# Propriétés rhéologiques du tissu musculaire en compression

# LEPETIT, J. and SALE, P.

Station de Recherches sur la Viande - I.N.R.A. - THEIX - 63122 CEYRAT, France

les propriétés rhéologiques de la viande - 1.N.K.A. Their outer definitions de server riels propriétés rhéologiques de la viande conditionnent ses propriétés senso-tés consus eu tilisés pour évaluer la texture de la viande. Ces tests pour la mesurer de façon précise la résistance du tissu conjonctif, cette structure turation create potentiale d'une viande. Les conditions optimum de ma-de la tendrest en effet la structure conjonctive qui reste l'élément limitant de la tendrest en effet la structure conjonctive qui reste l'élément limitant de la tendrest en effet la structure conjonctive qui reste l'élément limitant de la tendrest en effet la structure conjonctive qui reste l'élément limitant de la viande ainsi que certains traitements technologiques mis en œuvre peu-ven modifier très fortement les caractéristiques rhéologiques de la structure de la tendreté. Il est par conséquent nécessaire d'être en mesure d'analyser faitement les caractéristiques de cette structure. Mus avone

Nous avons entrepris l'analyse du comportement rhéologique de la viande et de ies modifications sous l'influence de paramètres tel que le taux de déforma-les , la vitesse de déformation et le temps de maturation de façon à définir l'ques spécifiques de chacune des structures.

Une première partie concerne le comportement de la viande après maturation, seconde les modifications de ce comportement au cours du processus de rigor de maturation.

l. <u>Comportement</u> rhéologique de la viande maturée

## - Muscles

Puscles
Puscles
Sent muscles ont été prélevés sur chaque animal d'un lot de 4 vaches de réfor-les muscles Pectoralis profundus (PP), Biceps femoris (BF), Semimembranosus (SH), Dissimus dorsi (LD), Triceps brachii (TB), Semitendinosus (ST) et d'eté, Paga major (PM) ont été choisis de façon à disposer d'une large gamme de ten-stockés à 6°C pendant 8 jours.

# - Métho

Méthode les mésures de compression sont effectuées avec le S.A.T.A. (Salé, 1984) sur ment des échantillons parallélipipédiques de 2 x l x l cm. Les échantillons au mo-ment de compression sont maintenus dans un support comportant deux parois muculaires suit parallèle aux parois du support. Ainsi, au cours de la com-pression. L'échantillon est disposé de telle façon que la direction des fibres musulaires soit parallèle aux parois du support. Ainsi, au cours de la com-pression. L'échantillon est disposé de telle façon que la direction des fib-fibres. Chaque échantillon est échantillon est soumis à un cycle de compression à un taux de ont été utilisées :





Evolution de la contrainte maximum  $\P_m, \bullet$  et du facteur d'élasticité  $\Gamma_{t^+} \circ en$  fonction de K pour différents muscles

Evolution of the maximum stress  $\sigma_m,\bullet$  and of the elasticity factor r ,  $\circ$  versus the ratio of compression

- PP
- : Pectoralis profundus : Semimembranosus : Biceps femoris : Psoas major DM
- PM

- 0,1 Hz correspondant à des vitesses maximum de déformation faibles couramment observées dans les tests rhéologiques appliqués à la viande
 10 Hz pour laquelle les vitesses maximum de déformation correspondent à cel-les mises en jeu pendant la mastication.

Chaque détermination à un taux et à une fréquence est une moyenne obtenue à partir de 7 échantillons.

Au cours d'un cycle de compression on mémorise les valeurs de la force en fonc-tion du temps que l'on transfère ensuite à un calculateur. A partir des dia-grammes contrainte-déformation nous avons retenus deux paramètres essentiels :

- La contrainte maximum atteinte au cours d'un cycle (Gm) - Le facteur d'élasticité (rt) définit par le rapport de l'énergie restituée par l'échantillon pendant la phase de remontée de l'outil à l'énergie fourr à l'échantillon pendant la compression. Ce facteur d'élasticité est égal à pour un corps parfaitement élastique et prend la valeur 0 pour un corps vis queux. nie

### - Résultats

Pour l'ensemble des muscles sauf le Psoas major dont le cas sera discuté ultérieurement l'évolution de la contrainte maximum en fonction de K s'effectue de façon semblable en trois phases (figure la, b, c). Pour les faibles déformations de 0,1 à 0,2 la contrainte augmente faiblement avec K. En outre, à faible déformation, tous les muscles présentent une résistance semblable. La contrainte maximum augmente par contre très rapidement dans la zone de déformation do 0,3 à 0,5. Enfin pour des valeurs de K supérieures à 0,6 la contrainte maximum augmente plus faiblement. A déformation élevée K = 0,8 la contrainte maximum diffère beaucoup d'un muscle à l'autre.

Parallèlement à l'évolution de la contrainte on note une variation importante du facteur d'élasticité. Celui-ci présente un maximum dans la phase d'augmenta-tion rapide de la contrainte. A faible déformation l'ensemble de ces muscles présente une élasticité semblable.

Le Psoas major présente également l'ensemble de ces phénomènes mais décalés v-ers les faibles déformations (figure ld). Ainsi, pour ce muscle on observe déjà une élasticité et une contrainte importantes à faible déformation

L'influence de la vitesse de déformation sur la contrainte maximum est très faible et diminue quand le taux de déformation augmente (figure 2). Une augmentation de la vitesse de déformation d'un facteur 100 ne produit au maximum qu'une augmentation de la contrainte d'un facteur 2. L'influence de la vitesse sur le facteur d'élasticité est également très faible, ce paramètre diminue d'environ 10 % quel que soit K lorsque la vitesse augmente d'un facteur 100.



Figure 2 : Influence de la vitesse de déformation sur la contrainte maximum à différents taux de déformation

Influence of the strain-rate on the maximum stress for different ratio of compression  $% \left( {{{\left[ {{{\left[ {{{c_{{\rm{m}}}} \right]}} \right]}_{\rm{m}}}}} \right)$ 

Nous avons montré que le comportement rhéologique du tissu musculaire à faible déformation peut être représenté par un modèle analogique de Kelvin-Voight constitué d'un élément élastique non linéaire et d'un élément de viscosité newtonienne, d'équation :  $\sigma(\epsilon) = \operatorname{Go}\epsilon^m + \eta \, \mathrm{d}\epsilon/\mathrm{d}t$  avec  $\sigma$  contrainte,  $\epsilon$  déformation, Go, n,  $\eta$  paramètres empiriques

L'ajustement de ce modèle aux diagrammes expérimentaux (figure 3) a montré que l'on peut ainsi représenter de façon satisfaisante environ 80 % des comporte-ments observés.



Figure 3 : Exemple d'ajustements du modèle rhéologique sur les courbes contrainte-déformation pour une période de 0,1 seconde

Fitting of the rheological model on stress-strain curves for a period of 0.1 seconde

LD : Longissimus dorsi PP : Pectoralis profundus

#### - Discussion

Ces résultats montrent que le tissu musculaire présente un comportement viscoé-lastique mais essentiellement élastique, en effet, ce comportement n'est que très faiblement influencé par la vitese de déformation.

Le taux de déformation est par contre le paramètre déterminant du comportement rhéologique et les résultats obtenus peuvent s'expliquer comme suit :

A déformation élevée (K = 0,8) les muscles présentent des résistances différen-tes en accord avec leur teneur respective en tissu conjonctif. Par conséquent on peut dire qu'à déformation élevée la contrainte maximum est une mesure de la résistance du tissu conjonctif. Par contre, à faible déformation K = 0,2 les muscles (sauf le PM) présentant des résistances semblables il s'ensuit que les paramètres mesurés à faible déformation ne font pas référence à la structure conjonctive et sont vraisemblablement liées aux caractéristiques de la structu-re myofibrillaire.

La transition brutale que l'on observe dans la zone 0,3 - 0,5 où la contrainte augmente rapidement et où l'élasticité est maximum peut être considérée comme la zone de déformation de l'échantillon pour laquelle le tissu conjonctif com-mence à être étiré et participe ainsi par sa résistance et son élasticité éle-vées au comportement global de l'échantillon. Pour des déformations supérieures à 0,6 le tissu conjonctif doit commencer à se rompre partiellement ce qui limi-te l'accroissement de contrainte et diminue la faculté de récupération de l'é-chantillon donc son élasticité.

La possibilité d'analyser la structure myofibrillaire en utilisant une déforma-tion faible peut être expliquée par le fait que dans les muscles étudiés le ré-seau de conjonctif n'est pas étiré et ne le devient que pour des déformations supérieures à 0,3 - 0,4. Dans le cas particulier Psoas major qui entre en rigor sur la carcasse, en position tendue, le réseau de conjonctif est étiré ce qui expliquerait qu'il participe au comportement de l'échantillon déjà à des défor-mations faibles telle que 0,1.

Nous avons cherché à vérifier si les paramètres G m et rt mesurés à faible dé-formation traduisaient bien effectivement les caractéristiques spécifiques de la structure myofibrillaire. Pour cela nous avons étudié et comparé l'évolution au cours du temps post mortem du comportement à petite et à grande déformation de muscles témoins et stimulés.

II - Evolution post mortem du comportement rhéologique du tissu musculaire

- Muscles

Cette expérience a été effectuée sur les muscles Longissimus dorsi et Semimem-branosus de 6 vaches de réforme. Pour chaque animal une demi-carcasse a été stimulée en haute tension (12,5 Hz, 600 volts) trente minutes après l'abattage. A ce moment les deux demi-carcasses ont été placées à 12°C pendant 6 h. puis stockées en chambre froide à 6°C. Les muscles ont été prélevés 24 heures après l'abattage découpés et mis sous vide.

- Mesures

### - Mesures mécaniques

Les mesures en compression ont été faites avec le S.A.T.A. aux taux K = 0,2 et K = 0,8 à une fréquence de 10 Hz. Pour le Longissimus dorsi un échantillon a été prélevé à 2 h. post mortem sur la carcasse, puis analysé aussitôt, ce muscle a également été testé aux temps 1, 2, 3, 4, 7 et 11 jours. Le Semimembranosus a été testé à 1, 4 et 11 jours post mortem.

## - Mesures biochimiques

Pour un animal, sur le Longissimus dorsi d'une demi-carcasse non stimulée des mesures d'indice biochimique ont été faites par Ouali aux mêmes temps que les mesures rhéologiques, selon une technique décrite par Ouali (1981). Cette tech-nique consiste à mesurer l'activité ATPasique MgCa dépendante de l'actomyosine. Cette activité est étroitement liée à l'état de la liaison entre l'actine et la myosine et permet ainsi de suivre au cours du temps les modifications bio-chimiques de la structure myofibrillaire.

#### Résultats

On note une évolution très similaire, en fonction du temps, de la contrainte à K = 0,2 et de l'indice biochimique de maturation (figure 4).



Figure 4 : Evolution de la contrainte maximum pour K = 0,2 et de l'indice bio-chimique de maturation au cours du temps post mortem

Post mortem evolution of the maximum stress at  $\ensuremath{\kappa}$  = 0.2 and of the biochemical index of maturation

Muscle Longissimus dorsi

Ce paramètre rhéologique permet donc de suivre l'évolution de la résistant myofibrillaire au cours du temps post mortem. Par contre la contrainte relation à K = 0,8 ne permet pas de mettre en évidence le phénomène de rigor et a maturation (figure 5). La contrainte à K = 0,8 reste constante pendant phase post rigor et mesure alors la résistance du tissu conjonctif. Il est ter que dans la phase ante rigor le tissu musculaire présente à grande afre mation une résistance très élevée vraisemblablement liée en partie aux cavaté ristiques myofibrillaires mais dont il est difficile de donner une interré tation. tation.



Figure 5 : Variation post mortem de la contrainte maximum pour K =  $0, ^{\theta}$ 

Temps ( jours )

65 40

Co

Re

Sa.

Va

Post mortem variation of the maximum stress at K = 0.8

Muscle Longissimus dorsi

L'évolution, en fonction du temps, de la contrainte maximum et du fact<sup>eur</sup>é<sup>l</sup> lasticité mesurés à K = 0,2 est fortement influencée par la stimulation en trique.

On observe en effet pour le Longissimus dorsi que le maximum de cont c'est-à-dire la rigor intervient à 5 h. environ pour les muscles stimme lieu de 24 heures pour les témoins (figure 6). On note également célaration de l'installation de la rigor mais plus faible pour le Semineer sus.



Figure 6 : Influence de la stimulation électrique sur l'évolution post port de la contrainte maximum pour K = 0,2

Influence of electrical stimulation on post mortem  $evolution\ of$  maximum stress at K = 0.2

#### Stimulated A Check 4 Muscle Longissimus dorsi

Le facteur d'élasticité permet également de suivre le processus de rigor maturation. On note pour le Longissimus dorsi une chute importante  $\frac{de}{de}r$ la phase d'installation de la rigor. Ensuite ce paramètre se stabilisé valeur légèrement plus élevée (fig. 7).



Figure 7 : Evolution post mortem du facteur d'élasticité Post mortem evolution of the elasticity factor Check ¥ Muscle Longissimus dorsi stimulated &

Nous avons montré que l'évolution de la contrainte maximum à K = 0,2, en fonc-tion du temps post mortem, peut être représentée avec une bonne approximation par le modèle empirique à trois paramètres suivant :

(+)= A + Bte(- 4/2)

tanci ativi et di te li t no acté rpré

%U() A + bte W(t) est la contrainte maximum à l'instant t a la contrainte résiduelle après maturation la vitesse initiale d'installation de la rigor t le temps correspondant à la rigor

les ajustements de ce modèle aux courbes expérimentales (figure 6) ont montré que les paramètres A, B et ⊄ varient beaucoup d'un animal à l'autre pour un mê-traitement (tableau 1).

	N° Animal	A (N/cm <sup>2</sup>	B (N/cm <sup>2</sup> J)	€ (Jours)
Témoins	1	10,8	121,2	0,876
	2	18,0	101,2	0,751
	3	8,73	47,6	1,45
	4	8,05	50,6	0,648
	5	9,38	51,6	1,14
	6	10,6	67,7	1,21
Stimulés	1	15,9	284,7	0,250
	2	15,3	343,7	0,220
	3	14,3	399,9	0,245
	4	9,41	124,0	0,267
	5	13,4	921,6	0,088
	6	14,5	655,0	0,141

IT EIN

Tableau ] : Paramètres obtenus à partir des ajustements des courbes contrainte maximum en fonction du temps, sur le modèle :

 $\sigma$  (t) = A + Bte (-t/ $\tau$ ) Muscle : Longissimus dorsi K = 0,2 Période : 0,1 s

- Discussion

Discussion Das la phase ante rigor le muscle contient de l'ATP qui permet le glissement voribrillaire est très déformable et conserve une certaine élasticité. A la rigor l'immuscle ne contient plus ou peu d'ATP, la liaison actine-myosine de-c'est l'emmelle muscle de la structure myofibrillaire qui subit des altérations enzy-milation électrique ayant pour effet de diminuer rapidement la quantité d'ATP a conséquence d'accélérer ces processus.

<sup>Unsequence</sup> d'accélérer ces processus. <sup>1]</sup> est important de noter que quel que soit le muscle et qu'il soit stimulé ou <sup>10</sup> est arésistance pendant la phase de maturation tend assymptotiquement vers <sup>10</sup> valeur qui est de l'ordre de 8 - 10 N/cm<sup>2</sup>. Cette valeur limite peut donc

<sup>etre</sup> Considérée comme une référence définissant un optimum de maturation. Il étit ainsi possible, par une seule détermination de la résistance d'un muscle à le déformation d'évaluer son état de maturation. Énclue. Conclusion générale

 $k_{\rm e}$  (1350 générale  $k_{\rm e}$  (1350 musculaire possède un comportement rhéologique visco-élastique à domi-éformatique et présente deux zones particulières de déformation. A faible déformation K = 0.2, c'est essentiellement la structure myofibrillaire qui est l'état de t dans ces conditions il est possible d'évaluer de façon prêcise principalement les caractéristiques du tissu conjonctif. défenne. Références

rte

f th

ete

D<sub>[a]1</sub>, A. 1981 Variation entre muscles de l'effet de la maturation sur l'acti-vité ATPasique des myofibrilles. <u>Sciences des Aliments</u>, 1(1), 1-6.

ATPasique des myofibrilles. Sciences des ninment. stale, p. 1971 Evolution de quelques propriétés mécaniques du muscle pendant la maturation. 17th European Meeting of Meat Research Workers - Bristol. Salé, p.

<sup>2</sup>udies, 15 (in press). <sup>3</sup>ulé, P., Noël, Yolande, Oléon, C., Lasteyras, A. 1984 A sinusoīdal <sup>compression</sup> system to study rheological properties of foods in transient, <sup>state</sup>. <u>Journal of Texture Studies</u>, 15 (in press). <sup>3</sup>ule.</sup>

\*vate. Journal of Texture Studies, 15 (in press).
\*vale. Journal of Texture Studies, 15 (in press).
\*vale. D.W., Pearson, G.P. and Coxworth, V.E. 1971 Evaluation of certain
provideal properties of meat using an universal testing machine. Journal of
\*vale. Journal of test carcasses. Revue Générale du
\*vale. Studies carcasses. Revue Générale du
\*vale. Studies carcasses. Yalin, C. 1978 La stimulation électrique des carcasses. <u>Revue Générale du</u> Froid, 501-505.