

4:22 Dispositif pour l'étude des propriétés rhéologiques des viandes

SALE, P., NOEL, Yolande*, LASTEYRAS, A., OLEON, C.

Station de Recherches sur la Viande - I.N.R.A. - THEIX - 63122 CEYRAT, France
*Laboratoire de Génie des Procédés Alimentaires - I.N.R.A. - 78350 JOUY EN JOSAS, France

L'étude du comportement rhéologique du tissu musculaire est la méthode de base pour établir les relations existant entre les caractéristiques structurelles de ces tissus (caractéristiques mécaniques propres du tissu conjonctif, des myofibrilles, interactions de ces deux tissus) et sa réponse à une sollicitation mécanique extérieure. Elle est donc directement impliquée dans l'étude de la texture, traduction sensorielle de la réponse du tissu musculaire à la déformation de grande amplitude et destructrice qu'est la mastication. Le problème de fond est ici d'identifier les paramètres rhéologiques qui jouent le rôle de stimulus pour la perception sensorielle de la tendreté.

Par contre, si la déformation est appliquée au muscle de façon contrôlée, la réponse mécanique du tissu est alors susceptible de fournir de façon rapide, et éventuellement non destructrice, des informations sur l'état de la structure musculaire. L'analyse de ces informations peut être à l'origine de méthodes et d'appareils permettant de caractériser la viande et de suivre son évolution au cours de divers processus (maturation, chauffage,)

Des méthodes et des appareils performants ont été développés pour l'étude rhéologique de nombreux matériaux, notamment ceux utilisés en construction. Mais leur transposition au niveau des viandes se heurte à des difficultés liées aux caractéristiques propres du tissu musculaire, notamment :

- difficultés d'obtenir de échantillons de géométrie définie et reproductible
- difficultés pour fixer de façon satisfaisante les éprouvettes sur les outils, ce qui rend très difficile l'analyse en traction
- Difficulté de contrôler la structure réelle de l'échantillon
- Enfin le tissu musculaire est fortement anisotrope, avec une distribution parfois très irrégulière de la direction des fibres.

Compte tenu de la complexité du milieu et du caractère principalement empirique des relations liant les paramètres rhéologiques mesurés et les caractéristiques structurelles ou sensorielles du tissu, il apparaît opportun d'effectuer les mesures dans des gammes de déformation et de vitesse de déformation recouvrant celles dans lesquelles le matériau est normalement utilisé.

Dans le cas de la mastication, la déformation est évidemment une déformation de grande amplitude. Des mesures de déplacement du maxillaire inférieur effectuées au laboratoire sur des sujets mastiquants de la viande montrent que la vitesse instantanée peut facilement atteindre des valeurs voisines de 0,2 m/sec.

Quant aux efforts nécessaires, l'expérience acquise sur la compression d'échantillon de muscle dans des états variés a montré qu'ils pouvaient largement dépasser des valeurs de 500 N, pour un outil de compression de 1 cm² de surface.

L'absence sur le marché de l'instrumentation de machine d'essai permettant de travailler dans des conditions nous a conduit à concevoir et à réaliser un dispositif spécifique dont la vocation première est celle d'un appareil destiné au laboratoire.

Caractéristiques du dispositif

- Nature du test

Le test auquel est soumis l'échantillon est un test de compression effectué dans une cellule dont la géométrie est représentée sur la figure 1. Les guides latéraux n'autorisent la déformation de l'échantillon que dans une seule direction, et permettent de contrôler cette déformation par rapport à la direction générale des fibres musculaires.

Ce test s'adapte bien à des échantillons de consistance molle et de géométrie approximative. La cellule est facile à réaliser et facile à reproduire. Enfin il présente par rapport à la mastication un caractère imitatif.

- Loi du mouvement

Pour que le mouvement de l'outil de compression puisse être exécuté avec une bonne précision et avec une vitesse importante il est nécessaire que la vitesse de déplacement évolue de telle sorte qu'elle passe par zéro en position haute (arrêt de l'outil) et en position basse (inversion du sens du mouvement). En outre la loi du mouvement doit avoir une expression simple pour faciliter l'exploitation des résultats.

La loi adoptée est une loi de type sinusoïdal. Par rapport à la position initiale, le mouvement de l'outil est donné par la relation :

$$d = a (1 - \cos (2 \pi t/T))$$

d : position de l'outil à l'instant t
a : amplitude du mouvement
T : période du mouvement

D'une façon générale, l'amplitude du mouvement est caractérisée par son importance relative par rapport à l'épaisseur initiale de l'échantillon, E₀. On définit le taux de compression K = a/E₀ (0 < K < 1)

- Mécanisme d'entraînement de l'outil

L'amplitude du mouvement de l'outil de compression doit être, pour chaque échantillon déterminée en fonction de deux paramètres.

- a - Le taux de compression maximum K, appliqué à l'échantillon
- b - L'épaisseur de l'échantillon, qui peut varier selon le type de découpe et le test effectué.

Pour simplifier les manipulations, le mouvement final de l'outil est obtenu par transformation d'un mouvement sinusoïdal d'amplitude fixe, à travers deux systèmes de leviers (figure 2) qui permettent :

- Le premier de fixer un taux de compression, réglable entre 0,1 et 0,9.
- Le second d'adapter l'amplitude du mouvement à l'épaisseur initiale de l'échantillon qui peut varier de 3 à 20 mm.

On montre alors que le mouvement de l'outil par rapport au plan de référence (P) est donné par la relation

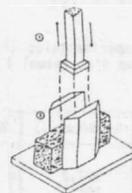


Figure 1 - Cellule de compression utilisée pour la viande
- Compression cell used for meat

- 1 Outil de compression - Compression tool
- 2 Porte-échantillons - Sample holder

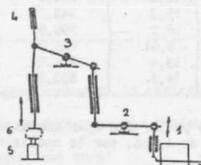


Figure 2 - Schéma du dispositif expérimental
- Schéma of experimental device

- 1 Embrayage, frein, disque codé
Clutch, brake, encoded disk
- 2 Pivot de réglage du taux de compression, K
Ball-pivot for adjusting compression ratio, K
- 3 Pivot d'ajustement à l'épaisseur de l'échantillon, E₀
Ball-pivot to adjust to initial thickness of sample, E₀
- 4 Capteur de déplacement
Linear displacement transducer
- 5 Capteur de force
Force transducer
- 6 Echantillon
Sample under test

$$y = E_0 (1 - (K/2)(1 - \cos 2 \pi t/T))$$

Le mouvement sinusoïdal initial est obtenu par transformation d'un mouvement circulaire uniforme. Un système d'embrayage et de frein électromagnétique permet d'accoupler et d'immobiliser le mécanisme de façon à obtenir soit un cycle, soit plusieurs cycles séparés par un délai variable.

La période du mouvement de l'outil peut être réglée entre 0,05 et 20 secondes grâce à un moteur d'entraînement à courant continu et à vitesse asservie.

- Système de mesure et d'acquisition

La force de réaction de l'échantillon sur le support est mesurée par un capteur de force à quartz placé sous le support. La sensibilité maximum utile de ce dispositif est 1 N. Même à la plus petite période du mouvement, les effets d'inertie dans l'échantillon sont négligeables par rapport aux forces de compression. L'intérêt principal du capteur à quartz dans ce dispositif est de posséder une sensibilité maximum quelle que soit la pré-charge du capteur, et de posséder une raideur très élevée.

La charge électrique du quartz est mesurée par un amplificateur donnant un signal de 10 volts pleine échelle. Les mesures quasi-statiques sont possibles en réduisant la bande passante de l'amplificateur.

Ce signal est envoyé sur une centrale de stockage temporaire. Les mesures sont déclenchées par un disque codé lié mécaniquement au dispositif d'entraînement de l'outil. Par ce système, 100 mesures de la force sont stockées à chaque cycle de compression.

En outre une impulsion mécaniquement liée au point de déformation maximum permet de situer exactement la position du diagramme force-déplacement par rapport au point de déformation maximum.

La position initiale de l'outil, qui donne aussi l'épaisseur initiale de l'échantillon, est mesurée par un capteur de déplacement linéaire à transformateur différentiel.

Ces valeurs sont ensuite transférées dans un micro-ordinateur qui effectue les calculs nécessaires et fournit les résultats sous forme de tableaux et graphiques.

Expression des résultats

Pour pouvoir établir les relations qui relient la contrainte, la déformation et le temps, c'est-à-dire qui décrivent le comportement rhéologique du corps, il est nécessaire de faire des hypothèses simplificatrices sur la répartition de ces grandeurs dans le corps. La plus simple et la plus couramment admise est celle d'une distribution homogène, uniforme et uniaxiale des contraintes et des déformations. Elle correspond au cas de la déformation uniaxiale et de l'amplitude d'un corps homogène. Dans ce cas la déformation du corps est facilement calculée à partir du déplacement de l'outil et elle est généralement primée, pour les petites déformations, par la relation de Cauchy :

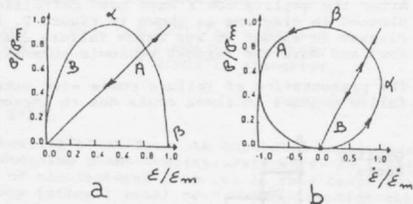


Figure 3 - Réponse d'un corps théorique élastique (A) et visqueux (B) en fonction de la déformation de Hencky (a) et de la vitesse de déformation de Hencky (b)

- Stress for theoretical elastic (A) and viscous (B) bodies versus Hencky strain (a) and Hencky strain rate (b)

α : Vitesse maximum de déplacement de l'outil - Maximum tool speed
 β : Taux de compression maximum - Maximum compression ratio

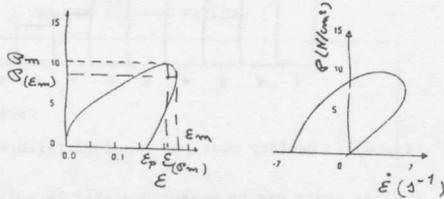


Figure 4 - Exemple de diagrammes contrainte/déformation et contrainte/vitesse de déformation obtenus dans le cas du tissu musculaire cru mûri

- Example of stress/strain and stress/strain rate diagrams observed with aged raw meat.

$K = 0,2$
 $T = 0,1 \text{ sec}$

Quelles que soient les conditions de la déformation, il est difficile de relier ces paramètres à des grandeurs rhéologiques spécifiques des constituants musculaires. Dans le cas de petites déformations, il est possible, par analogie et en comparant la position du maximum de force et celle du maximum de vitesse de déformation, d'apprécier l'influence de la vitesse de déformation sur la réponse mécanique du corps et d'en déduire de façon purement empirique, une décomposition en composante visqueuse et en composante élastique.

Toutefois cette interprétation devient erronée si l'échantillon présente au cours de la compression une rupture partielle qui se traduit sur le diagramme par une diminution plus ou moins brutale de la contrainte.

Conclusion

Ce dispositif a été d'abord testé sur des produits modèles afin de préciser les conditions d'analyses des résultats. Depuis il est utilisé pour étudier le comportement du tissu musculaire (Lepetit, 1982). Parmi les appareils existant il se caractérise d'une part par la vitesse élevée de l'outil de déformation (qui peut atteindre 1 m/sec.) et par la loi de compression qui d'expression simple permet une analyse théorique des diagrammes, dans la limite de taux de déformation réduit.

Malgré la similitude, les essais effectués ici ne peuvent être interprétés dans le cadre de la théorie des essais harmoniques puisque seul un effet de compression peut être appliqué à l'échantillon ce qui exclu l'établissement d'un régime de déformation périodique et permanent de l'échantillon. Cependant il est quand même possible de caractériser, au moins globalement, par une analyse des diagrammes, la part des comportements visqueux et élastique d'un échantillon. Ce sont deux composantes qui peuvent amener des éléments déterminants dans la description et la compréhension du comportement mécanique des produits étudiés.

Bien que conçu initialement pour l'étude des viandes, ce dispositif s'applique également aux produits carnés et autres aliments pour lequel on rencontre les mêmes problèmes pratiques dans l'évaluation des propriétés rhéologiques.

Références

Noël, Y. 1980 Etude des propriétés rhéologiques de corps semi-solides mesurées à des fréquences de 0,5 à 20 Hz. Thèse - Paris.
 Lepetit, J. 1982 Comportement rhéologique du tissu musculaire. Thèse - Clermont-Ferrand

$$\epsilon_c = (E(t) - E_0)/E_0$$

Dans le cas de déformation plus importante, la relation de Hencky :

$$\epsilon_H = \text{Log} (E(t)/E_0)$$

qui équivaut à celle de Cauchy pour les petites déformations est souvent utilisée. Elle permet de prolonger la gamme de déformation pour laquelle la réponse d'un corps reste linéaire. Appliquées à notre dispositif, les relations ci-dessus donneront pour la déformation en fonction du temps

$$\epsilon_H = \text{Log} (1 - (K/2)(1 - \cos (2t/T)))$$

et pour la vitesse de déformation

$$\dot{\epsilon}_H = -(K/T) \left\{ (\sin (2Kt/T)/(1 - (K/2)(1 - \cos (2Kt/T))) \right\}$$

Cette dernière expression montre que contrairement à ce qui se passe dans l'expression de Cauchy, on observe ici que la vitesse de déformation maximum n'est obtenus sur la compression de corps essentiellement visqueux (Noël, 1980) contrairement ce déphasage.

La seule contrainte calculable, dans le cadre des hypothèses indiquées plus haut, est celle apparaissant au niveau de la face active de l'outil :

$$\sigma = F/S$$

où F est la force donnée par le capteur de force et S la surface de l'outil (S en cm²).

Analyse des diagrammes

Le résultat de chaque compression est représenté par les diagrammes $\sigma = f(\epsilon_H)$

L'allure de ces diagrammes et la signification des paramètres que l'on peut déterminer dépend des conditions dans lesquelles s'effectue la déformation du corps et donc du taux de compression appliqué.

Pour guider l'interprétation il est utile de connaître la réponse de corps théoriques simples pour lesquels la réponse est facile à calculer. Les diagrammes correspondants sont indiqués sur la figure 3. Dans le cas du tissu musculaire les diagrammes sont plus complexe et traduisent un comportement visco-élastique comme le montre la figure 4.

Sur les diagrammes, un certain nombre de paramètres peuvent être calculés.

- σ_m : Contrainte maximum
- ϵ_m : Déformation à la contrainte maximum
- σ_p : Contrainte à la déformation maximum
- ϵ_p : Déformation résiduelle à contrainte nulle
- W : Energie reçue au cours de la compression
- W' : Energie restituée au cours de la détente de l'échantillon