



Influence de l'affinage sur les propriétés rhéologiques du camembert et du saint-paulin

M. Kfoury, M. Mpagana, J. Hardy

► To cite this version:

M. Kfoury, M. Mpagana, J. Hardy. Influence de l'affinage sur les propriétés rhéologiques du camembert et du saint-paulin. *Le Lait*, 1989, 69 (2), pp.137-149. hal-00929152

HAL Id: hal-00929152

<https://hal.science/hal-00929152>

Submitted on 11 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Article de recherche

Influence de l'affinage sur les propriétés rhéologiques du camembert et du saint-paulin

M. Kfoury, M. Mpagana et J. Hardy

Laboratoire de physico-chimie et génie alimentaire, Ecole nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires (ENSAIA) 2, avenue de la Forêt-de-Haye, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

(reçu le 19-5-1988, accepté le 28-11-1988)

Résumé — L'influence de l'affinage sur les propriétés rhéologiques des fromages a été évaluée à l'aide de 2 tests mécaniques : la compression uni-axiale et la relaxation. Les paramètres rhéologiques calculés à partir du test de compression uni-axiale sont la force au seuil de rupture, la déformation au seuil de rupture et le module de déformabilité. Le temps de demi-relaxation et un rapport force résiduelle/force initiale sont tirés des courbes de relaxation. Outre ces 2 derniers paramètres, une exploitation plus complète des courbes de relaxation a été réalisée selon le modèle de Maxwell généralisé afin de quantifier le comportement visco-élastique que manifestent ces 2 fromages.

Il a été montré que ces propriétés rhéologiques évoluent pendant l'affinage. Par analyse de régression multiple linéaire, des corrélations sont apparues entre certains paramètres et le degré de protéolyse ou la teneur en eau des produits. Des différences importantes ont été observées selon le type de fromage étudié. Ces paramètres pourraient être employés pour suivre l'affinage des fromages ou en assurer un classement.

camembert – saint-paulin – affinage – propriétés rhéologiques – visco-élasticité

Summary — Effect of cheese ripening on rheological properties of camembert and saint-paulin cheeses. The influence of ripening on the rheological properties of cheese has been evaluated by using 2 mechanical tests : the uniaxial compression and the stress relaxation. The calculated rheological parameters from an uniaxial compression test were the force of yield point, the relative deformation at yield point and the deformability modulus. From relaxation curves, 2 parameters were calculated : the half-relaxation time and the residual force/initial force ratio. Beside the latter parameters, an exploitation of the relaxation curves, according to the Maxwell generalized model, allowed to show that the 2 test cheese types exhibit a viscoelastic behaviour.

It has been shown that these rheological properties change during ripening. Such evolutions are not always similar for the 2 investigated cheese types (camembert and saint-paulin). For example, from the beginning to the end of ripening, Dse varies from 70 to 40% for camembert, and from 62 to 70% for saint-paulin. This can be explained by the more heterogeneous character of camembert paste. Conversely, the evolutions of the R1/2 are reverse for the 2 cheese types. An explanation can be given if we state that the stress relaxation (10 min) is probably incomplete for camembert cheese. The adjustment of the relaxation experimental curves to the generalized Maxwell model requires the use of 2 elements in the saint-paulin case, while 3 elements are required in the camembert case.

From the multiple linear regression analysis, it could be demonstrated that many parameters are correlated with the ripening degree or the water content. Moreover, some important differences

have been observed from one cheese type to another. The above mentioned parameters could be used to follow cheese ripening as well as cheese classification criteria.

soft cheese – semi-hard cheese – ripening – rheological properties – viscoelasticity

Introduction

La texture d'un fromage est un paramètre important pour son classement et l'appréciation de sa qualité. Les premières études effectuées dans ce domaine (Baron, 1952; Baron et Scott-Blair, 1953) ont montré l'existence de relations entre les paramètres de fabrication et diverses propriétés rhéologiques ou texturales du fromage final. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour mesurer les propriétés rhéologiques du caillé et du fromage. Elles comprennent l'évaluation sensorielle, l'analyse microstructurale, les techniques instrumentales empiriques et les études du comportement rhéologique (Prentice, 1972). Le développement des appareils d'essais universels, tels que l'Instron UTM, a permis l'étude des caractéristiques rhéologiques des différents types de fromages (Shama et Sherman, 1973; Culioli et Sherman, 1976; Lee *et al.*, 1978; Vernon-Carter et Sherman, 1978; Chen *et al.*, 1979; Imoto *et al.*, 1979; Dickinson et Goulding, 1980; Eberhard et Fluckiger, 1981; Vassal *et al.*, 1982). Une des techniques les plus employées est la compression uni-axiale d'un échantillon entre des plaques parallèles. Dans cette méthode, la force est enregistrée comme étant une fonction de la déformation ou du temps. La forme et l'amplitude de la courbe dépendent des conditions de l'essai telles que la dimension de l'échantillon, la vitesse de déformation, le taux de déformation et la nature de la surface de contact entre le fromage et les plaques de compression (Culioli et Sherman, 1976; Vernon-Carter

et Sherman, 1978; Dickinson et Goulding, 1980).

Dans différentes études, les corrélations entre la composition ou les paramètres de fabrication des fromages et leurs propriétés texturales ont été examinées (De Jong, 1976; Stanley et Emmons, 1977; Chen *et al.*, 1979; Creamer et Olson, 1982; Le Bars *et al.*, 1982; Mpagana et Hardy, 1985; Masi et Addeo, 1986). La plupart de ces études ont été réalisées pour spécifier l'importance de l'affinage du fromage. L'étude des propriétés des fromages a montré que leur fermeté, mesurée par pénétrométrie, évolue lors de l'affinage (De Jong, 1976; Le Bars *et al.*, 1982).

Dans le présent travail, la compression uni-axiale et la relaxation ont été utilisées pour étudier, d'une part, l'évolution des caractéristiques rhéologiques au cours de l'affinage des fromages à pâte molle de type camembert et à pâte pressée non cuite de type saint-paulin, et, d'autre part, les possibilités de classer les fromages à l'aide de paramètres quantifiables définis à partir de ces 2 tests mécaniques.

Matériels et Méthodes

Préparation des échantillons

Cas du camembert

Les fromages étudiés sont prélevés immédiatement après le démoulage dans une usine de l'Est de la France. Il s'agit de pâtes partiellement dé lactosées obtenues par un procédé classique de fabrication. A la fin de l'égouttage,

la teneur en matière sèche est de $45 \pm 2\%$, la teneur en matières grasses de $23 \pm 1\%$ et le pH de la pâte avant salage de $4,65 \pm 0,05$. Le salage est effectué par trempage pendant 45 min dans une saumure saturée en NaCl, de température 15°C et dont le pH est ajusté à 4,65. Les fromages ensemencés en *Penicillium caseicolum* sont ressuyés pendant 18 h, puis affinés dans un hâloir à 15°C et 95% d'humidité relative.

Cas du saint-paulin

Les fromages étudiés sont produits en atelier pilote selon une technique classique de fabrication. Le pressage est réalisé pendant 5 h. A la fin du pressage, la teneur en matière sèche est de $49 \pm 2\%$, la teneur en matières grasses de $22 \pm 1\%$. Le salage est effectué par trempage des fromages pendant 8 h dans une solution saturée en NaCl, de température 15°C et dont le pH est ajusté à 4,8. L'affinage de ces fromages est suivi pendant 30 jours dans un hâloir à 12°C et à 92% d'humidité relative.

Tests rhéologiques

Avant l'application des tests mécaniques, la température des échantillons est ajustée à 20°C . Au moyen d'un appareil d'essai universel Instron UTM, modèle 1122; les tests rhéologiques sont effectués sur des échantillons cylindriques (diamètre = 1,4 cm; hauteur = 1 cm) découpés dans les fromages à tester selon la méthode développée par Mpagana et Hardy (1986) (Fig. 1).

Compression uni-axiale

Les échantillons placés dans des capsules en inox à fond plat (diamètre = 6 cm) sont comprimés à l'aide d'une plaque d'acier inoxydable poli de diamètre 5 cm. La vitesse de déplacement de la traverse est fixée à 2 cm/min et une déformation maximale de 0,8 cm est imposée (soit une déformation relative de 80%). Durant ces tests, les plaques de compression de l'Instron ne sont pas lubrifiées. Cependant, l'eau et la matière grasse exsudées au cours de la compression suffisent pour réduire le frottement entre l'échantillon et les plaques de compression (Masi et Addeo, 1986). A partir des courbes force-déformation relative obtenues (Fig. 2), les paramètres suivants sont calculés;

a) le modèle de déformabilité, M_d , en Pa : c'est le rapport entre la contrainte apparente (force par unité de surface initiale) et la déformation relative dans la partie initiale de la courbe (Fig. 2). Dans ce travail, le module est calculé pour une déformation égale à la moitié de la déformation correspondant au premier point d'inflexion P_i (Fig. 2) (Mohsenin et Mittal, 1977). En effet, la condition principale pour que ces tests soient rhéologiquement valables est que l'échantillon se comporte comme un système visco-élastique linéaire (Skinner et Rao, 1986). Dans d'autres publications (Mpagana, 1986; Kfoury et Hardy, 1988), on a montré que, dans cette gamme de déformation, ces 2 types de fromage se comportent comme un corps visco-élastique linéaire, d'où le choix de cette position sur la courbe pour le calcul du module de déformabilité. Cette limite de linéarité a été déterminée à partir de la pente, dans la partie initiale des courbes, contrainte-déformation.

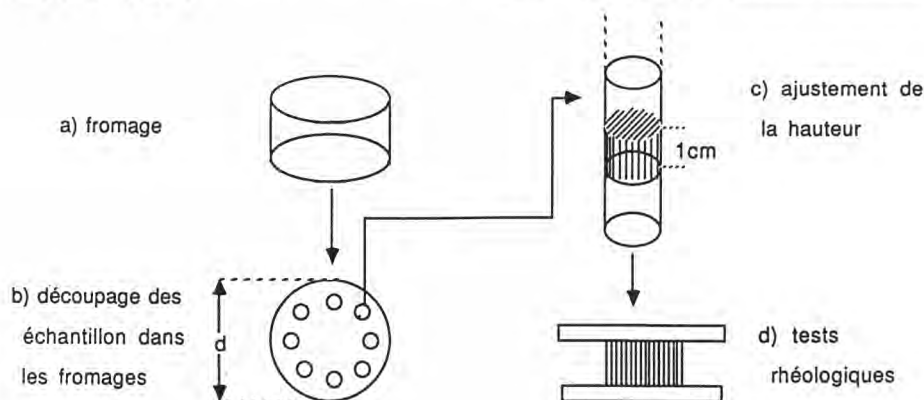


Fig. 1. Préparation des échantillons ($d = 11$ cm pour le camembert, $d = 20$ cm pour le saint-paulin).

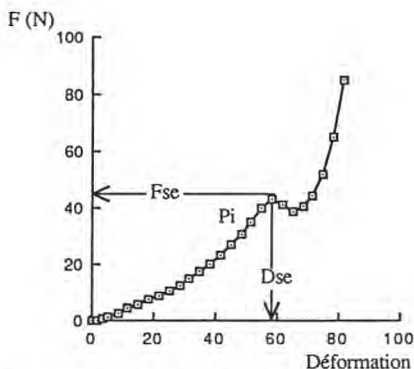


Fig. 2. Courbe Force (F) - Déformation relative (D) d'un fromage de type saint-paulin à 5 jours d'affinage. Pi = premier point d'inflexion; Fse : force au seuil de rupture; Dse : déformation relative au seuil de rupture.

Dans notre cas la linéarité a été conservée jusqu'à 35% de déformation;

b) la force au seuil de rupture, Fse, en N : elle peut être utilisée comme indice de fracturabilité des denrées alimentaires (Breene, 1975);

c) la déformation relative au seuil de rupture, Dse, en % : elle donne une valeur estimée de la fragilité (en anglais *brittleness*). Sa valeur peut être bien corrélée avec plusieurs propriétés texturales des fromages comme la souplesse, les caractères collant et gras (Sauvageot et al., 1977) ou, le plus souvent, avec une impression de manque de cohésion (en anglais *shortness*) de la pâte (Eberhard et Fluckiger, 1981; Walstra et Van Vliet, 1982). Bien que des différences dans la cohésion des pâtes fromagères soient évidentes lors d'une évaluation sensorielle, la définition physique de cette propriété reste plutôt imprécise.

Relaxation

Le test de relaxation est effectué sur les échantillons cylindriques déposés dans les capsules en inox. La vitesse de déplacement de la traverse est fixée à 20 cm/min jusqu'à une déformation de 10%. Dans un essai de relaxation, le comportement rhéologique des produits viscoélastiques tels que les fromages peut être représenté par un corps de Maxwell généralisé. Ce dernier est constitué par l'association en parallèle de n modèles de Maxwell, chacun d'entre eux étant caractérisé par un module d'élasticité E_i et un coefficient de viscosité η_i .

La réponse de ce modèle à une déformation appliquée instantanément peut être écrite sous la forme de séries de Prony :

$$E(t) = \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\tau_i} \quad (1)$$

où, $E(t)$ est le module de relaxation du temps t défini comme la variation de la contrainte avec le temps quand une déformation égale à l'unité est soudainement imposée à la matière. Les coefficients $\tau_i = \eta_i/E_i$ sont appelés temps de relaxation; τ_i représente le temps nécessaire pour que la contrainte aux bornes de la n^{e} branche soit réduite dans le rapport $1/e$ (Mohsenin, 1970; Mpagana et Hardy, 1985). Dans le cas du saint-paulin, des expériences préliminaires conduites sur une durée d'1 h ont montré qu'après 10 min 97% de la contrainte était relaxée. Dans ces conditions, pour des questions de limitation de l'évaporation des échantillons, les expériences de relaxation ont été conduites sur une période de 10 min.

A partir de ces essais de relaxation, d'autres paramètres plus empiriques peuvent être calculés :

- le temps de demi-relaxation, $R1/2$, en sec : c'est-à-dire le temps nécessaire pour que la valeur de la force revienne à la moitié de sa valeur initiale. D'après Weinberg et Angel (1984), l'augmentation du temps de demi-relaxation révélerait une augmentation du caractère solide du produit;
- le rapport $F10/F0$ entre la force résiduelle après 10 min de relaxation et la force initiale : sa valeur peut constituer une mesure de la vitesse de relaxation.

Déterminations analytiques

Les teneurs en eau et en sel sont déterminées sur les échantillons soumis aux essais rhéologiques. Les teneurs en eau et en sel sont déterminées selon les méthodes officielles de la Fédération Internationale de Laiterie. Le dosage de l'azote total (NT) et de l'azote soluble (NS) est effectué à partir d'une dispersion des échantillons affinés dans une solution de citrate trisodique 0,5 M.

Pour la mesure de la teneur en azote total, la méthode de Kjeldahl est appliquée directement sur une portion aliquote de la suspension

citratée. La mesure de la teneur en azote soluble est réalisée par application de la méthode de Kjeldahl sur le filtrat obtenu après précipitation de la paracaséine par acidification à pH 4,6. Le degré de maturation est ensuite obtenu par le rapport (100.NS/NT).

Résultats et Discussion

Evolution des paramètres rhéologiques des fromages lors de l'affinage

Paramètres obtenus à partir des essais de compression uni-axiale

Module de déformabilité (Md). On peut constater (Fig. 3) qu'au début de l'affinage la valeur du «module de déformabilité» du camembert augmente, notamment en raison de la diminution de la teneur en eau de la pâte (Fig. 4), alors que pour le saint-paulin ce module diminue tout au long de l'affinage. Par ailleurs, on peut constater que la valeur de Md est 4 fois plus importante pour le saint-paulin que pour le camembert.

Paramètres au seuil de rupture (Fig. 3) Pour le camembert, la force au seuil de rupture (Fse) reste pratiquement constante tout au long de l'affinage. En revanche, pour le saint-paulin, ce paramètre diminue lentement au cours de l'affinage. La déformation relative au seuil de rupture (Dse) diminue au cours de l'affinage dans le cas du camembert alors qu'elle augmente dans le cas du saint-paulin. Ainsi, la Dse du camembert passe de 70% au début à 40% vers la fin de l'affinage. En revanche, pour le saint-paulin cette évolution va de 62% au début à 70% à la fin de l'affinage. Ce déplacement du seuil de rupture vers des déformations moins importantes dans le cas du camembert montre que l'affinage de ce produit augmente le caractère plastique de la pâte, alors que dans le cas du saint-paulin on assiste plutôt à une perte de plasticité.

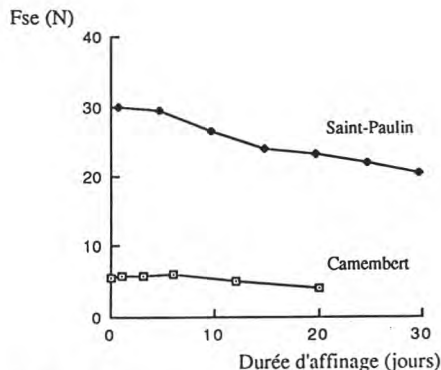
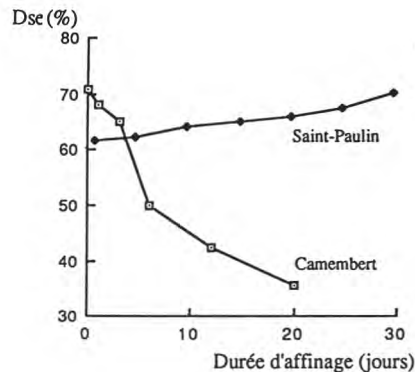
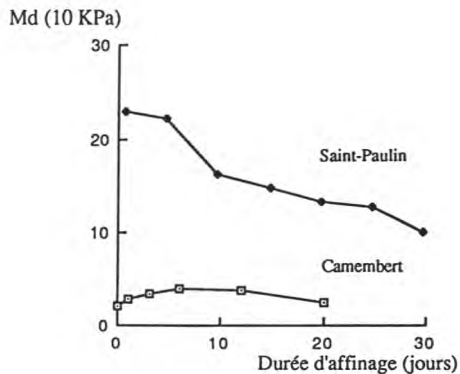


Fig. 3. Evolution, au cours de l'affinage, de la force au seuil de rupture (Fse), de la déformation au seuil de rupture (Dse) et du module de déformabilité (Md).

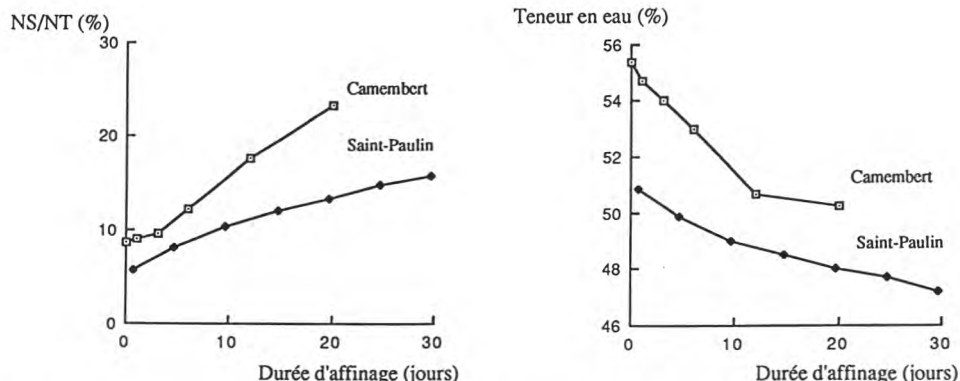


Fig. 4. Evolution, au cours de l'affinage, de la teneur en eau et du degré de maturation pour les 2 types de fromages.

Paramètres empiriques obtenus à partir des essais de relaxation (Fig. 5)

Temps de demi-relaxation $R1/2$. On peut remarquer que le temps de demi-relaxation qui reflète le caractère élastique de la pâte, diminue pendant l'affinage du saint-paulin. En effet, le $R1/2$ passe de 39 sec à la fin du salage à 17 sec après 30 jours d'affinage. Le camembert présente une évolution inverse.

Rapport $F10/F0$. Au cours de l'affinage, on constate que pour le camembert ce rapport atteint une valeur maximum de 0,17 vers le 3^e jour d'affinage, et pour le

saint-paulin, une valeur maximum de l'ordre de 0,26 vers le 5^e jour d'affinage. Au-delà de ces maxima, ce rapport diminue à des vitesses voisines, pour les 2 types de fromages. Cette évolution présente beaucoup de similitude avec celle de Md.

Généralement, on doit s'attendre à ce que ces 2 paramètres, $R1/2$ et $F10/F0$, évoluent dans le même sens : c'est bien ce que l'on observe pour le saint-paulin. Pour le camembert, l'évolution du $R1/2$ peut être faussée par une relaxation incomplète à 10 min. Cette relaxation plus

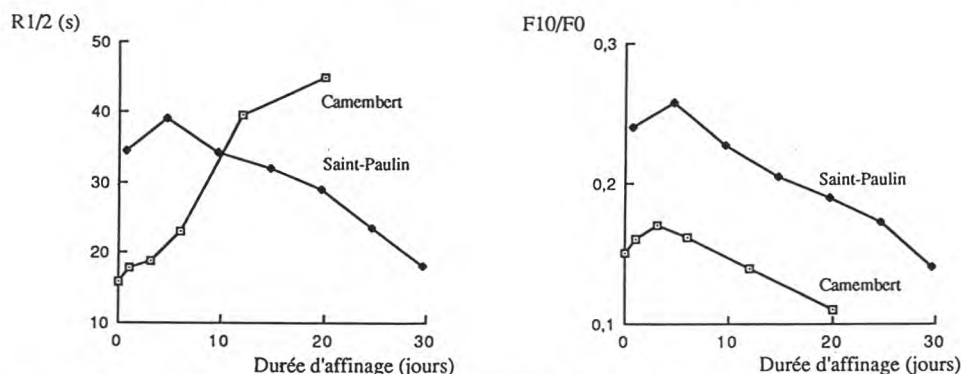


Fig. 5. Evolution, au cours de l'affinage, des paramètres $R1/2$ et $F10/F0$ pour 2 types de fromages : ($R1/2$ = le temps de demi-relaxation, $F10/F0$ = le rapport de la force résiduelle après 10 min de relaxation et de la force initiale).

lente pour le camembert est due probablement à un caractère plus hétérogène de la pâte.

Paramètres tirés de la modélisation des expériences de relaxation

Sur le plan théorique, la simple détermination du temps de demi-relaxation ou du rapport F_{10}/F_0 ne précise pas le type de comportement rhéologique du produit à tester. En fait, ces 2 paramètres ne donnent qu'une indication de tendance (Mpagana et Hardy, 1985). Ils présentent cependant comme intérêt d'être faciles à obtenir à partir d'une courbe enregistrée. Pour étudier le comportement visco-élastique de ces 2 types de fromages, on a appliqué la relation 1 qui permet de déterminer l'importance relative des caractères visqueux ou élastique du produit.

Paramètres visco-élastiques. L'ajustement des courbes expérimentales au modèle de Maxwell généralisé a nécessité, dans le cas du saint-paulin, l'utilisation de 2 éléments (Kfoury et Hardy, 1988) et, dans le cas du camembert, de 3 éléments (Mpagana, 1986). Dans le Tableau II, un quatrième élément est donné à titre informatif. Il est en fait négligeable, car il correspond à une relaxation inférieure à la précision des essais (Mpagana, 1986). L'évolution, au cours de l'affinage, des paramètres

visco-élastiques est présentée dans les Tableaux I et II. Cet ajustement des courbes de relaxation a été réalisé avec la méthode de résidus successive d'Inokuchi (d'après Sherman, 1970). La validité des 2 modèles est démontrée par le bon ajustement des valeurs théoriques avec les valeurs expérimentales (Figs. 6 et 7). Pour tous les temps d'affinage ainsi que pour les 2 types de fromages étudiés, les erreurs enregistrées entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques ne dépassent pas 6%. Les erreurs maximales sont remarquées pour les fromages les plus affinés. Cependant, les résultats présentés dans les Tableaux I et II sont des moyennes de 8 fabrications. Une étude statistique effectuée à l'aide de la distribution de Student prouve que les différences observées ne sont pas significatives aux seuils de 0,05 et 0,01.

En termes d'élasticité, on remarque que les modules d'élasticité (E_1 , E_2 , E_3) passent par un maximum situé aux alentours du 6^e jour pour le camembert, alors que ce maximum se situe juste après le salage dans le cas du saint-paulin. En revanche, en ce qui concerne le temps de relaxation le plus long (r_1), on note une évolution similaire pour les 2 types de fromages. Les autres temps de relaxation (r_2 et r_3), évoluent peu pendant l'affinage. Il est à noter que les valeurs des modules

Tableau I. Evolution, au cours de l'affinage, des paramètres du modèle de Maxwell à 2 éléments dans le cas du saint-paulin.

Temps d'affinage (jours)	E_1 (KPa)	r_1 (min)	E_2 (KPa)	r_2 (min)
0,67	176,9 ± 10	15,8 ± 0,7	129,6 ± 10	0,39 ± 0,01
5	162,5 ± 7	15,7 ± 0,6	110,2 ± 9	0,40 ± 0,01
10	144,6 ± 3	15,5 ± 0,3	107,7 ± 4,5	0,48 ± 0
15	134,9 ± 5	15,4 ± 0,5	95,5 ± 8,7	0,48 ± 0,01
20	118,8 ± 8	15 ± 0,3	85,9 ± 7,7	0,41 ± 0,01
25	100,1 ± 5	14,5 ± 1	74,2 ± 5	0,43 ± 0,01
30	86,2 ± 7	14 ± 0,4	64,2 ± 4	0,49 ± 0,01

Tableau II. Evolution, au cours de l'affinage, des paramètres du modèle de Maxwell à 4 éléments dans le cas du camembert.

Temps d'affinage (jours)	E1 (KPa)	r1 (min)	E2 (KPa)	r2 (min)	E3 (KPa)	r3 (min)	E4 (KPa)	r4 (min)
0	6,9 ± 0,7	17 ± 2	6 ± 0,7	1,2 ± 0,2	5,9 ± 0,6	0,14 ± 0,01	3,4 ± 0,4	0,02
1	10 ± 1	18 ± 2	9 ± 1	1,1 ± 0,2	9 ± 1	0,14 ± 0,01	5,1 ± 0,5	0,02
3	11 ± 1	20 ± 2	10 ± 1	1,2 ± 0,2	10 ± 1	0,13 ± 0,01	8 ± 1	0,02
6	14 ± 2	21 ± 2	14 ± 2	1,3 ± 0,2	14 ± 2	0,12 ± 0,01	13 ± 2	0,02
12	10 ± 1	15 ± 1	10 ± 1	1,2 ± 0,2	10 ± 1	0,13 ± 0,01	8 ± 1	0,02
20	6,4 ± 0,7	9 ± 1	5,9 ± 0,6	1,1 ± 0,2	5,8 ± 0,2	0,13 ± 0,01	4 ± 0,4	0,02

d'élasticité sont 15 fois plus élevées pour le saint-paulin que pour le camembert, alors que pour les temps de relaxation on trouve des valeurs du même ordre de grandeur pour les 2 types de fromages.

Relations entre évolution des propriétés rhéologiques et affinage des fromages

La dégradation des protéines est faible dans un fromage à pâte pressée non cuite tel que le saint-paulin puisque, en fin d'aff-

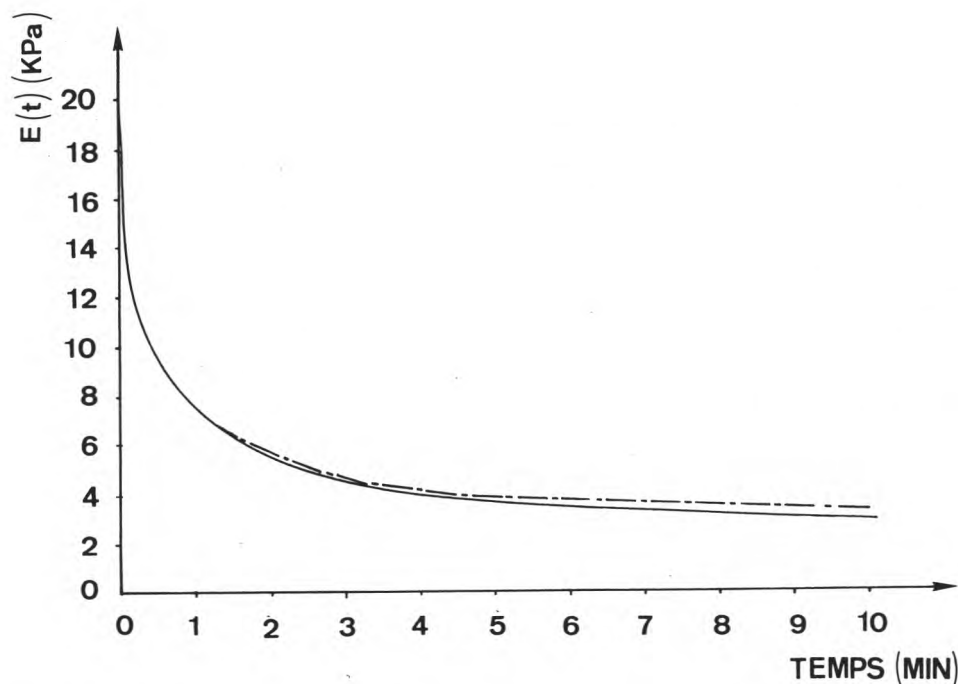


Fig. 6. Evolution du module d'élasticité $E(t)$ du fromage de type camembert à 20 jours d'affinage, en fonction du temps. — : valeurs expérimentales; - - : valeurs théoriques.

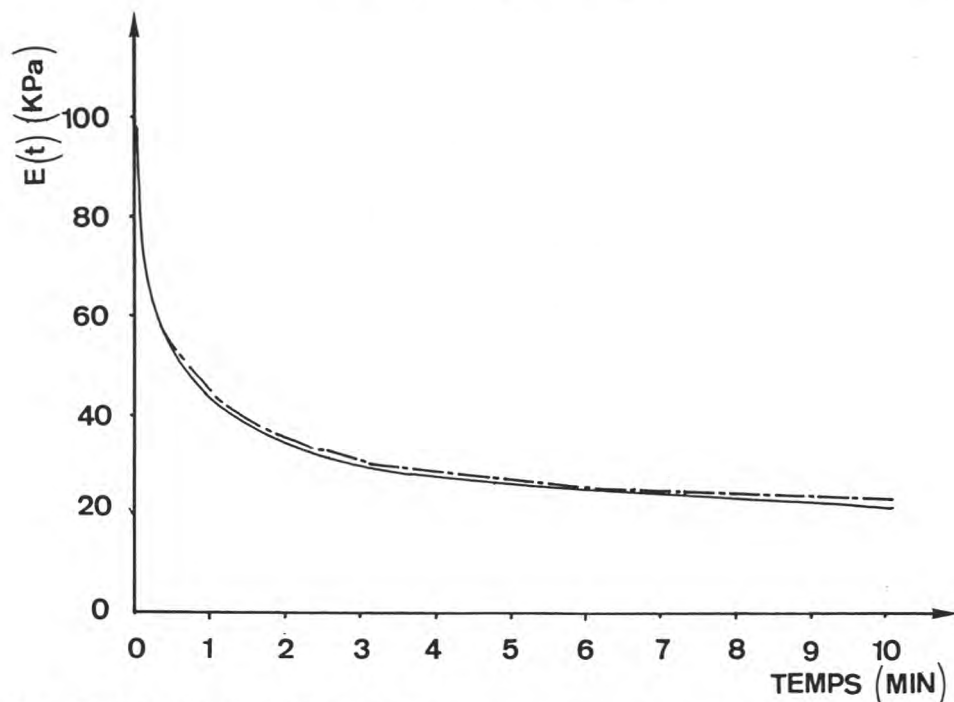


Fig. 7. Evolution du module d'élasticité $E(t)$ du fromage de type saint-paulin à 20 jours d'affinage, en fonction du temps. — : valeurs expérimentales; - - - : valeurs théoriques.

finage, la quantité d'azote soluble (NS) observée est de l'ordre de 15% de l'azote total alors que pour le camembert, cette valeur est de 24% (Fig. 4). Ces différences d'évolution ont déjà été observées par Lenoir (1963).

Les protéines jouent un rôle majeur dans la texture des fromages car elles en constituent la seule phase solide continue. En effet, des études par microscopie électronique ont révélé qu'elles forment un réseau qui piège les globules gras et le lactosérum. Toute modification de la nature des protéines présentes dans le fromage aura une répercussion sur ses propriétés rhéologiques. La protéolyse conduit à une pâte moins ferme et moins élastique. Ce phénomène a été amplifié artificiellement dans le cheddar et le gouda par l'addition de protéases au caillé et au lait de

fabrication (Vassal *et al.*, 1982). Cependant, s'il est clair que la protéolyse joue un rôle majeur dans les variations de texture au cours de l'affinage, des modifications physico-chimiques, telles que celles de la teneur en eau ou du pH, sont également susceptibles d'intervenir.

Dans un travail concernant l'influence de diverses variables de composition sur les propriétés texturales de divers types de fromages américains, Chen *et al.* (1979) ont montré que la contribution texturale des variables indépendantes suit la séquence : teneur en protéines > teneur en sel > teneur en eau > pH > teneur en matières grasses. En ce qui concerne les teneurs en sel, le pH, les teneurs en matières grasses, les différences entre les fromages de type camembert et saint-paulin sont très faibles; dans la présente

étude, les paramètres qui évoluent le plus sont la protéolyse et la teneur en eau.

Pour mieux comprendre l'influence de ces 2 facteurs qui semblent agir d'une façon antagoniste sur certains des paramètres rhéologiques calculés, on a eu recours à l'analyse de régression multiple, où le paramètre rhéologique constitue la variable dépendante tandis que les caractéristiques de composition sont considérées comme les variables indépendantes. Les résultats sont donnés dans les Tableaux III et IV.

Une simple observation des coefficients de régression multiple montre que globalement les paramètres rhéologiques (Fse, Dse, Md, R1/2 et F10/F0) se corrélaient bien avec les paramètres de composition (% NS/NT et % H₂O), à l'exception de R1/2 dans le cas du saint-paulin et Md dans le cas du camembert qui présentent des coefficients de corrélations moins bons.

En ce qui concerne les paramètres visco-élastiques, on peut constater que, pour les 2 types de fromages, seuls les termes du premier élément de Maxwell (E1, r1, η_1) présentent une bonne corrélation avec l'évolution du fromage au

cours de l'affinage. Dans le cas du camembert, les coefficients de corrélation moins élevés peuvent s'expliquer par la plus grande hétérogénéité de la pâte. Par ailleurs, la comparaison des Tableaux III et IV montre que la plupart des fonctions explicatives des paramètres rhéologiques à partir du degré de maturation et de la teneur en eau sont différentes selon les types de fromages.

Il est à noter que les paramètres rhéologiques Fse, Dse, Md, R1/2 et F10/F0 donnent une estimation générale et globale de la texture du produit. Ils présentent également l'avantage d'être facilement exploitables. Les autres paramètres E1, E2, E3, r1, r2 et r3 sont plus théoriques et permettent de séparer et de quantifier les 2 comportements, visqueux et élastique. Ils ont cependant l'inconvénient d'être longs à exploiter. Il est, en outre, possible que des corrélations existent entre ces différents paramètres empiriques ou théoriques. Cela fait l'objet d'un travail en cours de réalisation dans lequel des essais de pénétration sont également introduits.

Seuls les paramètres F10/F0 et Md qui présentent tous les 2 un maximum dans

Tableau III. Coefficients et constantes des régressions multiples linéaires entre les paramètres rhéologiques et de composition (% NS/NT et % H₂O) dans le cas du saint-paulin.

Paramètres rhéologiques	Degré de maturation (% NS/NT)	Teneur en eau (% H ₂ O)	Constante	Coefficient de régression (r)
F10/F0	- 0,02	- 0,02	1,27	0,93
Fse	- 0,7	1	- 15,1	0,97
Md	- 1,25	- 0,97	71,7	0,95
Dse	0,24	- 1,9	154,2	0,93
R1/2	- 3,1	- 4,55	283,9	0,82
E1	- 7,3	5,4	- 46,1	0,95
r1	0,28	1,38	- 54,5	0,68
E2	0,16	21,4	- 938,6	0,98
r2	- 0,04	- 0,14	7,76	0,49
η_1	- 5,31	12,9	- 439	0,98

Tableau IV. Coefficients et constantes des régressions multiples linéaires entre les paramètres rhéologiques et de composition (% NS/NT et % H₂O) dans le cas du camembert.

Paramètres rhéologiques	Degré de maturation (% NS/NT)	Teneur en eau (% H ₂ O)	Constante	Coefficient de régression (r)
F10/F0	- 0,008	- 0,01	0,94	0,97
Fse	- 0,24	- 0,37	28,2	0,95
Md	- 0,39	- 1,12	67,8	0,89
Dse	- 0,004	0,1	2,5	0,95
R1/2	1,2	- 2,52	144,2	0,98
E1	- 1,34	- 3,38	206,6	0,71
r1	- 1,66	- 2,99	196,7	0,92
η_1	- 2,15	- 4,89	298	0,7
E2	- 1,44	- 3,81	230,4	0,7
r2	- 0,02	- 0,06	4,81	- 0,27
η_2	- 0,12	- 0,31	18,6	0,63
E3	- 1,47	- 3,88	234,5	0,7
r3	0,002	0,007	- 0,26	0,32
η_3	- 0,026	- 0,01	1,59	0,78
E4	- 1,58	- 4,39	260,8	0,6
η_4	- 0,0002	- 0,0005	0,32	0,6

les premiers jours de l'affinage sont corrélés avec l'évolution de la pâte par des relations voisines. Amantea *et al.* (1986) pour du cheddar, Vernon-Carter et Sherman (1978) pour du leicester et Lebars *et al.* (1982) pour du camembert ont trouvé les mêmes allures d'évolution, bien que leurs méthodes d'évaluation des paramètres rhéologiques soient parfois différentes. Pour ce qui concerne la diminution de la perte d'eau, Hardy (1983) et Mpagna et Hardy (1986) ont montré que cette diminution est provoquée par la migration du sel qui tend à s'équilibrer dans l'ensemble de la pâte. Des mesures de répartition du sel sur nos échantillons ont montré que cet équilibre est atteint vers le quatrième jour d'affinage pour le camembert et vers le huitième jour pour le saint-paulin.

Conclusion

L'étude des relations entre la protéolyse et les propriétés rhéologiques du fromage

se révèle d'un intérêt primordial pour la fabrication d'un produit présentant des caractéristiques texturales souhaitées. Elle permet, en outre, l'utilisation des mesures rhéologiques pour un contrôle simple d'un processus aussi complexe que celui de la maturation des fromages.

Dans la présente étude, certains des paramètres calculés (Fse, Dse, F10/F0, R1/2, Md) constituent des critères intéressants qui pourraient servir pour la classification des fromages. En effet, les fromages sont actuellement classés en groupes, soit en utilisant des termes présentant une connotation texturale (pâtes molles, pâtes dures...) soit, au sein d'un même groupe, selon des termes géographiques ou d'appellation d'origine (camembert, roquefort...) ou encore en prenant comme critère de classification une étape de fabrication (pâte fraîche, pâte pressée cuite, pâte pressée non cuite...).

Ces classifications restent empiriques; les critères utilisés ne suffisent pas pour différencier les fromages. En revanche,

les paramètres obtenus à partir des essais de compression uni-axiale ou de relaxation présentent les avantages d'être quantifiables, et de pouvoir être utilisés pour caractériser objectivement tous les types de fromages. Par exemple, à 20 jours d'affinage le camembert présente un F_{10}/F_0 égal à 0,11 alors que le saint-paulin présente une valeur de 0,19. Ce paramètre qui, par définition, se situe obligatoirement entre 0 et 1 pourrait être utile pour une classification future des fromages, ou pour établir des corrélations avec des évaluations sensorielles de la texture. Les essais de relaxation constituent une autre approche des propriétés rhéologiques des fromages. Couplés, d'une part, à des essais de fluage et, d'autre part, à des mesures biochimiques et à des observations en microscopie électronique, ils devraient permettre de relier la réponse mécanique à l'évolution du réseau caséinique au cours de l'affinage et ainsi, de mieux comprendre la formation de la structure de la pâte.

Références

- Amantea G.F., Skura B.J. & Nakai S. (1986) Culture effect on ripening characteristics and rheological behaviour of Cheddar cheese. *J. Food Sci.* 51, 912-918
- Baron M. (1952) *The Mechanical Properties of Cheese and Butter*. United Trade Press, London
- Baron M. & Scott-Blair G.W. (1953) Rheology of cheese and curd. In: *Food-stuffs, their Plasticity, Fluidity and Consistency*. Scott-Blair, North Holland, Amsterdam
- Breene W.M. (1975) Application of texture profile analysis to instrumental food texture evolution. *J. Texture Stud.* 6, 53-69
- Chen A.H., Larkin J.W., Clark C.J. & Irwin W.E. (1979) Textural analysis of cheese. *J. Dairy Sci.* 62, 901-907
- Creamer K.L. & Olson N.F. (1982) Rheological evaluation of maturing Cheddar cheese. *J. Food Sci.* 47, 631-635
- Culioli J. & Sherman P. (1976) Evaluation of Gouda cheese firmness by compression tests. *J. Texture Stud.* 7, 353-372
- De Jong L. (1976) Protein breakdown in soft cheese and its relation to consistency. 1. Proteolysis and consistency of Noorhollandse Meshanger cheese. *Neth. Milk Dairy J.* 30, 242-253
- Dickinson E. & Goulding I.C. (1980) Yield behaviour of crumbly English cheeses in compression. *J. Texture Stud.* 11, 51-63
- Eberhard P. & Fluckiger E. (1981) Rheologische Messungen bei verschiedenen Käsesorten. *Schweiz. Milchzeit.* 107, 23-25
- Hardy J. (1983) *Diffusion et distribution du chlorure de sodium dans les fromages. Influence sur l'activité de l'eau et les propriétés de sorption de l'eau*. Thèse de Sciences, Institut national polytechnique de Lorraine
- Kfoury M. & Hardy J. (1988) Linear viscoelastic behaviour of semi-hard cheese. *J. Texture Stud.* (à paraître)
- Imoto E.M., Lee C.H. & Rha C. (1979) Effect of the compression ratio on the mechanical properties of cheese. *J. Food Sci.* 44, 343-345
- Le Bars D., Vassal L. & Gripon J.C. (1982) Méthode d'étude de la texture du camembert par pénétrométrie. *Congr. Intern. Lait* 1A, 502
- Lee C.H., Imoto E.M. & Rha C. (1978) Evaluation of cheese texture. *J. Food Sci.* 43, 1600-1605
- Lenoir J. (1963) Note sur la composition en matières azotées des fromages affinés de camembert, saint-paulin et gruyère de comté. *Ann. Techn. Agric. (INRA)* 12, 51-57
- Masi P. & Addeo F. (1986) An examination of some mechanical properties of a group of Italian cheeses and their relation to structure and conditions of manufacture. *J. Food Eng.* 5, 217-229
- Mpagana M. (1986) *Propriétés rhéologiques des fromages à pâte molle. Influence du salage et de l'affinage*. Thèse de Sciences, Institut national polytechnique de Lorraine
- Mpagana M. & Hardy J. (1985) Propriétés de compression et de relaxation des fromages à pâte molle. Influence de l'affinage. *Sci. Aliments* 5, hors série V, 91-96
- Mpagana M. & Hardy J. (1986) Effect of salting on some rheological properties of fresh camembert cheese as measured by uniaxial compression. *Milchwissenschaft* 41, 210-213

- Mohsenin N.N. (1970) *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Vol. 1. Gordon and Breach Sci. Pub., New York
- Mohsenin N.N. & Mittal J.P. (1977) Use of rheological terms and correlation of compatible measurements in food texture research. *J. Texture Stud.* 8, 395-410
- Prentice J.H. (1972) Rheology and texture of dairy products. *J. Texture Stud.* 3, 415-458
- Sauvageot F., Mathis R., Fagnoni G., Marien M. & Lamellière P.M. (1977) Quelques données sur la texture de l'emmental en provenance de fruitières diverses. *Cah. ESBANA* 1, 34-42
- Shama F. & Sherman P. (1973a) Evaluation of some textural properties with the Instron universal testing machine. *J. Texture Stud.* 4, 344-352
- Shama F. & Sherman P. (1973b) Stress relaxation during force compression on foods with the Instron universal testing machine and its implications. *J. Texture Stud.* 4, 354-362
- Sherman P. (1970) *Industrial Rheology*. Academic Press, London & New York, pp. 198-240
- Skinner G.E. & Rao V.N.M. (1986) Linear viscoelastic behaviour of frankfurters. *J. Texture Stud.* 17, 421-434
- Stanley D.W. & Emmos D.B. (1977) Cheddar cheese made with bovine pepsin. II. Texture-microstructure-Composition relationship. *J. Inst. Can. Sci. Technol. Aliment.* 10, 78-84
- Vassal L., Desmazeaud M.J. & Gripon J.C. (1982) Modification de fromages à pâte pressée par addition d'une métalloprotéase de *Micrococcus caseolyticus*. International symposium on the use of enzyme in food technology, pp. 315-319
- Vernon-Carter E.J. & Sherman P. (1978) Evaluation of the firmness of Leicester cheese by compression tests with the Instron universal testing machine. *J. Texture Stud.* 9, 311-324
- Walstra P. & Van Vliet T. (1982) Rheology of cheese. *IDF Bull.* 153, 22-27
- Weinberg Z.G. & Angel S. (1984) Stress relaxation and tensile strength testing of a processed fish product. *J. Texture Stud.* 15, 59-66