

Zeitschrift:	Mitteilungen aus Lebensmitteluntersuchungen und Hygiene = Travaux de chimie alimentaire et d'hygiène
Herausgeber:	Bundesamt für Gesundheit
Band:	94 (2003)
Heft:	5
Artikel:	La couleur du lait et des produits laitiers et sa mesure - un article de synthèse (1972-2002)
Autor:	Chatelain, Yann / Aloui, Jaber / Guggisberg, Dominik
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-982000

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

La couleur du lait et des produits laitiers et sa mesure – un article de synthèse (1972–2002)

Yann Chatelain, Jaber Aloui, Dominik Guggisberg et Jacques Olivier Bosset
Station fédérale des recherches laitières, Berne-Liebefeld, Suisse

Reçu le 4 avril 2003, accepté le 30 juin 2003

Introduction

Contrairement à bien des denrées alimentaires comme la viande, les fruits, les légumes et les vins, le lait et les produits laitiers en général n'ont pratiquement pas de « couleur propre ». Si le lait semble « blanc comme la neige », c'est surtout en raison de ses propriétés photodiffusantes. Le blanc n'est pas une couleur en soi, mais la somme de toutes les composantes de la lumière polychromatique visible. Le lait et les produits laitiers sont constitués de très nombreuses et fines particules solides (par exemple dans les poudres de lait) ou en suspension (micelles de caséines et globules gras dans le lait, la crème etc.) dans des liquides ou dans des milieux pâteux comme le yoghourt, le fromage et le beurre, particules qui ont la propriété de diffuser très efficacement la lumière. La mesure de leur couleur est donc surtout celle de leurs propriétés photodiffusantes, une combinaison d'absorption et de réflexion de la lumière incidente dans toutes les directions et, dans une moindre mesure, la mesure de la couleur de leurs composés chromophores. Au nombre de ceux-ci, on peut citer quelques vitamines (les caroténoïdes et celles du groupe B) voire des produits de condensation se formant au cours du traitement thermique (réaction de Maillard) ou du vieillissement des produits laitiers comme le brunissement non enzymatique de laits en poudre ou de fromages fondus au cours du stockage. Dans le fromage et le beurre on trouve occasionnellement des défauts ponctuels («spots») de couleur sous la forme de zones colorées ou décolorées (1–4). Une préparation du produit et une zone de mesure doivent être alors prédefinis (5).

L'absence de couleur propre du lait et des produits laitiers explique probablement le peu d'intérêt porté à cette question et de travaux consacrés à la mesure de cette grandeur. On ne trouve par exemple aucun article de synthèse sur ce sujet, alors que la couleur est pourtant un critère décisif pour le choix des produits laitiers

par le consommateur (6–8) et donc aussi pour l'assurance qualité des entreprises de transformation (6, 9, 10, 11). Si la couleur des produits laitiers n'est pas acceptable, les autres critères d'appréciation que sont leur saveur et leur texture seront en effet fortement dépréciés (6, 12). Ceci est d'autant plus vrai que généralement l'acheteur de produits laitiers n'a pas d'autre critère d'appréciation que le visuel puisqu'il ne peut ni toucher, ni humer et encore moins goûter ces derniers pour des raisons d'hygiène et/ou de conditionnement (emballage). En complément à d'autres méthodes d'analyse, la mesure de la couleur peut aussi contribuer à authentifier l'origine des fromages (13).

La vision des couleurs et leur appréciation sont par essence subjectives puisqu'elles dépendent de nombreux facteurs tels que l'objet à observer, les conditions d'éclairage et d'observation et surtout la perception visuelle de l'observateur (14–16). Dans une certaine mesure, on peut tenter de les rendre plus objectives en recourant à des standards colorés adéquats, d'où la nécessité de développer des techniques et des instruments de mesure rapides, exacts, précis et fiables. Divers auteurs se sont appliqués à développer et à évaluer de telles méthodes. Si des techniques de mesure fiables existent aujourd'hui pour l'industrie alimentaire, en particulier dans la détection de défauts ponctuels sur des fruits ou sur des pommes de terre (11), la couleur des produits laitiers reste encore un terrain d'exploration où aucune norme métrologique internationale n'a été édictée. Ceci est certainement lié aux difficultés de mesures dues à l'inhomogénéité et à la diversité des produits à considérer.

Plusieurs appareils ont été commercialisés, destinés à différentes applications industrielles notamment pour les textiles, les papiers, les vernis et les produits alimentaires (9) au point que la mesure de leur couleur est devenue aujourd'hui un outil pour le contrôle de qualité en routine (9, 17).

Le présent article de synthèse a pour objectif d'inventorier et d'analyser les publications sur ce thème pour la période 1972–2002. On y traitera successivement des facteurs qui peuvent influencer la couleur du lait et des produits laitiers en général, puis des applications de la mesure de leur couleur. La comparaison des appareils de mesure les plus utilisés fera l'objet d'un survol.

Rappel des principaux systèmes de mesure des couleurs

Divers systèmes de mesure des couleurs ont été proposés. Le principal d'entre eux est le système CIE-X, Y, Z (139). Tous les autres systèmes de mesure des couleurs qui suivent dérivent de façon simple de ce système de base.

Système CIE-X, Y, Z (1931)

C'est le système de mesure des couleurs dit de référence défini par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) en 1931. Les valeurs X , Y et Z sont obtenues par un calcul d'intégrales en fonction de la sensibilité spectrale correspondant aux cônes réceptifs se trouvant dans l'œil humain standard. Le système est basé sur les trois couleurs principales rouge, vert et bleu (le spectre visible se situe entre 380 et

780 nm). Les valeurs X, Y, Z donnent des résultats précis sur une couleur par rapport à une référence donnée. Selon les lois de Fresnel, l'angle de mesure est très important, la lumière réfléchie dépendant de l'angle d'illumination. La CIE a normalisé les angles d'illumination et d'observation suivants : $d(\text{iffus})/8^\circ$, $8^\circ/d(\text{iffus})$, $45^\circ/0^\circ$ et $0^\circ/45^\circ$. En outre, l'ouverture du cône d'observation est aussi prise en compte (CIE 2° et CIE 10°) pour tenir compte de la distribution des cônes et bâtonnets sur la rétine.

Les équations correspondantes (15) sont les suivantes :

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda,$$

où :

$$K = 100 / \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda,$$

$S(\lambda)$ est la distribution relative spectrale d'énergie de l'illuminant,
 $R(\lambda)$ est la réflectance spectrale de l'échantillon à chaque longueur d'onde λ et
 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ sont les fonctions de mélanges des couleurs pour l'Observateur Standard 2° (CIE 1931).

Système x, y, z

Appelé aussi système de chromaticité, il est obtenu comme suit :

$$x = X/(X+Y+Z)$$

$$y = Y/(X+Y+Z)$$

$$z = Z/(X+Y+Z) = 1-x-y$$

où :

- Y correspond à la réflectance ou la transmittance du produit observé,
- x, y, z correspondent aux coordonnées de chromaticité.

Système L, a, b de Hunter (1942)

Il est obtenu à l'aide des formules suivantes :

$$L = 100 \sqrt{Y/Y_0}$$

$$a = K_a \sqrt{[X/X_n - Y/Y_n]/(Y/Y_n)}$$

$$b = K_b \sqrt{[Y/Y_n - Z/Z_n]/(Y/Y_n)}$$

où:

- L correspond à la luminosité,
- a et b correspondent aux coordonnées rouge – vert et jaune – bleu respectivement
- les coefficients de K_a et K_b dépendent de la source de lumière utilisée
- X_n , Y_n et Z_n sont les composantes trichromatiques du diffuseur parfait. Elles dépendent de l'illuminant choisi et de l'observateur de référence CIE 2° ou CIE 10°.

Système CIE L^* , a^* , b^* (CIELAB) (1976)

Il est défini par:

$$L^* = 116 \sqrt[3]{Y/Y_n} - 16$$

$$a^* = 500(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n})$$

$$b^* = 200(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n})$$

où:

- X_n , Y_n et Z_n sont les composantes telles que définies précédemment,
- les valeurs de L^* , a^* et b^* représentent respectivement les positions sur les axes de luminosité (clarté, brillance), rouge/vert et bleu/jaune. Les valeurs de L^* se situent entre 0 et 100. Les valeurs a^* et b^* montrent des valeurs positives ou négatives qui se situent entre +60 et -60.
- les coefficients X/X_n , Y/Y_n et Z/Z_n sont tous plus grands que 0,008856 (si l'un des coefficients est plus petit ou égal à 0,008856, un autre ensemble d'équation sera utilisé (11)).

Indices et paramètres de couleur

Toutes les grandeurs qui suivent dépendent du système colorimétrique choisi.

Indices de jaunissement

$$Y=100 (1,28 X - 1,06 Z)/Y \text{ (ASTM test method D 1925)}$$

mesuré pour les plastiques exposés à la chaleur, la lumière ou autre,

$$Y=100 (1 - 0,847 Z/Y) \text{ (ASTM test method E 313)}$$

mesuré pour les matériaux opaques, blancs et proches du blanc où X , Y et Z sont les composantes trichromatiques de l'échantillon pour l'observateur de référence CIE 1931.

Indices de blancheur

$$*WI=3,388 Z - 3 Y$$

où Y et Z sont les deux composantes trichromatiques de l'échantillon pour l'observateur de référence CIE 1931. Cet indice est mesuré pour les matériaux opaques, blancs et proches du blanc.

$$*WI=Y+800 (x_n-x)+1700 (y_n-y)$$

où Y est la composante trichromatique de l'échantillon, x et y sont ses coordonnées trichromatiques et x_n et y_n les coordonnées trichromatiques du diffuseur parfait (pour un observateur de référence CIE 1931 pour l'illuminant D65 et pour la condition $40 < WI < 5$ $Y-280$). Ce dernier indice est mesuré seulement pour les échantillons ayant l'appellation « blanc » du commerce.

Chroma, saturation

$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$ définie dans l'espace CIELAB.

Angle de teinte

$h_{ab} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ défini dans l'espace CIELAB.

Ecart global de couleur et différence de teinte

$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$

$\Delta H^* = [(\Delta E^*_{ab})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2]^{1/2}$

définis dans l'espace CIELAB.

Indice de Kubelka-Munk

$K/S = kC$

où K et S sont respectivement les coefficients d'absorption et de dispersion. k est une constante et C la concentration du produit. A une longueur d'onde donnée, la relation K/S peut être exprimer comme :

$K/S = (1 - R_\infty)^2 / 2R_\infty$

où R_∞ est la réflectance d'une couche suffisamment épaisse pour que toute augmentation de son épaisseur ne modifie pas la valeur de dispersion. Les valeurs K et S peuvent être mesurées séparément si l'on applique une méthodologie adéquate et moyennant quelques hypothèses de travail. Elles décideront du mode de mesure du produit: une valeur élevée de K permettra une mesure par absorption alors que le contraire obligera à mesurer sa transmittance (18).

Indice de fluorescence

Une substance est dite fluorescente si elle absorbe une lumière à une longueur d'onde définie et la réemet à une autre longueur d'onde plus longue (10). Cet effet particulièrement important pour l'évaluation des azurants optiques n'a pratiquement jamais été exploité sur les produits laitiers.

Classification des articles par produit laitier, indicateur technologique et technique de mesure de la couleur

Il n'est pas possible de traiter exhaustivement de toutes les applications et utilisations possibles ou décrites de la mesure de la couleur de tous les produits laitiers considérés. Une sélection a donc dû être opérée parmi les plus intéressantes pour la pratique qui sera développée dans les chapitres suivants. Il en résultera occasion-

Tableau 1

Classification des articles par produit laitier et par domaine d'utilisation de mesure de la couleur

<i>Domaine d'utilisation</i>	<i>Laits</i>	<i>Fromages</i>	<i>Crèmes, beurres</i>	<i>Yoghurts</i>	<i>Crèmes glacés/ confitures de lait</i>	<i>Poudre de lait/petits laits</i>
Procédé technologique	7, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 55, 71, 72, 73, 84, 88, 96, 99, 104, 105, 110, 111, 112, 114, 115, 123, 125, 127, 136	32, 52, 57, 65, 68, 71, 75, 76, 78, 84, 116, 124, 134	7, 108, 117, 127	126	111, 112, 113, 115, 118, 119, 122, 125, 128	11, 32, 46, 89, 93
Stockage et/ ou affinage	19, 22, 25, 26, 27, 29, 32, 35, 44, 46, 105, 110, 111, 116, 127	4, 27, 57, 58, 59, 60, 64, 66, 67, 68, 70, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 84, 87, 97, 116, 124	31, 108, 117, 130	38, 90, 91, 126	111, 118, 119, 128	11, 46
Activité microbienne	38, 53, 54, 81, 107	1, 3, 4, 38, 61, 64, 73, 80, 82, 95, 101, 107	2, 107	81, 107, 109	107	107
Assurance qualité	17, 20, 45	85, 100				
Techniques de mesure	19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 29, 32, 34, 35, 37, 39, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 54, 138, 90, 92, 104, 113, 114, 115, 123, 125, 128, 129, 131, 136	5, 35, 52, 57, 58, 59, 60, 63, 64, 65, 66, 68, 72, 78, 82, 83, 116, 124	7, 31, 100, 108, 117, 127, 130	8, 12, 56, 103, 126	37, 118, 119, 125	11, 138, 86, 92, 93, 94
Autres applications	19, 20, 21, 24, 25, 29, 34, 35, 40, 44, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 67, 71, 96, 99, 104, 105, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 123, 125, 129	13, 30, 35, 52, 57, 59, 62, 63, 71, 72, 74, 75, 76, 79, 83, 84, 86, 91, 95, 97, 116, 124, 134	3, 31, 86, 130	8, 12, 38, 56, 90, 91, 98, 103, 126	111, 122, 118, 119, 128	46, 89, 93

nellement quelques répétitions. Le tableau 1 classe les articles répertoriés en six groupes principaux selon les produits laitiers considérés (lait, fromages, crèmes et beurres, yoghurts, crèmes glacées et confitures de lait, laits en poudre et petits-lait) et selon les applications de la mesure de la couleur décrites. Vu leur nombre, ces dernières ont été ramenées à l'essentiel. Ces mesures de la couleur peuvent caractériser i) le procédé technologique que le produit a subi avant, pendant ou après sa production, ii) l'influence des conditions de stockage (température, durée, lumière) voire iii) d'autres facteurs comme l'influence du conditionnement et iv) la composition du produit (matière grasse, caroténoïdes, riboflavine, protéines etc.). Certains aspects de la technique de la mesure de la couleur y sont parfois abordés.

Facteurs susceptibles d'influencer la couleur du lait

La couleur du lait est une caractéristique importante et sa mesure a trouvé des applications nombreuses et variées (19). *Bergmann et Schick* (20) considèrent notamment que la couleur des premiers jets de lait de traite constitue un critère permettant d'estimer si la traite produit un lait cru propre à la consommation ou non.

Composition du lait

La composition chimique et la microstructure physique du lait déterminent sa couleur. Au nombre des chromophores chimiques, il faut citer :

- les carotènes, en particulier le β -carotène, composés orangés, photosensibles, solubles dans les globules gras ;
- la riboflavine ou vitamine B₂. Présent en quantité relativement importante dans le lactosérum, la phase aqueuse, ce composé verdâtre est un puissant photosensibilisateur lui-même photodégradable (21–23). La photodégradation du lait se traduit par une augmentation de sa composante bleue (diminution de la valeur b).

Au nombre des composants photodiffusants, il faut mentionner :

- les caséines, principales protéines du lait, incolores. Elles se présentent sous la forme de micelles dont la forme, la structure et le degré d'agrégation dépendent de la température, de la valeur du pH, de la force ionique et de la présence d'ions libres tels que Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺. La formation de vastes agrégats sous l'effet de la chaleur se traduit donc par une augmentation de la photodiffusion (34) ;
- les protéines lactosériques (α -lactalbumine et β -lactoglobuline). Elles sont solubles dans l'eau, mais dénaturées par un traitement thermique et précipitent, devenant ainsi plus photodiffusantes ;
- les globules gras constitués essentiellement de triglycérides en émulsion dans la phase aqueuse du lait, sont donc insolubles dans l'eau. Leur taille, leur nombre et leur répartition dans la phase aqueuse dépendent de la technique d'homogénéisation appliquée.

Traitements technologiques

Les traitements technologiques qui déterminent pour la couleur du lait sont les suivants :

- l'homogénéisation qui réduit la taille des globules gras, et augmente leur nombre, ce qui accroît doublement leur caractère diffusant;
- les traitements thermiques (pasteurisation, UHT direct ou indirect, stérilisation) qui agissent sur le degré de dénaturation des protéines lactosériques et peuvent en outre générer des composés colorés, surtout en présence de sucres réducteurs (24, 25);
- la coagulation du lait qui épaisse ce dernier (fromages, yogourt, séré etc.) en faisant précipiter les caséines en un réseau.

Autres facteurs

Il existe encore bien d'autres facteurs susceptibles d'influencer la couleur du lait. On peut mentionner pour mémoire :

- les conditions de son stockage (température, durée, lumière) (26);
- le conditionnement du produit, notamment l'effet protecteur de son emballage contre la lumière (27, 28);
- l'addition de certains ingrédients. *Braekman et al.* (24) ont étudié par exemple le changement de couleur en fonction de la quantité de sucre présente lors du traitement thermique;
- l'espèce animale (20, 29);
- la région, la saison et le fourrage qui ont un effet direct sur maints des facteurs susmentionnés, par le biais notamment des caroténoïdes qui rendent le lait d'été plus jaune (30, 31).

En résumé, l'étude de la couleur du lait doit prendre en considération toutes les influences susmentionnées, considérées isolément et/ou combinées. On peut citer l'exemple du lait cru qui devient plus blanc sous l'effet conjugué tant de l'homogénéisation que du traitement thermique (32). Lorsqu'il subit jusqu'à une stérilisation, sa blancheur sera atténuée par un léger brunissement dû à la réaction de Maillard (33). Le chapitre suivant donne quelques exemples d'application de la mesure de la couleur du lait et du fromage parmi d'autres, les deux produits laitiers les plus mesurés dans la littérature consultée.

Applications et techniques de mesure de la couleur du lait

Le tableau 2 résume les principaux travaux traitant de la mesure de la couleur du lait et des techniques mises en œuvre.

Tableau 2
Applications de la mesure de la couleur du lait

But de la mesure de la couleur	Appareils de mesure utilisés	Système utilisé	Paramètres mesurés	Paramètres analytiques	Références bibliographiques
Composition	Spectrophotomètre (Macbeth Color-Eye) lampe incandescente avec Optiview software	Hunter L, a, b, CIELAB/CIE	L, a, b Réflectance diffuse (400 nm–500 nm) L*, a*, b* et ΔE^*_{ab} X, Y, Z obtenu directement	Lumière réfléchie <i>vs</i> % matière grasse L, a, b <i>vs</i> opacité L, a, b <i>vs</i> protéine % L <i>vs</i> indices sensoriels b* <i>vs</i> indices de qualité L, a, b <i>vs</i> temps de conservation	52 50, 51 46
	Colorimeter Minolta chromameter CR-100-300	CIELAB	L, a, b X, Y, Z	L, a, b <i>vs</i> % matière grasse L, a, b <i>vs</i> matière grasse	20 43
	Color Difference Meter 5100 Hunterlab	CIELAB	L, a, b	K/S (paramètre de Kubelka-Munk)	94
Influence de procédés technologiques	Spectrophotometer Macbeth	Hunter L, a, b	L, a, b	L, a, b <i>vs</i> temps d'exposition à la lumière L, a, b <i>vs</i> traitement	28 32
	Spectrophotomètre Micromatch	x, y, Y CIE	Réflectance (400–700 nm)	H (valeur-Hermann)	25
	Colorimètre Minolta	CIELAB	L, a, b	L <i>vs</i> température, <i>vs</i> concentration ΔE_H <i>vs</i> off-flavours	34 136 37
	Chromameter II Reflectometer CL-28	CIELAB	L*	L <i>vs</i> pression	104
	Spectrophotomètres Pye Unicams, Colorimeter Momcolor	CIELAB, X, Y, Z	Yxy	d'homogénéisation	
Influence du stockage	Chromameter Minolta CR-100	Hunter L, a, b	L*, a*, b* et ΔE^*_{ab}	ΔE^*_{ab} <i>vs</i> temps, L*, a*, b*) <i>vs</i> température	46

La mesure de la couleur du lait comme indicateur de traitement thermique et/ou mécanique

Le traitement thermique du lait entraîne des modifications fort complexes de sa structure physique et chimique qui ne sont pas toujours faciles à analyser, d'où l'utilité d'une mesure rapide et précise de sa couleur.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'influence d'un traitement thermique du lait sur sa couleur. Les études effectuées sous différentes conditions de durée de chauffage, de température et de type du lait confirment le fait que, dans une première phase, les traitements thermiques rendent le lait plus « blanc » en raison de la dénaturation des protéines (surtout des lactosériques) qui deviennent insolubles d'où l'augmentation de leur pouvoir réfléchissant (20). Après un certain temps, un léger brunissement vient alors diminuer légèrement cette blancheur au profit d'une couleur légèrement jaunâtre et brunâtre (34, 35) due aux mélanoïdes formés lors de la réaction de Maillard. *Rihm* (36) a montré que la période durant laquelle le lait devient plus blanc varie exponentiellement avec la température de chauffage. Cette constatation a été confirmée par *Singh et Patil* (37) en 1990 en étudiant la cinétique du blanchiment de lait de buffle.

Un examen microbiologique du lait nécessite comparativement souvent plusieurs jours avant de constater une contamination par des levures ou des bactéries indésirables (38). Par conséquent, la mise en évidence d'un traitement thermique du lait (par ex. une pasteurisation à différentes températures) par une mesure des seules composantes ΔE et Y (variation totale de la couleur et indice de jaune) est plus simple que la mesure d'autres grandeurs comme la viscosité et l'opacité du lait qui sont même parfois non significatives (29). Un traitement thermique peut aussi être évalué par la mesure de la teneur en lactulose, des valeurs de HMF (hydroxyméthyl-furfural), de la turbidité ou de la couleur (35).

L'application la plus courante de la colorimétrie du lait est la comparaison de traitements thermiques tels que pasteurisation, UHT direct, UHT indirect ou stérilisation en comparant les valeurs de L^* , a^* , b^* d'un lait avant et après ledit traitement thermique, généralement en terme de différences significatives (ΔL , Δa et Δb). *Bosset et al.* (32) rapportent que le traitement thermique provoque une augmentation relativement importante de L qui présente un maximum en fonction du traitement thermique subi, une diminution marquée de a , et une augmentation sensible de b . De même *Zadow* (39) a mesuré ΔL , Δa et Δb pour constater qu'un traitement thermique de type UHT indirect entraîne parallèlement une certaine homogénéisation qui influence aussi ces grandeurs.

La mesure de grandeurs telles que ΔL , Δa et Δb reste toutefois souvent insuffisante pour caractériser un traitement thermique car il faut encore tenir compte d'autres facteurs tels que les conditions de stockage (couple température et durée) du produit (33), l' « historique » de la température du produit et même la température au moment de la mesure. Cette constatation est confirmée par de nombreux auteurs (25, 26, 35).

En connaissant les conditions de stockage (30 et 90 jours) à différentes températures (20 et 30 °C), on peut distinguer des laits partiellement écrémés traités par UHT direct ou UHT indirect et stérilisés en comparant leurs valeurs de couleur (augmentation de a^* et b^* et légère baisse de L^* (33)). Dans d'autres cas, si on tient compte de la couleur et d'autres grandeurs telles que la teneur en lactulose, on peut identifier le lait stérilisé avec une probabilité de l'ordre de 96 % (25).

La mesure de la couleur du lait peut être évaluée à l'aide d'autres grandeurs telles que le taux de réflectance qui est couramment utilisé pour déterminer sa blancheur. Un lait qui a subi un traitement de type UHT direct, UHT indirect ou stérilisation ne change que très peu de valeur de taux de réflectance aux longueurs d'onde inférieures à 590 nm (26). En revanche aux longueurs d'onde plus élevées, la variation est plus importante, surtout pour le lait UHT direct. D'après Andrews (26), la mesure des valeurs L , a , b et de la réflectance en dessous de 530 nm permet de distinguer des laits UHT et stérilisés si l'on connaît les valeurs correspondantes antérieures au traitement thermique. Une étude de la réflectance du lait stérilisé montre que cette grandeur croît en fonction de la température entre 97 et 150 °C jusqu'à un maximum, dépendant du pH, puis décroît (39).

Influence de la température de mesure sur cette dernière

Toutes les mesures de la couleur décrites jusqu'ici ont été faites après refroidissement de l'échantillon ce qui empêche de suivre en temps réel et en ligne l'évolution de la couleur du lait et des phénomènes y relatifs (par exemple l'apparition de composés fluorescents intermédiaires libres (40)) depuis une température de chauffage donné jusqu'à son refroidissement. Seuls Dunkerley *et al.* (34) ont mesuré la couleur du lait d'abord à 80 °C puis après refroidissement à température ambiante ce qui leur a permis d'étudier l'influence de la température sur les micelles de caséines. La mesure des grandeurs L^* , a^* , b^* permet en effet de décrire une variation réversible et rapide de la taille des micelles de caséines sous l'influence d'un chauffage (augmentation de L^*) ou du refroidissement (diminution de L^*). La mesure directe de la couleur du lait porté à des températures élevées n'a pas été souvent rapportée en raison de la difficulté technique de procéder à de telles mesures et de l'instabilité de la réflectance en fonction du temps. Burton (41) propose une mise en équilibre (conditionnement) de l'échantillon pendant au moins deux heures à température ambiante pour assurer la stabilité finale des valeurs de couleur mesurées.

Limitations des mesures de la couleur comme indice de traitement thermique

Le traitement thermique peut être associé à d'autres facteurs susceptibles d'influencer la couleur du lait:

- l'exposition du lait à la lumière d'une source fluorescente ce qui entraîne sa photodégradation et la variation de sa teneur en vitamines. Ce phénomène peut être étudié par la mesure de la couleur surtout au dessus de 35 °C (21, 22);

- l'homogénéisation du lait (32) rend le lait plus «blanc». Comme ce traitement technologique est inévitablement couplé à un traitement thermique, ce paramètre technologique ne peut être considéré isolément. L'homogénéisation a donc un effet cumulatif avec le traitement thermique dans une certaine limite pour L , mais se compense partiellement pour b , comme le constatent *Bosset et al.* (32). Le lait de brebis ayant subi un effet combiné de traitements mécanique (homogénéisation) et thermique change de couleur (L^* décroît alors que a^* et b^* croissent) (42);
- l'origine géographique du lait: un lait pasteurisé d'une région donnée peut avoir des valeurs de L comparables à celles d'un lait cru d'une autre provenance (43);
- la matière grasse: un lait écrémé brunit plus rapidement qu'un lait entier car les globules gras masquent en partie le brunissement de ce dernier (26);
- l'espèce animale: un lait de vache préchauffé à $<100^{\circ}\text{C}$ avant la pasteurisation montre une augmentation plus rapide de sa réflectance que celle à du lait du buffle (29). Cette augmentation est due à la précipitation des protéines sur la surface des particules en suspension et des globules de matière grasse. Il semble que la différence de surface des globules de gras entre lait de vache et de buffle soit à l'origine de cette différence de réflectance. D'après *Ismail et El Deeb* (29) et *Andrew* (26), l'adsorption de protéines sur la surface considérable des globules de matière grasse est le résultat de l'homogénéisation du lait. *Burton* (41) remarque encore qu'un lait porté à des températures inférieures à 100°C voit sa réflectance, donc sa blancheur augmenter à partir de 60°C et encore plus fortement au-delà de cette température.

La mesure de la couleur du lait comme indicateur de la teneur en matière grasse

La couleur du lait de consommation dépend entre autre de sa teneur en matière grasse (19). On a constaté dans certains cas que l'augmentation de L^* est étroitement corrélée à celle de la teneur en certains composants du lait (20, 43), quels que soient le traitement thermique appliqué, la région, la race ou le type d'élevage de l'animal. La mesure de la couleur peut ainsi être utilisée indirectement pour déterminer ou contrôler le taux butyrique de celui-ci (19).

Certains travaux utilisent des méthodes spectrophotométriques pour déterminer la réflectance du lait (25). Ils montrent par exemple que la réflectance spectrale du lait augmente avec sa teneur en graisse. Ceci s'explique par l'accroissement de la surface des globules de matière grasse qui augmente à son tour les propriétés de réflexion et de diffusion du lait. Cette corrélation entre teneur en matière grasse et réflectance (29) est d'autant meilleure que la longueur d'onde utilisée est supérieure à 600 nm où se situe le maximum d'absorption ($\lambda_{\text{max}} \approx 525 \text{ nm}$) du carotène.

La couleur du lait comme indicateur de photodégradation

Un lait change de couleur s'il est exposé à la lumière du jour pendant 1 à 2 heures déjà et à une lumière fluorescente ou ultraviolette pendant 4 à 5 heures. Cette décoloration est due essentiellement à la dégradation de la riboflavine (21, 22, 23, 44).

La couleur d'un lait maigre est plus sensible à l'exposition à la lumière fluorescente que celle d'un lait entier. Ses valeurs L et b décroissent au cours du temps plus rapidement que celles d'un lait plus riche en matière grasse (21) en raison de sa plus grande translucidité. La photodégradation est donc un élément clé à considérer pendant le stockage. *Bosset et al.* (22) ont trouvé que les valeurs de L et b du lait diminuent et celle de a augmente pendant les premières heures de stockage à une lumière fluorescente. L'adjonction de certaines substances au lait améliore sa stabilité à la lumière. Mais la meilleure prévention demeure le choix d'un emballage adéquat. *Bosset et al.* (27, 28) et *Borle et al.* (23) ont largement décrit les exigences qu'un emballage doit remplir pour être photoprotecteur ainsi que les conditions de stockage à respecter pour que le risque de photodégradation soit minimisé. *Mortensen* a récemment publié une thèse de doctorat sur ce sujet à l'exemple du fromage danois *Havarti* (140).

La couleur du lait comme indicateur de stockage

Comme on l'a déjà noté précédemment, la couleur du lait est fortement influencée par les conditions de son stockage comme la température, la durée, l'exposition à la lumière et donc par l'emballage si celui-ci est photoprotecteur. Parmi les facteurs d'influence du stockage qui ont été largement étudiés, il faut citer la température et la durée. *Flückiger et al.* (45) indiquent que la couleur du lait UHT stocké à 5 °C à l'obscurité reste stable, mais si ce lait est stocké à 25 °C, il perdra plus rapidement de sa clarté. *Andrews* (26) signale que la réflectance et les valeurs de L des laits UHT et stérilisés diminuent au cours du stockage tandis que les valeurs de a et b augmentent. Cet auteur a aussi constaté que la mesure de la couleur de différents laits au cours de leur stockage peut être utile pour les distinguer. Il a trouvé que la réflectance du lait écrémé change plus rapidement que celle du lait entier au cours du stockage car la teneur en matière grasse du lait entier masque sa variation de couleur. Si l'âge et le « passé thermique » du lait sont connus, il peut être possible de distinguer un lait UHT d'un lait stérilisé (26) sur la base du taux de variation de leur réflectance et de leurs valeurs de L , a , b avant l'application d'un quelconque procédé technologique. *Fink et Kessler* (35) ont établi un seuil de décoloration du lait entier permettant de distinguer un lait UHT, qui ne change pas de couleur au cours du stockage, d'un lait stérilisé qui se décolore. Les difficultés inhérentes à cette méthode proviennent du fait que la couleur du lait entier non traité est intrinsèquement très variable en raison des multiples facteurs susmentionnés (35). *Rampilli et Andreini* (33) ont trouvé qu'un lait stérilisé stocké à des températures et à des durées croissantes subira des variations de couleurs plus importantes qu'un lait UHT. Cette corrélation entre le changement de la couleur du lait au cours du stockage et l'ac-

croissement de l'intensité du traitement thermique est en accord avec les résultats d'Andrews (26).

La mesure de la grandeur ΔE est, selon Rossi et Pompei (46), plus utile que celles d'autres paramètres tels que celle de la valeur du pH, de l'azote non protéique ou du lactulose. C'est ce que révèle l'étude de l'influence d'un traitement thermique sur des échantillons de lait stockés à des températures différentes (4, 20 et 38 °C) pendant 18 mois. La mesure de la valeur ΔE d'un lait destiné à l'alimentation infantile pourrait indiquer la température et la durée d'un long stockage permettant ainsi de disposer d'un critère supplémentaire pour le contrôle de la qualité (46).

La couleur du lait stocké dépend aussi de l'espèce animale. En effet, la réflectance d'un lait ou d'une crème de buffle pasteurisée et stockée à 5 °C pendant deux jours est plus stable que celle d'un lait ou d'une crème de vache au cours du stockage. La réflectance du lait de buffle stérilisé et stocké à 25 °C pendant huit jours ne change pas alors que celle du lait de vache décroît de façon significative et indépendamment de la teneur en matière grasse (29). Enfin, Andrews (26) constate que l'homogénéisation utilisée pour la préparation du lait UHT a peu d'effet sur la variation de la couleur de celui-ci au cours du stockage.

La mesure de la couleur du lait comme indicateur d'additifs

Plusieurs industriels recourent à des additifs pour améliorer l'acceptabilité visuelle de leur produit. Ceux-ci en modifient la composition, l'apparence et surtout la couleur (« whiteners »). La couleur d'un lait maigre a en effet une influence plus marquée sur le consommateur que sa viscosité par exemple, voire que ses propriétés sensorielles à la dégustation (47–51).

Jusqu'à ce jour, la plupart des recherches entreprises dans ce domaine visaient à trouver des additifs adéquats tels qu'épaississants, agents blanchissants (7), arômes de crème ou des combinaisons de tels additifs pour simuler la présence de corps gras dans le lait (52). D'où l'importance de la mesure de la couleur comme outil de contrôle à des fins analytiques ou de pilotage de l'addition de substituants tels que dioxyde de titane au lait (47), ou de poudre de lait partiellement écrémé au lait maigre (49). L'addition de protéines insolubles (par exemple des caséines) ou de matière grasse au lait maigre ou faiblement enrichi en corps gras à raison de 10 g/kg augmente sa blancheur ce qui permet d'ajuster ce paramètre par rapport à d'autres grandeurs comme la texture et la saveur (50). L'addition d'eau au lait maigre jusqu'à une température ne dépassant pas 80 °C est facilement détectable par la mesure de L^* qui a tendance à décroître (34).

L'addition d'un sucre réducteur au lait favorise la réaction de Maillard et par conséquent l'apparition d'une couleur brunâtre contrôlable par la mesure de la couleur (24), ce qui facilite la prédition de la date limite de vente de certains laits (53). L'addition de certaines cultures bactériennes influence aussi la couleur du lait maigre (54).

Autres applications de la mesure de la couleur du lait

Pour déterminer le plus rapidement possible la première phase de coagulation du lait lors de sa transformation, plusieurs méthodes peuvent être utilisées telles que la spéctrométrie infrarouge proche, la colorimétrie tristimulus et la photométrie de fluorescence pour remplacer les méthodes visuelles couramment utilisées (25, 55, 56). Une nouvelle méthode semble se profiler: l'analyse de la couleur au moyen d'une caméra digitale (10). L'image prise par une telle caméra est analysée grâce à un capteur de couleur intégré à un ordinateur.

Applications et techniques de mesure de la couleur du fromage

Le tableau 3 résume les principaux travaux traitant de la mesure de la couleur du fromage et des techniques mises en œuvre.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude de la couleur des fromages comme la Mozzarella (57), l'Emmental (13, 58, 59) et le Mahon (60). La mesure de la couleur du fromage est utilisée pour déterminer:

- son authenticité (13);
- sa contamination par des microorganismes ou des métaux (38, 61);
- les variations de la couleur lors du gratinage (62–65);
- son appréciation comme fromage fumé (66);
- l'influence de son emballage sur le consommateur (67).

Très peu d'auteurs se sont intéressés à la métrologie de la couleur du fromage. On peut citer *Bosset et al.* (5, 68) qui ont défini plusieurs conditions à respecter pour effectuer une mesure correcte de la couleur du fromage (Gruyère) à savoir le choix et la préparation de l'échantillon (taille, homogénéité, isotropie de la coupe, fraîcheur du produit) et la durée de l'illumination sous une lampe halogène à émission non pulsée. Les mesures effectuées par ces auteurs montrent que les valeurs de *L* et *b* varient considérablement à l'intérieur du même fromage, alors que la valeur de *a* reste relativement constante. La mesure de la couleur du fromage peut indiquer l'influence, combinée ou isolée, de plusieurs facteurs développés ci-dessous.

La mesure de la couleur du fromage comme indicateur de traitement du lait de fabrication

La couleur du fromage dépend entre autre de la composition du lait utilisé pour sa fabrication. En effet, *Rohm et Jaros* (58) et *Rohm* (69), considèrent que la couleur (exprimée en indice de jaunissement *Y_i*) d'un fromage à pâte dure comme l'Emmental est largement influencée par la teneur en matière grasse du lait utilisé ainsi que par la saison (variation de la teneur en bêta-carotène (31)). L'influence d'autres facteurs comme la teneur en matière sèche et la durée de l'affinage sur la couleur du fromage (due à la variation de sa réflectance) reste moins importante (59). La couleur d'un fromage de type Vorarlberg d'été est plus jaune et le nombre de trous est plus petit par rapport à une moyenne de 3 à 5 trous/dm² en hiver (70).

Tableau 3
Applications de la mesure de la couleur du fromage

But de la mesure de la couleur	Appareils de mesure utilisés	Système utilisé	Paramètres mesurés	Paramètres analytiques	Références bibliographiques
Composition	Spectrophotomètre	Hunterlab	a^* , b^* , C^* L , a , b L^* , a^* , b^* , ΔE^*_{ab}	L vs composition	70, 83
	Colorimètre Colorgard	Hunterlab		L , a , b , vs brunissement	63
	Colorimètre Hunterlab D25-9	Hunterlab		L , a , b , ΔE vs type du lait	52, 63
	Spectrocolorimètre Hunterlab, Miniscan XETEM	Hunterlab			72
	Microcolor Dr Lange	Hunterlab			73
Influence de procédé technologique	Colorimètre	CIELAB	L^* , a^* , b^*	PCA	65
	Hunterlab D25	Hunterlab	L , a , b , c , $h = \tan^{-1}(b/a)$	Brunissement vs fusion, consistance, exsudation	66
	Chromameter CR-310, Minolta D65				65
	Hunterlab D25 D2, illuminant C, 45/0				68
	Chromameter Minolta				64
Influence du stockage et de l'affinage	Tristimulus réflectance			Y_i	58
	Microcolor Dr Lange			Y_i	78
	Chromameter II, Minolta				
	Spectrocolorimètre Hunterlab Miniscan XETEM,			L , a , b vs temps	72, 74
	Spectrocolorimètre, Ultrascan Hunter			Jaunissement vs temps	60
Autres facteurs	Colorimètre	CIELAB	X , Y , Z	Y_i	59

La couleur du fromage dépend aussi du degré de l'homogénéisation du lait de fabrication. Un fromage de type Cheddar fabriqué à partir d'un lait homogénéisé (7 à 69 MPa) aura une apparence plus blanche (71). Une comparaison des valeurs de ΔE pour des échantillons de fromage a montré une légère différence des grandeurs L , a et b entre le fromage fabriqué avec du lait de chèvre cru et celui fabriqué à partir d'un même lait homogénéisé à 500 MPa (72).

Buffa et al. (72) constatent que la pasteurisation du lait a une influence minime sur ΔE alors qu'après une durée d'affinage de 30 et 60 jours on trouve une plus grande différence de ΔE entre les fromages fabriqués à partir de lait cru et ceux fabriqués à partir de lait pasteurisé. Les valeurs de a ne montrent pas de variations significatives au cours de l'affinage, alors que celles de L décroissent et celles de b croissent.

La mesure de la couleur du fromage comme indicateur d'affinage

Rohm et Jaros (58, 59) ont montré que la valeur de L décroît alors que celles de a et b croissent au cours de l'affinage de l'Emmental. En conjugaison avec L^* et b^* , l'indice Y_i est utilisé par de nombreux auteurs pour l'étude de l'influence de l'âge sur la couleur du fromage (69). *Ginzinger et al.* (73) ont prouvé que l'indice de jaunissement Y_i , très étroitement corrélé avec b , croît avec l'âge du fromage. Ils ont aussi montré que la pasteurisation du lait n'a aucun effet sur l'indice Y_i du fromage, alors que d'autres facteurs tels que la saison et la durée de l'affinage (58, 74) ont plus d'influence. *Kristensen et al.* (75) ont étudié l'influence de la température et de la lumière sur le fromage fondu au cours de son stockage. Ils ont trouvé qu'un fromage fondu stocké à 37°C subit un brunissement proportionnel au temps, qui est moins marqué à 20°C et quasi négligeable à 5°C. Une exposition du fromage fondu à lumière (2000 lux) a un effet minime sur son brunissement. La valeur de L^* décroît à toutes les températures de stockage et de façon significative à 37°C. Les valeurs de a^* dépendent fortement de la température de stockage et croissent significativement à 37°C et aussi lors d'une exposition à la lumière. Celles de b^* augmentent aussi significativement à 37°C mais demeurent presque constantes à 5°C (75).

Frau et al. (60) ont mesuré l'indice de jaune Z d'un fromage espagnol (Mahon) et trouvent qu'il est fortement corrélé avec l'activité de l'eau et l'élasticité. Ce paramètre de couleur primaire ($Z=100((L^*+16)/116-(b^*/200))^3$) a aussi été utilisé par *Rohm et Jaros* (58) et *Francis* (6).

La couleur du fromage est aussi mesurée parallèlement à d'autres paramètres pour évaluer l'influence des conditions de stockage à différentes teneurs en gaz (CO₂ et N₂), températures et durées (76). Un article de synthèse traite de l'influence des conditions de stockage du fromage fondu (77).

La mesure de la couleur du fromage comme indicateur microbiologique

Certaines bactéries agissent sur la couleur de différents types de fromage italiens à pâte dure comme le Provolone (78) ou le Parmesan (4) ou à pâtes molles comme le

Taleggio (1), la Mozzarella (où b^* est utilisé comme indice de comparaison) (64), le cottage cheese (3) et le Mascarpone (79). La décoloration du fromage peut être indicateur de la présence de bactéries comme *Arthrobacter* qui produit des pigments jaunes donnant un aspect rouge-brunâtre au Tilsit (80) et une couleur jaune et rouge-orangé à divers autres produits (81). Un fromage de type Kashar (61) inoculé avec *Brevibacterium linens* et stocké pendant un mois subit des changements de propriétés physico-chimiques, microbiologiques et sensorielles alors que sa couleur reste inchangée.

La mesure de la couleur des taches rouges sur la croûte du fromage est utile pour évaluer la teneur en carotène de plusieurs souches de *Brevibacterium* responsables de ces taches. Des mesures faites par un spectrophotomètre à 450 nm montrent que b^* est le meilleur paramètre de corrélation avec la teneur en carotène de ces bactéries (82).

La mesure de la couleur du fromage comme indicateur d'additifs

Kombila-Moundounga et Lacroix (83) ont montré que l'influence de l'addition de certains humectants comme le lactose ou de glycérol est beaucoup plus importante que celle du chlorure de sodium sur le brunissement du fromage fondu à tartiner fabriqué à partir de Gruyère, de Cheddar, de Mozzarella et d'Emmental. Les valeurs de a et b augmentent alors que celles de L diminuent avec l'augmentation de la concentration en humectants. La mesure de la couleur et l'analyse sensorielle ont été utilisées pour étudier l'effet de mélanges de sels émulsifiants sur l'appréciation du fromage fondu par le consommateur (84). La couleur du fromage peut aussi être influencée par certains extraits naturels végétaux (85, 86).

La mesure de la couleur du fromage comme indicateur de brunissement

Le brunissement du fromage fondu est dû principalement à la nature du traitement thermique subi et aux conditions de stockage (surtout la température), alors que la teneur en protéines et en lactose a un effet moins important. Ce brunissement peut être réduit par la diminution de: i) la teneur en lactose, ii) la température du traitement thermique, iii) la température de stockage, iv) son temps de refroidissement.

Les facteurs majeurs de brunissement de la Mozzarella sont la teneur en galactose résiduel et l'intensité de la protéolyse (64). Pour réduire le risque de brunissement de cette sorte de fromage on a recours parfois à de nouvelles cultures de bactéries qui ont été étudiées par *Mukherjee et Hulkins* (57). La durée de stockage, les conditions de gratinage et la consistance ont un très grand impact sur les valeurs de a^* et L^* , alors que b^* ne varie pas ce qui prouve que L^* est plus utile que b^* pour suivre le brunissement, mais contredit les résultats de *Oberg et al.* (64). *Johnson et Olson* (63) ont trouvé une forte corrélation entre la teneur du fromage en galactose et le brunissement de la Mozzarella.

Tableau 4

Principaux appareils fixes de mesure de la couleur actuellement disponibles

Fabricant	Minolta CM-3500D	Minolta CM-3700D	MacBeth Color-Eye 7000A	HunterLab UltraScan XE	HunterLab LabScan XE	Datacolor SF600 PLUS	Dr. Lange LUCI 100
Type d'instrument							
Iluminants	D65, Xe, A, C	D65, Xe, A, C	D65, Xe, A, C	D65, Xe, A, C	D65, Xe, A, C	D65, Xe, A, C	D65, Xe, A, C
Source de lumière	flash	flash	flash	flash	flash	flash	flash
Géometrie de mesure	d/8	d/8	d/8	d/8	0/45	d/8	d/8
Domaine de mesure [nm]	400–700	360–740	360–750	360–750	400–700	360–700	380–720
Diamètre ouverture [mm]	3–30	4–25	8–25	3–25	3–44	8–25	5–20
Position de l'échantillon	Dessus	Latérale	Latérale	Latérale	Dessus, dessous, latérale	Latérale	Dessus, dessous

Bley et al. (62) ont développé une méthode de traitement thermique suivi d'une mesure de la couleur pour prédire la tendance au brunissement d'un Cheddar au cours ou après un procédé technologique. Ils trouvent une très forte corrélation entre les valeurs de la couleur mesurée et le traitement thermique appliqué.

Richoux et al. (65) constatent que l'intensité du brunissement d'un fromage de type Emmental au gratinage est très étroitement corrélée à d'autres paramètres tels que l'étalement, l'exsudation (test de *Schreiber*) ou l'aptitude à former des fils.

Rappel des principaux appareils de mesure de la couleur actuellement disponibles

Le tableau 4 recense les principaux appareils de mesure (fixes) de la couleur actuellement disponibles et leurs principales caractéristiques. Les appareils portatifs, plus nombreux, mais moins fiables, ne sont pas cités.

Conclusion

Le présent travail indique clairement que la plupart des articles publiés pendant ces trente dernières années traitent des applications de la mesure de la couleur du lait et des produits laitiers et non de la métrologie de ces mesures, ce qui rend difficile, voire impossible la comparaison des résultats publiés par divers auteurs pour les mêmes produits et donc inutile toute critique sur la technique de mesure. Dans la plupart des cas, les mesures de la couleur (avec le système *L, a, b*) sont traitées conjointement à d'autres déterminations analytiques telles que la viscosité, la composition chimique, la valeur du pH, la composition microbienne ou des tests sensoriels.

Si la mesure en routine de la couleur du lait et des produits laitiers est simple, rapide, fiable et non destructrice dans la plupart des cas, elle est en revanche difficile à interpréter car dépendante souvent d'un grand nombre de facteurs concomitants et de plus difficiles à contrôler tels que composition, traitements thermiques et/ou mécaniques (homogénéisation), durée et température de stockage, exposition à la lumière, conditionnement, saison, affouagement et espèce animale. Les mesures différentielles ou dérivées (ΔE , Δa , Δb , Δl , indices de blancheur, de jaunissement ou de brunissement) sont de ce fait souvent préférables à des mesures absolues.

Les difficultés techniques rencontrées incitent dans certains cas à développer des appareils de mesure ou des équipements de mesure spécifiques (92). Parfois, il serait souhaitable que ces équipements incorporent des dispositifs de thermostatisation. Le fromage doit par exemple garder sa fraîcheur au cours de la mesure pour limiter l'effet d'exsudation. A cette fin *Bosset et al.* (68) conseillent d'effectuer les mesures en chambre froide à 15 °C–17 °C.

Durant la période considérée (1972–2002 environ), les appareils de mesure ont fait l'objet de perfectionnements multiples. On peut citer notamment le remplacement des lampes halogènes à émission continue par des lampes au xénon pulsées (flashes), le recours à des systèmes d'étalonnage/calibrage plus simples et plus fiables

et surtout à des logiciels de pilotage, de saisie et de traitement de données plus performants permettant des analyses statistiques. Pour l'instant, aucune norme internationale n'a été publiée concernant la mesure de la couleur du lait et des produits laitiers en général.

Résumé

Le présent travail passe en revue 140 articles publiés entre 1972 et 2002 qui traitent de la mesure de la couleur du lait et des produits laitiers. Après un court rappel des bases théoriques, cette étude bibliographique décrit les facteurs qui influencent la couleur de ces produits (surtout laits et fromages) tels que composition chimique, taille et la nature des particules, saison, valeur du pH, contaminations microbiennes ou chimiques, photodégradation et conditionnement du produit, puis les applications des telles mesures comme indicateurs de traitement thermiques (réactions de Maillard) et/ou mécaniques (homogénéisation), de vieillissement ou de stockage (brunissement) ou d'adjonction d'additifs. On n'y recense que peu de travaux à caractère métrologique et aucune norme de mesure internationale pour les produits laitiers.

Summary "The colour of milk and dairy products and its measurement – a review article (1972–2002)"

This paper reviews 140 articles dealing with the colour measurement of milk and dairy products published between 1972 and 2002. After a short overview of the theoretical background, this review article describes the factors that can influence the colour of these products, mainly milk and cheese, such as chemical composition, size and nature of the particles, season, pH value, microbial or chemical contaminants, photodegradation as well as packaging, and the applications of such measurements as indicators for thermal (or heat) treatments (Maillard reactions), mechanical treatments (homogenisation), ageing and storage effect (browning) as well as the use of additive(s). Only a few of these articles deal with the metrology of colour and no international standard for colour measurement of milk and dairy products have been reported.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt 140 zwischen 1972 und 2002 veröffentlichte Artikel betreffend der Farbmessung von Milch und Milchprodukten. Nach einem kurzen Überblick der theoretischen Grundlagen, beschreibt diese bibliographische Studie zuerst die Faktoren, welche die Farbe dieser Produkte (insbesondere Milch und Käsesorten) beeinflussen, wie z.B. die chemische Zusammensetzung, die Grösse und die Natur der Partikel, die Jahreszeit, der pH-Wert, die mikrobiologischen oder chemischen Kontaminationen, der Einfluss von Licht sowie die Verpackung des Produktes, dann die Anwendungen solcher Messungen als Indikatoren für thermische (Maillard-Reaktion) oder mechanische Behandlungen (Homogenisie-

rung), Alterung, Lagerung (Braunfärbung) und die Beimischung von Zusatzstoffen. Es wurden nur wenige Arbeiten gefunden, welche die Farbmetrik behandeln. International anerkannte Farbmessverfahren (Normen) für Milch und Milchprodukte wurden keine gefunden.

Key words

Colour, measurement, milk, dairy products, review

Remerciements

Les auteurs remercient Mme Dr Barbara Walther pour sa précieuse contribution à la recherche bibliographique des articles cités ainsi que Mme Dr Pallavi Joshi du Centre de Recherches de Nestlé à Vers-chez-les Blanc pour sa lecture critique du manuscrit.

Bibliographie

- 1 *Piantanida I., Cantoni C., Dragoni I. e Modolo A.:* Alterazione gialla superficiale del Taleggio. (Surface yellow colouring of Taleggio cheese). *Ind. Aliment.* **34** (339), 734–736 (1995)
- 2 *Dragoni I., Cantoni C., Piantanida L., Papa A. and Roquebert M.F.:* Red discolouration on the surface and within butter. *Latte* **18**, 920–923 (1993)
- 3 *Davey J.A. and Eyles M.J.:* Discolouration of Cottage cheese caused by *Rahnella aquatilis* in the presence of glucono delta-lactone. *Aust. J. Dairy Technol.* **47**, 62–63 (1992)
- 4 *Shannon E.L., Olson N.F. and von Elbe H.:* Pink discolouration in Italian varieties of cheese. *J. Dairy Sci.* **49**, 711 (1966)
- 5 *Bosset J.O., Pieri E. et Blanc B.:* De la mesure objective de la couleur du fromage. *Laitier Romand* **53** (25), 181 (1977). *Die objektive Farbmessung beim Käse. Schw. Milchztg.* **102**, 690–691 (1976)
- 6 *Francis F.J.:* Quality as influenced by color. *Food Qual. Preference* **6**, 149–155 (1995)
- 7 *Kneifel W., Ulberth E. and Schaffer E.:* Evaluation of coffee whitening ability of dairy products and coffee whiteners by means of reflectance colorimetry. *Milchwissenschaft* **47**, 567–569 (1992)
- 8 *Ulberth F., Kneifel W. and Schaffer E.:* Colour intensity preferences observed with selected fruit yogurts. *Milchwissenschaft* **48**, 15–17 (1993)
- 9 *Ullrich A.:* Instrumentelle Farbmessung in Produktions- und Qualitätskontrolle. *Alimenta* **27**, 27–29 (1988)
- 10 *Hutchings J.B.:* Food colour and appearance, Blakie academic & professional, 2–513, London, Glasgow, New York, Tokyo, Melbourne, Madras 1994
- 11 *Joshi P. and Brimelow C.J.B.:* Colour measurement of foods by colour reflectance. In: Colour in food, improving quality, CRC Press, pp 80–113, Woodhead publishing Ltd, Cambridge 2002
- 12 *Calvo C., Salvador A. and Fiszman S.M.:* Influence of colour intensity on the perception of colour and sweetness in various fruit-flavoured yoghurts. *Eur. Food Res. Technol.* **213**, 99–103 (2001)
- 13 *Pillonel L., Badertscher R., Bütkofer U., Casey M., Dalla Torre M., Lavanchy P., Meyer J., Tabacchi R. and Bosset J.O.:* Analytical methods for the determination of the geographic origin of Emmentaler cheese. Main framework of the project; chemical, biochemical, microbiological, colour and sensory analyses. *Eur. Food Res. Technol.* **215**, 260–267 (2002)
- 14 *Gabel P.W., Hofmeister F. and Pieper H.:* Interference pigments as focal point of colour measurement. *Kontakte* **2**, 25–34 (1992)

- 15 *Anonyme*: Analyse des couleurs, parlons clair. De l'appréciation visuelle à la mesure précise par l'instrument. Livret de Minolta (2000)
- 16 *Westland S.*: Models of colour perception and colour appearance. In: Colour in food, improving quality, CRC Press, pp 64–78, Woodhead publishing Ltd, Cambridge 2002
- 17 *Giese J.*: Color measurement in foods as a quality parameter. *Food Technol.* **54** (2) 62–64 (2000)
- 18 *Jowitt R., Escher F., Kent M., McKenna B. and Roques M.A. (Editors)*: Physical properties of foods. 2. Elsevier applied science publishers, pp 251–330, London and New York 1987
- 19 *Bergmann T. and Schick M.*: Significant relations. Colour measurement defines milk fat content. *Lebensmitteltechnik* **30** (6) 52–53 (1998)
- 20 *Bergmann T. und Schick M.*: Qualität – Farbe von Konsummilch. *Dt. Molkerei-Ztg.* **119**, 464–468 (1998)
- 21 *Desarzens C., Bosset J.O. et Blanc B.*: La photodégradation du lait et de quelques produits laitiers. Partie 1: Altérations de la couleur, du goût et de la teneur en quelques vitamines. *Lebensm. Wiss. Technol.* **17**, 241–247 (1983)
- 22 *Bosset J.O., Desarzens C. et Blanc B.*: La photodégradation du lait et de quelques produits laitiers. Partie II: Influence de certains facteurs chimiques et chimico-physiques sur l'altération de la seule couleur. *Lebensm. Wiss. Technol.* **17**, 248–253 (1983)
- 23 *Borle F., Sieber R. and Bosset J.O.*: Photo-oxidation and photoprotection of foods, with particular reference to dairy products. An update of a review article (1993–2000). *Sci. Alim.* **21**, 571–590 (2001)
- 24 *Braekman A., Mortier L., van Renterghem R. and de Block J.*: The influence of batch-pasteurisation on Maillard reaction in sweetened milk products with modified carbohydrate content. *Milchwissenschaft* **56**, 3–6 (2001)
- 25 *Andrews G.R. and Morant S.V.*: Lactulose content, colour and the organoleptic assessment of ultra heat treated and sterilized milks. *J. Dairy Res.* **54**, 493–507 (1987)
- 26 *Andrews G.R.*: Effect of storage, light and homogenization on the colour of ultra heat treated and sterilized milk. *J. Dairy Res.* **53**, 615–624 (1986)
- 27 *Bosset J.O., Daget N., Desarzens C., Dieffenbacher A., Gauch R., Tagliaferri E. et Trisconi M.J.*: Effet protecteur de l'emballage contre la photo-oxydation. *Trav. chim. alimen. hyg.* **183**, 1–57 (1989)
- 28 *Bosset J.O., Gallmann P.U. et Sieber R.*: Influence de la translucidité de l'emballage sur la conservation du lait et des produits laitiers. *Lait* **73**, 3–49 (1993)
- 29 *Ismail A.A. and El Deeb S.A.*: Effect of heat processing, storing and homogenization on the viscosity, opacity and stability of cow and buffalo milks. *Z. Lebensm. Unters. Forsch.* **152**, 202–207 (1973)
- 30 *Cantoni C., Marchisio E. e Vallone L.*: Colorazioni tipiche die «formaggi d'Alpe». *Ind. Aliment.* **38** (377), 21–23 (1999)
- 31 *Casalis J.*: Sur la relation entre la teneur en beta-carotène et la couleur des beurres français. *Lait* **52**, 511–512 (1972)
- 32 *Bosset J.O., Martin B. et Blanc B.*: La mesure de la couleur du lait et des produits laitiers par photométrie de réflexion (méthode tristimulus). *Trav. chim. alimen. hyg.* **70**, 203–227 (1979)
- 33 *Rampilli M. e Andreini R.*: Valutazione delle componenti di colore nel latte sterilizzato. *Ital. J. Food Sci.* **4**, 285–291 (1992)
- 34 *Dunkerley J.A., Ganguli N.C. and Zadow J.G.*: Reversible changes in the colour of skim milk on heating suggest rapid reversible heat-induced changes in casein micelle size. *Austr. J. Dairy Technol.* **48**, 66–70 (1993)
- 35 *Fink R. and Kessler H.G.*: Comparison on methods for distinguishing UHT treatment and sterilization of milk. *Milchwissenschaft* **43**, 275–280 (1988)

- 36 Rhim J.: Kinetic studies of thermal evaluation indicators of dairy products and developpment of a new kinetic data generation method. *Diss. Abstr. Int.* **49**, 5084 (1989)
- 37 Singh R.R.B. and Patil G.R.: Kinetics of whitening of milk during UHT processing. *Milchwissenschaft* **45**, 367–369 (1990)
- 38 Eliskases-Lechner F. und Ginzinger W.: Farbfehler bei Milchprodukten. *Dt. Molkerei Ztg.* **120**, 102–106 (1999)
- 39 Zadow J.G.: The influence of pH and heat treatment on the colour and stability of ultra-high-temperature sterilized milk. *J. Dairy Res.* **38**, 393–402 (1971)
- 40 Morales F.J., Romero C. and Jimenez-Perez S.: Fluorescence associated with Maillard reaction in milk and milk-resembling systems. *Food Chem.* **57**, 423–428 (1996)
- 41 Burton H.: The effect of heat treatment on the colour of milk. I. *dairy industries* **21**, 38–41 (1956)
- 42 Gervilla R., Ferragut V. and Guamis B.: High hydrostatic pressure effects on color and milk-fat globule of ewe's milk. *J. Food Sci.* **66**, 880–885 (2001)
- 43 Giangiacomo R. e Messina G.: Determinazione oggettiva del colore del latte alimentare mediante colorimetria tristimolo. *Sci. Tecnica Lattiero-Casearia* **39** (1), 20–39 (1988)
- 44 Toba T., Adachi S. and Arai I.: Sunlight and sodium hypochlorite induced color changes in milk. *J. Dairy Sci.* **63**, 1796–1801 (1980)
- 45 Flückiger E., Rüegg M., Steiger G., Lavanchy P., Blanc B. und Cerp O.: Einfluss von Rohmilchqualität, Erhitzungsverfahren und Lagerungsbedingungen auf Qualitätsmerkmale von UHT-Milch und in Flaschen nachsterilisierter Milch. *Schweiz. Milchw. Forschung* **18** (1), 3–12 (1989)
- 46 Rossi M. and Pompei C.: Changes in liquid milk-based infant formulas during long-term storage. *Ital. J. Food Sci.* **1**, 49–57 (1991)
- 47 Phillips L.G. and Barbano D.M.: The influence of fat substitutes based on protein and titanium dioxide on the sensory properties of lowfat milks. *J. Dairy Sci.* **80**, 2726–2731 (1997)
- 48 Phillips L.G., McGiff M.L., Barbano D.M. and Lawless H.T.: The influence of fat on the sensory properties, viscosity, and color of lowfat milk. *J. Dairy Sci.* **78**, 1258–1266 (1995)
- 49 Phillips L.G., McGiff M.L., Barbano D.M. and Lawless H.T.: The influence of nonfat dry milk on the sensory properties, viscosity, and color of lowfat milks. *J. Dairy Sci.* **78**, 2113–2118 (1995)
- 50 Quinones H.J., Barbano D.M. and Phillips L.G.: Influence of protein standardization by ultrafiltration on the viscosity, color, and sensory properties of 2 and 3.3 % milks. *J. Dairy Sci.* **81**, 884–894 (1998)
- 51 Quinones H.J., Barbano D.M. and Phillips L.G.: Influence of protein standardization by ultrafiltration on the viscosity, color, and sensory properties of skim and 1 % milk. *J. Dairy Sci.* **80**, 3142–3151 (1997)
- 52 Frøst M.B., Dijksterhuis G. and Martens M.: Sensory perception of fat in milk. *Food Qual. Preference* **12**, 327–336 (2001)
- 53 Owens S.L., Brewer J.L. and Rankin S.A.: Influence of bacterial cell population and pH on the color of nonfat milk. *Lebensm. Wiss. Technol.* **34**, 329–333 (2001)
- 54 Rankin S.A. and Brewer J.L.: Color of nonfat fluid milk as affected by fermentation. *J. Food Sci.* **63**, 178–180 (1998)
- 55 Giangiacomo R., Lizzano R., Barzaghi S. and Cattaneo T.M.P.: NIR and other luminometric methods to monitor the primary clotting phase of milk. *J. Near Infrared Spectroscopy* **6**, 205–212 (1998)
- 56 Giangiacomo R. e Messina G.: Applicata della colorimetria tristimolo per la valutazione della struttura del coagulo di yogurt. *L'industria del latte* **3–4**, 67–79 (1989)
- 57 Mukherjee K.K. and Hutzins R.W.: Isolation of galactose-fermenting thermophilic cultures and their use in the manufacture of low browning Mozzarella cheese. *J. Dairy Sci.* **77**, 2839–2849 (1994)

- 58 *Rohm H. and Jaros D.*: Colour of hard cheese: 1. Description of colour properties and effects of maturation. *Z. Lebensm. Unters. Forsch.* **203**, 241–244 (1996)
- 59 *Rohm H. and Jaros D.*: Colour of hard cheese: 2. Factors of influence and relation to compositional parameters. *Z. Lebensm. Unters. Forsch.* **204**, 259–264 (1997)
- 60 *Frau M., Simal S., Femenia A., Sanjuán E. and Rosselló C.*: Use of principal component analysis to evaluate the physical properties of Mahon cheese. *Eur. Food Res. Technol.* **210**, 73–76 (1999)
- 61 *Oksuz O., Kurultay S. and Simsek O.*: The effect of *Brevibacterium linens* on some physico-chemical properties and colour intensity of Kashar cheese. *Milchwissenschaft* **56**, 82–85 (2001)
- 62 *Bley M., Johnson M.E. and Olson N.F.*: Predictive test for the tendency of Cheddar cheese to brown after processing. *J. Dairy Sci.* **68**, 2517–2520 (1985)
- 63 *Johnson M.E. and Olson N.F.*: Nonenzymatic browning of Mozzarella cheese. *J. Dairy Sci.* **68**, 3143–3147 (1985)
- 64 *Oberg C.J., Wang A., Moyes L.V., Brown R.J. and Richardson G.H.*: Effects of proteolytic activity of thermolactic cultures on physical properties of Mozzarella cheese. *J. Dairy Sci.* **74**, 389–397 (1991)
- 65 *Richoux R., Roset G., Famelart M.H. et Kerjean J.R.*: Diversité de quelques propriétés fonctionnelles à chaud de l'Emmental français. *Lait* **81**, 547–559 (2001)
- 66 *Riha W.E. and Wendorff W.L.*: Evaluation of color in smoked cheese by sensory and objective methods. *J. Dairy Sci.* **76**, 1491–1497 (1993)
- 67 *Murray J.M. and Delahunty C.M.*: Description of Cheddar cheese packaging attributes using an agreed vocabulary. *J. Sensory Stud.* **15**, 201–218 (2000)
- 68 *Bosset J.O., Rüegg M. et Blanc B.*: La couleur du fromage et sa mesure: essai de détermination par photométrie de réflexion. *Schweiz. Milchw. Forsch.* **6**, 1–6 (1977)
- 69 *Rohm H.*: Selected applications of food physics. *Dt. Lebensm. Rundsch.* **91**, 311–316 (1995)
- 70 *Jaros D. and Rohm H.*: Characteristics and description of Vorarlberger Bergkäse: 2. Appearance and texture properties. *Milchwissenschaft* **52**, 625–629 (1997)
- 71 *Lemay A., Paquin P. and Lacroix C.*: Influence of microfluidization of milk on Cheddar cheese composition, color, texture, and yield. *J. Dairy Sci.* **77**, 2870–2879 (1994)
- 72 *Buffa M.N., Trujillo A.J., Pavia M. and Guamis B.*: Changes in textural, microstructural, and colour characteristics during ripening of cheeses made from raw, pasteurised or high-pressure-treated goats' milk. *Int. Dairy J.* **11**, 927–934 (2001)
- 73 *Ginzinger W., Jaros D., Lavanchy P. and Rohm H.*: Raw milk flora affects composition and quality of Bergkäse: 3. Physical and sensory properties, and conclusions. *Lait* **79**, 411–421 (1999)
- 74 *Bosset J.O.*: Untersuchungen über den Reifungsverlauf guter Sbrinzkäse. Projekt No K3.8 (AP 1985/88), Versuch 8761, FAM, Liebefeld (unveröffentlichte Daten)
- 75 *Kristensen D., Hansen E., Arndal A., Trinderup R.A. and Skibsted L.H.*: Influence of light and temperature on the colour and oxidative stability of processed cheese. *Int. Dairy J.* **11**, 837–843 (2001)
- 76 *Maniar A.B., Marcy J.E., Bishop J.R. and Duncan S.E.*: Modified atmosphere packaging to maintain direct-set cottage cheese quality. *J. Food Sci.* **59**, 1305–1308 (1994)
- 77 *Schär W. and Bosset J.O.*: Chemical and physico-chemical changes in processed cheese during storage. A review. *Lebensm. Wiss. Technol.* **35**, 15–20 (2002)
- 78 *Pompei C. e Casiraghi M.L.*: Caratterizzazione del formaggio Provolone I. Scelta delle varia-bili. *It. J. Food Sci.* **2**, 101–113 (1991)
- 79 *Cantoni C., d'Aubert S. and Marchesi S.L.*: Chromatic discoloration of mascarpone cheese. *Ind. Aliment.* **36** (360), 761 (1997)
- 80 *Bockelmann W., Fuehr C., Martin D. and Heller K.J.*: Color development by red-smear surface bacteria. *Kiel. Milchwirt. Forschungsber.* **49**, 285–292 (1997)

- 81 *Cantoni C., Vallone L., Modolo A. and Daubert S.*: Yellow and red-orange coloration in some milk products. *Ind. Aliment.* **35**, 382–385 (1996)
- 82 *Dufosse L., Mabon P. and Binet A.*: Assessment of the coloring strength of *Brevibacterium linens* strains: Spectrocolorimetry versus total carotenoid extraction/quantification. *J. Dairy Sci.* **84**, 354–360 (2001)
- 83 *Kombila-Moundounga E. et Lacroix C.*: Effet des combinaisons de chlorure de sodium, de lactose et de glycérol sur les caractéristiques rhéologiques et la couleur des fromages à tartiner. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* **24**, 239–251 (1991)
- 84 *Abdel-Hamid L.B., El Shabrawy S.A., Awad R.A. and Singh R.K.*: Physical and sensory characteristics of processed Ras cheese spreads with formulated emulsifying salt mixtures. *Int. J. Food Properties* **3** (1), 15–36 (2000)
- 85 *Thiele P., Kloos K. and Düsterhöft E.M.*: Cheesemaking – A question of colour. *Dairy Industries Int.* **65** (12), 33–34 (2000)
- 86 *Thiele P., Kloos K. und Düsterhöft E.M.*: Früchte- und Gemüseextrakte zum Färben von Käse. *Deutsche Milchwirtschaft* **52**, 12–13 (2001)
- 87 *Acquistucci R.*: Chemical aspects and technological use of colour measurements technology. *Ind. Aliment.* **32**, 1186–1194 (1993)
- 88 *Anonymous*: Wie Farbmessgeräte «sehen» – die richtige Wahl der Messgeometrie. *Chem. Plus* (1–2), 14–15 (1997)
- 89 *Bertelli L., Torreggiani D. and Bertolo G.*: Non-enzymatic browning in hydrolysed concentrated cheese whey permeate. *Food Chem.* **55**, 353–358 (1996)
- 90 *Bosset J.O.*: Photométrie. *FAM Interner Bericht*, 1–18 (1977)
- 91 *Bosset J.O. und Flückiger E.*: Einfluss der Licht- und Gasdurchlässigkeit verschiedener Packungsarten auf die Qualitätserhaltung von Naturjoghurt. *Deutsche Milchwirtschaft* **37**, 908–914 (1986)
- 92 *Bosset J.O. et Misteli K.*: Nouvelle cellule destinée à la détermination par photométrie de réflexion de la couleur d'échantillons opaques, liquides, pâteux ou pulvérulents. *Trav. chim. alim. hyg.* **69**, 109–115 (1978)
- 93 *Burin L., Jouppila K., Roos Y., Kansikas J. and Buera M.D.*: Color formation in dehydrated modified whey powder systems as affected by compression and Tg. *J. Agric. Food Chem.* **48**, 5263–5268 (2000)
- 94 *Calvo C.*: Colour of translucent foods – Kubelka-Munk theory. *Rev. Esp. Cienc. Tecnol. Aliment.* **33**, 597–605 (1993)
- 95 *Carreira A., Paloma L. and Loureiro V.*: Pigment producing yeasts involved in the brown surface discoloration of ewes' cheese. *Int. J. Food Microbiol.* **41**, 223–230 (1998)
- 96 *Chapman K.W., Lawless H.T. and Boor K.J.*: Quantitative descriptive analysis and principal component analysis for sensory characterization of ultrapasteurized milk. *J. Dairy Sci.* **84**, 12–20 (2001)
- 97 *Eberhard P. und Flückiger E.*: Veränderungen der Teigeigenschaften und der Farbe des Emmentalerkäses während der Reifung. *Schw. Milchzeitung* **105** (58), 396–399 (1979)
- 98 *Gambaro A., Gimenez A. and Burgueno J.*: Sensory and instrumental evaluation of strawberry yogurt color. *J. Sensory Stud.* **16** (1), 11–22 (2001)
- 99 *Garcia J., Lopez M.B., Jordan M.J. and Salmeron M.C.*: The influence of pasteurization temperature on the physicochemical composition and colour of Murciano-Granadina goat milk. *Int. J. Dairy Technol.* **52**, 73–75 (1999)
- 100 *Giangiacomo R. e Messina G.*: Applicabilità di un indice colorimetrico strumentale per la definizione di un parametro della qualità del mascarpone. *Ind. Latte* **17** (2), 45–55 (1991)
- 101 *Guyomarch F., Binet A. and Dufosse L.*: Characterization of *Brevibacterium linens* pigmentation using spectrocolorimetry. *Int. J. Food Microbiol.* **57**, 201–210 (2000)

- 102 Heyd B., Bardot I. and Bourriot P.: Comparison of optimisation algorithms in formulation on a sensory basis. *Food Qual. Preference* **8** (1), 73–80 (1997)
- 103 Jaros D. and Rohm H.: A research note identification of sensory color optima of strawberry yogurt. *J. Food Qual.* **24** (1), 79–86 (2001)
- 104 Johnson D.B., Austin B.A. and Murphy R.J.: Effects of high hydrostatic pressure on milk. *Milchwissenschaft* **47**, 760–763 (1992)
- 105 Kessler H.G. and Fink R.: Changes in heated and stored milk with an interpretation by reaction kinetics. *J. Food Sci.* **51**, 1105–1111 (1986)
- 106 Kinsella J.E.: Physical properties of food and milk components: research needs to expand uses. *J. Dairy Sci.* **70**, 2419–2428 (1987)
- 107 Krämer J.: *Lebensmittelmikrobiologie*. Zweite Auflage S. 8–336. Ulmer-Verlag, Stuttgart (1992)
- 108 Kristensen D., Boesen M., Jakobsen U.L., Mansson L., Erichsen L. and Skibsted L.H.: Oxidative and colour stability of salted sour cream dairy spread compared to salted sweet cream dairy spread. *Milchwissenschaft* **55**, 504–507 (2000)
- 109 Kudoh Y. and Matsuda S.: Effect of lactic acid bacteria on color tone and anthocyanin content of sweet potato yoghourt. *J. Jpn. Soc. Food Sci. Technol.* **47**, 619–625 (2000)
- 110 Nielsen B.R., Stapelfeldt H. and Skibsted L.H.: Differentiation between 15 whole milk powders in relation to oxidative stability during accelerated storage: Analysis of variance and canonical variable analysis. *Int. Dairy J.* **7**, 589–599 (1997)
- 111 Patel A.A., Gandhi H., Singh S. and Patil G.R.: Shelf-life modeling of sweetened condensed milk based on kinetics of Maillard browning. *J. Food Processing Preserv.* **20**, 431–451 (1996)
- 112 Pauletti M.S., Castelao E., Sabbag N. and Costa S.: Color development rate in dulce de leche. *Food Sci. Technol. Int.* **1**, 137–140 (1995)
- 113 Pauletti M.S., Castelao E.L. and Bernardi M.C.: Influence of soluble solids, acidity and sugar on the color of dulce de leche. *Food Sci. Technol. Int.* **2**, 45–49 (1996)
- 114 Pauletti M.S., Matta E.J., Castelao E. and Rozycki D.S.: Color in concentrated milk proteins with high sucrose as affected by glucose replacement. *J. Food Sci.* **64**, 90–92 (1999)
- 115 Pauletti M.S., Matta E.J. and Rozycki S.: Kinetics of heat-induced browning in concentrated milk with sucrose as affected by pH and temperature. *Food Sci. Technol. Int.* **5**, 407–413 (1999)
- 116 Pavia M., Guamis B., Trujillo A.J., Capellas M. and Ferragut V.: Changes in microstructural, textural and colour characteristics during ripening of Manchego-type cheese salted by brine vacuum impregnation. *Int. Dairy J.* **9**, 91–98 (1999)
- 117 Rohm H., Strob, M. and Jaros D.: Butter colour affects sensory perception of spreadability. *Z. Lebensm. Unters. Forsch.* **205**, 108–110 (1997)
- 118 Roland A.M., Phillips L.G. and Boor K.J.: Effects of fat content on the sensory properties, melting, color, and hardness of ice cream. *J. Dairy Sci.* **82**, 32–38 (1999)
- 119 Roland A.M., Phillips L.G. and Boor K.J.: Effects of fat replacers on the sensory properties, color, melting, and hardness of ice cream. *J. Dairy Sci.* **82**, 2094–2100 (1999)
- 120 Rosenthal R.D.: Recent advances in color measurement instrumentation. 31st Southwest Paint Convention Houston Texas 1973
- 121 Siegmund B., Derler K. and Pfannhauser W.: Changes in the aroma of a strawberry drink during storage. *J. Agric. Food Chem.* **49**, 3244–3252 (2001)
- 122 Silberzahn U.: Objective colour determination. Quality assurance of ice cream. *Süßwaren* **40** (5), 58–60 (1996)
- 123 Zadow J.G.: Studies on the ultra-heat treatment of milk: I. Comparison of direct and indirect heating of whole milk. *Aust. J. Dairy Technol.* **6**, 44–49 (1969)
- 124 Hardy J., Scher J., Spinnler H.E., Guichard E. and Gripon J.C.: *Cheesemaking: From science to quality assurance*, Eck, A., Gillis, J.C. 2nd edition, Lavoisier Publishing, 447–473, Paris 2000

- 125 *Buera M.D., Hough G., Martinez E. and Resnick S.L.*: Colorimetric, spectrophotometric and sensory color measurements of a dairy product. *Dulce de leche. Anal. Asociación quim. Arg.* **78**, 291–299 (1990)
- 126 *Venter B.G., Mostert J.F. and Mynhardt A.J.*: Factors affecting food colorant in yoghourt. *S. Afr. J. Dairy Sci.* **20** (2), 61–67 (1988)
- 127 *Wuelpern H.U., Buchheim W. und Wues, E.*: Anwendung der Farbmessung zur Beurteilung der Weisskraft und Kaffeestabilität von Kaffeesahne. *Deutsche Milchwirtschaft*, **43**, 819–822 (1992)
- 128 *Ferreira V.L.P., Hough G. and Yotsuyanagi K.*: The colour of creamy “doce de leite”. *Cole-tanea do Instituto de Tecnologia de Alimentos*, **19** (2) 134–143 (1989)
- 129 *Ulberth F.*: Chemische und physikalische Charakterisierung von Butterfett. Teil I. *Deutsche Milchwirtschaft* (Hildesheim), **42** (5), 117–119 (1991)
- 130 *Kammerlehner J. und Kessler H.G.*: Farbmessungen an Butter zur objektiven Beurteilung ihrer Farbe und verschiedener Einflüsse. *Deutsche Milchwirtschaft*, **20**, 758–762 (1979)
- 131 *Robinson R.K.*: A colour guide to cheese and fermented milks. Edition Chapman & Hall 1995
- 132 *Anonyme*: Rapport de colloque: Des méthodes d’analyse en agro-alimentaire. Mesure de la couleur. Université de Rennes, France 1981
- 133 *Commission of the European Communities*: Intercomparaison of colour measurements. BCR info., Applied metrol. (1993)
- 134 *Rowney M., Roupas P., Hickey and Everett D.W.*: Factors affecting the functionality of Mozzarella cheese. *Aust. J. Dairy Technol.* **54**, 94–102 (1999)
- 135 *MacDougall D.B.*: Colour measurement of food. In: Colour in food, improving quality, CRC Press, Woodhead publishing Ltd, 33–63 Cambridge 2002
- 136 *Pagliarini E., Peri C. and Abba S.*: High temperature pasteurization of milk: Sensory and chemical changes. *Milchwissenschaft* **45**, 363–366 (1990)
- 137 *Kneifel W. Ulberth F. and Schaffer E.*: Tristimulus colour reflectance measurement of milk and dairy products. *Lait* **72**, 383–391 (1992)
- 138 *Grünwald T.*: Messung der Farbe und Festigkeit von Lebensmitteln. *Mitt. Gebiete Lebensm. Hyg.* **70**, 97–106 (1979)
- 139 *Anonymous*: Color and color related properties. Flyer published by Garner Laboratory Inc., 6 pages, P.O. 5728, 5521 Landy Ln., Bethesda, Maryland 20014, USA, September 1976
- 140 *Mortensen G.*: Prevention of light-induced quality changes in Havarti cheese by optimal packaging. PhD thesis, EF 786, Food chemistry, Department of dairy and food science, The royal veterinary and agricultural University, Rolighedsvej 30, 1958 Frederiksberg C, Denmark 2002

Adresse du correspondant: Dr Jacques Olivier Bosset, 8 ch. des Prés,
CH-1530 Payerne