat Conf.*, 50, 68-77.

WHEELER T.L. et al, 1998. Cooking and palatability traits of beef longissimus steaks cooked with a belt grill or an open hearth electric broiler. *Journal of Animal Science*, 76, 2805-2810.

WHEELER T.L. et al, 2007. Noninvasive prediction of beef longissimus tenderness. *Proceedings 60th Reciprocal American Meat Science Association Conference*, 17-20 juin, Brookings, SD.

WHEELER T.L., CROUSE J.D. et KOOHMARAIE M., 1992. The effect of post-mortem time of injection and freezing on the effectiveness of calcium chloride for improving beef tenderness. *Journal of Animal Science*, 70, 3451-3457.

WHIPPLE G., KOOHMARAIE M., DIKEMAN M.E. et CROUSE J.D., 1990. *Journal of Animal Science*, 68, 4193-4199.

WHITE S.N., CASAS E., WHEELER T.L., SHACKELFORD S.D., KOOHMARAIE M., RILEY D.G., CHASE C.C., JOHNSON D.D., KEELE J.W. et SMITH T.P.L., e2005. A new single nucleotide polymorphism in CAPN1 extends the current tenderness marker test to include cattle of *bos indicus*, *bos taurus*, and crossbred descent. *Journal of Animal Science*, 83, 2001-2008.

WOLD J.P., 2000. Rapid quality assessment of meat and fish by using near-infrared spectroscopy and image analysis. PhD thesis, Agricultural University of Norway, 130 pp.

ZAMORA F., DEBITON E., LEPETIT J., LEBERT A., DRANSFIELD E. et OUALI A., 1996. Predicting variability of ageing and toughness in beef M. Longissimus lumborum et thoracis. *Meat Science*, 43 (3/4), 321-333.

ZIMOCH J. et GULLETT E.A., 1997. Temporal aspects of perception of juiciness and tenderness of beef. *Food Quality and Preference*, 8 (3), 203-211.

Annexes

Annexe 1 : Document synthétique pour évaluer les méthodes de mesure

Grille d'évaluation des publications sur les méthodes de mesure

Caractérisation de la source

Publication :

Auteurs :

Pays et date :

Produits :

Caractérisation de l'essai réalisé

Méthodes comparées :

Animaux et effectifs :

Muscles et effectifs :

Moment de la mesure :

Méthodo essai :

Caractérisation des résultats obtenus

Méthode(s) statistique(s) mise(s) en œuvre :	Résultats (corrélations, concordances...) :

Critiques

Avantages	Inconvénients

Grille d'évaluation des méthodes de mesure de la tendreté et du niveau de maturation

Méthode testée vs méthode de référence

Méthode	testée	de référence
Nom		
Principe		
Critère mesuré		
Composante(s) de la tendreté évaluée(s)		
Mesure tendreté / maturation		
Directe / indirecte		
Instrument / analyse		
Portable / non		
Encombrant / non		
Résistant / fragile		
Automatique / manuel		
Coût méthode		

Conditions de mise en oeuvre

Niveau d'application :

- terrain / laboratoire :
- animal / carcasse / découpe :
- type muscle :
- taille, poids, volume échantillon :

Etat échantillon :

- frais / congelé :
- cru / cuit :
- broyé / en l'état :

Mise en oeuvre :

- destructive / non :
- délais prélèvement/mesure :
- conditions prélèvement/préparation échantillons :
- niveau de facilité :
- durée mesure :
- délais de réponse :
- nombre de répétitions :
- dangerosité :
- multi-usages :

⇒ degré « d'opérationnabilité »

Caractérisation du résultat

Expression du résultat :

- sensoriel / instrumental :
- absolu / relatif :
- objectif / subjectif :
- interprétation simple / non :

Performance ou pouvoir prédicteur :

Source	Publication 1	Publication 2	Publication 3	Publication n	...
Intensité de liaison					
Fidélité (répétabilité et reproductibilité)					
Justesse					
Exactitude					
Sensibilité					
⇒ Précision (fiabilité)					
Représentativité de l'échantillonnage					

Conclusion

Avantages de la méthode – Points +	Inconvénients de la méthode – Points -
Quand utiliser cette méthode ?	Quand rejeter cette méthode ?

⇒ Pertinence du critère mesuré selon l'objectif recherché :

Glossaire

1. Grille d'évaluation des publications

Méthodes comparées : méthode de mesure testée et méthode de référence prise en comparaison.

Animaux et effectifs : ensemble des caractéristiques des animaux considérés dans l'essai (catégorie, race...) et nombre par lot.

Muscles et effectifs : ensemble des caractéristiques des muscles considérés dans l'essai (type de muscle, partie prélevée...) et nombre par carcasse.

Moment de la mesure : délai entre le prélèvement et la mesure (temps de maturation si mûré, temps de congélation si congelé...).

Méthodo essai : protocole détaillé de l'essai réalisé, modalités comparées...

2. Grille d'évaluation des méthodes de mesure

Méthode testée vs méthode de référence

Critère mesuré : désignation du paramètre mesuré (ex : collagène, taille des fibres, force de compression...).

Composante(s) de la tendreté évaluée(s) : la méthode permet-elle d'évaluer la composante conjonctive ou la composante musculaire.

Mesure tendreté / maturation : la méthode considérée permet-elle de mesurer le niveau de tendreté en tant que tel du morceau, ou le niveau de maturation du morceau.

Directe / indirecte : la méthode permet-elle de mesurer directement le critère de qualité initialement recherché (la tendreté) ou à l'inverse de mesurer une autre caractéristique utilisée comme un indicateur du critère recherché.

Instrument / analyse : la mesure est-elle réalisée grâce à un appareil (ex : texturomètre) ou grâce à une analyse (ex : jugement sensoriel, dosage chimique).

Portable / non : l'outil de mesure est-il portatif ou non.

Encombrant / non : l'outil de mesure est-il volumineux, lourd... ou non.

Résistant / non : l'outil de mesure est-il sensible à des conditions de mesure particulières (température, humidité...).

Automatique / manuel : l'outil permet-il de prendre la mesure automatiquement ou nécessite-t-il l'intervention d'un ou plusieurs opérateurs.

Coût méthode : estimation du coût global (investissement initial + frais de fonctionnement) de la méthode de mesure (achat du matériel, coût de mise en œuvre, coûts liés aux prélèvements de viande...).

Conditions de mise en oeuvre

Niveau d'application

Terrain / laboratoire : la méthode est-elle ou pourrait-elle être opérationnelle sur le terrain (ex : en routine dans une structure d'abattage) ou uniquement praticable en laboratoire.

Animal / carcasse / découpe : la mesure est-elle réalisée au niveau de l'animal vivant, de la carcasse entière, d'un muscle après découpe...

Type muscle : la mesure est-elle réalisée sur tous les types de muscles, seulement sur certains (lesquels), seulement sur des parties de muscle (lesquelles)...

Taille, poids, volume échantillon : caractéristiques des échantillons mesurés.

Mise en oeuvre

Destructive / non destructive : une fois appliqué sur le matériau (échantillon servant pour la mesure), l'outil de mesure peut-il être utilisé une seconde fois sur le même matériau, ou non. Si non, le niveau de destruction pourrait être évalué selon un système de points attribués en considérant le lieu de prélèvement, la quantité nécessaire à prélever...

Délai prélèvement/mesure : pour être fiable et pertinente, la méthode implique-t-elle un délai minimum ou maximum à respecter entre le prélèvement de l'échantillon et la mesure.

Conditions prélèvement/préparation échantillon : la méthode implique-t-elle des étapes particulières (broyage de l'échantillon par exemple).

Niveau de facilité : le niveau de facilité de mise en oeuvre de la méthode pourrait être évalué selon un système de points attribués à chaque étape constituant la mesure :

- facilité d'installation ou de mise en place de la méthode de mesure (avec considération du coût si adaptations à réaliser et réalisables).
- facilité de récupération ou d'accessibilité des échantillons à mesurer.
- facilité de préparation des échantillons.
- facilité de réalisation de la mesure (utilisation par l'opérateur ou adaptations à réaliser pour une mesure automatique).

Durée mesure : temps nécessaire pour réaliser la mesure.

Délai de réponse : temps nécessaire pour disposer du résultat de la mesure.

Nombre de répétition : nombre de mesure minimum à prendre pour 1 échantillon permettant d'assurer une bonne fiabilité du résultat pour l'échantillon considéré.

Dangerosité : la mise en oeuvre de la mesure implique-t-elle des manipulations à risque.

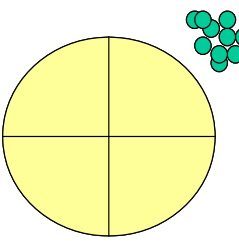
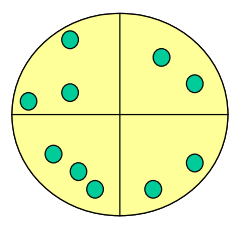
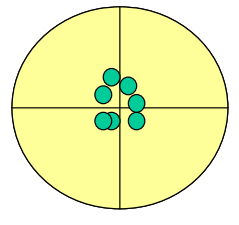
Multi-usage : la méthode de mesure permet-elle de mesurer en même temps d'autres paramètres de qualité de la viande (teneur en lipide, couleur...).

Degré « d'opérationnabilité » : le degré « d'opérationnabilité » de la méthode pourrait être évalué selon un système de points attribués à chaque critère listé ci-avant.

Caractérisation du résultat

Pouvoir prédicteur : capacité d'une méthode indirecte à rendre compte plus ou moins bien du critère initialement recherché. Notion qui intègre la précision de la méthode et l'intensité de liaison entre le critère mesuré et le critère recherché.

Intensité de liaison : force de la relation existant entre le critère mesuré et le critère recherché (corrélations, correspondances...).

<p>Fidélité : outil de mesure répétable et reproductible. On appelle répétabilité l'aptitude d'une méthode à redonner un résultat identique lors d'une répétition effectuée dans les mêmes conditions expérimentales. On appelle reproductibilité l'aptitude d'une méthode à redonner un même résultat lors d'une répétition au cours de laquelle au moins une condition expérimentale a été modifiée (ex : mesure réalisée par un autre opérateur, ou avec un autre appareil du même type,...).</p>	
<p>Justesse : outil de mesure dont la moyenne des indications données (moyenne des mesures réalisées) est très voisine de la vraie valeur de la grandeur à mesurer.</p>	
<p>Exactitude : outil de mesure dont les indications individuelles données (mesures individuelles réalisées) sont très proches de la vraie valeur de la grandeur à mesurer. Une mesure est exacte lorsqu'elle est simultanément fidèle et juste.</p>	
<p>Sensibilité : plus petite valeur ou écart détectable par la méthode de mesure (seuil de détection).</p>	

Précision : la précision intègre la fidélité, la justesse, l'exactitude et la sensibilité.

Fiabilité : une mesure est fiable lorsqu'elle est exacte et sensible, c'est-à-dire lorsqu'elle est précise.

Représentativité : à quel degré la méthode de mesure caractérise-t-elle la tendreté réelle du muscle, de la carcasse, de la population... La représentativité pourrait être évaluée selon un système de points attribués en considérant la taille de l'échantillon mesuré, le nombre de répétitions,...

Absolu / relatif : le résultat de la mesure a-t-il une signification individuelle (absolu) ou, au contraire, faut-il le positionner par rapport à un autre résultat pour qu'il ait un sens (relatif).

Sensoriel / instrumental : le résultat de la mesure rend-t-il compte d'une perception issue d'un ou plusieurs des 5 sens (vue, ouïe, toucher, odorat, goût) (sensoriel) ou non (instrumental).

Objectif / subjectif : le résultat est-il impartial et indépendant de toute interprétation (objectif) ou, à l'inverse, fait-il intervenir des jugements individuels susceptibles de varier selon la personnalité de chacun (subjectif).

Interprétation simple / non : le résultat est-il directement disponible ou nécessite-t-il une transformation préalable (équation de prédiction, expression du résultat avec plusieurs paramètres à combiner,...).

Pertinence du critère mesuré selon l'objectif recherché : appréciation globale de la méthode considérant l'ensemble des critères listés ci-avant. En effet, selon le type de méthode, ses conditions de mise en œuvre, et la caractérisation de son résultat, une méthode peut s'avérer plus ou moins pertinente à utiliser en fonction du contexte et de l'objectif à atteindre. Par exemple, une méthode instrumentale qui serait très fiable, objective, simple d'utilisation... mais qui nécessiterait de prélever 3 kg de viande sur une carcasse, ne serait pas pertinente dans un contexte de détermination de la tendreté en routine pour orienter les carcasses vers des circuits de distribution spécifiques.

Annexe 2 : Quelques exemples de protocoles d'analyse sensorielle mis en œuvre selon les études

Référence	Type d'analyse	Nombre de panélistes	Descripteurs	Echelle de notation	Taille des échantillons	Cuisson des échantillons
LIU et al, 2003	descriptive mode monadique 8 sessions 2 répétitions	7 membres entraînés	1 descripteur : note de tendreté	échelle non structurée de 1 à 5 (5 = tendreté max)	2,54 x 1,27 x 1,27 cm	Sur grill à 71°C à cœur (AMSA, 1995)
SHACKELFORD et al, 2005	descriptive 3 répétitions	8 membres entraînés (CROSS et al, 1978) répétabilité = 0,87 (WHEELER et al, 1998)	1 descripteur : note de tendreté	échelle non structurée de 1 à 8 (8 = tendreté max)	2,54 x 1,3 x 1,3 cm	Sur grill (WHEELER et al, 1998)
MATHEVON et al, 1995	descriptive 3 répétitions	14 membres entraînés	5 descripteurs : dureté, texture des fibres, jutosité, facilité et durée de mastication	np	2 x 1,5 x 1 cm	Bain-marie de 45 à 80°C (viande sous vide)
DUIZER et al, 1993	descriptive 4 répétitions	11 membres entraînés	2 descripteurs : force et temps de mastication ²⁰	échelle non structurée de 1 à 10 selon CSA (FINDLAY et al, 1986) (10 = valeur max de force ou de temps)	cubes de 1,2 cm	Bain-marie à 67,5°C
MATHONIERE et al, 1996	descriptive 3 répétitions	11 membres entraînés	5 descripteurs : élasticité, tendreté initiale et globale, jutosité, durée en bouche	échelle non structurée de 0 à 10 (10 = tendreté max)	cubes de 1,5 cm	Bain-marie à 60 et 80°C (viande sous vide)
Qualvigène	descriptive mode monadique	3 jury de 12 membres entraînés	4 descripteurs : tendreté, jutosité, flaveur, cuisson	échelle non structurée de 0 à 100		Sur grill selon la modalité « saignante » française
HILDRUM et al, 1994	descriptive 1 répétition	9 membres entraînés	3 descripteurs : dureté, tendreté, jutosité	échelle non structurée de 1 à 9 (9 = valeur max)	tranches de 3,5 cm	Bain-marie 50 min à 70°C (viande sous vide)

²⁰ Force de mastication = tendreté perçue en bouche après 3 mastications.

Temps de mastication = temps nécessaire pour mastiquer l'échantillon en entier, de la première bouchée jusqu'à l'ingestion.

Annexe 3 : Quelques exemples de protocoles de time-intensité mis en œuvre selon les études

Référence	Muscle étudié	Taille des échantillons	Cuisson des échantillons	Nombre de panélistes	Notation	Nombre et catégorie des animaux	Nombre d'échantillons
DUIZER et al, 1996	LD 7 jours de maturation	Cubes de 1,2 cm	20 min dans bain-marie à 67,5°C	7 membres entraînés	Enregistrement toutes les 70 s	5 vaches entre 12 et 20 mois	1 échantillon (3 répétitions) par 5 modalités (âge, carcasse et alimentation animaux)
DUIZER et al, 1993	PS LD ST SM	Cubes de 1,2 cm	Bain-marie à 67,5°C (pour une viande à 65°C)	11 membres entraînés	Enregistrement toutes les 45 s (échelle de 60 pixels), selon le CSA (FINDLAY et al, 1986)	1 animal	1 échantillon (4 répétitions) par 4 modalités (muscles)
DUIZER et al, 1994	ST	Cubes de 1,2 cm	Bain-marie à 67,5°C (pour une viande à 65°C)	9 membres entraînés	Enregistrement toutes les 70 s selon le CSA	8 animaux	1 échantillon (4 répétitions) par 8 modalités (engraissement et alimentation animaux)
SHEEHAN et al, 1997	ST 21 jours de maturation	-	Rôti au four de 160 à 180°C (pour une viande de 60 à 80°C)	3 membres 5 mesures / modalité	Enregistrement toutes les 70 s selon BUTLER et al (1996)	-	1 échantillon (3 répétitions de cuisson) par 9 modalités (3 températures de cuisson du four et 3 internes à la viande)

LD = long dorsal ; PS = Psoas Major ; ST = semitendineux ; SM = jarret arrière

Annexe 4 : Quelques exemples de protocoles d'électromyographie mis en œuvre selon les études

Référence	Muscle étudié	Taille des échantillons	Cuisson des échantillons	Nombre de panélistes	Réponses collectées	Nombre et catégorie des animaux	Nombre d'échantillons
DUIZER et al, 1996	LD maturation : 7j	cubes de 1,2 cm	20 min dans bain-marie à 67,5°C	7 membres entraînés	toutes les 0,06 s pour les masseters	5 vaches entre 12 et 20 mois	1 échantillon (3 répétitions) par 5 modalités (âge, carcasse et alimentation animaux)
MATHEVON et al, 1995	SM maturation : 18j	2 x 1,5 x 1 cm	30 min dans bain-marie de 45 à 80°C (viande sous vide)	14 membres entraînés	pour les masseters et les temporaux	1 vache de 7 ans	1 échantillon (4 répétitions) par 6 modalités (cuisson)
DUIZER et al, 1994	ST	Cubes de 1,2 cm	Bain-marie à 67,5°C (pour une viande à 65°C)	9 membres entraînés	toutes les 0,06 s pour les masseters	8 animaux	1 échantillon (4 répétitions) par 8 modalités (engraissement et alimentation animaux)
MATHONIERE et al, 1996	SM ST 0, 2 et 14 jours de maturation	Cubes de 1,5 cm	Bain-marie à 60 et 80°C (viande sous vide)	11 membres entraînés	pour les masseters et les temporaux	1 vache âgée	1 échantillon (3 répétitions) par 12 modalités (muscle, temps de maturation et cuisson)
SHEEHAN et al, 1997	ST 21 jours de maturation	-	Rôti au four de 160 à 180°C (pour une viande de 60 à 80°C)	3 membres 5 mesures / modalité	pour les masseters	3 animaux	1 échantillon (3 répétitions de cuisson) par 9 modalités (3 températures de cuisson du four et 3 internes à la viande)

LD = long dorsal ; SM = semimembraneux ; ST = semitendineux

**Annexe 5 : Quelques exemples de protocoles de mesure des forces de cisaillement
mis en œuvre selon les études**

Méthode de mesure	Taille et cuisson des échantillons	Nombre de répétitions	Déplacement et épaisseur lame	Configurations utilisées	Paramètres calculés	Exemples de références utilisant ce protocole
SALE, 1971	cubes de 2 x 1 x 1 cm - cuisson en bain-marie de 45 à 80°C	SM et ST 15 par échantillon	60 mm/min 3 cm	- longitudinale (rabot parallèle aux fibres) - transverse (rabot perpendiculaire aux fibres)	A partir des diagrammes de force déplacement : - force max (N) - énergie (J)	MATHEVON et al, 1995 MATHONIERE et al, 1996
Warner-Bratzler	cuisson « saignante » française	LD 10 à 12 par échantillon	np	np	contrainte max énergie	Etude Qualvigène
Warner-Bratzler	cubes de 1 cm - cuisson en bain-marie à 70°C	LD np	np	longitudinale (parallèle aux fibres)	contrainte max énergie	CAMPO et al, 2000
Warner-Bratzler (SHACKELFORD et al, 1999)	tranches 2,54 x 1 cm cuites à 65°C à cœur (WHEELER et al, 1998)	LD np	np	np	force max	SHACKELFORD et al, 2005 WHEELER et al, 2007
Warner-Bratzler	cubes de 1 cm – cuisson sous vide en bain-marie 50 min à 70°C	LD 5 par échantillon	np	np	force max	HILDRUM et al, 1994
Warner-Bratzler	« carotte » de 1,27 cm de diamètre cuit sur grill à 71°C à cœur (AMSA, 1995)	LD 6 par échantillon	4,2 mm/s sur 55 mm 1 mm	perpendiculaire	force max	LIU et al, 2003
Warner-Bratzler	« carotte » de 1,25 cm de diamètre cuit 60 min à 75°C (BARTON-GADE et al, 1994 ; CHRYSTALL et al, 1994)	LT 10 par échantillon	20 cm/min	perpendiculaire	force max	LEROY et al, 2003

LD = long dorsal ; SM = semimembraneux ; ST = semitendineux ; LT = longissimus thoracis

Annexe 6 : Quelques exemples de protocoles de mesure des forces de compression mis en œuvre selon les études

Cellule de mesure	Taille et cuisson des échantillons	Nombre de répétitions	Caractéristiques de la compression	Configurations utilisées	Paramètres calculés	Exemples de références utilisant cette cellule
Méthode INRA (SALE et al, 1984 ; 1986)	cubes de 2 x 1 x 1 cm ou de 1,5 cm cuits	7 à 10 par échantillon	Piston de 1 cm ² Acquisition des données sur une période de 0,2 s	Compression sinusoïdale perpendiculaire aux fibres à 20% (non destructif) et 80% (destructif)	A partir de la courbe de la contrainte exercée : - stress max (N./cm ²) - module de compression (N/cm ²) = pente à l'origine de la courbe	TOURAILLE et al, 1990 MATHEVON et al, 1995 MATHONIERE et al, 1996 ADIV, 2000
Méthode INRA	crus	10 par échantillon	Piston de 1 cm ²	compression perpendiculaire au sens des fibres à 20 et 80% de compression		ADIV, 2002 FRANCIA et al, 2002
Méthode INRA	« frites » 1 cm d'épaisseur x 3 à 5 cm de long crus	10 par échantillon	H dent = 20,7 mm ; H max déplacement = 19,5 mm ; V compression = 50 mm/min Acquisition des données : 20 points/s	compression perpendiculaire au sens des fibres à 20 et 80%		Etudes de l'Institut de l'Elevage
TPA	cubes de 1,2 cm cuits	3 par échantillon	V compression = 8,5 cm/min	2 cycles de compression jusqu'à déformation à 70% par rapport au poids original.	- dureté 1 ^{ère} et 2 ^{ème} compression (N) - fracturabilité (N) - cohésion - élasticité (mm) - masticabilité (J) - adhésivité (-10 ³ J).	DUIZER et al, 1996
Méthode INRA (LEPETIT et BUFFIERE, 1995)	cubes de 1 cm crus	np	Piston de 1 cm ²	compression linéaire	- stress à 20% - stress à 80% - stress max	CAMPO et al, 2000
	cubes de 1,5 x 1 x 1 cm crus	np	Piston de 1 cm ² V = 50 mm/min	perpendiculaire au sens des fibres à 20 et/ou 80%	-stress à 20%	ZAMORA et al, 1996 RENAND et al, 2001

Annexe 7 : Quelques exemples de protocoles de mesure de viscoélasticité mis en œuvre selon les études

Appareil	Taille et cuisson des échantillons	Nombre de répétitions	Caractéristiques de la méthode	Configurations utilisées	Paramètres calculés	Exemples de références utilisant ce protocole
Rhéomètre en mode oscillatoire	Cylindres de 2 cm de diamètre x 1 cm	4 par échantillons	Echantillons pré-tendus à 5% de compression Fréquence = 0,1 Hz Distorsion max = 0,5%	- transverse (fibres parallèles aux plaques) - axiale (fibres perpendiculaires aux plaques)	A partir de la sinusoïde et de la courbe de tension : - modules de stockage et de pertes (10^4 N/m ²) - angle de phase (pertes/stockage)	MATHEVON et al, 1995 MATHONIERE et al, 1996

Annexe 8 : Quelques exemples de protocoles de mesure spectroscopiques mis en œuvre selon les études

Appareil de mesure	Caractéristiques spectroscopiques	Modèle de calibration	Echantillons	Mesures et répétitions	Références
QSBT (LabSpec pro)	Mesure en réflectance (350 à 2500 nm) tête de lecture de 5 cm de diamètre	entre 552 et 930 nm moyenne toutes les 9 longueurs d'onde régression pas à pas puis cross validation pour équation variance pour classements	LD maigres (< 3,4 % de MG selon marbré - SAVELL et al, 1986) muscle entier cru	2 min après grosse coupe pas de répétition	SHACKELFORD et al, 2004 ; 2005
NIRsystems 6500 monochromator	Mesure en réflectance (400-2498 nm) cellules en quartz	entre 400 et 1080 nm intervalle tous les 2 nm moyenne de 32 spectres régression PLS et cross validation pour équation ACP pour classement	LD à 2, 4, 8, 14 et 21j de maturation muscle cru coupé à la taille des cellules	à 5 temps de maturation np	LIU et al, 2003
NIRsystems 6500	Mesure en réflectance - fibre optique de 4 cm ² et cellules en quartz	entre 750 et 1098 nm régression PCR et PLS et cross validation	LD à 1, 2, 7 et 14j de maturation tranches de 2,5 cm crues fraîches	à 4 temps de maturation pas de répétition	BYRNE et al, 1997 ; 1998
Tecator 1225 Infratec	Mesure en transmission	entre 850-1050 nm intervalle tous les 2 nm non concluant	LD à 1, 8 et 14j de maturation tranches de 1,5 cm crues fraîches et congelées	à 3 temps de maturation 5 par échantillon	HILDRUM et al, 1994
InfraAlyzer 500	Mesure en réflectance - cellule en quartz	entre 1100 et 2500 nm intervalle tous les 4 nm régression en composante principale et cross validation	tranches circulaires 4,5 cm de diamètre crus frais et congelés		
Spectromètre Transform Fourier	Mesure en transmission (833-2500 nm) - faisceau de 5 mm de diamètre	entre 935 et 2327 nm Intervalle tous les 1,6 à 6,4 nm - moyenne de 32 spectres Régression PLS (MARTENS et NAES, 1992) et cross validation	LT à 2 et 8j de maturation muscle cru frais de 3 mm d'épaisseur	à 2 temps de maturation 5 par échantillon	LEROY et al, 2003
	Mesure en réflectance (833-2500 nm) - fibre optique		muscle cru frais		

Table des Tableaux

Tableau 1 : Comparaison de l'approche analytique et de l'approche hédonique.....	28
Tableau 2 : Coefficients de corrélations r entre les paramètres du time-intensité et d'autres méthodes de mesure sensorielles de la tendreté	36
Tableau 3 : Notes moyennes de tendreté sensorielle attribuées à chaque partie pour un échantillon de 6 vaches et 6 JB	42
Tableau 4 : Notes moyennes de tendreté sensorielle attribuées à des morceaux de viande classés par niveau de tendreté à l'aide de la pression du pouce.....	42
Tableau 5 : Exemples de corrélations r entre la mesure des forces de cisaillement et d'autres méthodes de mesure de la tendreté	48
Tableau 6 : Influence de la préparation des échantillons sur la répétabilité des mesures de cisaillement par Warner-Bratzler.....	50
Tableau 7 : Différences entre institutions sur les résultats et la répétabilité de mesures de forces de cisaillement Warner-Bratzler selon le protocole appliqué	51
Tableau 8 : Définitions des différentes propriétés du produit calculables à partir de la courbe du profil de la texture de l'échantillon.....	57
Tableau 9 : Exemples de corrélations r entre la mesure de la force de compression selon la méthode INRA et d'autres méthodes de mesure de la tendreté	58
Tableau 10 : Exemples de corrélations r entre l'analyse du profil de la texture et d'autres méthodes de mesure de la tendreté	59
Tableau 11 : Corrélations r entre la mesure de la viscoélasticité et d'autres méthodes de mesure de la tendreté	67
Tableau 12 : Corrélations r entre les mesures spectroscopiques et l'analyse sensorielle	73
Tableau 13 : Corrélations r entre les mesures spectroscopiques et les forces de cisaillement par Warner-Bratzler.....	74
Tableau 14 : Influence des caractéristiques technique de mesure sur la répétabilité des mesures par spectroscopie proche infra-rouge.....	74
Tableau 15 : Exemples de résultats (discrimination ou corrélation r) entre la mesure par spectrofluorescence et d'autres méthodes de mesure de la tendreté	84
Tableau 16 : Corrélations r entre le spectrofluorimètre modulaire ADIV-ENITAC et d'autres méthodes de mesure de la tendreté	85
Tableau 17 : Corrélations r entre les mesures d'impédances sur différents muscles et les mesures de compression à 20% selon la méthode INRA.....	91

Tableau 18 : Exemples de corrélation r entre le dosage du collagène et d'autres méthodes de mesure de la tendreté	98
Tableau 19 : Exemples de corrélation r entre les critères de typage des fibres et d'autres méthodes de mesure de la tendreté	104
Tableau 20 : Exemples de corrélation r entre la surface et le nombre des fibres et d'autres méthodes de mesure de la tendreté	105
Tableau 21 : Exemples de corrélation r entre l'indice de fragmentation myofibrillaire et d'autres méthodes de mesure de la tendreté.....	106
Tableau 22 : Définitions des termes de génomiques	113

Table des Figures

Figure 1 : Les composantes de la tendreté	9
Figure 2 : Profil d'évolution de la dureté du muscle	10
Figure 3 : Eléments déterminants la fiabilité d'une mesure.....	22
Figure 4 : Les 5 sens intervenant dans la perception organoleptique d'un produit	27
Figure 5 : Paramètres de la méthode time/intensity	35
Figure 6 : Cellule de type Warner-Bratzler avec les 2 lames utilisables	47
Figure 7 : Comparaison des différences de tendreté entre muscles selon la mesure des forces de cisaillement par Warner-Bratzler (en blanc) et l'analyse sensorielle (en noir).50	
Figure 8 : Texturomètre et cellule pour la mesure des forces de compression selon la méthode INRA.....	56
Figure 9 : Type de cellule majoritairement utilisée pour l'analyse du profil de texture	56
Figure 10 : Courbe de profil de la texture d'un échantillon.....	57
Figure 11 : Tranche de long dorsal et « frites » préparées pour la mesure des forces de compression selon la méthode INRA.....	61
Figure 12 : Attache Volodkevitch.....	63
Figure 13 : Attache Ottawa.....	65
Figure 14 : Cellule de Kramer	65
Figure 15 : Principe de fonctionnement de la spectrométrie de transmission et de la spectrométrie de réflexion.....	70
Figure 16 : Domaine visible sur spectre électromagnétique	71
Figure 17 : Domaines du spectre électromagnétique en fonction de la longueur d'onde, de la fréquence ou de l'énergie des photons	71
Figure 18 : Les différentes parties du QualitySpec® BT	81
Figure 19 : Réalisation de la mesure aux Etats-Unis et lors de l'expérimentation en France	81
Figure 20 : Capteur 8 électrodes dorées 4 points et capteur 8 électrodes 4 points à aiguilles hypodermiques.....	94
Figure 21 : sonde circulaire 20 électrodes en configuration 2 points	94
Figure 22 : Sonde circulaire couronne	94

Figure 23 : Diagrammes polaires des impédances obtenues avec la sonde circulaire 20 électrodes 2 points et avec la sonde circulaire couronne	95
Figure 24 : Organisation des sarcomères	108

Bibliographie critique des méthodes instrumentales de mesure de la tendreté de la viande bovine

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier d'Interbev et de l'Office de l'Élevage

En viande bovine, la tendreté compte parmi les critères de qualité les plus importants pour le consommateur. Son impact commercial n'est plus à démontrer, et compte tenu de son énorme variabilité, il existe en France une forte demande pour mieux la maîtriser. Malgré les éléments déjà à la disposition des professionnels pour les aider dans ce sens, un problème demeure : la filière ne dispose pas d'outil simple et fiable permettant de mesurer la tendreté de la viande en temps réel. L'analyse sensorielle reste pour beaucoup LA méthode de référence. Elle présente néanmoins des inconvénients de taille ; c'est pourquoi de nombreux travaux ont été réalisés pour mettre au point des méthodes de mesure alternatives, sans que l'on sache vraiment quel est leur pertinence par rapport à l'analyse sensorielle. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail était de réaliser un état des lieux comparatif et critique des méthodes instrumentales de mesure de la tendreté disponibles à ce jour (niveau d'utilisation, précision, fiabilité, coût et facilité de mise en œuvre...). Une grille d'évaluation critique des méthodes de mesure a été mise au point. Toutes les méthodes de mesure de la tendreté recensées au travers de la bibliographie ont été analysées selon cette grille, et l'ensemble des informations sont synthétisées par une fiche caractérisant la méthode, les conditions de sa mise en œuvre, et la fiabilité du résultat donné par rapport à la référence qu'est l'analyse sensorielle. Il existe 3 grandes catégories de méthodes de mesure : les méthodes sensorielles, les méthodes physiques et les méthodes physico-chimiques. Chacune présente des avantages et des inconvénients sur le plan pratique, et une capacité à évaluer la tendreté plus ou moins fiable. Sur ce dernier point, une quatrième catégorie de méthode est apparue au cours de ce travail : les méthodes dites explicatives de la tendreté, c'est-à-dire celles qui ne mesurent pas la tendreté en soi mais des facteurs indicateurs de tendreté. La confusion est fréquente dans les travaux de recherche. Sans grande surprise, aucune méthode ne combine tous les atouts nécessaires pour envisager une mesure de la tendreté en temps réel. L'analyse sensorielle demeure à ce jour la méthode la plus complète pour évaluer la tendreté telle que perçue réellement par le consommateur. Cela dit, selon le contexte, certaines méthodes alternatives peuvent s'avérer opérationnelles. Les fiches synthétiques réalisées dans ce travail pour chaque méthode de mesure apportent l'ensemble des éléments permettant d'aider la filière à choisir en connaissance de cause la méthode de mesure de la tendreté la plus adaptée selon les objectifs recherchés (programme de R&D, démarches qualité, orientation des produits selon les circuits commerciaux...) et les moyens à sa disposition.

collection résultats



Interbev
149 rue de Bercy
75595 Paris CEDEX 12



Office de l'Élevage
12 rue Henri Rol-Tanguy
TSA 30003
93555 Montreuil sous Bois CEDEX



Institut de l'Élevage
149 rue de Bercy
75595 Paris CEDEX 12
www.inst-elevage.asso.fr