

Facteurs de variation de la proportion de caséines dans les protéines du lait de vache

Le rendement de transformation du lait en fromage dépend du taux protéique et de la part des caséines dans la fraction protéique du lait. Le taux protéique varie selon trois grandes catégories de facteurs : génétiques, physiologiques et alimentaires, qu'en est-il de la proportion des caséines dans les protéines ?

Les protéines sont les constituants les plus recherchés du lait. Les facteurs de variation de leur concentration, d'origine physiologique, génétique ou alimentaire sont bien connus et ont fait l'objet de nombreuses revues de synthèse (Thomas 1984, Rémond 1985, Spörndly 1989, Sutton 1989, Coulon et Rémond 1991, DePeters et Cant 1992, Murphy et O'Mara 1993, Rulquin *et al* 1994, Coulon *et al* 1995). Les protéines du lait sont composées de deux grandes familles. La première est constituée des caséines (α S1, α S2, β et κ) qui représentent environ 80 % des protéines vraies. La

seconde regroupe les protéines solubles, qui sont constituées essentiellement de la β -lactoglobuline, de l' α -lactalbumine, de la sérum albumine et des immunoglobulines. La plupart de ces protéines présentent plusieurs variants génétiques (Grosclaude 1988). Si les protéines solubles du lait ont une valeur nutritionnelle élevée (Alais 1984), seules les caséines comptent pour le fromager puisqu'elles déterminent en grande partie le rendement de transformation du lait en fromage (Barbano et Sherbon 1984, Aleandri *et al* 1990, Colin *et al* 1992, Hurtaud *et al* 1993). Dans un pays comme la France où plus de la moitié du lait est transformée en fromage, il est important de connaître l'amplitude et les facteurs de variation de la proportion des caséines dans les protéines totales du lait, d'autant que certains fromagers disent observer un rendement de transformation moins que proportionnel à la teneur en protéines quand celle-ci augmente.

Un certain nombre de travaux ont décrit la variabilité du rapport caséines/protéines entre des laits individuels ou de troupeaux, en relation avec les caractéristiques génétiques des animaux (Cerbulis et Farrell 1975, Blake *et al* 1980, Morini *et al* 1982, Ng-Kwai-Hang *et al* 1984 et 1987, Kroecker *et al* 1985, Mariani et Pecorari 1987, Aleandri *et al* 1990, Rahali et Ménard 1991) ou avec leur conduite (Szijarto *et al* 1972, Le Doré *et al* 1986, Ng-Kwai-Hang *et al* 1987, Verdi *et al* 1987, Franke *et al* 1988). Par ailleurs des travaux expérimentaux ont été effectués pour analyser l'effet de certains facteurs de variation, comme l'état sanitaire de la mamelle (Anderson et Andrews 1977, Munro *et al* 1984, Balou *et al* 1995) ou la nature de l'alimentation

Résumé

L'objectif de cette étude a été de préciser et de hiérarchiser les différents facteurs de variation de la proportion entre les caséines et les protéines totales dans le lait de vache. Au total 29 essais, tous effectués dans les unités de l'INRA de Rennes ou de Theix et regroupant 821 lactations ont été utilisés. Pour 551 de ces lactations, les variants génétiques des lactoprotéines avaient été déterminés. Les autres lactations faisaient partie d'essais dans lesquels les animaux étaient leurs propres témoins. Le principal facteur de variation de ce rapport est le polymorphisme génétique de la β -lactoglobuline : toutes choses étant égales par ailleurs, les animaux de type BB présentent un rapport supérieur, de près de 3 points, à celui des vaches de type AA. Le variant B de la caséine κ exerce aussi un effet favorable (+ 1,2 points à l'avantage des animaux BB). En dehors de la première semaine de lactation et des deux dernières semaines de gestation, le rapport caséines/protéines varie peu au cours de la lactation mais tend à diminuer légèrement en fin de lactation. Ce rapport est significativement diminué lorsque la numération cellulaire du lait dépasse 200 000 cellules/ml. Il diminue par ailleurs légèrement avec l'âge. Parmi les différents facteurs alimentaires étudiés (niveau et nature des apports énergétiques et azotés, mode de conservation et nature des fourrages), aucun n'a eu un effet significatif sur le rapport caséines/protéines du lait, sauf dans des conditions de sous-alimentation très prononcées. Ce rapport augmente très légèrement avec le niveau de production laitière des animaux et le taux protéique du lait. En pratique, la mesure du taux protéique du lait, chez des animaux indemnes de mammites reste donc un très bon indicateur du taux de caséines, dont il explique à lui seul 93 % des variations.

(Laurent *et al* 1992, Coulon *et al* 1995, Malossini *et al* 1996). Cependant aucune synthèse n'a été entreprise, à notre connaissance, pour tenter de hiérarchiser les différents facteurs de variation de ce rapport.

L'objectif de cet article est d'une part de faire le point sur l'effet des différents facteurs de variation de ce rapport, en examinant plus particulièrement les facteurs alimentaires, d'autre part de hiérarchiser leurs influences respectives. L'étude est basée sur des données expérimentales obtenues à l'INRA de Clermont-Fd-Theix (laboratoire Adaptation des Herbivores aux Milieux et domaine de Marcegnat) et de Rennes (station de Recherches sur la Vache Laitière) au cours des dix dernières années dans le cadre d'études concernant l'effet de l'alimentation sur les caractéristiques du lait et du fromage. Ces données présentent l'avantage d'avoir été acquises de façon homogène et dans des conditions connues.

1 / Origine et traitement des données

Pour analyser l'effet du stade physiologique, nous avons utilisé les résultats de cinq essais, dans lesquels les vaches (entre 16 et 154 selon les essais) étaient à différents stades « normaux » de la lactation, ou en fin de gestation et de lactation (période sèche raccourcie ou omise).

Les données utilisées pour l'étude des effets de l'âge, des facteurs alimentaires et des facteurs génétiques proviennent d'essais réalisés à l'INRA de Rennes et de Clermont-Fd-Theix (domaine de Marcegnat) dans le cadre d'études portant essentiellement sur les relations entre l'alimentation (niveau des apports énergétiques et azotés, nature de l'énergie ou de

l'azote, nature des fourrages) et la production laitière. Le rapport caséines/protéines dépend principalement des caractéristiques individuelles des vaches (en particulier des variants génétiques des lactoprotéines, voir plus loin). Aussi, nous n'avons retenu parmi nos essais que ceux (n = 29) où les effets individuels et nutritionnels ne risquaient pas d'être confondus (22 dispositifs en inversion ou en carré latin, avec de 4 à 24 vaches par essai sur des périodes de 2 à 6 semaines) ou pouvaient être séparés par analyse de variance-covariance prenant en compte la nature des variants génétiques ou la valeur du rapport caséines/protéines au cours d'une période pré-expérimentale (sept essais en continu, avec 16 à 121 vaches par essai, sur des périodes de 2 à 20 semaines). Deux de ces essais ont été réalisés au pâturage. Dans tous les autres, les animaux étaient alimentés individuellement avec des rations à base d'ensilage de maïs, d'ensilage d'herbe ou de foin. Les compléments énergétiques étaient généralement à base de céréales et les compléments azotés à base de tourteau tanné de soja et de colza (sauf cas particuliers expérimentaux). Les concentrés représentaient, selon les essais, de 15 à 40 % de la MS totale de la ration. Les résultats des 22 essais dans lesquels les variants génétiques avaient été déterminés constituent un fichier de 551 lactations effectuées par 307 vaches (fichier général). Pour chaque lactation, deux à cinq périodes de mesure de la quantité de lait sécrétée et de sa composition, de sa numération cellulaire (pour 449 lactations seulement) et des bilans énergétiques et azotés étaient disponibles. La grande majorité de ces mesures avaient été réalisées en milieu de lactation (111 jours en moyenne), aucune n'ayant été effectuée au cours du premier mois ou après le 8^e mois de lactation. Les caractéristiques moyennes de ces 551 lactations sont résumées dans le tableau 1. Toutes ces mesures avaient été faites chez des animaux indemnes de mammites cliniques et traits deux fois par jour.

Tableau 1. Principales caractéristiques des données du fichier général (n = 551 lactations).

Caractéristiques du lait	Moyenne	Ecart-type			Minimum	Maximum
Stade de lactation (j)	111	39			27	251
Lait (kg/j)	20,5	7,4			5,5	40,4
Taux butyreux (g/kg)	39,3	5,7			20,5	62,7
Taux protéique (g/kg)	31,3	2,8			24,2	40,9
Caséines/protéines (%)	81,5	2,1			74,0	88,0
Cellules (1 000/ml)	197	326			9	2451
Numéro de lactation	1	2	3	4	≥ 5	
Nombre de vaches	202	135	79	54	81	
Génotypes des vaches						
Caséine αS1	BB	BC	autres			
	472	58	21			
Caséine β	A1A1	A1A2	A2A2	A2B	autres	
	124	167	133	61	66	
Caséine κ	AA	AB	BB			
	273	229	49			
β-lactoglobuline	AA	AB	BB			
	114	285	12			

1.1 / Dosages, mesures et analyse

La quantité de lait sécrétée a été pesée à chaque traite. La composition chimique du lait (taux de matières grasses et taux de protéines vraies) a été mesurée quatre à six fois par semaine par spectrophotométrie infrarouge (Milkoscan), et la numération cellulaire une fois par semaine par comptage automatique (Somatocount). Par ailleurs, deux à cinq fois au cours de chaque essai (et parfois plus dans le cas des essais concernant le stade physiologique), les teneurs en protéines vraies et en caséines ont été mesurées sur un échantillon de la traite du matin. Dans les essais réalisés à Marcegnat, et sauf indication particulière précisée dans les tableaux et les figures, le taux protéique a été mesuré par spectrophotométrie infrarouge et la teneur en caséines par la méthode de Rowland (1938). Dans les essais réalisés à Rennes, les teneurs en matières azotées totales et en caséines ont été mesurées par la méthode de Rowland

(1938), et la teneur en protéines vraies a été estimée par différence entre la teneur en matières azotées totales et la somme des matières azotées uréiques (mesurée par la méthode de Moore et Sax 1965) et non protéiques non uréiques. Cette dernière fraction, très peu variable, a été estimée égale à 0,7 g/kg à partir de 92 mesures réalisées à la station de Recherches sur la Vache Laitière (C. Hurtaud, non publié). Les variants génétiques des lactoprotéines ont été déterminés par focalisation isoélectrique (Seibert *et al* 1985), ou par chromatographie (Guillou *et al* 1987). Les apports et les bilans énergétiques et azotés des animaux ont été calculés individuellement selon les systèmes présentés par l'INRA (1989). Les valeurs retenues pour les apports alimentaires, la production laitière, le taux butyreux et la numération cellulaire ont été celles de la semaine correspondant à la mesure de la teneur en caséines.

Les données ont été traitées par analyse de variance (procédure GLM, SAS 1987). Les variables prises en compte dans chaque analyse sont précisées lors de l'étude de chacun des facteurs, dans le texte ou dans les illustrations.

2 / Résultats

2.1 / Effet des facteurs génétiques

a / Effet de la race

L'effet de la race sur le rapport caséines/protéines a été analysé à partir des résultats de trois essais dans lesquels des vaches de trois races (Holstein, Montbéliarde et Tarentaise) étaient comparées (tableau 2). L'effectif disponible par race (64 à 82) ne peut évidemment pas être considéré comme représentatif de la race, mais ces données ont l'avantage d'avoir été recueillies dans des conditions de milieu contrôlées.

Le rapport caséines/protéines n'a pas été significativement différent entre races dans notre troupeau, bien qu'il ait été légèrement plus faible en race Holstein que dans les autres races (- 0,6 point). Ce résultat confirme les observations de Le Doré *et al* (1986) (- 0,5 point au détriment des vaches Holstein

comparativement aux Montbéliardes, test statistique non calculé). Certains auteurs ont cependant observé des différences significatives entre races, à l'avantage de vaches Jersey (+ 3 points, Blake *et al* 1980) ou Brunnes (+ 3,5 points, Malossini *et al* 1996) comparativement à des vaches Holstein. Ces différences ne sont cependant pas systématiques, puisque Cerbulis et Farell (1975) observent un rapport légèrement plus faible (- 0,3 point) chez des vaches Brunnes que chez des Holstein. Ces écarts d'une étude à l'autre proviennent vraisemblablement, d'abord, de différences de répartition des variants B de la β -lactoglobuline et de la caséine κ , qui influencent le plus le rapport caséines/protéines (voir ci-après). Ainsi, dans notre étude, la prise en compte, dans l'analyse statistique, de la nature des variants des lactoprotéines ne modifie pas les résultats car les fréquences des variants B de la β -lactoglobuline et de la caséine κ étaient peu différentes entre nos échantillons d'animaux des trois races (tableau 2). Par contre, dans d'autres études, la fréquence de ces variants a été très différente entre des animaux de type pie-noir, Jersey ou pie-rouge (respectivement 54, 31 et 11 % d'allèle A de la β -lactoglobuline ; Bech et Kristiansen 1990). Par ailleurs il est aussi possible que ces différences soient parfois dues à une teneur en azote non protéique plus élevée chez les vaches Holstein (Cerbulis et Farell 1975), ce qui diminuerait légèrement le rapport caséines/protéines lorsque, dans ce rapport, le dénominateur correspond en fait aux matières azotées totales du lait et non aux protéines vraies, ce qui est parfois le cas dans certains travaux étrangers (Blake *et al* 1980).

b / Effet des variants génétiques des lactoprotéines

L'effet des variants génétiques des lactoprotéines a été analysé sur le fichier général en introduisant dans le modèle statistique les facteurs essai, variant de la β -lactoglobuline, variant de la caséine κ , variant de la caséine α S1 et variant de la caséine β , ainsi que l'interaction β -lactoglobuline x caséine κ . En l'absence d'effet significatif des variants des caséines α S1 et β , ces deux facteurs n'ont pas été retenus dans le modèle final.

Le rapport caséines/protéines augmente avec la présence des variants B de la β -lactoglobuline et de la caséine κ (tableau 3), sans

Tableau 2. Effet de la race sur le rapport caséines/protéines du lait. Les valeurs présentées sont issues d'analyses statistiques effectuées sur les résultats poolés de trois essais (Machebœuf *et al* 1993, Coulon *et al* 1995, Coulon *et al* 1997) dans chacun desquels des vaches des trois races étaient comparées.

	Fréquence allélique du variant B de la β -lactoglobuline %	Lait kg/j	Taux butyreux g/kg	Taux protéique g/kg	Caséines / protéines ⁽¹⁾ %
Holstein (n = 82)	54	22,6 ^a	41,1 ^a	30,9 ^a	81,1
Montbéliarde (n = 76)	55	17,1 ^b	39,2 ^b	32,2 ^b	81,7
Tarentaise (n = 64)	59	14,7 ^c	39,1 ^b	32,0 ^b	81,7

⁽¹⁾ Valeurs ajustées par analyse de variance en tenant compte de l'effet du numéro d'essai. Les valeurs suivies d'une lettre différente sont significativement différentes (P < 0,01).

La proportion de caséines augmente avec la présence des variants B de la β -lactoglobuline et de la caséine- κ .

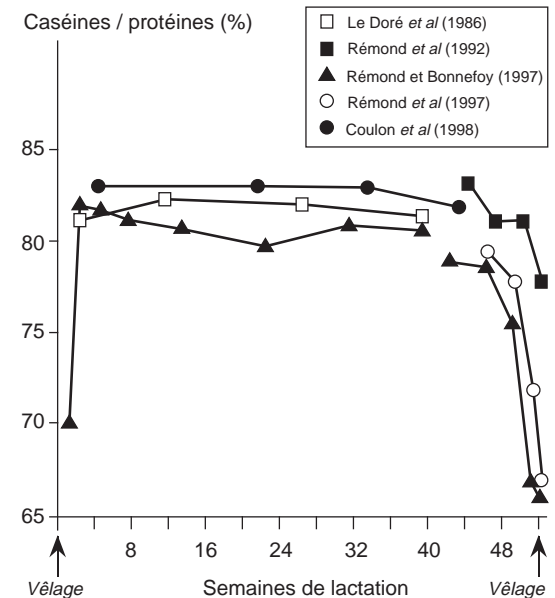
qu'il y ait d'interaction entre les deux. L'écart est de respectivement 2,9 et 1,2 points entre les animaux de type AA et BB pour la β -lactoglobuline et la caséine κ . L'effet favorable du variant B de la β -lactoglobuline est connu depuis longtemps (cf. revue de Grosclaude 1988). L'effet favorable du variant B de la caséine κ a été moins décrit (Rahali et Ménard 1991), vraisemblablement parce qu'il ne se manifeste que chez les animaux homozygotes BB, dont la fréquence est relativement faible dans les principales races laitières mondiales. L'effet favorable du variant B de la β -lactoglobuline est dû à la fois à une augmentation de la teneur du lait en caséines et à une diminution de la teneur en protéines solubles, comme cela est couramment décrit, tandis que celui du variant B de la caséine κ est dû essentiellement à une augmentation de la teneur du lait en caséines (tableau 3), ce qui confirme les observations réalisées sur des populations importantes d'individus (Ng-Kwai-Hang *et al* 1987, Grosclaude 1988).

2.2 / Effet des facteurs physiologiques

a / Effet du stade de lactation

Le rapport caséines/protéines est faible juste après le vêlage (environ 50 % à la première traite) en raison de la sécrétion de quantités très importantes d'immunoglobulines dans le colostrum. Il augmente rapidement d'une traite à la suivante au cours de la première semaine de lactation (Rémond *et al* 1992) pour atteindre dès la deuxième semaine une valeur au moins égale à 80 %. Cette valeur reste pratiquement constante jusqu'à la fin de la période « normale » de la lactation (40 semaines, figure 1). On note toutefois une tendance à la diminution de ce rapport, en particulier au cours des deux derniers mois de la lactation, comme cela avait déjà été observé par Rémond (1987). Chez les vaches conduites sans période sèche, le rapport caséines/protéines diminue de façon accélérée à l'approche du vêlage (figure 1) parce que la teneur en caséines s'accroît proportionnellement moins

Figure 1. Evolution du rapport caséines/protéines durant la lactation. Dans l'étude de Rémond et Bonnefoy (1997), le taux de caséines a été estimé par la différence entre le taux protéique du lait et le taux protéique du sérum, après coagulation du lait par la présure.



vite que la teneur en protéines solubles. L'accroissement de cette dernière fraction est dû essentiellement (pour 80 %, Rémond *et al* 1997) aux immunoglobulines qui passent d'environ 0,6 g/l pendant l'ensemble de la période « normale » de la lactation à plusieurs g/l au cours du dernier mois de gestation, voire plusieurs dizaines de g/l au cours de la dernière semaine. Le rapport caséines/protéines présente, pendant cette période, des variations individuelles considérables ; il est d'autant plus faible que la quantité de lait sécrétée l'est également (Rémond *et al* 1992).

b / Effet de la numération cellulaire

L'accroissement du nombre de cellules somatiques s'accompagne d'une diminution significative du rapport caséines/protéines (tableau 4). Cette diminution est sensible dès que la numération cellulaire dépasse 200 000 cellules/ml : elle est de 0,5 point au-delà de 200 000 cellules/ml et atteint 1,0 point au-delà de 400 000 cellules/ml. Nos résultats sont en accord avec la littérature (Haenlein *et al* 1972, Munro *et al* 1984, Verdi *et al* 1987, Ballou *et al* 1995, Auldust *et al* 1996). Les diminutions du rapport caséines/protéines que nous avons enregistrées sont cependant sensiblement plus faibles que celles observées par ces auteurs, peut-être parce que, en dépit d'une numération cellulaire parfois élevée, les vaches de nos essais ne présentaient pas de mammites cliniques au moment de l'échantillonnage.

La diminution du rapport caséines/protéines avec l'augmentation de la numération cellulaire serait due à la fois à une moindre synthèse de caséines (Anderson et Andrews

Tableau 3. Effet des variants génétiques de la β -lactoglobuline et de la caséine κ sur le rapport caséines/protéines du lait (analyse effectuée sur les 551 données du fichier général).

	Taux protéique (g/kg)	Taux de caséines (g/kg)	Taux de protéines solubles (g/kg)	Caséines / protéines (%)
β -lactoglobuline				
AA (n = 114)	31,1	25,0 ^a	6,1 ^a	80,4 ^a
AB (n = 285)	31,8	26,0 ^b	5,8 ^b	81,9 ^b
BB (n = 152)	31,5	26,3 ^b	5,3 ^c	83,3 ^c
Caséine κ				
AA (n = 273)	31,0	25,2 ^a	5,8	81,3 ^a
AB (n = 229)	31,7	25,8 ^{ab}	5,8	81,7 ^a
BB (n = 49)	31,7	26,1 ^b	5,5	82,5 ^b

⁽¹⁾ Valeurs ajustées pour tenir compte de l'effet essai.

Les valeurs suivies d'une lettre différente sont significativement différentes (P < 0,01).

1977, Munro *et al* 1984, Ballou *et al* 1995), à un afflux de protéines du sérum (albumine et immunoglobulines) dans le lait à travers l'épithélium mammaire détérioré (Haenlein *et al* 1972, Auld *et al* 1996), et à une destruction enzymatique des caséines par la plasmine (Auld *et al* 1996), enzyme dont la concentration augmente en cas de mammite.

c / Effet de l'âge

L'effet du numéro de lactation a été analysé de deux manières différentes (tableau 5) : d'une part en décrivant l'évolution du rapport caséines/protéines chez 19 vaches au cours de leurs trois ou quatre premières lactations et, d'autre part, sur les données du fichier général, en introduisant dans le modèle les facteurs « rang de lactation » (1, 2, 3, 4, 5, 6 et +), « variant de la β -lactoglobuline » (AA, AB ou BB), et « variant de la caséine κ » (AA, AB ou BB). Dans les deux analyses, le rapport caséines/protéines diminue significativement avec l'âge, en particulier pour les lactations de rang élevé (supérieur à 4) : l'écart entre les lactations extrêmes est cependant réduit (0,5 à 0,7 point) et sensiblement plus faible que celui observé dans d'autres études (1,2 à 3,5 points ; Hayes *et al* 1984, Le Doré *et al* 1986, Ng-Kwai-Hang *et al* 1987, Lykke et Pedersen 1991). La raison couramment avancée de cette diminution est l'altération des capacités de synthèse du tissu sécréteur et l'augmentation de la perméabilité tissulaire, en particulier sous l'effet des mammites survenues au cours des lactations précédentes.

d / Effets du niveau de production laitière et du taux protéique

Il est également intéressant de savoir si, au-delà des effets génétiques et physiologiques, le rapport caséines/protéines n'est pas affecté par la productivité des vaches ou par la teneur de leur lait en protéines. Cette analyse a été effectuée sur le fichier général en

Tableau 4. Effet de la numération cellulaire sur le rapport caséines/protéines du lait.

n	Cellules ($\times 1\ 000/\text{ml}$)	Taux protéique (g/kg)	Caséines/protéines ⁽¹⁾ (%)
258	< 100	32,1	82,1 ^a
91	100-200	32,1	82,2 ^a
63	200-400	32,0	81,6 ^b
23	400-800	31,8	80,9 ^c
26	> 800	32,6	80,8 ^c

⁽¹⁾ Valeurs ajustées pour tenir compte de l'essai et de la nature du variant de la β -lactoglobuline et de la caséine κ .

Les valeurs suivies d'une lettre différente sont significativement différentes ($P < 0,05$).

introduisant dans le modèle statistique les facteurs « numéro d'essai » ($n = 22$), « classe de numération cellulaire » (< 100 000 par ml, 100-200 000 par ml, 200-400 000 par ml, > 400 000 par ml), « variant de la β -lactoglobuline » et « variant de la caséine κ », ainsi que la valeur du taux protéique et de la production laitière correspondant à la période de mesure du rapport. La variabilité du rapport caséines/protéines s'explique pour une bonne part (29 % dont 23 % pour le seul facteur variant de la β -lactoglobuline) par les facteurs génétiques et physiologiques inclus dans le modèle, mais aussi par un écart entre essais (23 %), qui peut provenir de différences entre troupeaux et/ou procédures expérimentales et analytiques. En dehors de ces facteurs, le rapport caséines/protéines n'est pas ou est peu lié au niveau de production laitière ou à la teneur en protéines du lait : même si l'effet de ces deux variables est significatif, il est en pratique très faible (respectivement + 0,1 point par g de protéines supplémentaire et + 0,04 point par kg de lait supplémentaire). Dans un essai pour lequel nous disposions d'une très grande variabilité des taux protéiques du lait (62 mesures variant de 25 à 49 g/kg), sous l'influence conjointe du stade physiologique et de la variabilité individuelle, nous n'avons observé aucune variation signifi-

Le rapport caséines/protéines diminue avec l'âge, notamment après la 4e lactation, et lorsque la numération cellulaire augmente au-delà de 200 000.

Tableau 5. Effet du numéro de lactation sur le rapport caséines/protéines du lait.

n° de lactation	n	Lait (kg/j)	Taux butyreux (g/kg)	Taux protéique (g/kg)	Cellules ($\times 1\ 000/\text{ml}$)	Caséines / protéines (%)
Echantillon 1 ⁽¹⁾						
1	19	23,3	41,1	31,5	nd	82,3 ^a
2	19	27,3	41,8	31,4	nd	82,1 ^{ab}
3 et 4	19	28,8	42,0	31,5	nd	81,8 ^b
Echantillon 2 ⁽²⁾						
1	98	18,6	40,5	31,8	127	82,5 ^a
2	95	22,1	40,0	31,3	184	82,6 ^a
3	79	20,7	41,5	31,8	263	82,3 ^a
4	54	22,8	39,2	31,2	261	82,2 ^a
5	48	21,1	39,6	31,2	289	81,7 ^b
6 et 7	33	18,4	41,4	31,9	216	81,9 ^b

⁽¹⁾ 19 vaches du fichier général ayant réalisé 3 ou 4 lactations successives.

⁽²⁾ Analyse réalisée sur les essais du fichier général où différents numéros de lactation étaient inclus. Valeurs ajustées par analyse de variance en tenant compte de la nature du variant de la β -lactoglobuline et de la caséine κ .

Intra échantillon, les valeurs suivies d'une lettre différente sont significativement différentes ($P < 0,05$).

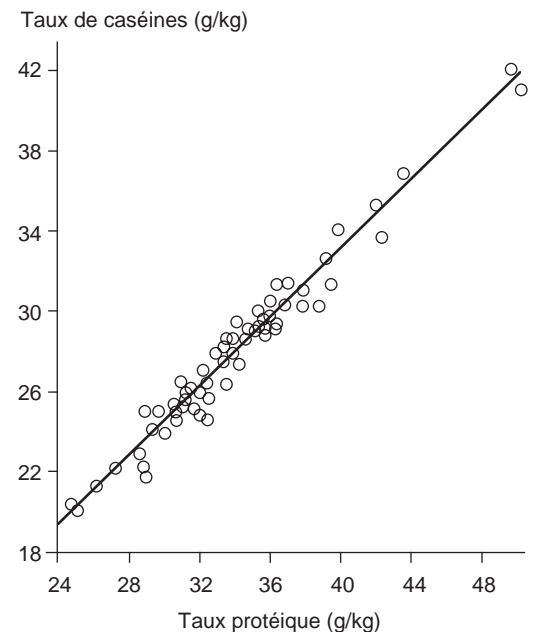
nd = non déterminé

cative du rapport caséines/protéines du lait selon le niveau de taux protéique (figure 2, Coulon *et al* 1998).

2.3 / Effet des facteurs alimentaires

La composition chimique du lait, le taux protéique en particulier, peuvent varier fortement sous l'effet des facteurs alimentaires (Sutton 1989). On sait ainsi que le taux protéique augmente de manière linéaire avec les apports énergétiques (Coulon et Rémond 1991), sauf lorsque l'augmentation de ces apports est réalisée par adjonction de matières grasses qui, au contraire et quelle que soit leur origine, ont un effet dépressif (Doreau et Chilliard 1992). Par ailleurs, le taux protéique dépend aussi de la couverture des besoins en acides aminés indispensables, lysine et méthionine en particulier (Rulquin *et al* 1993), donc de la nature des compléments azotés distribués aux animaux. L'augmentation du niveau des apports azotés dans la ration entraîne une augmentation conjointe des quantités de lait et de protéines sécrétées, de sorte que le taux protéique est peu modifié (Rémond 1985). L'augmentation de l'apport azoté entraîne en revanche un accroissement de la teneur en urée du lait (+ 4 mg urée/100 ml par point de MAT % MS, Rémond 1985), mais ceci n'affecte que très peu la teneur en matières azotées totales du lait (+ 0,1 g/l) et donc pas du tout le taux protéique tel qu'il est mesuré en France. Enfin, l'effet de la nature de l'énergie sur le taux protéique fait l'objet de résultats contradictoires, même si l'on admet que des rations riches en amidon conduisent généralement à une augmentation du taux protéique, au moins dans les cas extrêmes (Thomas 1984, Coulon *et al* 1989, Sutton 1989). La question est de savoir si ces modifications du taux protéique du lait sous

Figure 2. Relation entre les taux de caséines et de protéines du lait (d'après Coulon *et al* 1998). Dans cet essai, la variabilité du taux protéique du lait était essentiellement due à la variabilité du stade de lactation des animaux (entre 20 et 300 j).



l'effet de l'alimentation s'accompagnent de modifications du rapport caséines/protéines.

a / Effet du niveau et de la nature des apports énergétiques

L'effet du niveau des apports énergétiques a été étudié dans deux essais (tableau 6) dans lesquels des quantités (essai 1) ou des proportions différentes (essai 2) d'aliment concentré dans la ration avaient été distribuées à des

L'augmentation des apports énergétiques entraîne une hausse du taux protéique, mais la proportion de caséines n'est pas ou est peu modifiée selon la nature des aliments distribués.

Tableau 6. Effet du niveau et de la nature des apports énergétiques sur le rapport caséines/protéines du lait.

	n	Apport énergétique (UFL/j)	Lait (kg/j)	Taux butyreux (g/kg)	Taux protéique (g/kg)	Caséines / protéines (%)
Niveau d'apport						
Essai 1 ⁽¹⁾						
- bas	59	12,9 ^a	17,4 ^a	34,1	30,0 ^a	80,1
- haut	62	14,8 ^b	19,0 ^b	34,8	31,8 ^b	80,1
Essai 2 ⁽¹⁾						
- bas	35	18,8 ^a	30,4	41,8	28,7	81,6
- haut	43	19,7 ^b	30,8	41,1	29,3	81,4
Type de concentré						
Essai 1 ⁽²⁾						
- parois	6	18,0	25,6	44,0	31,2	80,9
- amidon	6	17,9	25,2	44,9	31,9	80,9
Essai 2 ⁽²⁾						
- parois	6	20,6 ^a	33,2	41,0 ^a	30,2 ^a	81,3 ^a
- amidon	6	21,1 ^b	33,6	38,9 ^b	30,9 ^b	81,0 ^b

Intra essai, les valeurs suivies d'une lettre différente sont significativement différentes ($P < 0,05$).

⁽¹⁾ Essai 1 d'après Machebœuf *et al* (1993), essai 2 d'après R. Vérité *et al* (non publié). Valeurs ajustées pour tenir compte de l'essai et de la nature du variant de la β -lactoglobuline et de la caséine κ .

⁽²⁾ Essai 1 d'après C. Hurtaud *et al* (non publié), essai 2 d'après Peyraud *et al* (1994). Essais en carré latin.

vaches laitières. Dans tous les cas, l'augmentation des apports énergétiques a conduit à une augmentation du taux protéique du lait (respectivement + 1,8 et + 0,6 g/kg dans les essais 1 et 2), mais le rapport caséines/protéines n'a pas été modifié, conformément aux résultats de la bibliographie (Vertès *et al* 1989, Laurent *et al* 1992, Malossini *et al* 1996, Rulquin et Delaby 1997).

La nature de l'énergie apportée par les aliments peut affecter la digestion au niveau ruminal (composition du mélange des acides gras volatils), ou intestinal (modification du flux d'amidon, donc de la quantité de glucose absorbée). Dans les deux essais réalisés à même niveau d'apport énergétique, la nature du concentré (riche en parois cellulaires ou en amidon), qui modifie parfois la composition chimique du lait, n'a pas ou peu modifié le rapport caséines/protéines (tableau 6), conformément aux observations de Laurent *et al* (1992) et Colin-Schoellen *et al* (1995a). Ces résultats vont dans le même sens que ceux de DePeters et Taylor (1985) et Elliot *et al* (1995), qui n'ont pas constaté d'effet marqué de la nature de l'énergie (différentes céréales) sur le rapport caséines/protéines.

Lorsque la nature de l'énergie est modifiée par des infusions d'acide propionique dans le rumen ou de glucose dans l'intestin grêle, la production et la composition du lait sont parfois fortement modifiées (tableau 7), mais le rapport caséines/protéines n'est que peu affecté, comme l'avaient observé Rook et Balch (1961). On remarque cependant parfois une tendance, non significative, à une diminution linéaire de ce rapport avec les doses croissantes de glucose (C. Hurtaud *et al*, non publié).

L'adjonction de matières grasses dans la ration des vaches laitières conduit presque systématiquement à une diminution significative du taux protéique du lait (Sutton 1989, Doreau et Chilliard 1992), mais elle n'affecte pas significativement le rapport caséines/protéines (DePeters et Cant 1992), même si une tendance à la baisse est observée dans la plu-

part des essais (Doreau et Chilliard 1992), quelle que soit l'origine des matières grasses.

b / Effet du niveau et de la nature des apports protéiques

L'effet du niveau des apports azotés sur le rapport caséines/protéines a été étudié dans deux essais (tableau 8). Dans le premier essai, les modifications du niveau d'apport azoté n'ont pas entraîné d'effet significatif sur le rapport caséines/protéines. Ce résultat est en accord avec les observations de Sutton *et al* (1996) qui n'ont pas mis en évidence de variation du rapport caséines/protéines dans une gamme pourtant très large de teneurs en matières azotées totales de la ration. Dans le deuxième essai, l'augmentation de l'apport azoté était importante et s'est accompagnée d'une augmentation des quantités de MS ingérées par les animaux et donc des apports énergétiques. Ces modifications ont entraîné une forte augmentation de la production laitière et du taux protéique ainsi qu'une augmentation significative du rapport caséines/protéines (+ 1 point, $P < 0,05$).

L'effet de la nature du complément azoté a été étudié dans trois essais. Dans deux d'entre eux, le complément protéique le mieux équilibré en acides aminés, le plus riche en lysine notamment (tourteau de soja *vs* corn gluten meal dans l'essai 1, farine de poisson *vs* tourteau de soja dans l'essai 3) a amélioré légèrement mais significativement le rapport caséines/protéines. L'effet positif d'aliments riches en lysine et en méthionine sur le rapport caséines/protéines a également été observé par Rogers *et al* (1984). Cependant, le remplacement d'un tourteau d'arachide (pauvre en lysine et en méthionine) par de la farine de poisson (riche en ces deux acides aminés) n'a pas eu d'effet (tableau 8, essai 2).

L'effet de l'apport de lysine et/ou de méthionine protégées contre la dégradation des microbes du rumen a été étudié dans neuf essais (tableau 9). Dans tous les cas, l'apport d'acides aminés a eu un effet positif et signifi-

Tableau 7. Effet (écart entre le traitement et le témoin) de l'infusion d'acide propionique dans le rumen et de l'infusion de glucose dans le duodénum sur le rapport caséines/protéines du lait.

Essai (1)	Nutriment infusé (2)	Apport énergétique (UFL/j)	Apport azoté (g PDI/j)	Lait (kg/j)	Taux butyreux (g/kg)	Taux protéique (g/kg)	Caséines / protéines (%)
1	C3	- 0,7	- 57	- 1,9	- 5,0**	0,1	0,2
2	C3	- 0,1	- 2	0,6	- 4,8**	1,2**	- 0,2
2	Glucose	- 0,1	- 3	- 1,1**	- 4,5**	2,2**	- 0,3
3	Glucose	1,2	132	- 2,2*	- 4,9**	2,7**	- 0,6
4	Glucose	- 0,1	- 38**	- 0,2	- 6,1**	1,3	- 0,3
5	Glucose	0,7	- 48	0	- 4,8**	1,2	- 0,4
6	Glucose	0,5	37	2,4**	- 4,0	1,3	- 0,6
Réponse moyenne		0,2	3	- 0,3	- 4,9**	1,4*	- 0,3*
Moyenne des témoins		18,4	1 953	32,0	37,8	28,9	81,3

** : $P < 0,01$; * : $P < 0,05$.

(1) Essai 1 : Hurtaud *et al* (1993) ; essais 2, 4, 5 et 6 : C. Hurtaud *et al* (non publié) ; essai 3 : Favardin *et al* (1992).

Tous ces essais ont un schéma expérimental en carré latin.

(2) C3 = acide propionique : 993 g/j. Glucose : 1 300-1 500 g/j.

Tableau 8. Effet du niveau et de la nature des apports azotés sur le rapport caséines/protéines du lait (essais en carré latin, sauf Vérité et al).

	MAT % MS	Apport azoté (g PDI/j)	Apport énergétique (UFL/j)	Lait (kg/j)	Taux butyreux (g/kg)	Taux protéique (g/kg)	Caséines / protéines (%)
Niveau d'apport ⁽¹⁾							
Essai 1							
- bas	13,1	1 563 ^a	16,6 ^a	23,5 ^a	44,1 ^a	31,8 ^a	80,6
- haut	15,2	1 878 ^b	17,2 ^b	24,3 ^b	42,4 ^b	32,8 ^b	80,9
Essai 2							
- bas	11,2	1 515 ^a	18,7 ^a	24,4 ^a	43,2 ^a	28,1 ^a	79,7 ^a
- moyen	12,0	1 849 ^b	20,7 ^b	27,4 ^b	42,5 ^{ab}	30,2 ^b	80,0 ^a
- haut	13,6	2 200 ^c	21,6 ^c	30,3 ^c	40,5 ^b	30,9 ^b	80,7 ^b
Nature des apports ⁽²⁾							
Essai 1							
- gluten meal	14,7	1 693	15,8	22,0 ^a	42,6 ^a	31,6 ^a	80,9 ^a
- tourteau de soja	14,5	1 665	16,0	22,7 ^b	41,6 ^b	32,2 ^b	81,5 ^b
Essai 2							
- tourteau d'arachide	14,6	2 051	19,6 ^a	27,9	43,1	31,9	81,3
- farine de poisson	15,0	1 991	18,9 ^b	27,7	41,0	32,3	81,1
Essai 3							
- tourteau de soja	15,1	2 124	19,8	28,6	41,4 ^a	32,0	80,6 ^a
- farine de poisson	15,0	2 062	18,9	29,5	37,3 ^b	31,9	81,2 ^b

Intra essai, les valeurs suivies d'une lettre différente sont significativement différentes ($P < 0,05$).

⁽¹⁾ Essai 1 : Rulquin *et al* (1994b), essai 2 : R. Vérité *et al* (non publié).

⁽²⁾ Essai 1 : C. Hurtaud *et al* (non publié), essai 2 : Rulquin *et al* (1994a), essai 3 : Hurtaud et Rulquin (1994).

Les suppléments protéiques représentent 30 à 40 % de la MAT totale ingérée.

La proportion de caséines varie peu ou pas avec les apports azotés dans les conditions habituelles d'alimentation.

catif sur le taux protéique (augmentation de 0,5 à 2,9 g/kg), mais pas sur le rapport caséines/protéines, sauf dans l'essai 2. La valeur moyenne de ce rapport n'est que très légèrement supérieure avec l'apport d'acides aminés protégés (+ 0,2 point, non significatif). Ces résultats sont en accord avec ceux de la

littérature (Donkin *et al* 1989, Chow *et al* 1990, Colin-Schoellen 1995a et b, Jurjanz *et al* 1996, Schwab 1996). En conclusion, si l'amélioration des apports en acides aminés essentiels entraîne une augmentation du taux protéique du lait, le rapport caséines/protéines du lait n'est que peu ou pas modifié.

Tableau 9. Effet (écart entre traitement et témoin) de l'apport d'acides aminés sur le rapport caséines/protéines du lait.

07	Acides aminés apportés ⁽²⁾	Apport énergétique (UFL/j)	Apport azoté (g PDI/j)	Lait (kg/j)	Taux butyreux (g/kg)	Taux protéique (g/kg)	Caséines/ protéines (%)
1	Lys + Met	0	23	- 0,8	2,1*	0,6	0
2	Lys + Met	- 0,3	14	- 0,7**	0,6	1,4**	0,6**
3	Lys + Met	0,1	48**	- 0,2	1,3*	1,6*	0,3
4	Lys + Met	0,1	48*	- 0,2	0,2	1,7**	0,4
5	Lys + Met	0,5	79*	0,4	0,7	1,2**	0,2
6	Lys	0,3	48	- 0,7	0	2,2**	0,1
7	Met	0	4	- 0,6	0,1	1,8**	0,4
8	Met	0,5	37	- 0,2	0,6	0,7**	0,3
9	Met	0,2	28	- 0,4	0,6	1,3**	-0,3
Réponse moyenne		0,2	37**	- 0,4*	0,7*	1,4*	0,2
Moyenne des témoins		18,6	1953	27,9	42,7	31,3	80,8

** : $P < 0,01$; * : $P < 0,05$.

⁽¹⁾ Essai 1 : H. Rulquin (non publié), essai 2 : C. Hurtaud *et al* (non publié), essai 3 : Rulquin *et al* (1994b), essais 4 et 5 : Rulquin *et al* (1994a), essai 6 : Rulquin *et al* (1994c), essais 7 et 8 : Rulquin et Delaby (1994), essai 9 : Rulquin et Delaby (1997). Essais en carré latin sauf essai 1.

⁽²⁾ Lysine : 24-30 g/j ; méthionine : 8-12 g/j, sauf dans l'essai 9 (21 g/j). Dans tous les essais les acides aminés ont été apportés par voie orale, sous forme protégée.

c / Effet du mode de conservation et de la nature des fourrages

L'effet du mode de conservation des fourrages (herbe verte, foin, ensilage) ou de leur nature (ray-grass, dactyle, prairie naturelle, ensilage de maïs) a été récemment étudié dans plusieurs essais réalisés pour la plupart selon un schéma expérimental en inversion (tableau 10).

Dans ces essais, la production et/ou la composition chimique du lait ont été plus ou moins fortement modifiées par le type de ration de base, mais le rapport caséines/protéines a été identique dans les différents traitements (tableau 10), sauf pour un essai dans lequel les vaches qui pâturaient un ray-grass ont produit un lait présentant un rapport plus élevé ($P < 0,05$) que celles qui pâturaient une prairie naturelle. Dans cet essai, le pâturage de ray-grass a aussi entraîné une production laitière et un taux protéique très supérieurs à ceux obtenus avec le pâturage de prairie naturelle. Cet effet positif du ray-grass n'a cependant pas été retrouvé lorsqu'il était distribué sous forme de foin (tableau 10).

Conclusion

Après avoir connu une diminution sensible au cours des années 80, le taux protéique du lait augmente de nouveau en France depuis 1990 (+ 1,1 g/kg entre 1989 et 1996, résultats du Contrôle Laitier 1997) sous l'effet conjoint de la sélection génétique et de l'alimentation. Certains acteurs de la filière laitière semblent s'interroger sur la réalité de l'amélioration de la valeur fromagère du lait liée à cette augmentation du taux protéique, en particulier lorsque celui-ci, à certaines périodes de l'année, atteint des valeurs très élevées. Cette constatation semble cependant plus basée sur des observations faites à l'échelle de laits de mélange de troupeaux que sur des éléments objectifs clairement enregistrés et diffusés, et ne permet pas de faire la part entre les différents facteurs possibles de la dégradation de la valeur fromagère du lait (liée aux caractéristiques des animaux et de leur conduite, au transport et à la conservation du lait, ou à sa valorisation technologique) d'autant que ces différents facteurs interagissent vraisemblablement. Cette étude, basée sur un très grand nombre de données individuelles de vaches conduites en conditions contrôlées, permet de répondre au premier type de facteurs mis en cause (les caractéristiques des animaux et leur conduite alimentaire).

Le rapport caséines/protéines est très fortement affecté dans les laits colostraux, ou ceux issus de vaches atteintes de mammites cliniques ou en toute fin de gestation. Ces situations constituent cependant des cas extrêmes, voire interdits (laits colostraux). En dehors de ces situations, cette étude confirme que le rapport caséines/protéines dépend d'abord de facteurs génétiques, en particulier du variant de la β -lactoglobuline et, dans une moindre

Tableau 10. Effet de la forme et de la nature du fourrage sur le rapport caséines/protéines du lait.

Essai ⁽¹⁾	n	Lait (kg/j)	Taux butyreux (g/kg)	Taux protéique (g/kg)	Caséines/protéines (%)
Essai 1					
- foin	42	19,5 ^a	37,1 ^a	32,2 ^a	82,8
- ensilage	42	20,2 ^b	36,0 ^b	31,2 ^b	82,5
Essai 2					
- foin	16	17,9 ^a	34,9	30,4	82,0
- pâturage	16	19,7 ^b	35,6	30,8	82,2
Essai 3					
- foin de dactyle	54	17,0 ^a	39,7 ^a	31,8 ^a	82,1
- ensilage de ray grass	54	18,9 ^b	40,0 ^a	31,3 ^b	82,4
- ensilage de maïs	54	18,5 ^b	41,4 ^b	32,2 ^c	82,3
Essai 4					
- pâturage de ray-grass	16	16,4 ^a	36,4 ^a	33,3 ^a	83,4 ^a
- pâturage de prairie naturelle	16	12,6 ^b	38,8 ^b	32,5 ^b	81,7 ^b
Essai 5					
- foin de ray grass	42	16,1 ^a	35,6	31,0	81,5
- foin de dactyle	42	14,9 ^b	35,9	30,8	81,2
- foin de prairie naturelle	42	16,7 ^a	36,6	31,0	81,9

Intra essai, les valeurs suivies d'une lettre différente sont significativement différentes ($P < 0,05$).

⁽¹⁾ Essais 1 et 2 : Coulon *et al* (1997), essai 3 : Coulon *et al* (1995), essais 4 et 5 : J.B. Coulon *et al* (non publié). Essais en carré latin sauf essai 4 (où les valeurs ont été ajustées pour tenir compte de la nature des variants de la β -lactoglobuline et de la caséine κ). Dans les essais 1 et 2, les fourrages provenaient de la même parcelle.

mesure, de celui de la caséine κ . En pratique, les différences entre vaches peuvent donc être importantes (de l'ordre de 3 à 4 points). Même si on ne peut complètement l'exclure, cet effet génétique est sans doute fortement réduit à l'échelle des laits de troupeaux, et a fortiori des laits de mélange de différents troupeaux. Il est en effet peu probable qu'il existe des différences très importantes de fréquence allélique du variant B de la β -lactoglobuline d'un troupeau à l'autre, au moins pour des troupeaux de même race. Pour des troupeaux de races différentes, dans l'état actuel des connaissances, des différences éventuelles de rapport caséines/protéines sont d'abord à interpréter en relation avec la fréquence des variants génétiques des lactoprotéines dans ces troupeaux.

A côté des facteurs génétiques, certains facteurs physiologiques (âge, stade de lactation) ou sanitaires (petite augmentation de la numération cellulaire liée à des mammites subcliniques) peuvent avoir un léger effet à l'échelle individuelle. Leur impact à l'échelle du troupeau est cependant moindre, sauf dans quelques cas particuliers où ils sont cumulés (vêlages très groupés, durée de tarissement réduite). Par ailleurs, même avec la large gamme de situations dont nous disposons dans cette étude, le rapport caséines/protéines a été indépendant du niveau de production des animaux et du taux protéique de leur lait.

Nous avons aussi montré que l'alimentation, qui est un levier important pour améliorer le taux protéique du lait, ne modifiait pas le rapport caséines/protéines dans la très grande majorité des situations examinées. En particulier ni le niveau ni la nature des apports énergétiques et azotés n'ont d'effet important sur ce rapport. En d'autres termes, les différentes pratiques alimentaires examinées visant à améliorer le taux protéique du lait, ont également induit une amélioration proportionnellement équivalente du taux de caséines. Les rares situations où ce rapport a été modifié (apports énergétiques et azotés très faibles ou, au contraire, très excédentaires) constituent des conditions extrêmes associées à des modifications considérables de la production et de la composition du lait. Même si elles méritent un complément d'examen scientifique, elles se rencontrent rarement, en pratique, à l'échelle d'un troupeau.

Il est donc essentiel, lorsque l'on veut étudier les variations de ce rapport sous l'effet de facteurs du milieu, et en particulier de l'alimentation, de prendre en compte les caractéristiques génétiques, sanitaires et physiologiques des animaux. Il est vraisemblable qu'un certain nombre de modifications du rapport caséines/protéines du lait observées à l'échelle d'exploitations soient d'abord dues à des facteurs non alimentaires. Il existe ainsi des résultats contradictoires d'un troupeau à l'autre quant à l'évolution de ce rapport au cours de l'année (Lucey et Fox 1992). Il est également possible :

- qu'il existe des interactions entre les facteurs physiologiques ou sanitaires et les facteurs alimentaires : une diminution importante du rapport caséines/protéines a ainsi été récemment observée en fin de lactation chez

des vaches sous-alimentées, mais pas chez des vaches bien alimentées (Kefford *et al* 1995) ;

- que certains facteurs physiologiques (stade de lactation) ou sanitaires (numération cellulaire élevée, flore psychrotrophe importante), qui n'ont qu'un effet mineur sur des laits individuels analysés immédiatement après la traite, puissent entraîner, après transport et conservation, des modifications plus sensibles du rapport, en raison de la présence dans le lait d'enzymes protéolytiques natives (teneur en plasmine plus élevée en fin de lactation et dans les laits à forte numération cellulaire ; Auld *et al* 1996) ou microbiennes (liées aux bactéries psychrotrophes). Des travaux sont actuellement en cours pour préciser l'importance éventuelle de ces différentes interactions.

En définitive, d'un point de vue pratique, dans un contexte génétique donné, en dehors des laits mammites, colostraux ou de toute fin de gestation, le taux protéique du lait, tel qu'il est mesuré en France, est un indicateur très précis du taux de caséines : dans notre échantillon de 551 données, il explique à lui seul 93 % de la variabilité du taux de caséines, avec un écart-type résiduel de 0,6 g/kg. Intra essai et en tenant compte du variant de la β -lactoglobuline, la part de variation expliquée atteint 96 %.

Remerciements

Nous remercions M.-F. Mahé qui a réalisé la détermination des variants génétiques des lactoprotéines des vaches du domaine de Marcenat et I. Garcia qui a rassemblé les données de la station de Recherches sur la Vache Laitière de Rennes.

Ce texte est adapté de l'article " Factors contributing to variation in the proportion of casein in cow's milk true protein : a review of recent INRA experiments " paru en anglais dans *Journal of Dairy Research*, 1998, 65, 375-387.

Références

- Alais C., 1984. Le lait. Editions Sepiac, Paris, 814 p.
- Aleandri R., Buttazzoni L.G., Schneider J.C., Caroli A., Davoli R., 1990. The effects of milk protein polymorphisms on milk components and cheese-producing ability. *J. Dairy Sci.*, 73, 241-255.
- Anderson M., Andrews A.T., 1977. Progressive changes in individual milk protein concentrations associated with high somatic cell counts. *J. Dairy Res.*, 44, 223-235.
- Auld M.J., Coats S., Sutherland B.J., Mayes J.J., McDowell G.H., Rogers G., 1996. Effects of somatic cell count and stage of lactation on raw milk composition and the yield and quality of Cheddar cheese. *J. Dairy Res.*, 63, 269-280.
- Ballou L.U., Pasquini M., Bremel R.D., Everson T., Sommer D., 1995. Factors affecting herd milk composition and milk plasmin at four levels of somatic cell counts. *J. Dairy Sci.*, 78, 2186-2195.
- Barbano D.M., Sherbon J.W., 1984. Cheddar cheese yields in New York. *J. Dairy Sci.*, 67, 1873-1883.
- Bech A.M., Kristiansen K.R., 1990. Milk protein polymorphism in Danish dairy cattle and the influence of genetic variants on milk yield. *J. Dairy Res.*, 57, 53-62.
- Blake R.W., Nmai I.B., Richter R.L., 1980. Relationships between distribution of major milk proteins and milk yield. *J. Dairy Sci.*, 63, 141-147.
- Cerbulis J., Farrell J.R., 1975. Composition of milks of dairy cattle. I. Protein, lactose and fat contents and distribution of protein fraction. *J. Dairy Sci.*, 58, 817-827.
- Chow J.M., DePeters E.J., Baldwin R.L., 1990. Effect of rumen-protected methionine and lysine on casein in milk when diets high in fat or concentrate are fed. *J. Dairy Sci.*, 73, 1051-1061.
- Colin O., Laurent F., Vignon B., 1992. Variations du rendement fromager en pâte molle. Relations avec la composition du lait et les paramètres de la coagulation. *Lait*, 72, 307-319.

- Colin-Schoellen O., Jurjanz S., Gardeur J.N., Laurent F., 1995a. Effet de la nature de l'aliment concentré sur les performances zootechniques de vaches laitières recevant une ration complète. *Ann. Zootech.*, 44, 359-372.
- Colin-Schoellen O., Laurent F., Vignon B., Robert J.C., Sloan B., 1995b. Interactions of ruminally protected methionine and lysine with protein source or energy level in the diets of cows. *J. Dairy Sci.*, 78, 2807-2818.
- Coulon J.B., Rémond B., 1991. Variations in milk output and milk protein content in response to the level of energy supply in the dairy cow : a review. *Livest. Prod. Sci.*, 29, 31-47.
- Coulon J.B., Faverdin P., Laurent F., Cotto G., 1989. Influence de la nature de l'aliment concentré sur les performances des vaches laitières. *INRA Prod. Anim.*, 2, 47-53.
- Coulon J.B., Pradel P., Verdier I., 1995. Effect of forage type on milk yield, chemical composition and clotting properties of milk. *Lait*, 75, 513-521.
- Coulon J.B., Pradel P., Verdier I., 1997. Effect of forage conservation (hay or silage) on chemical composition of milk. *Ann. Zootech.*, 46, 21-26.
- Coulon J.B., Verdier I., Pradel P., Almena M., 1998. Effect of lactation stage on the cheesemaking properties of milk and the quality of Saint-Nectaire type cheese. *J. Dairy Res.*, 65, 295-305.
- DePeters E.J., Cant J.P., 1992. Nutritional factors influencing the nitrogen composition of bovine milk : a review. *J. Dairy Sci.*, 75, 2043-2070.
- DePeters E.J., Taylor S.J., 1985. Effects of feeding corn or barley on composition of milk and diet digestibility. *J. Dairy Sci.*, 68, 2027-2032.
- Donkin S.S., Varga G.A., Sweeney T.F., Muller L.D., 1989. Rumen-protected methionine and lysine : effects on animal performance, milk protein yield, and physiological measures. *J. Dairy Sci.*, 72, 1484-1491.
- Doreau M., Chilliard Y., 1992. Influence d'une supplémentation de la ration en lipides sur la qualité du lait chez la vache. *INRA Prod. Anim.*, 5, 103-111.
- Elliot J.P., Drackley J.K., Fahey G.C., Shanks R.D., 1995. Utilization of supplemental fat by dairy cows fed diets varying in content of nonstructural carbohydrates. *J. Dairy Sci.*, 78, 1512-1525.
- Faverdin P., Richou B., Peyraud J.L., 1992. Effects of digestive infusions of volatile fatty acids or glucose on food intake in lactating or dry cows. *Ann. Zootech.*, 41, 93.
- Guillou H., Miranda G., Pelissier J.P., 1987. Analyse quantitative des caséines dans le lait de vache par chromatographie liquide rapide d'échanges d'ions (FPLC). *Lait*, 67, 135-148.
- Grosclaude F., 1988. Le polymorphisme génétique des principales lactoprotéines bovines. Relations avec la quantité, la composition et les aptitudes fromagères du lait. *INRA Prod. Anim.*, 1, 5-17.
- Haenlein G.F.W., Schultz L.H., Zikakis J.P., 1972. Composition of proteins in milk with varying leucocyte contents. *J. Dairy Sci.*, 56, 1017-1024.
- Hayes J.F., Ng-Kwai-Hang K.F., Moxley J.E., 1984. Heritability of milk casein and genetic and phenotypic correlations with production traits. *J. Dairy Sci.*, 67, 841-846.
- Hurtaud C., Rulquin H., 1994. Effet de la composition en acides aminés des compléments protéiques sur la composition du lait et son aptitude fromagère. *Rencontres Recherche Ruminants*, 1, 109-112. Institut de l'Élevage et INRA, Paris.
- Hurtaud C., Rulquin H., Vérité R., 1993. Effect of infused volatile fatty acids and caseinate on milk composition and coagulation in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 76, 3011-3020.
- INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), 1989. Ruminant Nutrition. Recommended allowances and feed tables (R. Jarrige ed). John Libbey Eurotext, London, Paris.
- Jurjanz S., Colin-Schoellen O., Laurent F., 1996. Influence de la nature de l'amidon du complément énergétique et d'une supplémentation en méthionine sur les performances zootechniques de vaches laitières. *Ann. Zootech.*, 45, 467-476.
- Kefford B., Christian M.P., Sutherland B.J., Mayes J.J., Grainger C., 1995. Seasonal influences on Cheddar cheese manufacture : influence of diet quality and stage of lactation. *J. Dairy Res.*, 62, 529-537.
- Laurent F., Coomans D., Gardeur J.N., Vignon B., 1992. Composition azotée et caractéristiques technologiques du lait de vache en relation avec la nature et le niveau d'apport de l'aliment concentré. *Lait*, 72, 175-183.
- Le Doré A., Rémond B., Grappin R., Jeunet R., Journet M., 1986. Teneurs du lait en ses principales fractions azotées et en matières grasses : effets de quelques caractéristiques des animaux et de leur alimentation. *Bull. Techn. CRZV Theix, INRA*, 63, 13-20.
- Lucey J.A., Fox P.F., 1992. Rennet coagulation properties of late-lactation milk : effect of pH adjustment, addition of CaCl₂, variation in rennet level and blending with mid-lactation milk. *Irish J. Agric. Food Res.*, 31, 173-179.
- Lykke T., Pedersen J., 1991. Production of casein by red Danish, Danish Friesian and Danish Jersey cattle breeds. 42nd Annual meeting of the EEAP.
- Machebœuf D., Coulon J.B., D'Hour P., 1993. Effect of breed, protein genetic variants and feeding on cows' milk coagulation properties. *J. Dairy Res.*, 60, 43-54.
- Malossini F., Bovolenta S., Piras C., Dalla Rosa M., Ventura W., 1996. Effect of diet and breed on milk composition and rennet coagulation properties. *Ann. Zootech.*, 45, 29-40.
- Moore J.J., Sax S.M., 1965. A revised procedure for urea nitrogen. *Clin. Chim. Acta*, 11, 475-477.
- Murphy J.J., O'Mara F., 1993. Nutritional manipulation of milk protein concentration and its impact on the dairy industry. *Livest. Prod. Sci.*, 35, 117-134.
- Ng-Kwai-Hang K.F., Hayes J.F., Moxley J.E., Monardes H.G., 1987. Variation in milk protein concentrations associated with genetic polymorphism and environmental factors. *J. Dairy Sci.*, 70, 563-570.
- Peyraud J.L., Journet M., Hurtaud C., Agus A., Delaby L., 1994. Influence of the nature of energy source and rate of ruminal degradation of concentrates on milk yield and composition. In 45th Annual Meeting of the European Association for Animal Production, Edinburgh, UK.

- Rahali V., Ménard J.L., 1991. Influence des variants génétiques de la β -lactoglobuline et de la caséine κ sur la composition du lait et son aptitude fromagère. *Lait*, 71, 275-297.
- Rémond B., 1985. Influence de l'alimentation sur la composition du lait de vache 2. Taux protéique : facteurs généraux. *Bull. Tech. CRZV Theix, INRA*, 62, 53-67.
- Rémond B., 1987. Influence du stade de lactation et de l'âge sur la composition chimique du lait. In : *Le lait, matière première de l'industrie laitière*, 151-160. Editions INRA, Paris.
- Rémond B., Bonnefoy J.C., 1997. Performance of a herd of Holstein cows managed without the dry period. *Ann. Zootech.*, 46, 3-12.
- Rémond B., Petit M., Ollier A., 1992. Milking of cows in late pregnancy : milk production during this period and during the succeeding lactation. *J. Dairy Res.*, 59, 233-241.
- Rémond B., Machebœuf D., Rouel J., Chilliard Y., 1997. Composition chimique et coagulation du lait sécrété en fin de gestation et au début de la lactation suivante par des vaches laitières conduites sans période sèche. *Lait*, 77, 615-624.
- Rogers J.A., Clark J.H., Drendel T.R., Fahey G.C.J., 1984. Milk production and nitrogen utilization by dairy cows infused posturally with sodium caseinate, soybean meal, or cottonseed meal. *J. Dairy Sci.*, 67, 1928-1935.
- Rook J.A., Balch C.C., 1961. The effects of intraruminal infusions of acetic, propionic and butyric acids on the yield of milk and composition of the milk of the cow. *Brit. J. Nutr.*, 15, 361-369.
- Rowland S.J., 1938. The determination of the nitrogen distribution in milk. *J. Dairy Res.*, 9, 42-46.
- Rulquin H., Delaby L., 1994. Effect of energy status on lactational responses of dairy cows to rumen-protected methionine. *J. Dairy Sci.*, 77 (suppl 1), 346.
- Rulquin H., Delaby L., 1997. Effects of the energy balance of dairy cows on their lactational responses to rumen-protected methionine. *J. Dairy Sci.*, 80, 2513-2522.
- Rulquin H., Pisulewski P.M., Vérité R., Guinard J., 1993. Milk production and composition as a function of post-ruminal lysine and methionine supply : a nutrient-response approach. *Livest. Prod. Sci.*, 37, 69-90.
- Rulquin H., Delaby L., Hurtaud C., 1994a. Effects of protein supplements on lactational responses of dairy cows to rumen-protected methionine and lysine. *J. Dairy Sci.*, 77 (suppl 1), 347.
- Rulquin H., Hurtaud C., Delaby L., 1994b. Effects of dietary protein level on lactational responses of dairy cows to rumen-protected methionine and lysine. *Ann. Zootech.*, 43, 245.
- Rulquin H., Hurtaud C., Delaby L., 1994c. Effects of graded levels of rumen-protected lysine on milk production in dairy cows. *Ann. Zootech.*, 43, 246.
- SAS, 1987. *SAS User's Guide : Statistics*. Cary, NC : SAS Institute
- Schwab C.G., 1996. Rumen-protected amino acids for dairy cattle : progress towards determining lysine and methionine requirements. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 59, 87-101.
- Seibert B., Erhardt G., Senft B., 1985. Procedure for simultaneous phenotyping of genetic variants in cow's milk by isoelectric focusing. *Anim. Blood Groups Biochem. Gen.*, 16, 183-191.
- Sutton J.D., 1989. Altering milk composition by feeding. *J. Dairy Sci.*, 72, 2801-2814.
- Sutton J.D., Aston K., Beever D.E., Dhanoa M.S., 1996. Milk production from grass silage diets : effects of high-protein concentrates for lactating heifers and cows on intake, milk production and milk nitrogen fractions. *Anim. Sci.*, 62, 207-215.
- Verdi R.J., Barbano D.M., Dellavalle M.E., Senyk G.F., 1987. Variability in true protein, casein, non-protein nitrogen, and proteolysis in high and low somatic cell milks. *J. Dairy Sci.*, 70, 230-242.
- Vertès C., Hoden A., Gallard Y., 1989. Effet du niveau d'alimentation sur la composition chimique et la qualité fromagère du lait de vaches Holstein et Normandes. Résultats préliminaires. *INRA Prod. Anim.*, 2, 89-96.

Abstract

Factors contributing to variation in the proportion of casein in cows' milk true protein.

The aim of this study was to identify and rank the various factors, in particular feeding ones, affecting the proportion of caseins in milk true protein. Twenty nine feeding trials involving 821 lactations were used. Lactoprotein genetic variants were known for 551 of these lactations. The main factor affecting the casein/protein ratio was the genetic polymorphism of β -lactoglobulin : once corrected for other factors, BB type animals exhibited a ratio nearly 3 g/100 g higher than AA animals. κ -casein variant B also had a positive effect (+ 1.2 g/100 g in favour of BB animals relative to AA animals). Except in the first week of lactation and in the two last weeks of pregnancy, the casein/protein ratio varied little during lactation. It was significantly reduced when milk cell count

exceeded 200 000 cells/ml, even without clinical mastitis. It also decreased slightly with parity. Among the various dietary factors studied (level and type of nitrogen and energy supplies, forage type and preservation method), none had any significant effect on the milk casein/protein ratio, except in drastic dietary situations. That ratio increased very slightly in parallel with the animals' milk yield and milk protein content. In practice, measuring the milk protein content in animals free of clinical mastitis remains a very precise predictor of casein content, accounting for 93 % of its variation.

Coulon J.-B., Hurtaud C., Rémond B., Vérité R., 1998. Facteurs de variation de la proportion de caséines dans les protéines du lait de vache. *INRA Prod. Anim.*, 11, 299-310.