

Diversité de quelques propriétés fonctionnelles à chaud de l'Emmental français

Romain RICHOUX^a, Grégory ROSET^a, Marie-Hélène FAMELART^b,
Jean-René KERJEAN^{a*}

^a Institut Technique Français des Fromages, ITFF, BP 6224, 35 062 Rennes Cedex, France

^b Laboratoire de recherches de technologie laitière, INRA, 65 rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes Cedex, France

(Reçu le 11 juillet 2000 ; accepté le 9 janvier 2001)

Abstract — Diversity of some functional characteristics of melted French Emmental-cheese.

Four methods were developed or revised to determine the functionality of melted Emmental-cheese (Swiss-cheese). Flowability was measured using a modified Schreiber test. Stretchability was assessed by a new method involving vertical traction. A butyrometric method was applied to quantify oiling-off. Browning of cheese-gratin was measured objectively with a colour meter (L^* , a^* , b^*). The repeatability and the power of these tests were satisfactory. The functionality of 48 french commercial Emmental-cheeses was determined over one year. Great variations were registered. The flowability index (melted cheese area divided by the initial area) ranged from 1.0 to 2.7. The oiling-off ranged from 7 to 17 g fat per 100 g of cheese (30 to 60 g·100 g⁻¹ fat). The length of the strings of melted cheese (stretchability) ranged from 80 to 950 mm. Ranges of 13 a.u. L^* , 9 a.u. a^* and 9 a.u. b^* were observed for colour measurement. Meltability, stretchability, oiling-off and browning were strongly correlated. Finally, Principal Component Analysis showed the great diversity of the functionality of melted French Emmental-cheese.

Emmental-cheese / meltability / oiling-off / stretchability / browning

Résumé — Quatre techniques de mesure des propriétés fonctionnelles de l'Emmental ont été développées ou adaptées pour la détermination des caractéristiques d'étalement, de filant, d'exsudation d'huile et de couleur de gratin. L'étalement était mesuré par un test de Schreiber modifié, la couleur de gratin par une analyse au chromamètre (L^* , a^* , b^*). Des méthodes originales ont été développées pour l'appréciation du filant (test de traction verticale) et de l'exsudation d'huile (méthode butyrométrique). La répétabilité et le pouvoir discriminant de ces analyses ont été déterminés. Quarante-huit échantillons d'Emmentals du commerce, représentatifs de la production française, ont été prélevés et

* Correspondance et tirés à part

Tél. : (33) 2 23 48 55 88 ; fax : (33) 2 23 48 55 89 ; e-mail : itff.rennes@wanadoo.fr

caractérisés. Le coefficient d'étalement (rapport des surfaces du fromage fondu et du fromage initial) variait de 1 à 2,7. L'exsudation d'huile variait de 7 à 17 g de matière grasse pour 100 g de fromage soit 30 à 60 g·100 g⁻¹ de matière grasse. La longueur des fils de fromage fondu variait entre 80 et 950 mm. Pour la couleur des gratins, des plages de variation de 13 unités arbitraires (u.a.) de L*, 9 u.a. de a* et 9 u.a. de b* ont été enregistrées. L'intensité du brunissement, de l'étalement, de l'exsudation d'huile et du filant étaient fortement corrélés. Une analyse en composantes principales a révélé une grande diversité de propriétés fonctionnelles à chaud au sein de l'univers de l'Emmental français.

Emmental / fonte / filant / exsudation d'huile / brunissement

1. INTRODUCTION

Avec une production annuelle de 247 000 tonnes [30], la France est le premier fabricant mondial d'Emmental. Cette transformation représente 13 % de la collecte de lait et près de 25 % de la production fromagère nationales. Des estimations du Syndicat Interprofessionnel du Gruyère français (communication personnelle) chiffrent aux deux tiers la part de l'Emmental consommé dans des préparations culinaires à chaud : gratins, pizzas, pâtes, sauces, croque-monsieur, etc. Il ne s'agit pas d'un phénomène isolé, on assiste depuis quelques années à une forte croissance des fromages à vocation culinaire. La progression spectaculaire de la mozzarella aux États-Unis (environ 940 000 t de production annuelle soit 30 % de la production nationale) en est un bon exemple [8].

Face à la croissance du marché de ce type de produit, la position hégémonique traditionnelle de l'Emmental en cuisine pourrait se trouver menacée. En effet, malgré son utilisation avant tout culinaire, la qualité de l'Emmental reste essentiellement appréciée à froid. Les propriétés fonctionnelles du fromage chaud, tant mécaniques (propriétés d'étalement, de filant, de texture) que visuelles (exsudation d'huile, couleur), pour lesquelles le consommateur achète de l'Emmental sont rarement prises en compte par les industriels fromagers.

Béhérec et Clément [2] ont ainsi recensé, auprès d'utilisateurs ménagers et indus-

triels, quatre propriétés fonctionnelles majeures : les aptitudes à l'étalement, et à filer, l'exsudation d'huile et la couleur du fromage fondu ou gratiné. Pour Kindstedt [14], l'élasticité du fromage fondu serait également déterminante.

De multiples techniques ont été proposées pour apprécier les propriétés fonctionnelles à chaud des fromages [14, 23, 26, 28]. La mesure des propriétés de fonte et d'étalement, qualités principalement étudiées, fait souvent appel à des tests de type empirique, simulant le comportement du fromage en conditions culinaires : tests de Schreiber [19, 22], d'Arnott [26], du tube [28], de perte de forme [6], détermination du point de ramollissement [5, 21, 28]. L'évaluation sensorielle est parfois utilisée [2, 18]. Des méthodes plus fondamentales, non directement reliées à la perception du consommateur, ont également été proposées [2, 14, 20, 23, 26, 31] : essais harmoniques sous balayage de température, viscosité élongationnelle bi-axiale apparente, rhéométrie capillaire.

La bibliographie fait état de techniques d'exsudation sur papier [14], dérivées du test de Schreiber, ou d'extraction au méthanol et centrifugation [15, 17] pour la détermination de l'exsudation d'huile.

L'aptitude des fromages à filer est traditionnellement appréciée par un test empirique à la fourchette. Plusieurs techniques de mesure objective ont été développées : viscosité hélicoïdale apparente [16] (considérée plutôt aujourd'hui comme un indice

d'élasticité [6, 8]), tests de traction verticale [1] ou horizontale [7, 8].

Plus rarement étudiée, la couleur des fromages fondus ou gratinés est souvent appréciée de manière visuelle ou mesurée au chromamètre [14, 26].

Le premier objectif de cette étude consistait en la mise au point de techniques simples de caractérisation des propriétés fonctionnelles à chaud de l'Emmental. Quatre méthodes ont ainsi été développées ou adaptées pour apprécier les propriétés d'étalement, de filant, d'exsudation et de gratinage des fromages. Considérant les étroites corrélations trouvées par différents auteurs [20, 31] entre les tests de type empirique et les mesures purement rhéologiques, le choix des techniques s'est délibérément porté sur des méthodes facilement transférables auprès des industriels fromagers. L'absence de support alimentaire a également été retenue pour développer des tests plus polyvalents en terme de modèle culinaire et pour s'affranchir des interactions entre le support et le fromage [32].

La diversité de ces quatre propriétés fonctionnelles au sein de l'univers de l'Emmental a été ensuite évaluée avec les méthodes développées, une comparaison plus globale s'intéressant aux différentes familles de fromages ayant été réalisée récemment [2].

L'objectif de ce travail était donc double : méthodologique en développant ou en adaptant des tests adaptés à l'Emmental, et descriptif avec un travail de caractérisation sur 48 Emmentals du commerce.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Fromages analysés

Quarante-huit échantillons d'Emmental ont été prélevés, dans les hypermarchés de

la région rennaise entre février 1999 et décembre 1999, sous forme de plaquettes préemballées de 200 g à 400 g. Trente-six Emmentals industriels au lait thermisé, de diverses provenances et de durée d'affinage variable ont été testés ainsi que 12 Emmentals traditionnels au lait cru et affinés au minimum 70 j. Sans être *sensu stricto* représentatif du marché de l'Emmental, ce plan d'échantillonnage avait pour objectif de traduire la diversité de la production d'Emmental français. Après écrouûtage, les plaquettes étaient débitées en cubes de 3 à 4 cm d'arrête et râpées, à 4 °C, à l'aide d'une râpe ménagère manuelle. À titre indicatif, les brins de fromage râpé présentaient une longueur moyenne de 20 à 30 mm pour un rayon de 1 à 1,5 mm.

Le fromage râpé était conservé en boîte hermétique à 4 °C et analysé dans les 48 h après préparation. Des essais préliminaires (non montrés) avaient précédemment montré l'absence d'impact de telles conditions de stockage sur les quatre propriétés fonctionnelles étudiées.

2.2. Analyses physico-chimiques

La composition physico-chimique des 48 Emmentals a été analysée par le Laboratoire d'Analyses et de Recherches Fromagères (LARF-ITFF, Mamirolle, France) avec les méthodes décrites par Berdagué et al. [3] : extrait sec total, matières grasses, matières azotées totales (NT), matières azotées solubles à pH 4,6 (NS), matières azotées solubles dans le TCA à 12 % (NPN), fractions caséiques (caséines α_{s1} , α_{s1-1} , β , δ), pH, calcium, chlorures, lactates, acides gras volatils.

2.3. Mesure des propriétés fonctionnelles

Les propriétés d'étalement des fromages étaient appréciées selon une technique dérivée du test de Schreiber [19] et proche

des suggestions de Muthukumarappan et al. [22]. Huit grammes d'Emmental étaient placés dans un emporte-pièce cylindrique (40 mm de diamètre), au centre d'une feuille de papier de qualité laser (80 g·m⁻²) comprenant un cercle de même diamètre et six rayons pré-tracés. Après la formation d'un palet de fromage par un pressage à 65 g·cm⁻² pendant 2 min, l'emporte-pièce était retiré. La feuille, supportant le palet de fromage, était placée 3 min dans un four à chaleur tournante ménager (modèle RX 5449, De Dietrich, RUEIL-MALMAISON, France) équilibré à 225 °C. Après 3 min dans le four, la température du fromage atteignait 103 °C ± 2 °C. Après 1 min de refroidissement de l'ensemble feuille plus fromage fondu, la feuille de papier était retournée et la détermination du rayon moyen du fromage fondu était effectuée à partir de la mesure des 6 « rayons ». La surface du fromage fondu était ensuite calculée à partir de ce rayon moyen, en postulant une forme circulaire. Le coefficient d'étalement était ensuite calculé en divisant la surface du fromage fondu par la surface initiale du palet de fromage.

Cinq répétitions par échantillon étaient effectuées.

Une estimation de l'exsudation d'huile était effectuée à partir du test d'étalement en mesurant le rayon de l'aurole de matière grasse entourant le fromage fondu. Le résultat était exprimé en terme de différence des rayons de l'aurole de matière grasse et du fromage fondu. Dans un second temps, une méthode originale d'extraction a été développée pour obtenir une quantification plus rigoureuse. Trois grammes de fromage râpé étaient introduits dans un butyromètre à fromage van Gulik. Après 20 min de chauffage en bain-d'eau à 65 °C, les butyromètres étaient remplis d'eau à 65 °C et centrifugés pendant 2 min à 1 200 tr·min⁻¹ (centrifugeuse à butyromètres thermostatée à 65 °C). Après passage au bain-marie à 65 °C pendant 2 min en position verticale, la détermination de la

quantité d'huile exsudée était effectuée directement par lecture sur la colonne. Deux déterminations par échantillons étaient pratiquées. Les résultats étaient exprimés de manière brute (g·100 g⁻¹ de fromage) et rapportés à la teneur en matière grasse du fromage, déterminée par la méthode Heiss [10].

Le comportement des fromages en conditions gratinantes était apprécié par la mesure instrumentale de la couleur après chauffage au four sans support alimentaire (dénommée couleur de gratin dans le texte). Dix grammes de fromage étaient répartis régulièrement sous forme d'un fin tapis dans un moule à tartelette à revêtement Téflon de 8 cm de diamètre. Le moule était placé en position centrale dans un four à chaleur tournante à 225 °C pendant 6,5 min. Après aplanissement de la surface à la spatule, le fromage « gratiné » était démoulé, refroidi pendant 2 min sur une surface plane et froide, puis placé sur un support de lecture blanc. Cinq mesures colorimétriques étaient ensuite réalisées à l'aide d'un chromamètre, doté d'une tête de lecture de 50 mm de diamètre et utilisant l'éclairage standard D65 de la CIE et un angle de lecture de 0° (modèle CR-310, Minolta, Carrières-sur-Seine, France) : une mesure en position centrale et 4 mesures périphériques en des points diamétralement opposés. À partir des coordonnées de l'espace couleur CEI (L*, a*, b*, exprimées en unité arbitraires – u.a.), les valeurs de saturation [C* = (a² + b²)^{1/2} en u.a.] et d'angle de teinte métrique [H° = tan⁻¹(b/a) en degrés] étaient calculées. Ces coordonnées dans l'espace couleur sont exprimées en unités arbitraires (u.a.). Cinq déterminations étaient réalisées par échantillon.

Les propriétés filantes des fromages étaient appréciées par le test de traction verticale précédemment décrit [13]. Dix-sept grammes de fromage râpé étaient placés dans un bécher de 100 mL de forme haute en Pyrex. Un mobile-harpon à 6 branches était introduit dans le bécher et l'ensemble

placé en bain d'eau à 82 °C pendant 9,5 min. Le bécher était ensuite retiré du bain d'eau et le harpon fixé à une machine de traction universelle INSTRON 4501 (INSTRON SA, Guyancourt, France), équipée d'un capteur 100 N. Une traction verticale à une vitesse de 1 015 mm·min⁻¹ était alors pratiquée jusqu'à la rupture du dernier fil de fromage ainsi formé. La température du fromage atteignait 78 °C ± 1 °C au début de la phase d'étirement et diminuait de 10 °C après une minute (soit la fin du test pour les fromages les plus filants). L'aptitude à filer était ainsi appréciée par la distance parcourue par le mobile avant la rupture du dernier fil. Cinq déterminations par échantillon étaient pratiquées.

2.3. Analyses statistiques

Une analyse en composantes principales (ACP) était effectuée sur les 48 Emmentals, à l'aide du logiciel STATITCF version 4, avec les variables suivantes : coefficient d'étalement (ETA), longueur de fil (FIL), exsudation sur papier (HUI), luminance (L*), saturation (C*), angle de teinte métrique (H°), a* et b*. Une seconde ACP a été effectuée en incluant la variable « exsudation d'huile butyrométrique » (HB) avec les 31 Emmentals pour lesquels cette analyse a été réalisée.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Composition des fromages

La composition physico-chimique des Emmentals testés est compilée dans le tableau I. Les valeurs moyennes et leur dispersion sont en bon accord avec les résultats de Berdagué et al. [3]. Dans la présente étude, les teneurs plus basses en matière sèche et en matières azotées solubles s'expliquent probablement par la part plus importante d'Emmentals industriels dans l'échantillonnage.

3.2. Caractéristiques analytiques des méthodes

Le tableau II donne la gamme de variation et les valeurs de répétabilité (sur la base des cinq déterminations effectuées par échantillon) obtenues avec les quatre méthodes mises en œuvre. À l'exception de la mesure du filant, les coefficients de variation de répétabilité sont globalement inférieurs à 5 %, soit un niveau équivalent aux techniques les plus répétables décrites dans la bibliographie [14, 23, 24, 26, 28].

En accord avec Rüegg et al. [28], la mesure d'exsudation d'huile sur papier donne des résultats peu répétables et peu discriminants, justifiant le développement d'une technique par extraction. La répétabilité obtenue avec cette méthode par extraction est équivalente à celle de Kindstedt et Rippe [17]. Le protocole est plus simple, plus rapide et ne requiert pas de réactifs dangereux comme le méthanol.

La répétabilité des mesures des propriétés filantes est la plus faible parmi les analyses développées dans cette étude. La diminution de la température au cours du test peut l'expliquer en partie. Cette répétabilité reste néanmoins supérieure à celles précédemment décrites dans la bibliographie [1, 4, 8, 16, 26].

Pour les mesures des propriétés d'étalement, de filant et de brunissement, la puissance du test ($= 1 - \beta$, β étant le risque de seconde espèce ou de non différenciation) avoisine 80 % pour un risque de première espèce $\alpha = 0.05$ et une différence des moyennes de 2 écarts-types soit 0.2 point de coefficient d'étalement, 100 mm de longueur de fil, 2 u.a. de L*, 1 u.a. de b*, a* et C*.

Globalement, la répétabilité des tests mis en œuvre distingue significativement des fromages dont les différences de propriétés fonctionnelles équivalent à 10 % environ de la plage de variation observée dans l'univers de l'Emmental.

Tableau I. Composition des fromages.

EST : extrait sec total, MG : matières grasses, G/S : gras-sur-sec, H/ESD : humidité sur extrait sec dégraissé, Ca : calcium, Ca/ESD : calcium sur extrait sec dégraissé, NaCl : taux de sel, NaCl/H : sel sur humidité, NT : matières azotées totales, NS/NT : matières azotées solubles à pH 4,6 sur matières azotées totales, NPN/NT : matières azotées solubles dans le TCA 12 % sur matières azotées totales, indice de protéolyse CN β , dégradation de la caséine $\beta = \Sigma \text{CN } \gamma / (\text{CN } \beta + \Sigma \text{CN } \gamma)$, indice de protéolyse CN α_{s1} , indice de dégradation de la caséine $\alpha_{s1} = \text{CN } \alpha_{s1-1} / (\text{CN } \alpha_{s1-1} + \text{CN } \alpha_{s1})$.

Table I. Composition of the cheeses.

EST: total solid, MG: fat, G/S: fat in dry matter, H/ESD: moisture/non fat solid, Ca: calcium, Ca/ESD: calcium/non fat solid, NaCl: salt, NaCl/H: salt in moisture, NT: crude protein, NS/NT: pH 4.6 soluble nitrogen/total nitrogen, NPN/NT: TCA 12% soluble nitrogen/total nitrogen, proteolyse index CN β , β -casein breakdown index = $\Sigma \gamma \text{ CN} / (\beta \text{ CN} + \Sigma \gamma \text{ CN})$, proteolyse index CN α_{s1} , α_{s1} -casein breakdown index = $\alpha_{s1-1} \text{ CN} / (\alpha_{s1-1} \text{ CN} + \alpha_{s1} \text{ CN})$.

Analyse	Unité	Moyenne	Écart-type	Médiane
EST	g·100 g ⁻¹	62,6	1,26	62,5
MG	g·100 g ⁻¹	29,8	1,08	29,6
G/S	%	47,7	1,07	47,4
H/ESD		1,14	0,06	1,13
pH		5,63	0,11	5,58
Ca	g·100 g ⁻¹	0,98	0,04	0,98
Ca/ESD	g·100 g ⁻¹	2,96	0,12	2,98
NaCl	g·100 g ⁻¹	0,42	0,10	0,41
NaCl/humidité	g·100 g ⁻¹	1,13	0,25	1,09
NT	g·100 g ⁻¹	28,2	0,74	28,1
NS/NT	%	17,3	4,41	16,2
NPN/NT	%	12,6	2,80	12,0
lactates	mg·100 g ⁻¹	570	341	675
acétate	mg·100 g ⁻¹	177	94,4	155
propionate	mg·100 g ⁻¹	328	122	320
butyrate	mg·100 g ⁻¹	20,8	10,9	20,7
isovalérate	mg·100 g ⁻¹	3,1	2,4	2,5
caproate	mg·100 g ⁻¹	2,7	2,1	2,3
indice de protéolyse CN β		0,39	0,08	0,38
indice de protéolyse CN α_{s1}		0,45	0,14	0,46

3.2. Propriétés fonctionnelles des 48 Emmentals

Le tableau III compile les résultats obtenus sur les 48 Emmentals et illustre la forte

variabilité des propriétés fonctionnelles des fromages du commerce. Le coefficient d'étalement varie par exemple de 1,0 (absence d'étalement) à 2,7 (augmentation de la surface du fromage de + 170 %).

Tableau II. Caractéristiques analytiques des méthodes utilisées (plage de variation, écart-type de répétabilité maximal, coefficient de variation moyen), n = 5.

Table II. Characteristics of the methods (range, maximal standard deviation of repeatability, mean coefficient of variation of repeatability), n = 5.

Propriété	Plage de variation	Écart-type de répétabilité maximal	Coefficient de variation de répétabilité moyen (%)
Étalement	1–2,7	0,1	4
Exsudation			
– sur papier	5–10 mm	1	12
– butyrométrie	7–17 g·100 g ⁻¹	0,5	4
Filant	80–950 mm	50	15
Brunissement			
L*	62–75 u.a.	1	1,3
a*	7–16 u.a.	0,5	6,1
b*	43–52 u.a.	0,5	0,7
C*	43–54 u.a.	0,5	1,2
H°	72–82°	0,5	0,9

Tableau III. Propriétés thermoplastiques des 48 Emmentals : moyenne, écart-type, médiane (N = 48 sauf pour l'exsudation butyrométrique : N = 31).

Table III. Functionalities (mean, standard deviation, median) of melted Emmental-cheeses: melting index, oiling-off (paper and butyrometric methods), stretchability and the various browning index (N = 48 except for oiling-off measured with the butyrometric method: N = 31).

Propriété	Moyenne	Écart-type	Médiane
Étalement (indice)	1,82	0,48	1,94
Exsudation			
– sur papier (mm)	7,4	1,1	7,3
– butyrométrie (g·100 g ⁻¹)	13,5	2,68	13,5
Filant (mm)	283	235	230
Brunissement			
L* (u.a.)	69,1	2,77	69,9
a* (u.a.)	10,9	2,32	10,4
b* (u.a.)	48,4	2,50	49,3
C* (u.a.)	49,7	2,79	50,2
H° (°)	77,4	2,26	78,1

La longueur des fils de fromage fondu varie d'un facteur 1 à 10.

La figure 1 révèle une distribution bimodale du coefficient d'étalement, laissant supposer l'existence de deux populations. La distribution des longueurs de fils (Fig. 2) montre une allure plus gaussienne même si 10 % des échantillons se distinguent par une longueur de fil très importante (> 600 mm). L'exsudation d'huile, appréhendée par la méthode qualitative (non montré) ou par extraction (Fig. 3), présente également une distribution plus gaussienne. L'analyse colorimétrique des « gratins » donne une répartition à tendance bimodale pour la luminance L* (Fig. 4), la saturation C* et l'angle de teinte métrique (H°) (non représentés).

Une forte variabilité d'aptitude à la fonte avait déjà été observée par Rüegg et al. [28] sur 14 Emmentals : point de ramollissement moyen de 74,5 °C pour un écart-type de 7,8 °C et une dispersion de 24 °C. Au contraire, Guinea et al. [9] ont enregistré une faible dispersion du coefficient d'étalement de cheddars (n = 8) et de mozzarella (n = 8) du commerce : de 2,85 à 3,30 et de 2,05 à

2,81 respectivement. Ces auteurs ont observé également une moindre hétérogénéité des propriétés filantes, mesurées en traction horizontale sur un support pizza : 10,5 cm à 39,3 cm pour le cheddar et 56,0 cm à 134,7 cm en mozzarella.

Les figures 5 et 6 présentent la cartographie des 48 Emmentals par analyse en composantes principales (ACP) en prenant en compte toutes les variables à l'exception de l'exsudation d'huile mesurée par extraction. Les trois premières composantes principales contribuent respectivement à 62,0 %, 15,8 % et 11,5 % de la variance totale soit 89,3 % des variations. Le premier axe est corrélé négativement avec L* (r = - 0,93) et H° (r = - 0,82) des gratins, et positivement avec a* (r = 0,91), le coefficient d'étalement (r = 0,88), C* (r = 0,88), b* (0,80) et la longueur de fil (r = 0,64). Le deuxième axe est corrélé négativement à l'exsudation d'huile (r = - 0,72). La troisième composante principale est corrélée positivement à la longueur de fil (r = 0,54) et à l'exsudation d'huile (r = 0,53).

Le plan formé par les deux premières composantes principales (78 % de la

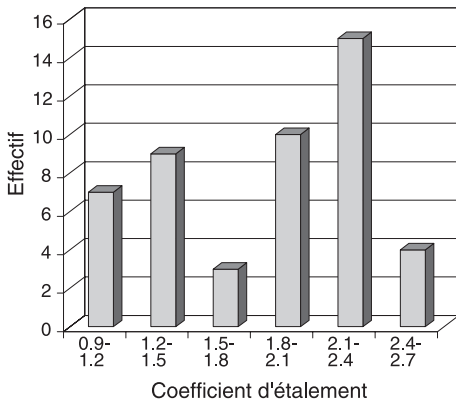


Figure 1. Histogramme de répartition des coefficients d'étalement (N = 48).

Figure 1. Distribution of the index of meltability/flowability (N = 48).

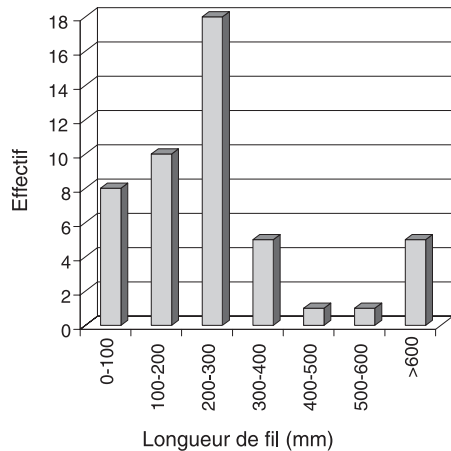


Figure 2. Histogramme de répartition de la longueur de fil (N = 48).

Figure 2. Distribution of stretchability in mm (N = 48).

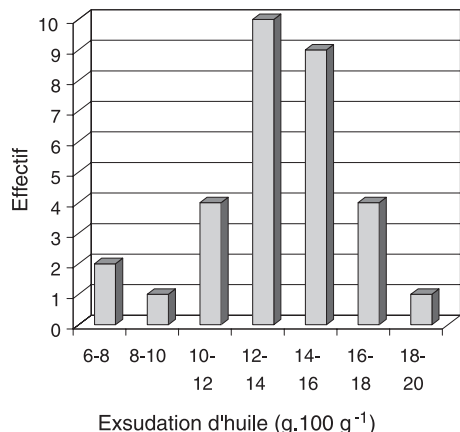


Figure 3. Histogramme de répartition de l'exsudation d'huile mesurée par extraction butyrométrique (N = 31).

Figure 3. Distribution of oiling-off (butyrometric method, N = 31).

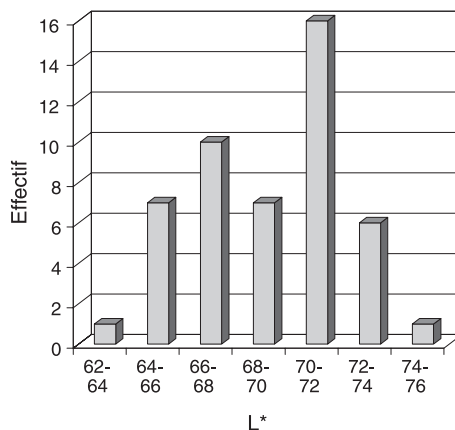


Figure 4. Histogramme de répartition de la luminosité (L*) des gratins (N = 48).

Figure 4. Distribution of L* value (browning method, N = 48).

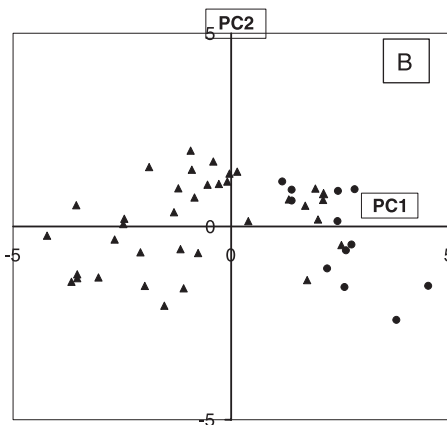
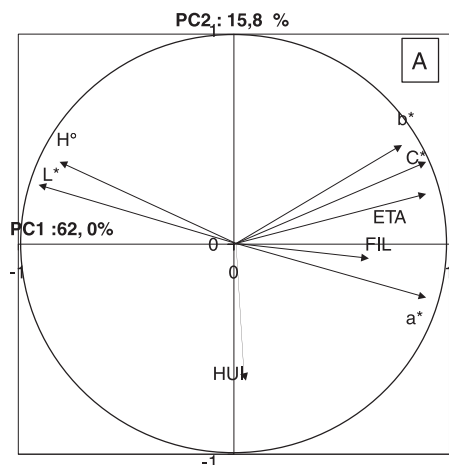


Figure 5. Analyse en composantes principales des propriétés thermoplastiques (plan formé des composantes principales 1 et 2).

(A) Cercle des corrélations avec les variables étalement (ETA), filant (FIL), exsudation sur papier (HUI), luminosité (L*), saturation (C*), angle de teinte métrique (H°), a* et b*. (B) Plots of the 48 Emmentals analysés : (▲) fromages au lait thermisé ; (●) fromages au lait cru.

Figure 5. Principal Component Analysis of the functionalities of melted Emmental-cheese (PC1 versus PC2).

(A) Attribute correlation circle with the variables meltability (ETA), stretchability (FIL), Oiling-off (paper method) (HUI), and the various index of browning (L*, a*, b*, C*, H°). (B) Plots of the Emmentals-cheeses (N = 48): (▲) thermized-milk cheeses; (●) raw-milk cheeses.

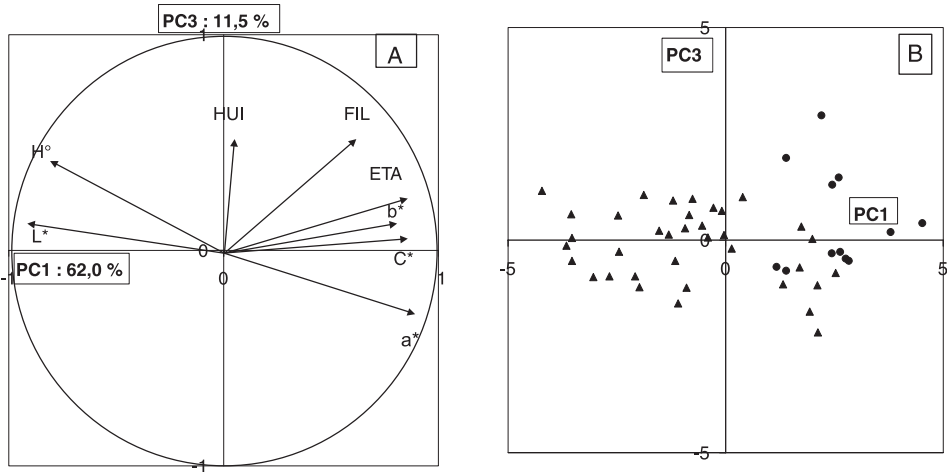


Figure 6. Analyse en composantes principales des propriétés thermoplastiques (plan formé des composantes principales 1 et 3). Mêmes légendes que la figure 5.

Figure 6. Principal Component Analysis of the functionalities of melted Emmental-cheese (PC1 versus PC3). Legends: see figure 5.

variance) discrimine bien les fromages. Les Emmementals situés sur la partie droite du graphique correspondant à de forts niveaux d'étalement, de filant, de saturation et de composantes a^* et b^* ainsi qu'à de faibles valeurs de luminance (gratins sombres) et d'angle de teinte métrique (gratins « jaunes rougeâtres »). Cela correspond à la totalité des 12 fromages traditionnels au lait cru et à 8 Emmementals industriels au lait thermisé. Les fromages situés dans la partie inférieure du graphique correspondent à des Emmementals qui exsudent plus intensément de l'huile. Le plan formé par la première et la troisième composante principale (73,5 % de la variance) isole plus nettement les Emmementals dotés de propriétés filantes particulièrement importantes (partie en haut et à droite du graphique).

En ajoutant la variable exsudation par extraction, ou en la substituant à l'exsudation sur papier, pour les 31 fromages sur lesquels cette analyse a été effectuée, l'ACP donne une cartographie très proche (résultats non montrés). Les vecteurs propres de la va-

riable « exsudation d'huile butyrométrique » sont voisins de ceux de la variable « étalement ». En substitution de la variable « exsudation d'huile sur papier » (HUI), le taux d'explication de la variance totale atteint 87,7 % pour les deux premières composantes principales (95,8 % pour les trois premières composantes principales). Les deux premiers axes permettent une meilleure distinction des fromages très filants.

3.4. Relations entre les quatre propriétés fonctionnelles

La matrice des corrélations de l'analyse en composantes principales (Tab. IV) montre que les variables d'étalement, de filant et d'intensité du brunissement (fortes valeurs de a^* , b^* , C^* ; faibles valeurs de L^* et H^0) sont fortement liées. Seule l'exsudation d'huile mesurée sur papier est indépendante des autres variables : aucun des coefficients de corrélation n'est statis-

Tableau IV. Coefficients de corrélations entre les propriétés fonctionnelles (N = 48 sauf HB et HB % : N = 31) : chiffres en italique pour $p < 0,05$, en italique et gras pour $p < 0.01$. Même légendes qu'à la figure 5 avec HB et HB % : exsudation par méthode butyrométrique exprimés en g·100 g⁻¹ de fromage et en g·100 g⁻¹ de matière grasse respectivement.

Table IV. Correlation coefficients between the functional properties (N = 48 except HB and HB % : N = 31): italic numbers for $p < 0.05$, italic and bold numbers for $p < 0.01$. Legends: see figure 5 with HB and HB%: oiling-off (butyrometric method) in g·100 g⁻¹ cheese or g·100 g⁻¹ fat respectively.

	ETA	FIL	HUI	HB	HB %	L*	a*	b*	C*	H°
ETA	1,00	<i>0,67</i>	-0,03	<i>0,80</i>	<i>0,78</i>	<i>-0,72</i>	<i>0,65</i>	<i>0,80</i>	<i>0,83</i>	<i>-0,53</i>
FIL		1,00	0,13	<i>0,65</i>	<i>0,54</i>	<i>0,63</i>	<i>0,40</i>	<i>0,40</i>	<i>0,42</i>	<i>-0,35</i>
HUI			1,00	0,15	0,15	-0,12	0,09	-0,10	-0,06	-0,11
HB				1,00	<i>0,97</i>	<i>-0,68</i>	<i>0,65</i>	<i>0,73</i>	<i>0,77</i>	<i>-0,55</i>
HB %					1,00	<i>-0,62</i>	<i>0,62</i>	<i>0,74</i>	<i>0,77</i>	<i>-0,50</i>
L*						1,00	<i>-0,94</i>	<i>-0,53</i>	<i>-0,64</i>	<i>-0,93</i>
a*							1,00	<i>0,59</i>	<i>0,70</i>	<i>-0,98</i>
b*								1,00	<i>0,99</i>	<i>-0,41</i>
C*									1,00	<i>-0,54</i>
H°										1,00

tiquement significatif. Au contraire, l'exsudation d'huile, mesurée par butyrométrie, est corrélée positivement au coefficient d'étalement, à la longueur des fils et aux variables colorimétriques a*, b*, C*. À l'inverse, elle est reliée négativement aux paramètres L* et H°, traduisant des couleurs claires de gratins. Les deux modes d'expression de l'exsudation d'huile par butyrométrie donnent des corrélations très proches avec les autres variables et sont eux même fortement corrélés. Ces observations peuvent être mises en parallèles avec les travaux américains, établissant le rôle fondamental de l'exsudation d'huile sur les propriétés de fonte et de couleur de la mozzarella [27].

Logiquement, les coordonnées des gratins dans l'espace couleur sont fortement corrélées entre elles. C'est particulièrement le cas pour les variables calculées C* ou H°, respectivement très corrélées à b*

($r = 0,99$) ou à L* ($r = 0,93$) et a* ($-0,98$). Le calcul de ces valeurs permet ainsi de synthétiser les coordonnées L*, a*, b* et de réduire (et en les remplaçant) le nombre de variables prises en compte.

3.5. Origines de la diversité des propriétés fonctionnelles

Des écarts de composition et/ou des différences de technologie peuvent être à l'origine de la diversité des propriétés fonctionnelles enregistrée dans la présente étude. L'HFD, le G/S, le rapport NS/NT, la teneur en calcium sont des paramètres connus pour leur influence sur les propriétés d'étalement et d'exsudation d'huile des fromages, notamment de la mozzarella [14, 26, 28]. L'impact de la durée d'affinage, de l'intensité du traitement thermique du lait ou du chauffage en cuve, du type de

coagulant ou de ferments utilisés est, par exemple, également bien établi. La teneur en galactose résiduel et l'intensité de la protéolyse secondaire ont été identifiées comme des facteurs majeurs du brunissement de la mozzarella [26]. La teneur en calcium, le rapport streptocoques sur lactobacilles, le potentiel protéolytique des souches de lactobacilles thermophiles sont des paramètres déterminants pour les propriétés filantes [11, 26].

Cependant, de part sa nature, ce travail d'enquête ne permet pas de mettre en relation la composition et les propriétés fonctionnelles de l'Emmental. Comme l'estiment Scherrer [29] ou Hunter et al. [12], l'interprétation de ces approches descriptives ne peut être étendue à l'étude rationnelle des causes explicatives, tout particulièrement dans ce contexte d'un nombre modeste d'échantillons.

En effet, la composition de ces fromages est le résultat d'une grande diversité technologique (nature du lait et des auxiliaires de fabrication, de procédés de traitement du lait, de fabrication et d'affinage), dont les effets sur les propriétés fonctionnelles peuvent être importants sans qu'il y ait de modification de composition grossière des fromages. La bibliographie évoque, par exemple, les impacts de l'homogénéisation du lait [26], de l'emploi de rétentat de babeurre [25], de la nature du coagulant [14, 26] sur les propriétés de fonte et de filant de la mozzarella ou du cheddar. Relier la composition grossière aux propriétés fonctionnelles serait négliger l'incidence directe des pratiques technologiques et pourrait conduire à des conclusions erronées.

Une démarche expérimentale, construite à partir des données bibliographiques et réalisée dans des conditions technologiques contrôlées, est actuellement menée par notre laboratoire pour apporter des éléments explicatifs aux différences de fonctionnalités observées dans le présent travail d'enquête.

5. CONCLUSIONS

Au cours de cette étude, quatre méthodes simples, répétables et discriminantes ont été mises au point ou adaptées de la bibliographie pour caractériser les propriétés thermoplastiques de l'Emmental. Ces techniques instrumentales ont permis d'effectuer un état des lieux des aptitudes culinaires de l'Emmental français et d'en démontrer la forte variabilité. La simplicité de ces méthodes permet aisément leur transfert auprès des industriels fromagers et leur utilisation dans le cadre du contrôle qualité. Dans cet esprit, un appareil pilote spécifique à la mesure du filant est en cours de développement dans notre laboratoire. Une validation sensorielle de ces quatre méthodes est également en cours.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le Syndicat Interprofessionnel du Gruyère Français (SIGF) et la région Bretagne.

RÉFÉRENCES

- [1] Apostolopoulos C., Simple empirical and fundamental methods to determine objective stretchability of Mozzarella, *J. Dairy Res.* 61 (1994) 405-413.
- [2] Béhérec F., Clément J.F., L'Emmental : un fromage qui fait recette, Ed. SIGF, Paris, 1998.
- [3] Berdagué J.L., Grappin R., Delacroix-Buchet A., Chaillet B., Caractérisation de l'Emmental « Grand-Cru » français. I. Composition physico-chimiques, *Lait* 70 (1990) 1-14.
- [4] Cavella S., Chemin S., Masi P., Objective measurement of the stretchability of mozzarella cheese, *J. Text. Stud.* 23 (1992) 185-194.
- [5] Eberhard P., Moor U., Rüeegg M., Composition et propriétés de fromages à raclette de bonne qualité et de qualité de fonte insuffisante. *Information FAM* n° 172 W, 32 p., Ed. FAM, Berne, 1988.

- [6] Guinee T.P., Pizza cheese quality: effects of processing and ripening. End of project report 1998 DPRC n° 7, Ed. Teagasc, Dublin, 10 p., 1999.
- [7] Guinee T.P., O'Callaghan D.J., The use of a simple empirical method for objective quantification of the stretchability of cheese on cooked pizza pies, *J. Food Eng.* 31 (1997) 147–161.
- [8] Guinee T.P., O'Callaghan D.J., O'Donnell H.J., Stretching the limits of cheese testing, *Eur. Dairy Mag.* 4 (1999) 28–30.
- [9] Guinee T.P., Harrington D., O'Corcoran M., O'Mulholland E., Mullins C., The compositional and functional properties of commercial Mozzarella, Cheddar and analogue pizza cheeses, *Int. J. Dairy Technol.* 53 (2000) 51–56.
- [10] Heiss E., Essai de dosage de la matière grasse dans le fromage, *Dtsch. Molk. Ztg.* 82 (1961) 67–70.
- [11] Hong Y.H., Yun J.J., Barbano D.M., Larose K.L., Kindstedt P.S., Mozzarella cheese: impact of three commercial *Lactobacillus* strains on composition, proteolysis and functional properties, *Aust. J. Dairy Technol.* 53 (1998) 163–169.
- [12] Hunter E.A., McNulty D.A., Banks J.M., Statistical design and analysis of experiments in cheese technology, *Lebensm.-Wiss. u.-Technol* 30 (1997) 121–128.
- [13] Kerjean J.R., Richoux R., Famelart M.H., Valembois S., Jabot M., Measure of stretchability of Emmental cheese, Poster n° 190, 25^e Cong. Int. Lait. 1998, Arrhus, Danemark.
- [14] Kindstedt P.S., Effect of manufacturing factors, composition and proteolysis on the functional characteristics of Mozzarella cheese, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 33 (1993) 167–187.
- [15] Kindstedt P.S., Fox P.F., Modified Gerber test for free oil in melted Mozzarella cheese, *J. Food Sci.* 56 (1991) 1115–1116.
- [16] Kindstedt P.S., Kiely L.J., Revised protocol for the analysis of melting properties of Mozzarella cheese by helical viscosimetry, *J. Dairy Sci.* (1992) 676–682.
- [17] Kindstedt P.S., Rippe J.K., Rapid quantification for free oil (oiling off) in melted Mozzarella cheese, *J. Dairy Sci.* 73 (1990) 867–873.
- [18] Klantschitsch T., Bachmann H.P., Puhan Z., Influence of milk treatment and ripening conditions on quality of raclette cheese, *Lait* 80 (2000) 51–67.
- [19] Kosikowski F.V., Cheese and fermented milk foods, 2nd Ed. Edwards Bross. Inc., Ann Arbor, MI, 1977, pp. 405–406.
- [20] Mounsey J.S., O'Riordan E.D., Empirical and dynamic rheological data correlation to characterize melt characteristics of imitation cheese, *J. Food Sci.* 64 (1999) 701–703.
- [21] Muthukumarappan K., Wang Y.C., Gunasekaran S., Estimating softening point of cheeses, *J. Dairy Sci.* 82 (1999) 2280–2286.
- [22] Muthukumarappan K., Wang Y.C., Gunasekaran S., Short communication: modified Schreiber test for evaluation of Mozzarella cheese meltability, *J. Dairy Sci.* 82 (1999) 1068–1071.
- [23] Olson N.F., Gunasekaran S., Bogenrief D.D., Chemical and physical properties of cheese and their interactions, *Neth. Milk Dairy J.* 50 (1996) 279–294.
- [24] Park J., Roseneau J.R., Peleg M., Comparison of four procedures of cheese meltability evaluation, *J. Food Sci.* 49 (1984) 1158–1162, 1170.
- [25] Poduval V.S., Mistry V.V., Manufacture of reduced fat Mozzarella cheese using ultrafiltered sweet buttermilk and homogenized cream, *J. Dairy Sci.* 80 (1997) 100.
- [26] Rowney M., Roupas P., Hickey M.W., Everett D.W., Factors affecting the functionality of Mozzarella cheese, *Aust. J. Dairy Technol.* 54 (1999) 94–102.
- [27] Rudan M.A., Barbano D.M., Yun J.J., Kindstedt P.S., Effect of fat reduction on chemical composition, proteolysis, functionality and yield of Mozzarella cheese, *J. Dairy Sci.* 82 (1999) 661–672.
- [28] Rüegg M., Eberhard P., Popplewell L.M., Peleg M., Melting properties of cheese, *Bull. IDF* 268, 1991, 36–43.
- [29] Scherrer B., Biostatistiques, Gaëtan Morin Editeur, Chicoutimi, Québec, Canada, 1984, pp. 29–93.
- [30] SIGF, Statistiques pâtes pressées cuites 1999, Ed. SIGF, Paris, 2000.
- [31] Ustunol Z., Karachi K., Steffe J., Arnott test correlates with dynamic rheological properties for determining Cheddar cheese meltability, *J. Food Sci.* 59 (1994) 970–971.
- [32] Wang W., Kindstedt P.S., Gilmore J.A., Guo M.R., Changes in the composition and meltability of Mozzarella cheese during contact with pizza sauce, *J. Dairy Sci.* 81 (1998) 609–614.