



CONTRIBUTION A L'ETUDE DES VARIATIONS DE LA COMPOSITION DU LAIT ET SES CONSEQUENCES EN TECHNOLOGIE LAITIERE

THESE
Pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

Présentée et soutenue publiquement en 2001
devant l'Unoversité Paul-Sabatier de Toulouse

par

Sandra, Isabelle, Andrée, Simone, POUGHEON
10 Novembre 1974, Paris XIIIe

Directeur de thèse : M. le Professeur BRUGERE

JURY

PRESIDENT :
M.

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :

Monsieur Jean Denis BAILLY Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

A Monsieur Le Président du jury,

Professeur à la faculté de Médecine de Toulouse
Qui nous a fait l'honneur de présider cette thèse

Hommage respectueux

A Monsieur Le Docteur BRUGERE

Maître de Conférence de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'origine Animale
Pour son aide précieuse et sa disponibilité

Sincères Remerciements

A Monsieur le Docteur BAILLY

de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'origine Animale
Que nous remercions d'avoir accepté de faire partie de notre jury de thèse

A Mathieu,
Pour sa patience et son amour

A Mes Parents
Pour leur générosité, leur confiance et leur soutien

A Tous mes Amis,
Avec qui nous avons passé de merveilleux moments dans notre vie étudiante et en particulier aux Claudettes, à Brassine et aux Maguettes,

Sans oublier tous les autres ...

PREAMBULE :

L'idée de cette thèse nous est venue suite à la proposition de Monsieur GOURSAUD, Maître de Conférence à l'Ecole Normale Supérieure des Industries Agroalimentaires de participer à l'élaboration d'un chapitre concernant la composition du lait, débutant un ouvrage sur le lait intitulé « LAIT, NUTRITION ET SANTE » coordonné par Gérard DEBRY.

L'étude que nous avons menée pour rédiger ce chapitre nous a suggéré de compléter celle ci en explorant les multiples débouchés des constituants du lait dans l'industrie laitière et les technologies développées pour faire face aux contraintes de variation de cette matière première.

Nous tenons donc à remercier particulièrement Monsieur GOURSAUD pour nous avoir proposé de partager cette enrichissante expérience avec lui.

<u>PREAMBULE :</u>	4
<u>INTRODUCTION</u>	8
<u>PARTIE I :</u>	10
<u>GENERALITES : LE LAIT, MATIERES PREMIERES AUX MULTIPLES RESSOURCES</u>	10
<u>1.1 La filière lait française maîtrise la qualité des produits laitiers (Jean Goursaud, 1999)</u>	11
<u>1.1.1 Par la performance de la zootechnie laitière</u>	11
<u>1.1.2 Par la fabrication de produits laitiers sains</u>	11
<u>1.1.3 Par l'adaptation des produits aux besoins du consommateur</u>	12
<u>1.2 Le lait, présentation générale</u>	14
<u>1.2.1 Aspect, définition légale</u>	14
<u>1.2.2 Composition moyenne du lait</u>	14
<u>1.2.3 Les différentes phases de l'évolution naturelle du lait</u>	15
<u>1.3 Le lait, matière première de l'industrie laitière</u>	16
<u>1.4 Le lait, matière première à la composition variable : aspect général</u>	18
<u>1.4.1 Variations au stade de l'animal</u>	19
<u>1.4.2 Variations au stade du traitement du lait</u>	19
<u>PARTIE 2 :</u>	21
<u>LES CONSTITUANTS DE LA PHASE AQUEUSE</u>	21
<u>2.1 Solution de molécules et ions < 1nm</u>	22
<u>2.1.1 Le lactose et autres glucides du lait</u>	22
<u>2.1.2 Sels organiques et minéraux, oligo-éléments</u>	28
<u>2.2 Protéines solubles <10nm et composés azotés</u>	30
<u>2.2.1 Les différents constituants azotés du lait et leur dosage</u>	30
<u>2.2.2 Classification des protéines</u>	30
<u>2.2.3 Les protéines du lactosérum</u>	31
<u>2.2.4 Intérêt des protéines du lactosérum en industrie laitière</u>	32
<u>2.3 Les biocatalyseurs : vitamines et enzymes</u>	34
<u>2.3.1 Les enzymes</u>	34
<u>2.3.2 Les vitamines et leur variation saisonnière</u>	34
<u>PARTIE 3 :</u>	37
<u>LES CONSTITUANTS DE LA PHASE COLLOIDALE : LES MICELLES DE CASEINES</u>	37
<u>3.1 Description et composition physico-chimique de la micelle</u>	38
<u>3.1.1 Aspects et propriétés</u>	38
<u>3.1.2 Les caséines αS</u>	40
<u>3.1.3 Les caséines β et γ</u>	41
<u>3.1.4 La caséine κ</u>	41

<u>3.2 Le fromage : matière protéique et rendement fromager</u>	44
<u>3.2.1 Paramètres de l'aptitude du lait à la coagulation</u>	44
<u>3.2.2 Facteurs inhérents au lait qui règlent son aptitude à la coagulation</u>	44
<u>3.3 Facteurs de variation du taux protéique et conséquences en technologie laitière</u>	48
<u>3.3.1 Polymorphisme des lactoprotéines</u>	48
<u>3.3.2 Variations liées à l'alimentation</u>	49
<u>3.3.3 Variations liées à la saison</u>	51
<u>3.3.4 Action du froid et traitement thermique</u>	52
<u>3.3.5 Correction des laits en fromagerie</u>	53
<u>PARTIE 4 :</u>	54
<u>LES CONSTITUANTS DE LA PHASE D'EMULSION : LA MATIERE GRASSE ET LES GLOBULES GRAS</u>	54
<u>4.1 La matière grasse et le globule gras : composition physico-chimique</u>	55
<u>4.1.1 Analyse globale</u>	55
<u>4.1.2 Constitution de la matière grasse : le globule gras</u>	56
<u>4.2 Facteurs de variation</u>	59
<u>4.2.1 Variations du TB liées à l'apport alimentaire</u>	59
<u>4.2.2 Influence des traitements thermiques et du froid sur le TB</u>	62
<u>4.2.3 Défauts liés à la lipolyse</u>	62
<u>4.3 Technologie de la matière grasse laitière et exigences des industriels</u>	65
<u>PARTIE 5 :</u>	66
<u>SUSPENSION CELLULAIRE ET MICROBIENNE : LA QUALITE DU LAIT</u>	66
<u>5.1 Description, composition</u>	67
<u>5.1.1 Les cellules somatiques</u>	67
<u>5.1.2 Importance hygiénique de la concentration en cellules somatiques</u>	69
<u>5.1.3 Les autres bactéries</u>	69
<u>5.2 Obtention d'un lait de bonne qualité</u>	71
<u>5.2.1 Généralités</u>	71
<u>5.2.2 La traite, conséquence sur la qualité du lait</u>	71
<u>5.2.3 Conservation du lait à la ferme</u>	72
<u>5.2.4 Transport du lait vers les laiteries</u>	73
<u>5.3 Conduite d'élevage et état sanitaire du troupeau</u>	74
<u>5.3.1 Généralités</u>	74
<u>5.3.2 Conséquence sur le TP</u>	74
<u>5.3.3 Conséquence sur le TB</u>	75
<u>5.3.4 Conséquences sur les autres constituants du lait</u>	75
<u>5.4 Exemple de bactéries ou de leurs produits pathogènes et leurs conséquences en technologie laitière</u>	77
<u>5.4.1 Spores butyriques et gonflements tardifs des fromages</u>	77
<u>5.4.2 La protéolyse et les problèmes de conservation</u>	78
<u>PARTIE 6 :</u>	79
<u>ACTION SUR LE LAIT POUR UNE MEILLEURE UTILISATION EN TECHNOLOGIE LAITIERE</u>	79

<u>6.1 Exigences des industriels laitiers et nouvelles technologies</u>	80
<u>6.2 Fractionnement et utilisation des composants du lait</u>	82
<u>6.2.1 Le fractionnement du lait : généralités (81, 83)</u>	82
<u>6.2.3 Utilisation du fractionnement des protéines en fromagerie</u>	83
<u>6.2.4 Le fractionnement de la matière grasse</u>	84
<u>6.3 l'amélioration génétique</u>	85
<u>6.3.1 Variabilité génétique inter-race</u>	85
<u>6.3.2 Amélioration génétique d'une race</u>	87
<u>CONCLUSION</u>	93
<u>TABLE DES ILLUSTRATIONS</u>	94
<u>TABLE DES FIGURES</u>	94
<u>TABLE DES TABLEAUX</u>	94
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	96

INTRODUCTION

Le lait est une matière première aux ressources considérables ; et face à la demande du consommateur qui sollicite de plus en plus de produits innovants à la qualité constante, l'industrie doit exploiter toutes les richesses de cette matière première à la fois si simple en apparence et si complexe dans sa composition.

Pour mieux faire faces aux contraintes naturelles du lait découlant de ses variations quantitatives et qualitatives, les technologues ont imaginé des solutions qui ont contribué à augmenter la diversité de la gamme des produits laitiers tout en répondant aux exigences économiques et hygiéniques.

L'industrie laitière a donc mis en place, au niveau de la production, une politique qualité qui, a permis, au cours des dernières années, d'acquérir une meilleure maîtrise des caractéristiques microbiologiques et physico-chimiques du lait.

Mais la difficulté réside dans la notion de qualité ; en effet, celle-ci reste très subjective et elle aura des définitions différentes à chaque niveau de la filière :

Pour le producteur, la qualité est une absence d'impuretés et une présence de taux de matière utile élevés ; l'industriel réclame une matière première au rendement de transformation élevé, tandis que le consommateur désire un produit sans risque pathogène aux qualités organoleptiques satisfaisantes.

L'industrie et la recherche dans le domaine laitier doivent donc faire face à toutes ces définitions afin de satisfaire tous les acteurs de la filière.

Nous aborderons ce thème, si vaste qu'est la composition physico-chimique du lait, à travers les différentes phases du lait afin de mettre en évidence l'importance de chacun des constituants de cette riche matière première.

Le lait est une suspension colloïdale complexe.

Certains constituants y sont à l'état de solution vraie dans l'eau du lait (Phase aqueuse), ce sont ceux dont la taille est la plus faible : ions minéraux, lactose, protéine soluble.

La phase colloïdale est composée de caséines structurées en agrégats, appelées micelles qui sont chargées et dispersées en suspension stable dans la phase aqueuse du lait.

Enfin la matière grasse composée essentiellement de triglycérides est dispersée à l'état de micro gouttes stabilisées, il s'agit de la phase d'émulsion.

Par ailleurs, on rencontre dans le lait des éléments figurés comme des fragments de cellules mammaires ou des cellules du sang, témoin de l'état physiologique de la mamelle.

Après une présentation générale du lait et de la politique actuellement en vigueur aussi bien au niveau économique, technologique qu'hygiénique et les exigences législatives, nous ferons une étude phase par phase du lait.

Chacune de ces parties traitera, après un rappel physico-chimique, des facteurs de variations de la composition du lait (facteurs intrinsèques et extrinsèques) et des technologies industrielles qui ont été développées pour mettre fin à une telle dépendance.

Enfin, nous terminerons, ce travail par un chapitre consacré aux innovations qui permettent d'améliorer et d'adapter les laits aux contraintes des producteurs, des transformateurs et des consommateurs.

PARTIE I :

**GENERALITES : LE LAIT, MATIERES PREMIERES
AUX MULTIPLES RESSOURCES**

1.1 La filière lait française maîtrise la qualité des produits laitiers (Jean Goursaud, 1999)

1.1.1 Par la performance de la zootechnie laitière

En France en 1998, environ 146 000 exploitations possédant 4. 476 000 vaches laitières (VL) traitées ont produit 23,99 milliards de litres de lait. Dans l'Union Européenne depuis 1984 le lait à commercialiser est sous quota attribué pour la partie française à 145 092 exploitations dont 9 366 vendeurs directs et 135 726 livrant en laiteries 22,29.10⁹ litres de lait collectés (92,9% de la production de VL) qui seront industrialisés. Ce volume place la France au 3^{ème} rang mondial des pays laitiers après les USA et l'Allemagne (environ 71 et 27 milliards de litres respectivement).

Plusieurs types de races de VL génétiquement sélectionnées fournissent le lait en France : Prim'holstein (noire et blanche) représentant plus de la moitié des VL puis Normande, Montbéliarde, ... Quelles que soient les races, le lait a toujours la même composition qualitative, seules quelques variations quantitatives sont observées principalement concernant les taux, qui en moyenne nationale de la collecte globale s'établissent à 42.44 g/l et 32.83 g/l de matières grasses et protéiques respectivement.

Il est aussi exploité des laits de chèvre (Ch) et de brebis (B) ce qui donne une collecte globale de 22,83.10⁹ litres (22,29 en VL ; 0,32 en Ch ; 0,22 en B). Ce volume est suffisant pour les besoins nationaux et les exportations ; il pourrait être augmenté si des débouchés nouveaux apparaissaient (données chiffrées d'après Landry et Maurisson, 1999) (60).

1.1.2 Par la fabrication de produits laitiers sains

Pour assurer un haut niveau de protection de la santé publique, aider le consommateur dans ses achats et permettre la loyauté des actions commerciales, les pouvoirs publics français dès 1905 avec la loi sur la répression des fraudes ont mis au point une ressource réglementaire laitière performante.

Dans l'Union Européenne désormais, le lait et les produits laitiers industriels et artisanaux destinés à l'alimentation humaine sont réglementés par la directive 92-46 traduite en droit français par des textes d'application très importants promulgués à partir de 1993. Ils doivent être sains (directive 92-46, art. 20, Journal Officiel des Communautés Européennes (JOCE du 14 septembre 1992)).

Mis à jour au fur et à mesure des besoins et des avancées techniques, sociales et commerciales, ces textes doivent être connus par tout professionnel de ce secteur dans le cadre de son métier. La lecture de l'ensemble apporte par ailleurs un accroissement considérable du potentiel de connaissance laitier, grâce à la collaboration fructueuse (figure 1.1) de l'administration et des professionnels de la filière. L'obligation de maîtrise de l'hygiène est assurée dès la production (VL indemnes de tuberculose et de brucellose, critères microbiologiques pour la collecte du lait cru : arrêté modifié du 18 mars 1994, Journal Officiel de la République Française (JORF) du 19 avril 1994), puis par les transformateurs laitiers par une maîtrise des risques et la pratique d'autocontrôles (arrêté modifié du 30 décembre 1993, JORF du 11 janvier 1994) ainsi que par le respect des critères microbiologiques applicables aux produits finis (arrêté modifié du 30 mars 1994, JORF du 21 avril 1994) et par les autres opérateurs par la mise en place d'une méthodologie HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point).

1.1.3 Par l'adaptation des produits aux besoins du consommateur

La satisfaction totale des clients, notamment par la maîtrise de la qualité sanitaire des produits laitiers destinés à la consommation est un impératif et une déontologie pour tous les acteurs de la filière lait. Ces derniers peuvent assurer un suivi réglementaire aisé pour une mise en application rigoureuse par la lecture, entre autres, d'ouvrages spécialisés régulièrement mis à jour comme celui de Cogitore (25) spécifique du domaine laitier et Lamy Dehove (59) consacré à tous les champs des industries agro-alimentaires.

Le consommateur peut donc en toute confiance acquérir parmi les gammes considérables de produits laitiers, ceux résultant d'un choix raisonné. Ils seront sains, à caractéristiques sensorielles multiples, adaptés à la nutrition spécifique de chacun et élaborés à partir d'une matière première de base aux propriétés exceptionnelles, le lait, aliment de la vie dont toutes les potentialités résultent de sa remarquable composition qu'il convient de présenter.

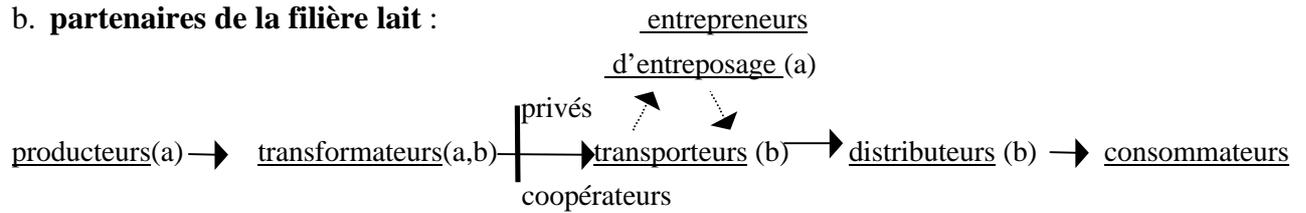
Figure 1.1

Maîtrise de l'hygiène et de la sécurité dans la filière lait : les acteurs et partenaires principaux

a. droit alimentaire :

réglementation européenne laitière (D-92/46 (1)) et alimentaire (D-93/43 (2))

b. partenaires de la filière lait :



c. organismes interprofessionnels laitiers de conseil, d'expertise et de gestion :

CNIEL : regroupement de tous les partenaires professionnels laitiers

(a) maîtrise des risques et autocontrôles - (b) méthodologie HACCP

sigles :

ONILAIT : Office national interprofessionnel du lait et des produits laitiers

AFSSA : Agence française de sécurité sanitaire des aliments

DSV : Direction des services vétérinaires

DGCCRF : Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

CNIEL : Centre Nationale Interprofessionnel de l'Economie Laitière

(Goursaud, 2000)

1.2 Le lait, présentation générale

1.2.1 Aspect, définition légale

Le lait est un liquide sécrété par les glandes mammaires des femelles après la naissance du jeune.

Il s'agit d'un fluide aqueux opaque, blanc, légèrement bleuté, d'une saveur douceâtre et d'un pH (6.6 à 6.8) légèrement acide, proche de la neutralité (2).

Le lait, proche du plasma sanguin, est un sérum comportant une émulsion de matière grasse, une suspension de matière protéique caséuse, du lactose, des sels et minéraux, des protéines solubles et des traces d'éléments divers.

Les principaux constituants du lait sont donc par ordre décroissant:

- de l'eau très majoritairement ;
- des glucides principalement représentés par le lactose ;
- des lipides essentiellement des triglycérides rassemblés en globules gras ;
- des protéines : caséines rassemblées en micelles, albumines et globulines solubles ;
- des sels et minéraux à l'état ionique et moléculaire ;
- des éléments à l'état de traces mais au rôle biologique important : enzymes, vitamines, oligo-éléments ...

Le lait a été défini en 1908 au cours du Congrès International de la Répression des Fraudes à Genève comme étant :

« Le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée. Le lait doit être recueilli proprement et ne doit pas contenir de colostrum. »

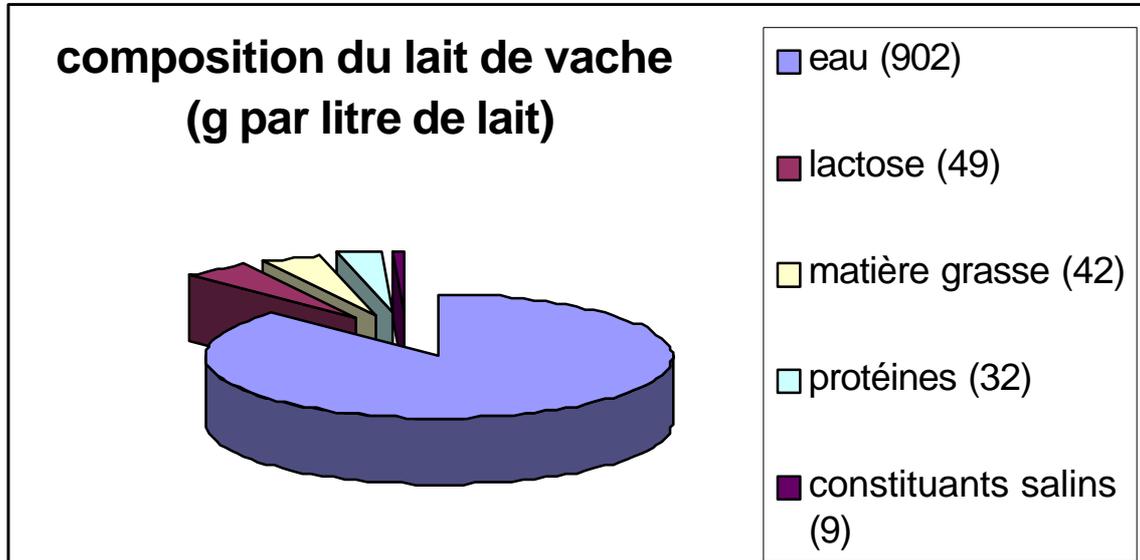
Le lait est ainsi le seul aliment des nouveaux-nés mammaliens et il y a autant de laits différents qu'il existe de mammifères au monde.

1.2.2 Composition moyenne du lait

La composition moyenne du lait de vache est représentée par la figure 1.2, Elle fait apparaître les grandes catégories de constituants du lait : eau, lactose, matière grasse,

protéines et les constituants salins mais ne nous révèle pas la multitude de ses substances et la complexité de sa composition.

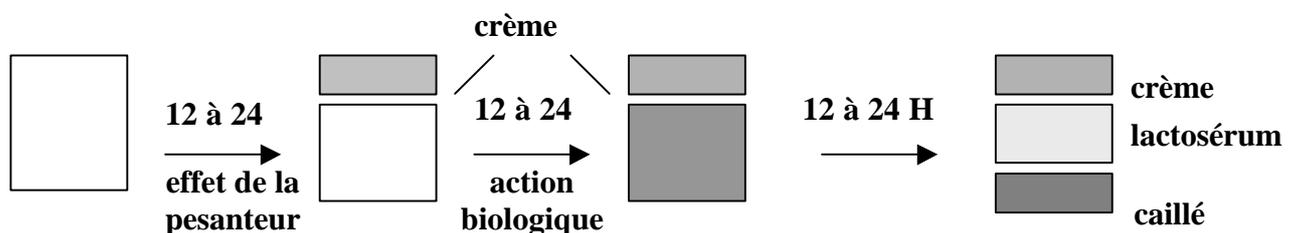
Figure 1.2
Composition moyenne du lait de vache

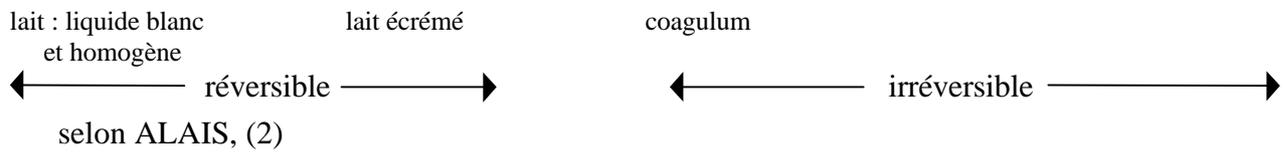


1.2.3 Les différentes phases de l'évolution naturelle du lait

Le lait est un mélange hétérogène ; si on le laisse un certain temps à température ambiante (figure 1.3), le lait évolue : ceci permet de mettre en évidence différentes phases de son évolution.

Figure 1.3
Evolution du lait cru abandonné vers 20°C
Répartition en trois compartiments





Le lait est donc un milieu hétérogène dans lequel trois phases distinctes coexistent :

- la phase aqueuse qui contient l'eau (87% du lait) et les produits solubles pouvant donner naissance au lactosérum (lactose, sels, protéines solubles, composés azotés non protéiques, biocatalyseurs tels que vitamines hydrosolubles ou enzymes) ;
- la suspension colloïdale micellaire (2,6%) qui peut donner naissance au caillé obtenu par la coagulation des caséines suite à l'action de micro-organismes ou d'enzymes ;
- l'émulsion (4,2%) qui peut donner naissance à la crème, une couche de globules gras rassemblés à la surface du lait par effet de gravité.

Il apparaît donc que l'eau est l'élément le plus important; elle joue le rôle de dispersant des différents constituants du lait qui forment en son sein des secteurs différents par leur composition et leur dimension.

La figure 1.3 montre que les constituants du lait se répartissent dans trois compartiments de base, mais ne révèle pas la finesse et la complexité de la composition du lait. Celle-ci est décrite dans le tableau 1.1 qui présente précisément le contenu des trois secteurs du lait (phases : aqueuse vraie, colloïdale, émulsion). On doit aussi y ajouter la suspension microbienne et cellulaire, puisque dans les conditions techniques réglementairement reconnues de production du lait à la ferme, la présence de ces micro-organismes typiques et de cellules somatiques est probable.

1.3 Le lait, matière première de l'industrie laitière

L'industrie laitière occupe une place importante et particulière dans l'Agroalimentaire.

D'une part parce que l'industrie laitière se caractérise par la transformation d'une unique matière première et non pas par l'assemblage de matières premières diverses et d'autre part parce qu'elle produit une multitude de fabrications et de produits différents.

Les contacts avec les fournisseurs de lait sont quotidiens et la notion de qualité du lait est devenue primordiale puisqu'elle définit la qualité du produit fini et donc la satisfaction du consommateur.

Le transformateur doit donc répondre à trois critères : en premier lieu assurer la santé du consommateur et la satisfaction de ses attentes, puis respecter la réglementation en vigueur et enfin respecter le cahier des charges de ses clients (les distributeurs notamment), et pour cela trois domaines doivent être pris en compte :

- **la composition en matière utile** : matière grasse et matière protéique sont les deux composants les plus étudiés en terme de gestion et de revenus pour le producteur, d'orientation pour la recherche, la génétique et l'alimentation animale.

- **La qualité microbiologique et hygiénique du lait** : cette qualité est évidemment importante en terme de santé du consommateur et de respect de la réglementation mais également pour les contraintes technologiques dont les besoins sont différents en fonction du produit final désiré : le fabricant de lait de consommation recherche un lait biologiquement stable alors que le fromager a besoin d'enzymes qui interviennent pendant l'affinage.

- **Les contaminants chimiques** : de la même façon, le lait peut être contaminé par des inhibiteurs, des résidus de médicaments ou de pesticides, des métaux lourds... qui peuvent être néfastes aussi bien au niveau des consommateurs qu'au niveau des technologies.

(39)

A une matière première correspond un grand nombre de transformations et de produits finis, nous pouvons donc nous interroger sur la nécessité d'envisager la production d'autant de lait matière première qu'il y a de transformation aujourd'hui ou doit-on trouver un seul lait apte à toute transformation ?

L'industrie laitière est soumise à de nombreuses contraintes, les ateliers deviennent de plus en plus grand et il n'existe plus de correspondance entre zones de collecte et atelier de fabrication. La sélection des laits pour un atelier, même si elle existe à petite échelle, devient donc vite une contrainte.

Nous arrivons alors à une politique d'un lait apte à toute transformation avec, aujourd'hui, une stabilisation du taux butyrique et un taux protéique aussi régulier que possible (55).

mais cette recherche d'un taux un peu plus élevé ne devrait pas se faire au détriment du rapport caséines / protéines.

Nous pouvons dire, qu'aujourd'hui, ce sont les transformateurs, par l'intermédiaire de cahiers des charges, qui orientent la production et les recherches en matière de composition du lait.

Tableau 1.1

Phases, subdivisions et dimensions des constituants du lait à la traite

1 - EAU	87%	
2 - MATIERE SECHE TOTALE	13%	
2.1 constituants dissous de la phase aqueuse vraie		
<ul style="list-style-type: none"> • solution de molécules et ions < 1 nm 	glucidique 4,8 saline 0,8	lactose (4.8) ; oligosaccharides (0.1) sels organiques (citrate,...), minéraux (phosphates) K, Ca, Cl, P, Na, Mg, CO ₂ et colloïdaux dans les micelles de caséines oligoéléments, Zn, Cu, Fe,...
<ul style="list-style-type: none"> • protéines solubles < 10 nm • composés azotés • biocatalyseurs 	0,6 0,03 traces	β-LG, α-LA, SA, IgG , protéoses peptones protéines diverses (lactoferrine 0,2g/l ...) urée, AAL, créatine, acide orotique, ... vit B, (B2), ... enzymes (lactoperoxydase 0,03 g/l), ...
2.2 constituants en phase colloïdale		
<ul style="list-style-type: none"> • suspension de micelles de caséinophosphates de calcium - caséines seules - 50 nm < 10¹⁵ micelles/ml < 150 nm 	2,6	partie organique : αs-CN, β-CN, κ-CN et partie minérale ((PO ₄) ₂ Ca ₃ , Ca, Mg ...)
2.3 constituants en phase émulsion		
<ul style="list-style-type: none"> • émulsion de globules gras (GG) 3000nm < 10¹⁰ GG/ml < 5000nm - lipides totaux (partie centrale et lipides de la membrane dont phospholipides et cholestérol) - membrane du globule gras - composés liposolubles 	4,2	Tri-; 1-2di- et mono-glycérides (95,80; 2,25 et 0,08%) phospholipides, cholesté(rol)rides (1,11 ; 0,46 et 0,02%), AG libres (0,28%) 2 à 6% du globule, 50% lipidique, 50% protéique (dont xanthine-oxydase et butyrophiline : 0,4 g/l) vit A, D, E, K, β-carotène, ...
2.4 suspensions cellulaires et microbiennes		
<ul style="list-style-type: none"> • suspension cellulaire 8000nm < 10⁵ cel/ml < 40000nm • suspension microbienne 2000nm < 10⁴ bact/ml < 6000nm 		leucocytes, lymphocytes, cellules épithéliales bactéries lactiques et microorganismes

1.4 Le lait, matière première à la composition variable : aspect général

Le lait qui arrive à l'usine constitue une matière première dont la composition n'est pas fixe, ce caractère rend donc l'utilisation de cette matière première assez difficile, diminue les rendements et modifie les caractères organoleptiques des produits (102).

Deux grands types de variation existent, au stade de l'animal et au stade du traitement du lait.

1.4.1 Variations au stade de l'animal

La composition chimique du lait et ses caractéristiques technologiques varient sous l'effet d'un grand nombre de facteurs.

Ces principaux facteurs de variation sont bien connus, ils sont liés soit à l'animal (facteurs génétiques, stade de lactation, état sanitaire ...) soit au milieu et à la conduite d'élevage (saison, climat, alimentation). Cependant, si les effets propres de ces facteurs ont été largement étudiés, leurs répercussions pratiques sont parfois plus difficiles à interpréter compte tenu de leurs interrelations.

Pour certains facteurs, comme le stade physiologique et la saison, l'éleveur n'a aucun moyen d'action, il est donc nécessaire d'en connaître les influences car elles peuvent expliquer certaines variations de la composition non seulement au niveau de l'individu, mais aussi au niveau des laits de mélange.

Contrairement à ces derniers, la maîtrise de certains facteurs tels que les facteurs génétiques et l'alimentation est très intéressante puisqu'elle peut permettre à l'éleveur d'agir sur la composition du lait et améliorer ses caractéristiques.

Les facteurs génétiques et alimentaires restent donc les principaux leviers d'action : mais si la sélection génétique a un effet à moyen et long terme, l'alimentation, elle, peut agir rapidement.

En pratique et à petite échelle, on constate que les variations des taux d'une exploitation à l'autre sont principalement attribuables à des facteurs du milieu (alimentation, traite). Et que les différences génétiques entre troupeaux voisins sont en général faibles, car les éleveurs choisissent souvent les mêmes caractéristiques de production (29).

1.4.2 Variations au stade du traitement du lait

Dès la traite et jusqu'à son utilisation en industrie, le lait subit de nombreuses manipulations, au cours de son transport, de sa conservation, de son stockage et de son traitement de préparation.

L'industriel joue, encore, dans ce cas, un rôle important, puisque pour satisfaire certaines exigences réglementaires et hygiéniques, il manipule sa matière première, pour ensuite la réadapter pour les besoins de la transformation.

On constate, donc, un antagonisme, entre exigences réglementaires et exigences industrielles.

L'industrie utilise de nouvelles technologies pour pallier à cette variation naturelle du lait et pour exploiter toutes les ressources, tous les constituants que révèle cette matière première.

Nous verrons au cours du chapitre 6, comment les nouvelles technologies permettent de tirer le meilleur de cette source.

PARTIE 2 :

LES CONSTITUANTS DE LA PHASE AQUEUSE

La phase aqueuse est formée de l'ensemble des substances dissoutes dans l'eau, ses substances se caractérisent par leur poids moléculaire et leur taille faibles.

En fromagerie, cette phase aqueuse est obtenue par la séparation de la caséine par la coagulation acide ou enzymatique.

Les caractéristiques du lactosérum sont les valeurs les plus constantes parmi toutes celles qui concernent le lait. (2)

2.1 Solution de molécules et ions < 1nm

2.1.1 Le lactose et autres glucides du lait

2.1 1.1 Les glucides du lait : généralités

Les glucides sont essentiellement représentés dans le lait par le lactose (la proportion des autres glucides étant toujours très faible).

Cependant, le lait contient deux types de glucides (101):

- les glucides libres et dialysables (= les oligoholosides) ;
- les glucides combinés en glycoprotéines et non dialysables.

On distingue selon un classement basé sur leur polarité électrique :

- les glucides neutres : lactose, glucose, galactose ;
- les glucides azotés : glucosamine N-acétylée et galactosamine N-acétylée ;
- les glucides acides toujours liés aux glucides neutres ou azotés : acide sialique.

La teneur en glucides variable au cours de la lactation est différente selon l'espèce prise en compte : par exemple, le lait humain contient beaucoup plus de glucides autres que le lactose par rapport au lait de vache (tableau 2.1).

Tableau 2.1
Composition glucidique du lait et du colostrum
(77)

Glucides (g/l)	Lait humain		Lait de vache	
	Colostrum	lait	colostrum	lait
Lactose	32	62	28	50
Polyoside libre	23	12	2,5	1
Glucides combinés	9	1	2,7	0,26

D'après Montreuil

2.1.1.2 Le lactose

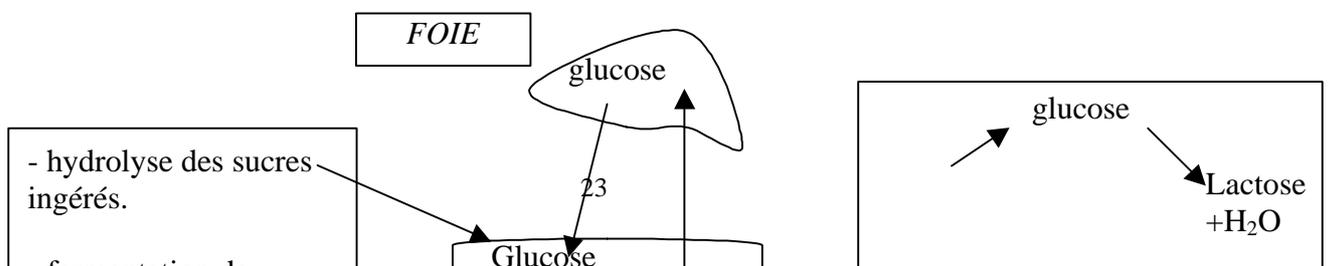
C'est le composant majeur le plus simple et le plus constant du lait. C'est un sucre extrêmement rare en dehors de sa présence dans le lait.

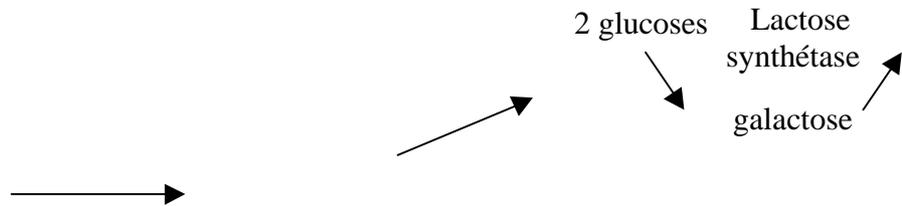
- **Structure physique**

Le lactose est un disaccharide ($C_{12}H_{22}O_{11}$) réducteur spécifique du lait puisque sa synthèse se déroule dans la glande mammaire par fixation par liaison 1-4 d'un bêta galactose sur un glucose.

Sa synthèse (figure 2.1) s'effectue dans les acini à partir du glucose sanguin produit essentiellement dans le foie.

Figure 2.1 :
Synthèse du lactose

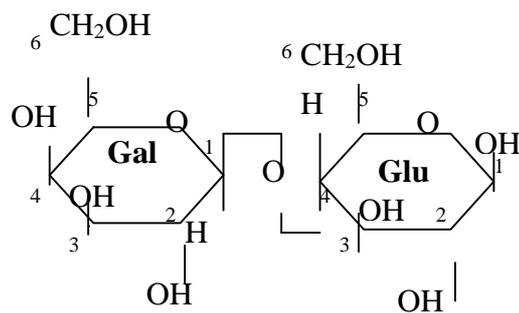




Il est dit alpha (α) ou bêta (β) selon la position du groupement $-OH$ porté par le carbone 1 du résidu glucose. Il se crée un équilibre entre ces 2 formes et on considère que dans une solution de lactose à $15^\circ C$, le mélange se compose de 38% de lactose α et de 62% de lactose β (figure 2.2).

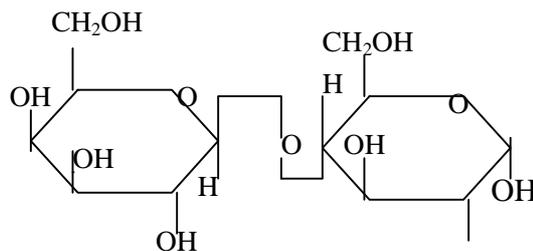
Figure 2.2 : Structure du lactose

Lactose β :



β D Galactosido 1-4 β D Glucose

Lactose α :



OH

- **Propriétés physico-chimiques du lactose**

Le lactose est le constituant du lait, le plus rapidement attaqué par action microbienne, les bactéries transforment le lactose en acide lactique, cette transformation parfois gênante est souvent utilisée en industrie laitière et notamment pour l'obtention des laits fermentés et yaourt (2).

- Constantes physiques du lactose (tableau 2.2)

Le lactose peut se présenter sous forme α ou β selon la configuration stéréochimique du carbone 1 réducteur du glucose. Les 2 anomères présentent des caractéristiques différentes :

Tableau 2.2
Constantes physiques du lactose (78)

Constantes	L α	L β	L $\alpha + \beta$
Pouvoir rotatoire α^{25}_D	+ 89,4°rd	+ 35° rd	+ 55°rd
Point de fusion	221°C	235°C	203
Masse molaire (g/mol)	342	342	
Solubilité initiale à 15°C (g/100g eau)	7	50	17

(d'après Morrissey, 1985)

Quelques remarques sur la solubilité :

- la forme β plus soluble prédomine jusqu'à 93°C mais au-delà de cette température, la forme β perd sa solubilité.

- à 15°C, la solubilité initiale est assez faible (10 fois plus faible qu'un sucre ordinaire) mais elle s'élève après une agitation prolongée (de 7.3 à 17 g / 100g d'eau).

- la solubilité augmente avec la température (à 25°C, elle est de 22g / 100g d'eau).

- Goût sucré

Le lactose a un goût sucré faible : son pouvoir sucrant est 6 fois + faible que le sucre ordinaire. Par exemple, si on considère le pouvoir sucrant du saccharose égal à 100, celui du fructose est de 170, celui du glucose de 75 et celui du lactose de 17 (78).

- L'hydrolyse du lactose (78)

Cette action est assez difficile car le lactose est stable vis à vis des agents chimiques. Il est donc nécessaire d'utiliser soit :

- ♦ un acide à haute température :



L'hydrolyse acide est un procédé industriel fortement concurrencé par le procédé enzymatique.

- ♦ soit la voie enzymatique par action d'une lactase (ou β -galactosidase).

On utilise cette technique dans différentes opérations industrielles conduisant à des produits à lactose hydrolysé contenant du galactose et du glucose.

➤ Propriétés réductrices

Le lactose est un sucre réducteur du fait de la présence d'un groupe aldéhyde libre (contrairement au saccharose).

Il en résulte une méthode de dosage couramment employée à la liqueur cuprique alcaline de Fehling (Norme NF V₀₄₋₂₁₃ de janvier 1971).

Mais aujourd'hui la méthode de dosage par la liqueur de Fehling devient obsolète et on lui préfère des méthodes telles que l'HPLC (chromatographie liquide à haute pression) ou par spectrophotométrie IR utilisées dans l'industrie.

➤ Réaction avec des substances azotées

Les sucres par leurs fonctions aldéhydes libres réagissent avec diverses substances azotées (ayant une fonction amine) pour former des composés condensés, réducteurs et pigmentés en brun : l'ensemble de ces réactions complexes est nommé réactions de Maillard.

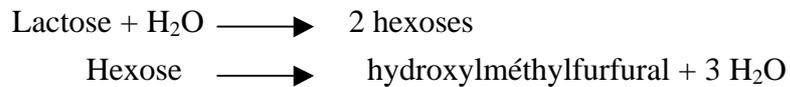
Ces réactions entraînent pour les protéines concernées du lait une dévalorisation de la valeur biologique des protéines, une coloration brune et un goût caramel.

Pour limiter ces réactions, il faut employer des températures aussi basses que possible, maintenir les produits déshydratés dans une atmosphère sèche, employer du matériel sans fer ni cuivre qui catalyserait la réaction ou utiliser une technologie adaptée en stérilisation à l'autoclave par exemple.

➤ La dégradation du lactose par la chaleur

Comme tous les autres sucres, l'action de la chaleur sur le lactose conduit à la formation d'un caramel vers 175°C ; cependant dans le lait chauffé le brunissement apparaît dès 120°C avec un goût de cuit différent de celui du caramel.

A la chaleur, la transformation du lactose aboutit à la formation d'un acide organique :



L'hydroxyméthylfurfural est un corps labile qui tend à se décomposer en acides lévulique et formique.

Par ailleurs le chauffage du lait entraîne une certaine transformation du lactose en lactulose (par isomérisation du résidu glucose en fructose), ce qui est un traceur de mise en évidence de l'intensité du traitement thermique appliqué.

- **Transformation biologique du lactose**

- Métabolisme : l'hydrolyse enzymatique

Le métabolisme du lactose débute dans le jéjunum par l'action de la β galactosidase intestinale qui libère lentement le glucose et le galactose au sein de l'organisme.

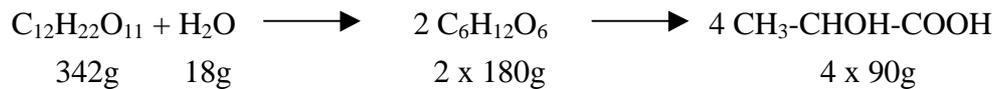
Les sujets déficients en cette enzyme ne peuvent digérer le lactose qui, non hydrolysé, ne passe pas la barrière intestinale ; une telle déficience se manifeste cliniquement par une diarrhée généralement transitoire.

Galactose et glucose sont ensuite employés dans les cycles biologiques du métabolisme après phosphorylation.

Ce type d'hydrolyse est employé en industrie : on utilise des lactases de levures (*Kluyveromyces fragilis* ou *lactis*) ou des lactases fongiques (*Aspergillus niger* ou *orizae*).

- La fermentation lactique

Quelques bactéries adaptées au métabolisme du lactose (car possédant une β -galactosidase) réalisent cette fermentation qui donne comme métabolite final essentiellement de l'acide lactique:



Ces bactéries lactiques (lactobacille et streptocoque) sont utilisées en industrie pour l'obtention de laits fermentés ou de fromages frais (par baisse du pH lors de l'acidification lactique) ou encore pour la fabrication de fromages affinés.

Cependant la réaction est plus complexe qu'il n'y paraît, il s'agit d'une succession de 10 étapes dont les neuf premières sont communes à différentes fermentations.

2.1.1.3 Importance en technologie laitière et conséquences des variations

Le lactose est le substrat essentiel des ferments lactiques. Sa teneur initiale peut conditionner le déroulement de la fermentation lactique : une teneur trop élevée peut être responsable de post-acidification préjudiciable pour la qualité du fromage. Une réduction de sa teneur peut limiter le déroulement de la fermentation et réduire en conséquence la baisse du pH, ce qui aura des effets sur la texture et le déroulement de l'affinage.

En industrie, l'utilisation du lactose est multiple : support d'arômes, diluant ou excipient en industrie pharmaceutique, en diététique en tant que charge glucidique à faible caractère sucré, substrat de culture pour les ferments de maturation en charcuterie.

L'industrie de l'alimentation du bétail utilise du lactose hydrolysé sous forme d'un aliment liquide complémentaire pour veaux de boucherie.

2.1.2 Sels organiques et minéraux, oligo-éléments

2.1.2.1 Les différents composants

La matière minérale et saline du lait, d'environ 9 g/l, répartis de manière complexe est fondamentale d'un point de vue nutritionnel et technologique. En effet, le lait contient tous les éléments minéraux indispensables à l'organisme et notamment, le calcium et le phosphore (15).

Les matières minérales ne se sont pas exclusivement sous la forme de sels solubles (molécules et ions) ; une partie importante se trouve dans la phase colloïdale insoluble (micelles de caséines) (46,79).

Il est possible de doser les matières minérales ou cendres du lait (mais cela ne rend absolument pas compte de ce que sont réellement les sels du lait) par une méthode de calcination à 550°C (Norme NF V 04-208). On constate que la composition minérale est variable selon les espèces, les races (la teneur en calcium et en phosphore est plus élevée chez la normande que chez la frisonne ou la prim'holstein), le moment de la lactation et les facteurs zootechniques (15).

Les principaux macro-éléments rencontrés dans le lait sont, le calcium, le phosphore, le magnésium, le potassium, le sodium et le chlore (79).

Ces éléments se répartissent différemment entre la phase colloïdale et la phase soluble du lait : les alcalins (Na et K) et les chlorures sont présents en totalité dans la phase soluble tandis que les alcalino-terreux (Ca et Mg) sont distribués entre les deux phases. L'affinité relative des constituants protéiques et non protéiques est responsable de la répartition des éléments minéraux entre les phases colloïdales et solubles du lait.

Le lait contient également les oligo-éléments indispensables pour l'organisme humain tels que le zinc, le fer, le cuivre, le fluor, l'iode et le molybdène.

2.1.2.2 Influence des paramètres physico-chimiques sur les équilibres minéraux (15)

- **La température et le pH**

L'abaissement de la température entraîne une solubilisation partielle du calcium micellaire et inversement, son augmentation entraîne une diminution du calcium soluble qui passe dans la phase micellaire et s'insolubilise. La diminution du pH entraîne une augmentation du calcium ionique.

- **Addition de sels (46)**

L'ajout, par exemple, de chlorure de sodium favorise la solubilisation du calcium micellaire. Il est préféré en fromagerie pour faciliter la coagulation des laits traités thermiquement et donc l'augmentation du taux de calcium ionique, l'ajout de $\text{Cl}_2\text{Ca} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ qui apporte au lait pasteurisé de fromagerie des ions Ca^{2+} indispensables à sa coagulation enzymatique (41).

2.2 Protéines solubles <10nm et composés azotés

2.2.1 Les différents constituants azotés du lait et leur dosage

On distingue l'azote des protéines (AP), techniquement exploitable, de l'azote non protéique (ANP) qui n'a aucun effet technologique.

L'ANP représente 3 à 7% de l'azote total dont 36 à 80% d'urée, il est le résultat d'une altération du lait ou d'une dégradation des protéines.

Le dosage de l'azote dans le lait est obtenu par la méthode de Kjeldahl qui consiste en une minéralisation du lait par voie humide, suivie du dosage de l'azote total (AT = AP + ANP).

Pour ne doser que l'ANP, on réalise un filtrat, après précipitation des protéines du lait avec de l'acide trichloroacétique à 12% et on applique ensuite la méthode de Kjeldahl, pour apprécier la teneur en ANP.

Le taux protéique (TP) qui est une caractéristique essentielle de la valeur marchande du lait peut ainsi être calculé :

$$TP = (AT - ANP) \times 6,38$$

6,38 étant le facteur de transformation de la masse d'azote en g en protéines laitières (on considère que la teneur en azote dans une protéine est de 15,67% d'où $100/15,67 = 6,38$), (47).

2.2.2 Classification des protéines

On distingue 2 grands groupes de protéines : les protéines des caséines et les protéines du lactosérum (tableau 2.3).

Les caséines et la micelle de caséine seront étudiées au cours du chapitre 3 ; elles représentent la partie protéique la plus intéressante en technologie laitière et notamment fromagère.

Tableau 2.3
Classification des protéines (18)

NOMS	% des protéines	Nombre d'AA
CASEINES :	75-85	
Caséine α_{S1}	39-46	199
Caséine α_{S2}	8-11	207
Caséine β	25-35	209
Caséine κ	8-15	169
Caséine γ	3-7	
PROTEINES DU LACTOSERUM	15-22	
β -Lactoglobuline	7-12	162
α -Lactalbumine	2-5	123
Sérum-albumine	0.7-1.3	582
Immunoglobulines (G1, G2, A, M)	1.9-3.3	
Protéoses-peptones	2-4	

D'après Brunner

2.2.3 Les protéines du lactosérum

Elles représentent 15 à 28% des protéines du lait de vache et 17% des matières azotées.

Elles demeurent en solution dans le «sérum isoélectrique» obtenu à pH = 4,6 à 20°C ou dans le sérum présure exsudé par le coagulum formé lors de l'emprésurage.

On les distingue des caséines par leur composition, leur structure et diverses propriétés :

- leur teneur élevée en lysine, tryptophane, cystéine et autres acides aminés soufrés leur confère une très bonne valeur nutritionnelle ;

- la structure est plus compacte : ces protéines fixent peu les ions et résistent à l'action des protéases ;

- elles sont plus sensibles à la chaleur car dénaturées par chauffage (à 100°C) et forment des flocons, elles deviennent alors insolubles (sauf les protéoses-peptones).

Ces substances peuvent être classées en 3 groupes hétérogènes ou en 8 constituants électrophorétiques (tableau 2.4). (2)

Tableau 2.4
Les 3 groupes principaux des protéines du lactosérum (2)

Groupe	Constituants électrophorétiques	%	Mobilité	Propriétés
1-Globulines	euglobulines	13	-1.7	Propriétés immunologiques

	pseudoglobulines		- 2.4	
2-Protéoses-peptones		18,9		Issu de la protéolyse de la caséine β par la plasmine
	composant III	4.6	- 2.8	
	composant V	8.6	- 4.5	
	composant VIII	5.7	- 7.8	
3-Albumines		68,1		Synthèse du lactose Identique à la sérum albumine sanguine
	α -lactalbumine	19.7	- 3.6	
	β -lactoglobuline	43.7	- 4.9	
	sérumalbumine	4.7	- 6.5	

L'ensemble des propriétés et caractéristiques des protéines solubles est rassemblé dans le tableau 2.5 suivant :

2.2.4 Intérêt des protéines du lactosérum en industrie laitière

Les protéines du lactosérum sont récupérées, en industrie laitière, lors de la fabrication des fromages, le lactosérum étant la phase aqueuse qui se sépare du caillé.

La mise en valeur du lactosérum passe par la séparation de ses différents constituants ; les protéines sont extraites au troisième rang après l'eau et le lactose par ultrafiltration ou par adsorption sur échangeurs d'ions (96).

Ces protéines présentent un intérêt nutritionnel important par leur haute valeur énergétique et leur composition en acides aminés essentiels très riche (et notamment en lysine et tryptophane).

Elles ont également des propriétés fonctionnelles très intéressantes :

- pouvoir émulsifiant en présence de matière grasse,
- pouvoir gélifiant par coagulation à la chaleur,
- pouvoir moussant.

Tableau 2.5
Propriétés et caractéristiques des protéines solubles (à pH = 4.6 et à 20°C)
(68)

	β -LG (β -lactoglobuline)	α -LA (α -lactalbumine)	SA	Immuno- globulines	Protéoses- peptones
Nombre d'AA	162	123	582		28 à 107
Masse Molaire (g/mol)	18 363 (A)	14 175 (B)	66 267 (A)	146 000 à 1 000 000	< 15 000
Nombre de	5	8	35	?	-

résidus cystéines	(2) -S-S- ; 1-SH	(4) -S-S-	(17)-S-S- ; 1-SH		
pH	5,23 (A) 5,30 (B)	4,3	4,8	5,6 – 7,3	3,3 – 3,7
Origine	mammaire	mammaire	<u>sanguine</u>	(mammaire)* <u>sanguine</u>	β-CN
en g/l dans le lait	3,2	1,2	0,4	0,8	1,0

d'après Mathieu, 1997

2.3 Les biocatalyseurs : vitamines et enzymes

2.3.1 Les enzymes

Ce sont des substances organiques de nature protidique, produites par des cellules ou des organismes vivants, agissant comme catalyseurs dans les réactions biochimiques. Environ 60 enzymes principales ont été répertoriées dans le lait dont 20 sont des constituants natifs (11).

Une grande partie se retrouve dans la membrane des globules gras mais le lait contient de nombreuses cellules (leucocytes, bactéries) qui élaborent des enzymes : la distinction entre éléments natifs et éléments extérieurs n'est donc pas facile.

Ces enzymes peuvent jouer un rôle très important en fonction de leurs propriétés (42, 66):

- lyses des constituants originels du lait ayant des conséquences importantes sur le plan technologique et sur les qualités organoleptiques du lait (lipase, protéase) ;
- rôle antibactérien, elles apportent une protection au lait (lactoperoxydase et lysozyme) ;
- indicateurs de qualité hygiénique (certaines enzymes sont produites par des bactéries et des leucocytes), de traitement thermique (phosphatase alcaline, peroxydase, acétylestérase, sont des enzymes thermosensibles) et d'espèces (test de la xanthine-oxydase pour détecter le lait de vache dans le lait de chèvre).

2.3.2 Les vitamines et leur variation saisonnière

Les vitamines sont nécessaires au fonctionnement normal des processus vitaux, mais l'organisme humain est incapable de les synthétiser, il doit donc puiser ces sources dans l'alimentation.

Ce sont des molécules plutôt complexes mais de taille beaucoup plus faible que les protéines, de structures très variées ayant un rapport étroit avec les enzymes car elles jouent un rôle de coenzyme associée à une apoenzyme protéique (1).

On classe les vitamines en deux grandes catégories :

- les vitamines hydrosolubles (vitamines du groupe B et vitamine C) de la phase aqueuse du lait ;
- les vitamines liposolubles (vitamines A, D, E et K) associées à la matière grasse, certaines sont au centre du globule gras et d'autres à sa périphérie.

Dans le lait des ruminants, seules les vitamines liposolubles sont d'origine alimentaire et les conditions de vie de l'animal exercent une influence sur les teneurs vitaminiques du lait : les productions estivales offrent donc un plus grand intérêt que les laits de stabulation. Au contraire, la vitamine C offre un taux relativement constant en raison de sa synthèse régulière dans l'épithélium intestinal.

Le lait et ses dérivés sont des sources notables en vitamine A, B₁₂ et B₂ ; dans une moindre mesure en vitamine B₁, B₆ et PP ; par contre ils ne contiennent que peu de vitamines E, acide folique et biotine.

Le tableau 2.6 donne les différentes teneurs en vitamines que l'on trouve dans le lait. Il est à noter que d'une source à une autre, les valeurs peuvent être différentes, ce qui est, une conséquence de l'instabilité des vitamines à doser et des techniques analytiques utilisées.

Tableau 2.6
Composition vitaminique moyenne du lait cru.

Vitamines	teneur en µg/l (d'après Jensen, 1995)	teneur en µg/l (d'après Adrian, 1987)
B1, thiamine	388	400
B2, riboflavine	914	1700
B6, pyridoxine	554	600
B12, cobalamine	4	6
PP, niacine	1300	900
acide folique	60	2
acide pantothénique	3251	3200
biotine	47	40
C	30 000	20 000
A, rétinol		500
carotènes	310	30
D	0,4	1
E, tocophérols	400	1500
K	3	100

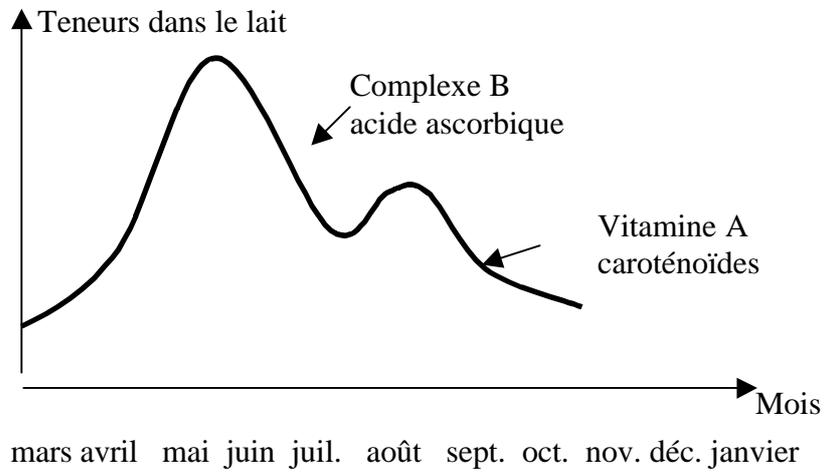
Un certain nombre d'études ont été effectuées sur différents troupeaux (en particulier une de Wolster,1997), celles-ci ont démontré que la teneur en vitamines dans le lait est sujette aux variations annuelles comme le montre la figure 2.3.

L'origine de ces variations annuelles est poly factorielle : elle dépend de la saison, de la photopériode mais également de l'alimentation (88).

Ainsi, nous constatons, qu'un lait de vache au pâturage est plus riche en vitamine qu'un lait de vache en stabulation (1).

Figure 2.3

Evolution annuelle des teneurs du lait en vitamines (Wolster, 1997)



PARTIE 3 :

**LES CONSTITUANTS DE LA PHASE COLLOIDALE :
LES MICELLES DE CASEINES**

La teneur du lait en protéines est une caractéristique essentielle de sa valeur marchande car plus le taux protéique est élevé, meilleur sera le rendement de la transformation technologique.

La matière protéique et les caséines en particulier prennent, ainsi, de plus en plus d'importance.

Nous verrons donc quelles sont les propriétés physico-chimiques de ces protéines, à quel type de transformation sont elles liées et comment la maîtrise des facteurs de variation peut permettre aux producteurs une meilleure valorisation du lait.

3.1 Description et composition physico-chimique de la micelle

3.1.1 Aspects et propriétés

La caséine est un complexe protéique phosphoré à caractère acide qui précipite dans le lait à pH 4,6. Il s'agit d'une substance hétérogène même si elle a été longtemps considérée comme une protéine pure et homogène en raison de la constance de sa composition élémentaire (20).

3.1.1.1. La micelle

Les caséines se présentent dans le lait sous forme d'un complexe organique et minéral (figure 3.1), la micelle.

Particule sphérique d'environ 180 nm constituée de submicelles de 8 à 20 nm (64), elle est très hydratée (2 à 4 g d'eau par g de protéine) et 7% environ de son extrait sec (tableau 3.1) est composé de sels (phosphate, calcium, magnésium, citrate dans l'espace inter sub-micellaire).

Les submicelles pourraient être constituées d'environ 10 molécules des 4 caséines en proportion variable avec une répartition de caséine κ (hydrophile) en surface ; les submicelles les plus riches en caséine κ sont situées en surface de la micelle, ce qui la stabilise. Les portions C-terminales de la caséine κ hérissent la micelle et l'enveloppent d'une chevelure périphérique particulièrement hydrophile (20).

Cependant, l'organisation exacte intramicellaire (très petites submicelles ou structure interne de caséines individuelles) n'est pas aujourd'hui précisément connue (Mc Mahon et Mc Manus, 1998).

La coagulation du lait après addition de présure résulte, entre autres phénomènes, d'une action primaire sur la caséine κ (protéolyse entre les acides aminés 105 (Phénylalanine) et 106 (Méthionine) situés à l'extérieur de la micelle) laissant des plages hydrophobes de para-caséine κ (les acides aminés 1 à 105 restant fixés à la micelle). Sous l'influence de calcium ionique Ca^{++} dissous, il y a agglomération des micelles dépourvues de caséino glycopeptide (cas κ 106-169 qui se solubilise) en un réseau : le caillé (17, 40)

Figure 3.1

Modèle schématique supposé d'une section de micelle de caséines

Tableau 3.1
Composition moyenne d'une micelle de caséine

	En g pour 100 g de caséine*	En g/l de lait**
CASEINES :	93,3	29,5 (donnée surévaluée)
α_{S1}	35,6	11,9

α_{S2}	9,9	3,1
β	33,6	9,8
κ	11,9	3,5
γ	2,3	1,2
CONSTITUANTS SALINS :	6,7	1,84 (estimation)
Phosphate	2,9	0,89
Ca	2,9	0,79
Citrate	0,4	0,12
Mg	0,1	0,04
Autres (minéraux, sucres)	0,4	

Teneur en eau = 63% ; matières sèches : 37%

d'après Mc Mahon et Brown, (1984)* et Swaisgood, (1995)**

3.1.1.2 Propriétés des caséines

- **pHi et charge électrique**

Les groupements acides libres des résidus glutamyle, aspartyle et phosphoryle en nombre supérieur aux groupements basiques libres $-NH_2$ des lysines et autres acides aminés diaminés, confèrent à la caséine entière un pHi de 4.65, une charge négative et des propriétés acides (réaction avec les métaux alcalino-terreux).

- **Propriétés associatives des caséines**

A pH = 7, lorsqu'on élève la température, les caséines β et κ donnent des polymères d'une vingtaine à une trentaine d'unités, les différentes molécules étant unies par des liaisons hydrophobes. De plus, les polymères $\kappa + \alpha_{S2}$ résultent de liaisons disulfures S-S intermoléculaires.

Le Ca^{2+} complexe les molécules α_{S1} , α_{S2} , β et diminue ainsi leur charge, leur hydrophilie et les insolubilise (85).

3.1.2 Les caséines aS

3.1.2.1 La caséine α_{S1}

C'est la protéine la plus importante en masse, elle possède 199 AA pour 23 614 g/mol.

Cette caséine est très sensible au calcium au pH normal du lait (=6,7) : quelle que soit la température et en présence de calcium, on constate une formation de flocons.

Dans la micelle, la caséine α_{S1} est peu accessible à la plasmine ; il est donc probable qu'elle se situe au cœur de la micelle masquée par d'autres caséines.

3.1.2.2 La caséine α_{S2}

Elle représente 8 à 11% de la micelle de caséine, possède 207 AA et 13 à 10 phosphates (il s'agit de α_{S2} ou α_{S3} ou α_{S4} ou α_{S6} selon le nombre de phosphates) et son poids moléculaire estimé varie de 25150 à 25390 g/mol. Grâce à la présence des 2 résidus cystéine, les molécules peuvent s'associer en dimères qui s'agrègent entre eux par interactions électrostatiques pour former des polymères (α_{S5} dimère de α_{S3} et α_{S4}).

Par sa richesse en phosphate, elle est très sensible au calcium, et comme pour α_{S1} , la caséine α_{S2} semble ne pas être en surface de la micelle.

3.1.3 Les caséines **b** et γ

3.1.3.1 La caséine β

Représentant 25 à 35% de la micelle, avec ses 209 acides aminés et ses 5 groupements phosphates, elle possède beaucoup d'analogie avec la caséine α_{S1} .

Elle est sensible au calcium à température ambiante mais après déphosphorylation (expérience de laboratoire), la molécule perd cette sensibilité et devient capable d'empêcher la précipitation de la caséine α_{S1} par le calcium.

Elle est sensible au froid et très hydrophobe (ces zones hydrophobes sont à l'origine de l'association des caséines β entre elles pour former des « néomicelles »).

3.1.3.2 La caséine γ

Il s'agit des fragments C-terminaux résultant de la protéolyse de la caséine β par la plasmine (protéase alcaline du lait).

3.1.4 La caséine **k**

Une grande majorité de cette caséine se trouve à la surface de la micelle, accessible à la présure.

Il s'agit d'une protéine de 169 acides aminées, phosphorylée (Serine 149) comportant 2 variants génétiques A et B. Elle comporte un constituant majeur non glycosylé (figure 3.1) et des constituants mineurs glycosylés dont la structure précise est élucidée (34).

Cette caséine est insensible au calcium et stabilise les autres caséines phosphorylées vis à vis de ce cation. La coagulation du lait se fait suite à la protéolyse de cette caséine par la présure (ou chymosine : enzyme naturelle de la caillette du jeune bovin pré-ruminant) qui scinde la molécule en deux parties : la partie N-terminale ou paracaséine κ (1-105) et le fragment C-terminal ou caséinomacropéptide (CMP : 106-169) aux propriétés très contrastées :

Dans le caillé, seules sont récupérées les caséines α_{S1} , α_{S2} , β et paracaséine κ tandis que le CMP se retrouve dans le lactosérum.

Il est à noter que le CMP contient tous les glucides, quand ils existent, sur les Thréonine 131, 133, 135 et 136 (variant A uniquement).

Figure 3.1

Structure primaire de la caséine κ -CN B-1P (34)

(masse moléculaire : 19 007 Da)

PyroGlu-Glu-Gln-Asn-Gln-Glu-Gln-Pro-Ile-Arg(10)-Cys-Glu-Lys-Asp-Glu-Arg-Phe-Phe-Ser-Asp(20)
 Lys-Ile-Ala-Lys-Tyr-Ile-Pro-Ile-Gln-Tyr(30)-Val-Leu-Ser-Arg-Tyr-Pro-Ser-Tyr-Gly-Leu (40)-
 Asn-Tyr-Tyr-Gln-Gln-Lys-Pro-Val-Ala-Leu (50)-Ile-Asn-Asn-Gln-Phe-Leu-Pro-Tyr-Pro-Tyr (60)-
 Tyr-Ala-Lys-Pro-Ala-Ala-Val-Arg-Ser-Pro (70)-Ala-Gln-Ile-Leu-Gln-Trp-Gln-Val-Leu-Ser (80)-
 Asp-Thr-Val-Pro-Ala-Lys-Ser-Cys-Gln-Ala (90)-Gln-Pro-Thr-Thr-Met-Ala-Arg-His-Pro-His (100)-
 Pro-His-Leu-Ser-Phe-Met-Ala-Ile-Pro-Pro (110)-Lys-Lys-Asn-Gln-Asp-Lys-Thr-Glu-Ile-Pro (120)-
 Thr-Ile-Asn-Thr-Ile-Ala-Ser-Gly-Glu-Pro (130)-Thr-Ser-Thr-Pro-Thr-Ile*-Glu-Ala-Val-Glu (140)-
 Ser-Thr-Val-Ala-Thr-Leu-Glu-Ala*-Ser-Pro (150)-Glu-Val-Ile-Glu-Ser-Pro-Pro-Glu-Ile-Asn (160)-
 Thr-Val-Gln-Val-Thr-Ser-Thr-Ala-Val-OH (169)

protéolyse
 avec 1.....Phe (105) \downarrow Met (106)-.....169 (Action de la chymosine)

3.2 Le fromage : matière protéique et rendement fromager

Les matières protéiques de la phase colloïdale du lait constituent l'élément principal du caillé, et donc de la formation du fromage, elles interviennent dans les phases de coagulation et d'égouttage et sont modifiées au cours de l'affinage.

3.2.1 Paramètres de l'aptitude du lait à la coagulation

La valeur fromagère du lait est une partie complexe qui repose sur deux entités différentes : l'aptitude du lait à être transformé en fromage et celle à donner un produit fini aux caractères organoleptiques recherchés. C'est la première notion, basée sur les qualités physico-chimiques de la matière première qui nous intéresse dans cette étude (86).

La fabrication fromagère se déroule en trois étapes principales : la coagulation du lait par la présure, l'égouttage du gel obtenu et l'affinage (ou la maturation enzymatique du caillé) qui donnera les qualités organoleptiques du fromage. (86)

Un lait présente une bonne aptitude à la coagulation lorsqu'il coagule rapidement, qu'il forme un gel ferme s'égouttant facilement pour donner un caillé de texture et de bonne composition, capable de se transformer après affinage en un fromage de qualité .

Les laits présentent, face à la présure, des comportements différents. Ces différences sont essentiellement liées aux caractéristiques originelles du lait mais aussi aux traitements subis par celui-ci avant sa mise en fabrication (65).

3.2.2 Facteurs inhérents au lait qui règlent son aptitude à la coagulation

Les critères de contrôle pour mesurer l'aptitude d'un lait à coaguler sont :

- le temps de floculation (temps écoulé depuis l'emprésurage jusqu'à l'apparition des premiers flocons),
- la vitesse de raffermissement du gel et sa fermeté maximale,
- la vitesse et l'importance de la synérèse (phénomène de rétraction du réseau protéique avec expulsion du sérum) (65).

Ces paramètres sont principalement influencés par quatre caractéristiques propres au lait qui sont la teneur en caséines, la concentration en calcium et en phosphate de calcium, le pH, la dimension des micelles. Interviennent, également, de façon significative, d'autres facteurs, tels que les proportions relatives des différentes caséines dans les micelles, et la nature des variants génétiques de celles-ci.

3.2.2.1 La teneur en caséines

Ce paramètre constitue un élément déterminant pour la fermeté du gel alors que son incidence est limitée sur le temps de floculation (86,71).

Cette influence s'explique par la structure du gel composée d'un réseau tridimensionnel de micelles de paracaséines emprisonnant les autres constituants du lait (86).

C'est ainsi que l'accroissement de la concentration en protéines par ultrafiltration ou par addition de poudre de lait se traduit par un accroissement marqué de la fermeté maximale du gel (4), et par une diminution de la quantité de lactosérum libérée.

3.2.2.2 Concentration en calcium et en phosphate de calcium

L'influence du taux de calcium se manifeste sur le temps de floculation et la fermeté du gel. Le calcium est indispensable à la floculation des micelles : un lait pauvre en calcium coagule difficilement et conduit à un gel mou qui se tient mal. Certains auteurs ont montré que l'influence du rapport Ca/azote sur le temps de floculation était très marquée.

L'aptitude à la coagulation dépend également de la teneur en phosphate de calcium colloïdal : plus la teneur en phosphate de calcium micellaire sera élevée, plus le gel sera ferme et se prêtera à l'égouttage.

On sait également que l'addition de chlorure de calcium est une pratique courante utilisée en fromagerie pour permettre d'obtenir un caillé plus structuré et réduire le temps de floculation.

3.2.2.3 Le pH

L'influence du pH sur le temps de floculation, la vitesse de raffermissement du gel et sa fermeté maximale est très sensible.

L'abaissement du pH favorise le processus de coagulation (diminution du temps de floculation et formation d'un gel se raffermissant plus rapidement) par deux actions :

- L'activité de la présure sur la caséine κ est maximale à $\text{pH} = 5,5$ et est rapidement inactivée lorsque le pH est supérieur à $7,0$,
- La stabilité des micelles décroît avec le pH par neutralisation des charges négatives et par libération d'ions calcium, ce qui favorise la réaction d'agrégation (66).

Les causes de variation du pH du lait, propres à l'animal reste, cependant, assez mal connues à l'exception de l'effet de l'état sanitaire de la mamelle (86), Les laits de mammite possédant un pH élevé, souvent supérieur à $7,0$.

3.2.2.4 Dimension des micelles

Les études concernant l'influence de ce facteur ont longtemps été contradictoires. Il a été longtemps admis que le temps de floculation était plus long et la fermeté du gel moindre lorsque le diamètre moyen des micelles était faible (74).

Des travaux plus récents ont permis d'établir que les gels formés à partir de lait contenant des petites micelles sont plus fermes. Les gels constitués de petites micelles sont caractérisés par la formation d'un réseau protéique plus dense, plus cohérent et donc plus ferme (65,17), et qu'il existe une corrélation positive entre le temps de prise et la dimension des micelles.

3.2.2.5 Influence des proportions relatives en caséines

Des travaux montrent que la composition des caséines intervient également sur le temps de floculation et sur la fermeté du gel mais les données de la littérature dans ce domaine sont parfois contradictoires.

Il existerait une corrélation assez étroite et négative entre le temps de floculation et la concentration en caséine β (97), alors que la fermeté du gel serait plus étroitement liée à la concentration en caséine α_s . Ceci est en contradiction avec d'autres travaux selon lesquels la teneur en caséine β influence de manière positive l'aptitude du lait à la coagulation alors que celle de la caséine α_s aurait plutôt un effet contraire (64).

Par ailleurs, Yun et al (1982) ont démontré que l'augmentation de la concentration en caséine β se traduit par une meilleure fermeté des gels présures qu'un enrichissement réalisé avec la fraction α_s .

Colin et al (1992) ont démontré l'influence favorable de la caséine β sur l'expulsion du lactosérum en début d'égouttage et donc sur la vitesse d'égouttage d'une part, et son effet sur

le volume de lactosérum expulsé en fin d'égouttage et sur la rétention en eau du fromage, d'autre part.

3.2.2.6 Influence du polymorphisme génétique des caséines

L'influence de la nature des variants génétiques des caséines sur les aptitudes fromagères ont été source de nombreux travaux.

Il est toutefois intéressant de noter que l'incidence de ce polymorphisme résulte indirectement de ces effets sur la composition physico-chimique du lait (86).

Aussi, les laits contenant les variants B des caséines κ et β ont des temps de floculation plus courts et des gels plus fermes que les laits ayant des variants A (35).

La meilleure aptitude à la coagulation s'obtient pour des laits présentant le variant BB de la caséine κ . Ces laits se caractérisent par une plus grande concentration en caséine et des micelles aux dimensions plus faibles (65).

Ces différentes données conduisent à penser que les animaux qui présentent une association des variants B des caséines β et κ produisent un lait particulièrement bien adapté à la transformation laitière. Ce cas a été démontré chez la vache laitière de race Normande.

CONCLUSION : Cette étude des relations entre les caractères physico-chimiques des laits et leurs aptitudes fromagères met ainsi en évidence :

- l'intérêt d'une prise en compte de la structure des micelles et notamment leur dimension et leur degré de minéralisation calcique ; il apparaît, en effet, qu'un lait ayant des micelles de faible diamètre et d'un degré de minéralisation élevé donnera un gel plus ferme et une synérèse plus importante,
- l'incidence de la composition en caséine : même si quelques travaux sont contradictoires, on peut penser que plus un lait présente un rapport caséine α_s / caséine β faible, plus il est favorable à une fermeté de gel et à un meilleur rendement fromager,
- la confirmation de la dominance du variant B de la caséine κ puisqu'un tel lait présente des aptitudes fromagères supérieures.
- l'importance d'un lait riche en caséine et en calcium ; cette déficience pouvant être compenser par une préparation du lait avant sa mise en fabrication.

3.3 Facteurs de variation du taux protéique et conséquences en technologie laitière

3.3.1 Polymorphisme des lactoprotéines

Il existe un polymorphisme naturel des lactoprotéines largement étudié pour ses effets sur la fromageabilité du lait. Trois des quatre caséines du lait de vaches (caséines α_{s1} , β et κ) ainsi que la β -lactoglobuline se présentent, dans toutes les races, sous plusieurs formes alléliques.

Les variants génétiques découverts sont plus ou moins universellement distribués au sein des races ; ainsi, la race Montbéliarde possède pour l' α_{s1} caséine les variants B, C, D tandis que d'autres races (Normandes, Holstein) ne présentent que les variants B et C (31), cf. tableau 3.2.

Un grand nombre de recherches ont tenté d'évaluer les effets de ce polymorphisme sur la quantité, la composition et les aptitudes fromagères du lait.

▪ Inventaire des variants génétiques

C'est dans les années cinquante que différents scientifiques (Aschaffenburg notamment pour la β -lactoglobuline, la caséines α_{s1} et β) ont mis en évidence l'existence du polymorphisme des principales lactoprotéines.

A l'heure actuelle, on décrit 5 variants génétiques (A,B,C,D,E) pour la caséine α_{s1} , 4 variants (A,B,C,D) pour la caséine α_{s2} , 7 variants ($A^1, A^2, A^3, B, C, D, E$) pour la β caséine, 4 variants (A,B,C,E) pour la κ caséine, 7 variants (A,B,C,D,E,F,G) pour la β -lactoglobuline (β -lg) et 3 variants (A,B,C) pour α lactalbumine (80).

On parle de polymorphisme quand la fréquence de l'allèle le plus rare dépasse 1%. Ainsi, seuls les principaux variants ont été étudiés et on considère que la caséine α_{s2} et l' α lactalbumine sont monomorphes dans la presque totalité des races bovines. En ce qui concerne les quatre autres lactoprotéines, elles sont polymorphes dans toutes les races avec des variants universellement reconnus : B et C pour la caséine α_{s1} ; A^1, A^2 et B pour la caséine β ; A et B pour la caséine κ ; A et B pour la β lactoglobuline (44). Ce sont ces derniers qui seront étudiés.

Tableau 3.2 :

Fréquences alléliques aux locus des 6 lactoprotéines principales dans les principales races bovines françaises

(44)

Races	α_{s1} -Cn				α_{s2} -Cn		β -Cn					κ -Cn		α -La		β -Lg		
	A	B	C	D	A	D	A ¹	A ²	A ³	B	C	A	B	A	B	A	B	D
Prim'holstein	-	0,99	0,01	-	1	-	0,92	(1)	0,05	-	0,66	0,34	-	1	0,56	0,44	-	
Normande	-	0,82	0,18	-	1	-	0,19	0,29	0,04	0,47	0,01	0,34	0,66	-	1	n.a.		
Montbéliarde	-	0,87	0,13	0,01	1	-	0,22	0,60	-	0,17	0,01	0,63	0,37	-	1	0,39	0,59	0,02
Abondance	-	0,78	0,22	-	0,99	0,01	0,12	0,79	-	0,07	0,02	0,56	0,44	-	1	0,62	0,37	0,1

n.a. : non analysé

(1) fréquence de $A^1 + A^2 + A^3$

▪ Conclusion

Si on regarde le tableau 3.2, on remarque que les différences entre races sont nettes pour les fréquences alléliques : il convient d'éviter d'analyser ces résultats séparément mais de considérer l'haplotype entier de la race.

Par exemple, on constate que les animaux de type B pour la caséine κ sont en général BB pour α_{s1} et β chez la race Normande, BA¹ chez la Prim'holstein et BA² chez la Montbéliarde (Seegers, 1994). L'examen des fréquences alléliques dans les races françaises met donc en évidence la supériorité de la race Normande puisque cette race associe les deux variants des caséines conférant les meilleures aptitudes fromagères (β -CnB et κ -CnB).

Ce polymorphisme naturel est souvent lié à la race mais il convient de noter que ces résultats sont difficile à interpréter et que l'analyse des effets du polymorphisme génétique est rendue délicate par de multiples facteurs (technique de séparation, liaison entre les différents loci ...)

3.3.2 Variations liées à l'alimentation

3.3.2.1 Niveau et nature des apports énergétiques (50,28,37,19)

Le niveau d'apport énergétique reste le principal facteur de variation alimentaire du TP. Ce dernier augmente avec l'apport énergétique : en supplément à une ration de base équilibrée, un apport de 1 UFL augmente le TP de 0,3 à 0,6 g/kg selon le stade de lactation.

Un apport supplémentaire d'énergie entraîne :

- une augmentation de l'acide propionique (C3) au détriment de l'acide acétique (C2).
- une augmentation de la quantité de protéines digestibles dans l'intestin d'origine microbienne ruminale (PDIM) grâce à une amélioration des synthèses d'acides aminés dans le rumen. Cette synthèse est stimulée par la sécrétion d'insuline qui inhibe également l'utilisation des acides aminés dans la néoglucogénèse.

La nature des aliments a des effets plus faibles sur le TP que sur le TB ; néanmoins, on constate que l'ensilage de maïs, les foin ou l'herbe ont une action plus efficace sur le TP que l'ensilage d'herbe. De plus, la nature de fourrages n'a pas de répercussion sur le rapport caséines/protéines totales.

3.3.2.2 Niveau et nature des apports azotés (50,28,37,19)

L'augmentation du niveau des apports azotés conduit à une augmentation conjointe de la production laitière et de la matière protéique (de ce fait le TP reste constant). Le supplément protéique se partage entre un soutien à la néoglucogénèse et un apport de précurseurs de la synthèse de caséine.

D'autre part, l'apport de certains acides aminés essentiels à la ration peut avoir une influence sur le TP. Par exemple, il a été démontré que l'apport post-ruminal (ou protégé des fermentations ruminales) de lysine et de méthionine (acides aminés les plus limitant) a un effet bénéfique sur le TP (et sa teneur en caséines) sans modifier la production laitière. Ces acides aminés améliorent l'efficacité d'utilisation des protéines (PDI) et extériorisent leurs potentialités.

Le tourteau de Colza représente une bonne source en acides aminés et notamment en méthionine : l'introduction de ce tourteau dans une ration à base d'ensilage de maïs (fortement déficitaire en matières azotées fermentescibles) a permis une légère augmentation de la production laitière, le maintien du TP et la réduction du TB.

3.3.2.3 Apport de matières grasses (37,103)

L'apport des lipides à la ration a un effet dépresseur sur le TP (lié notamment à une baisse de sécrétion des caséines) ; la cause exacte n'est pas encore élucidée même si on pense qu'elle

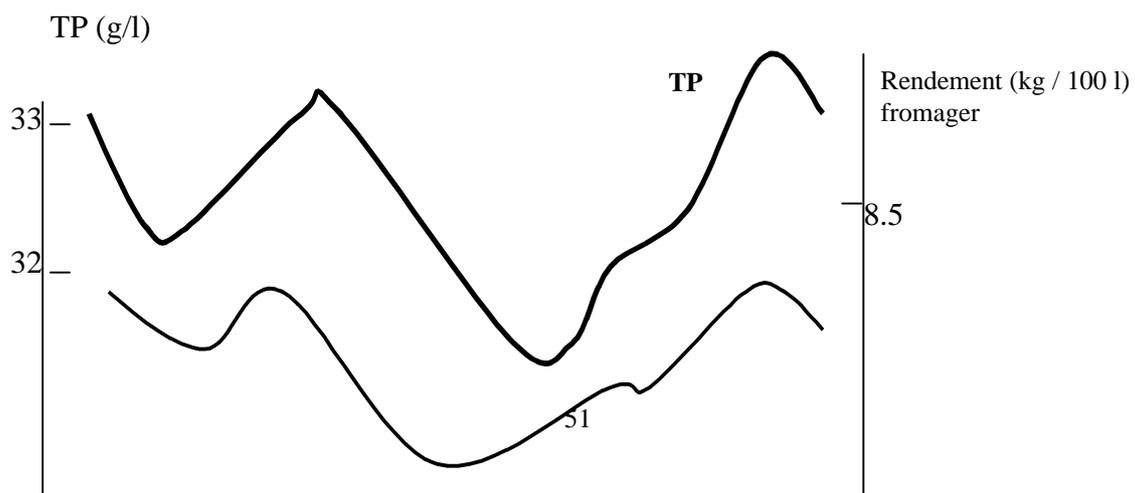
est extraruminale (l'effet de dilution par augmentation de la production laitière fait partie de l'explication mais n'explique pas tout).

Les huiles alimentaires sont également néfastes à la protéosynthèse microbienne et au TP, l'apport de niacine ayant un rôle palliatif de cet effet négatif.

3.3.3 Variations liées à la saison

Le taux protéique passe par deux valeurs minimales, à la fin de la période hivernale (mars) et au milieu de l'été (août) et par deux valeurs maximales, à la mise à l'herbe (avril) et surtout à la fin de la période de pâturage (oct.) ; l'azote non protéique suit également cette courbe. La figure 3.3 retrace cette évolution,

Figure 3.2
Evolution annuelle du TP et liaison avec le rendement laitier
(103)



Ja Fe Ma Av Ma Ju Jui Ao Sep Oct Nov Dec

3.3.4 Action du froid et traitement thermique

Le refroidissement du lait cru et son maintien à basse température est aujourd'hui chose courante. Il en résulte une meilleure maîtrise de la qualité du lait mais cette technique est également à l'origine de modifications physico-chimiques qui auront des répercussions sur le comportement du lait lors de ses transformations.

3.3.4.1 Action du froid sur les protéines du lait

Les effets du refroidissement se font ressentir au niveau des caséines et des équilibres phosphocalciques. Ceux-ci se traduisent par une diminution de l'aptitude du lait à la coagulation par la présure et à l'égouttage : le temps de coagulation est allongé, la fermeté du gel diminue et l'égouttage est ralenti (86).

Les principales modifications au niveau des caséines sont dues au fait que les liaisons hydrophobes sont minimales à basse température ; la caséine β étant la plus hydrophobe, elle est particulièrement sensible à l'action du froid : elle se solubilise et tend à s'extraire de la micelle pour passer à un état de caséine soluble. La proportion de caséines solubles augmente de 3,2-4,5% dans un lait à 20°C à 12-16% dans un lait refroidi à 2°C (51).

Les rapports entre les formes solubles et les formes colloïdales du calcium et des phosphates sont assez profondément modifiés par le refroidissement où les ions tendent à sortir de la micelle. Il s'ensuit une solubilisation de phosphate de calcium colloïdal et une augmentation des teneurs en calcium et phosphore inorganique solubles. Ceci a pour conséquence une diminution des micelles. Par contre, les teneurs en magnésium dissous et colloïdal ne sont pas modifiés par le refroidissement (51).

Parallèlement à la réduction des dimensions de micelles, il se produit un accroissement de leur degré d'hydratation.

Le gel formé à partir d'un lait refroidi est moins ferme et plus fragile ce qui se traduit par des difficultés au niveau de l'égouttage.

On constate que la diminution de l'aptitude à la coagulation par la présure du lait est particulièrement sensible pour des temps de conservation au froid supérieures à 48 heures.

3.3.4.2 Traitement thermique et action sur le TP

Le chauffage est à l'origine de modification affectant les protéines solubles, les équilibres salins et le système micellaire. Les conséquences technologiques de ces phénomènes sont nombreuses : diminution de l'écémage spontané, moindre sensibilité à la présure (allongement du temps de prise, réduction de la vitesse de raffermissement du gel et de sa fermeté maximale, égouttage du gel plus difficile et moins complet), apparition de goûts anormaux (3).

La formation d'un complexe caséine κ/β lactoglobuline (due à une perte de solubilité des protéines du sérum) constitue un facteur limitant du processus de coagulation enzymatique, les micelles de caséines étant plus stables.

Le chauffage entraîne une précipitation et une migration du phosphate de calcium vers la phase micellaire ce qui réduit les teneurs en calcium et en phosphore inorganique (86).

Le chauffage peut être à l'origine de réactions entre les groupes aldéhydes et aminés du lactose et des protéines qui forment des produits de condensation colorés (réaction de Maillard). Ces réactions provoquent le brunissement des laits et aboutissent à une baisse de la valeur nutritionnelle des protéines.

3.3.5 Correction des laits en fromagerie

Il s'agit de mettre en œuvre des techniques appropriées pour restituer au lait une bonne aptitude à la coagulation suite à sa réfrigération et à son stockage :

- l'addition de chlorure de calcium provoque un léger abaissement du pH et augmente les teneurs en minéraux calciques,
- légère acidification du lait à pH = 6,5 ou maturation du lait à 10-12°C pendant 15 à 16 heures associée à l'emploi de chlorure de calcium,
- enrichissement du lait en caséine couplé avec l'apport de chlorure de calcium ou mise en œuvre d'une ultrafiltration qui a pour but de concentrer le lait et augmenter ainsi sa teneur en protéines.

Conclusion :

Il apparaît que l'aptitude du lait à la coagulation est fonction d'un grand nombre de facteurs et qu'une simple correction telle que l'addition de sel de calcium ne peut pas transformer un lait déficient en qualité fromagère en un lait normal.

Il est donc nécessaire de jouer avec les facteurs de variation de la composition physico-chimique du lait :

- les facteurs héréditaires sont très importants, mais il peut alors se poser un problème de sélection génétique d'un animal,
- les facteurs alimentaires ne sont pas à négliger, s'ajoutent à ces derniers, l'influence du climat, de la saison et de la région dans laquelle pâturent les animaux,
- l'influence de la période de lactation est également très nette puisqu'en début de lactation, on observe une baisse de la concentration en caséine et en calcium ce qui se traduit par une baisse sensible de la fermeté du gel et en fin de lactation, on a également un lait qui coagule plus difficilement et donne des gels mous.

PARTIE 4 :

LES CONSTITUANTS DE LA PHASE D'EMULSION : LA MATIERE GRASSE ET LES GLOBULES GRAS

La matière grasse a été pendant longtemps, le seul constituant du lait systématiquement déterminé pour l'appréciation de la valeur de ce produit. Aujourd'hui, la politique économique s'oriente autrement. Néanmoins, cela révèle la grande richesse de ce constituant.

En effet, d'un point de vue nutritionnel, les lipides représentent une grande part de l'apport énergétique du lait et satisfont à une partie du besoin en métabolites essentiels.

D'autre part, du point de vue des transformateurs, les lipides sont responsables des caractéristiques sensorielles des produits laitiers.

Leur connaissance depuis leur synthèse jusqu'à la fin des procédés de transformation est donc fondamentale pour prédire leur évolution.

4.1 La matière grasse et le globule gras : composition physico-chimique

La teneur en matière grasse du lait ou taux butyreux (TB) est le nombre de grammes de substance dans un kilo ou un litre de lait, séparée des autres constituants selon la méthode par extraction éthéro-chlorhydrique en France ou la méthode internationale par extraction éthéro-ammoniacale ou toute autre méthode reconnue pour le paiement différentiel du lait.

4.1.1 Analyse globale

On range sous le terme de matière grasse des substances aux propriétés et aux structures chimiques souvent bien éloignées mais possédant les caractéristiques communes suivantes :

- insolubles dans l'eau mais solubles dans les solvants organiques (éther, benzène),
- leur masse volumique est inférieure à celle de l'eau (# 0,92 kg/l).

Cela sous-entend l'ensemble des composés lipidiques qui par hydrolyse des esters redonnent des acides gras libres (AGL) et des corps liposolubles : caroténoïdes, cholestérol, squalène, vitamines liposolubles (8).

La matière grasse du lait est donc un mélange très complexe composé pour l'essentiel de triglycérides et secondairement de diglycérides, lipides complexes et substances liposolubles insaponifiables (tableau 4.1).

Tableau 4.1

Matière grasse du lait : contenu du globule gras en émulsion dans la phase aqueuse

	% lipidique strict
Goutte lipidique non polaire (# 95% du GG)	
*Tri-; 1-2 Di-; Mono-Glycérides : 95,80; 2,25; 0,08	98,13
*Cholestérol (majoritairement dans la membrane)	
*Acides gras libres	0,28
*Cholestérides	0,02
*Esters de rétinol	traces
* Composés liposolubles : Vit°A,D,E,K;squalène,caroténoïdes°	traces
Membrane lipidoprotéique externe polaire (#5% du GG)	
*Triglycérides	comptabilisés dans les glycérides
*Phospholipides (lipides complexes)	1,11
*Cholestérol total	0,46
*Protéines (butyrophiline et xanthine oxydase : 0,3 à 0,4 g/l)	non lipidique
*Enzymes (traces)	non lipidique
*Glycanes divers (traces)	non lipidique

°note : la répartition exacte de ces composés non lipidiques entre la goutte d'huile et la membrane n'est pas certaine.

(d'après Jensen et Newburg, 1995)

4.1.2 Constitution de la matière grasse : le globule gras

4.1.2.1 Définition, généralités

La matière grasse est sous forme de globule gras (visible au microscope optique) en émulsion dans la phase aqueuse du lait. Une émulsion est une dispersion de fines gouttelettes d'une substance liquide dans un autre liquide. Suivant la nature de la phase dispersée, on distingue les émulsions de matière grasse dans l'eau (le lait) des émulsions d'eau dans la matière grasse (le beurre). La stabilité de l'émulsion est due à la présence d'une enveloppe lipido-protéique chargée négativement (84).

Le diamètre du globule gras est variable (0,1 à 20 µm, le diamètre moyen du globule gras du lait de vache est : 3 à 5 µm) : il diminue du début à la fin de la lactation tandis que le nombre de globules gras augmente et au cours d'une traite, le diamètre augmente ; un globule gras est donc plus gros en fin de traite de début de lactation.

La taille des globules gras est aussi un caractère propre à la race.

Une émulsion laissée au repos à 15°C se sépare en deux phases distinctes : il y a une remontée des globules, ce qui constitue le phénomène du crémage (c'est un phénomène

réversible). La remontée de la crème s'effectue beaucoup plus rapidement dans le lait de vache que dans le lait de chèvre, ceci est dû à la présence de globulines (euglobuline, protéine thermolabile) qui ont la propriété de favoriser l'agglutination des globules gras entre eux.

4.1.2.2 Composition du globule gras

La structure du globule gras est hétérogène, en allant du centre à la périphérie, on trouve successivement :

- une zone de glycérides à bas point de fusion, liquides à température ambiante ;
- une zone riche en glycérides à haut point de fusion ;
- une zone corticale : la membrane du globule gras qui joue un rôle très important en raison de sa composition et de ses propriétés.

- **Composition de la membrane du globule gras :**

Les constituants totaux de la membrane (tableau 4.2) représentent 2% du globule gras.

La membrane du globule gras (2 à 6%), composée essentiellement pour moitié respectivement de protéines et lipides représentant au moins 90% de sa masse, comporte (57) :

- protéines, 0,3 à 0,4 g/l : butyrophiline glycolysée constituant majeur typique lié à la xanthine-oxydase et nombreuses autres substances telles les mucines;
- lipides : triglycérides (62%), phospholipides certains glycolysés (28%); diglycérides (9%), acides gras libres, stérols, hydrocarbures (1%);
- hexoses, hexosamines, acides sialiques (traces);
- enzymes, plus de 25 dont surtout des hydrolases type phosphatase alcaline;
- vitamines A,D,E,K.

Tableau 4.2
Estimation de la composition de la membrane du globule gras
(101)

Constituants	% (/ globule)	% (/membrane)
Protéines	0,9	42
Phospholipides	0,6	28
Glycérides neutres	0,3	14
Eau	0,2	9
Cérébrosides	0,08	4
Cholestérol	0,04	2

Gangliosides	0,02	1
Fer	$0,3 \cdot 10^{-3}$	-
Carotène + Vit. A	$0,04 \cdot 10^{-3}$	-
Cuivre	$0,01 \cdot 10^{-3}$	-
Total	# 2,14	100

La membrane du globule gras est très complexe et difficile à étudier car son extraction et purification sont sujettes à variations ce qui explique l'évolution de l'estimation de sa composition.

Elle enveloppe la goutte lipidique (\cong 95% du globule) essentiellement glycéridique hydrophobe. Elle permet au globule d'être hydrophile, chargé négativement et d'assurer une émulsion stable (55). Elle est en remaniement continu depuis la création du globule gras et fonction des traitement technologiques que subira le lait.

4.2 Facteurs de variation

La matière grasse est le constituant du lait le plus variable en proportion. Nous verrons que divers facteurs influent sur le taux butyreux (TB). La matière grasse varie aussi dans sa composition (acide gras, phospholipides, substances insaponifiables ...), il en résulte alors des variations dans ses propriétés.

4.2.1 Variations du TB liées à l'apport alimentaire

Le taux butyreux est de loin l'élément le plus sensible à l'alimentation ; une grande partie de cette variation peut être attribuée aux modifications survenues dans les acides gras (AG) produits par la fermentation du rumen. Pour obtenir un taux butyreux (TB) élevé, il faut amener un rapport acétate(C2)/propionate(C3), dans le rumen, élevé.

4.2.1.1 Apports énergétiques et globaux (87,37)

La sous alimentation entraîne un accroissement du TB (et une diminution de la quantité de lait produite) avec une modification des acides gras : augmentation des AG à chaîne longue et diminution des AG à chaîne courte. Ce taux supérieur résiste tant que la vache compense le niveau d'alimentation par une mobilisation de ses lipides corporels.

A l'inverse, le TB diminue par accroissement de l'apport énergétique (0,3g/kg par UFL (unité fourragère laitière) supplémentaire – (30)). Par ailleurs on constate que la quantité de lait produite augmente ce qui ne change pas la production de matière grasse.

4.2.1.2 Composition de la ration (103,88,49,37,45)

- **Nature des glucides**

➤ Rapport fourrages/concentrés

Le TB dépend de l'équilibre entre précurseurs lipogéniques (acide acétique (C2) et acide butyrique(C4)) et les produits favorisant la synthèse de glucose et la sécrétion d'insuline (acide propionique (C3)).

Lorsque à partir d'une ration riche en fourrage, on augmente le taux de concentrés, le TB diminue lentement et s'effondre si on atteint des proportions très élevées (70% de concentrés). Cette diminution s'accompagne d'un changement de composition en AG (augmentation des AG à chaîne longue).

Ces changements s'expliquent par une dilution de la matière grasse (par augmentation de la production laitière) et une diminution du pH ruminal ce qui entraîne une stimulation de l'activité lipogénique du tissu adipeux (par libération d'insuline) et donc une mobilisation des AG sanguins aux dépens du TB du lait.

L'effet d'un rapport fourrages/concentrés trop faible peut être limité par l'usage de substances tampons.

➤ Nature des glucides cytoplasmiques

L'herbe jeune de printemps qui est riche en sucres solubles peut occasionner des diminutions de TB par accroissement du taux sanguin de propionate.

A l'inverse, d'autres glucides tels que le lactose ou le saccharose (betterave) augmentent le TB par accroissement d'acide butyrique responsable de la synthèse mammaire des AG à chaîne courte. Mais ces aliments sont rapidement dégradables et leur effet favorable sur le TB n'est pas forcément protecteur des risques d'acétose.

En ce qui concerne les aliments complémentaires des fourrages riches en amidon, l'orge et le blé diminuent le TB car leur amidon entièrement digéré dans le rumen donne lieu à des productions importantes d'acide propionique tandis que l'apport d'amidon du maïs dont une partie est digérée dans l'intestin grêle diminue beaucoup moins le TB.

De la même façon, les concentrés riches en parois (son, pulpes) qui n'augmentent pas la quantité de C3, n'abaissent pas autant le TB que les concentrés riches en amidon.

- **Apport de matières grasses**

Elles doivent représenter environ 3% de la ration car elles ont un effet légèrement positif sur la production de lait (apports énergétiques élevés). Mais l'excès de lipides inhibe la cellulose ruminale et diminue le TB.

On préfère le suif ou les graisses oléagineuses aux huiles végétales (effets défavorables consécutifs au ralentissement de la digestibilité de la cellulose et des fermentations ruminales). On peut également utiliser des huiles protégées par enrobage qui seront digérées directement dans l'intestin grêle ce qui empêche les problèmes liés aux fermentations ruminales.

- **Utilisation d'additifs alimentaires**

La valeur du TB est étroitement liée aux processus de fermentations ruminales et donc au pH du rumen. On peut ainsi réguler ce pH avec du bicarbonate de sodium et de l'oxyde de magnésium (substances tampons).

D'autres additifs tels que la choline ou la méthionine qui permettent de restaurer un TB initialement faible ou le monopropylène glycol qui diminue la synthèse des matières grasses peuvent également influencer la teneur en matière grasse du lait.

4.2.1.3 Traitement appliqués aux aliments et forme de présentation de la ration (50,49,37,87)

Le traitement technologique des aliments intervient en modifiant la vitesse de fermentation, la salivation, le temps de mastication et donc la quantité et la composition des AG volatils du rumen.

La consommation de fourrages broyés ainsi que celle des concentrés broyés diminue le TB. L'origine de cette diminution avec le broyage des aliments réside dans la baisse de stimulation de la rumination, ce qui abaisse le pH ruminal par une moindre production de substances tampons salivaires.

On constate donc que le temps de mastication joue un rôle important pour le TB, cette notion est traduite par l'indice de fibrosité exprimé en minute de mastication par kg de matière sèche (MS) ingérée mais la relation entre le TB et cet indice reste encore assez lâche et certaines données manquent pour pouvoir l'exploiter au maximum.

Le conditionnement des concentrés peut, lui aussi, avoir des conséquences sur le TB, lorsqu'ils constituent plus de 50 à 60% de la ration. La mise en agglomérés des céréales provoque un échauffement de l'amidon qui conduit à une production accrue d'acide propionique dans le rumen, défavorable au TB.

Pour limiter les effets de ce broyage, il est souvent nécessaire d'apporter à la ration une petite quantité de fourrage long tel que le foin ou encore de fractionner les repas de concentrés qui régularisent le pH ruminal et réduisent les pics insuliniques et propioniques.

4.2.2 Influence des traitements thermiques et du froid sur le TB

4.2.2.1 Influence du froid

La cristallisation des triglycérides augmente progressivement avec la diminution de la température. Il y a rétraction du globule entraînant une déformation de la membrane du globule ce qui amène à une éventuelle perte d'une partie de la membrane et une migration des phospholipides vers la phase aqueuse du lait (98). L'altération d'une trop grande partie de la membrane libère les acides gras du globule et peut entraîner un phénomène de lipolyse de la matière grasse.

D'autre part, les triglycérides se répandent à la surface et l'hydrophilie disparaît en partie (puisque les triglycérides sont hydrophobes) d'où une tendance des globules gras à se réunir et à remonter en surface ; c'est le phénomène de crémage.

4.2.2.2 Influence des traitements thermiques sur la matière grasse du lait

Les traitements thermiques (pasteurisation, traitement UHT) ont une action sur la membrane du globule gras et en particulier sur certaines lipoprotéines. La β lactoglobuline s'associe également au globule gras par la formation de ponts disulfures ce qui augmente la teneur en protéines de la membrane du globule gras sans que la taille de ce dernier en soit augmentée (Surel, 1999).

On peut trouver dans des laits concentrés ou desséchés des défauts organoleptiques et notamment des saveurs désagréables.

4.2.3 Défauts liés à la lipolyse

La lipolyse du lait est une dégradation de la matière grasse libérant des acides gras libres, elle occasionne des défauts organoleptiques dans les produits transformés (5).

La matière grasse est composée de petits globules de triglycérides protégés de l'action des enzymes lipolytiques par une membrane.

Il existe plusieurs type de lipases et donc plusieurs types de lipolyse (75) :

- la lipase naturelle toujours présente dans le lait peut agir après un simple refroidissement, c'est la lipolyse spontanée ou après une agitation accrue du lait, la lipolyse induite,
- Les lipases sécrétées par des bactéries psychotrophes qui se développent dans un lait de mauvaise qualité, c'est la lipolyse bactérienne.

4.2.3.1 La lipolyse spontanée

Il s'agit d'une lipolyse qui se développe sans agitation mécanique dans le lait cru. Les causes exactes de cette lipolyse sont encore mal connues. Cependant, on énumère certains facteurs prédisposants : un effet individuel (qui n'est pas forcément lié à la race), le stade de lactation et le niveau de production (la lipolyse est plus élevée chez les vaches, faibles productrices, en fin de lactation et lors la traite du soir) (70), l'alimentation qui est souvent liée au stade de lactation (ainsi on constate que chez une vache en fin de lactation nourrie avec un ensilage d'herbe de bonne qualité, la lipolyse est plus élevée), l'intervalle entre deux traites (intervalle court augmente les risques de lipolyse) et l'état sanitaire (par exemple chez une vache présentant des kystes folliculaires et traitée aux oestrogènes).

4.2.3.2 La lipolyse induite

On la constate suite à une agitation mécanique ou à une turbulence du lait qui rompt la membrane des globules gras et libèrent les triglycérides qui vont être hydrolysés (5).

La manipulation du lait à la ferme, et notamment lors de la traite est responsable de l'agitation excessive que peut subir un lait mais elle peut également se produire lors du transport ou à la réception à la laiterie (69).

Une des causes de l'agitation du lait lors de la traite est l'entrée d'air dans le circuit du lait qui provoque un moussage du lait chaud ; le réglage et l'entretien du matériel sont donc fondamentaux (36).

Les chocs thermiques sont également à l'origine de cette lipolyse induite : l'abaissement de la température entraîne une élévation des teneurs en acides gras libres (75) par fragilisation de la membrane du globule gras. En pratique, la descente de température du lait doit être rapide

et l'élévation de la température dans le tank due à l'introduction du lait chaud d'une nouvelle traite doit être minimale (6 à 10°C) (21).

4.2.3.3 La lipolyse microbienne

La lipolyse microbienne est un risque lié à la qualité bactériologique du lait ; le développement de certaines bactéries (notamment *Pseudomonas*), n'est pas bloqué par la réfrigération du lait. Ces bactéries sécrètent des lipases et protéases thermostables responsables d'altération dans le lait lorsqu'elles sont présentes en grand nombre (10^6 à 10^7 germes/ml). Leur présence dans le lait provient de contaminations liées à un manque d'efficacité du nettoyage et de la désinfection du matériel de traite et de réfrigération (21).

4.2.3.4 Conséquences en technologie laitière

La lipolyse est un phénomène qui participe au développement des qualités gustatives des produits laitiers mais en fonction du produit et de la lipase pris en compte (microbienne ou naturelle), les conséquences ne seront pas les mêmes.

Pour le lait de consommation et les produits frais, la lipolyse naturelle, rapide est néfaste parce que les acides gras libres produits subsistent dans le lait pasteurisé.

L'action des lipases microbiennes peut être importante dans les laits de longue conservation puisque certaines d'entre elles résistent à de hautes températures. Pour les produits dérivés du lait (crème, beurre ...), la lipase naturelle est en grande partie détruite par la pasteurisation.

L'impact commercial est considérable non seulement à cause du risque des défauts lipolytiques dans les produits mais aussi à cause du risque de protéolyse entraînant une instabilité du produit (Mahieu, 1985).

4.3 Technologie de la matière grasse laitière et exigences des industriels

Comme nous l'avons précisé dans les chapitres précédents, la matière grasse est un constituant très variable en proportion mais également dans sa composition, ce qui influe directement sur ses propriétés physico-chimiques.

Compte tenu de son caractère instable, la matière grasse est sujette aux attaques enzymatiques parfois lourdes de conséquences dans la qualité du produit, c'est le cas de la lipolyse notamment.

Par ailleurs, l'instabilité de la matière grasse est également mise à profit par toutes les techniques de la transformation du lait ou de la crème : les technologies de la matière grasse et sa transformation ont longtemps reposé sur des phénomènes mécaniques tels que les traitements d'écémage, de fouettage, d'homogénéisation, de butyrication ou des traitements physiques jouant sur les températures de fusion et de solidification.

Aujourd'hui de nouvelles technologies sont apparues et nous verrons au cours du chapitre 6 comment les industriels utilisent les propriétés de la matière grasse et notamment sa richesse en triglycérides, pour jouer sur les points de fusion des lipides afin d'obtenir des propriétés de tartinabilité du beurre à basse température, en utilisant des techniques de fractionnement de la matière grasse (76).

La richesse de la matière grasse du lait est à nouveau reconnue : les recherches sur l'intérêt nutritionnel des lipides n'ont pas fini de révéler la complexité des composants lipidiques et des relations qui existent entre les apports en lipides alimentaires et les maladies cardiovasculaires.

Par exemple, l'acide myristique (C 14 : 0) interviendrait sur la diminution d'un facteur de risque cardiovasculaire ou l'acide ruménique (C 18 : 1) (nommé ainsi en 1998) qui offre une protection contre l'induction des cancers du sein par un carcinogène.

PARTIE 5 :

**SUSPENSION CELLULAIRE ET MICROBIENNE :
LA QUALITE DU LAIT**

La qualité est une notion très subjective, le producteur cherche une absence d'impureté, l'industriel réclame un lait sans germe pouvant être à l'origine de problèmes de fabrication et le consommateur recherche une absence de risque pathogène.

Alors que quelques bactéries peuvent être recherchées pour certaine transformation, la politique actuelle dirige les différents intervenants de la filière vers une diminution de la teneur microbienne dans le lait.

5.1 Description, composition

5.1.1 Les cellules somatiques

Le comptage des cellules somatiques du lait a une grande importance pour évaluer la qualité hygiénique du lait.

Depuis 1969, la loi «Godefroy » a instauré un mode de paiement du lait en fonction des taux de matières utiles mais également en fonction de la quantité de germes et de cellules présentes dans le lait. Deux prélèvements sont effectués par mois, les analyses permettent de classer le lait en 3 classes (A, B, C) auxquelles est attribué un indice du prix du lait (63).

Les cellules somatiques ne présentent pas en elles-même un pouvoir pathogène ou toxique mais elles sont le reflet d'un désordre dans la sécrétion lactée (7).

5.1.1.1 Généralités

Le lait, même « normal », contient des cellules somatiques : le terme de cellules somatiques s'opposant à celui de cellules « étrangères » qui peuvent être présentes dans un lait contaminé telles que les bactéries (67).

Quatre types de cellules sont présentes dans le lait (cf. tableau 5.1).

Tableau 5.1 :
Les différents types cellulaires du lait en absence d'infection (61)

Cellules	%
Polynucléaires	0-11
Lymphocytes	10-27
Macrophages	66-88
Cellules épithéliales	0-7

- **Les polynucléaires neutrophiles** : leur rôle essentiel est la défense de l'organisme, elles peuvent phagocyter et détruire les micro-organismes présents dans la mamelle. Elles sont le reflet d'une infection mammaire puisque lors d'une infection, il y a un appel leucocytaire important qui peut atteindre 40 à 50% des cellules du lait (7).
- **Les lymphocytes** : ce sont essentiellement les lymphocytes T qui participent aux réactions immunitaires et on trouve également des lymphocytes B à l'origine de la production d'anticorps (14).
- **Les macrophages constituent** le type cellulaire dominant du lait en absence d'infection. Leur rôle essentiel est d'éliminer les débris cellulaires, les globules gras et dans une moindre mesure, les bactéries par phagocytose.
- **Les cellules épithéliales** se trouvent souvent en amas. On a beaucoup de mal à les différencier (52). Elles proviennent essentiellement de la desquamation de l'épithélium galactophore, elles sont peu nombreuses et ne jouent aucun rôle physiologique particulier dans le lait (61).

5.1.1.2 Variation de la teneur des cellules somatiques dans le lait

De nombreux facteurs influencent le nombre de cellules dans le sang ; même si la principale cause de variation reste le statut infectieux de la mamelle, Serieys (92) a constaté que la numération cellulaire varie en fonction :

- de l'âge et du numéro de lactation : les concentrations cellulaires sont plus faibles chez les primipares que chez les multipares,
- du stade de lactation : les concentrations sont multipliées par 2 ou 3 entre le début et la fin de la lactation et elles sont les plus faibles entre le 15^e et le 75^e jour après le vêlage,
- du niveau de production laitière : plus la production laitière est importante, plus la concentration cellulaire est basse, ceci s'explique par un effet de dilution et également par le fait qu'une réaction inflammatoire entraîne une baisse de production laitière,
- de la saison : les numérations les plus faibles apparaissent en hiver et les plus fortes en été (32).

Il existe également des variations nyctémérales, mensuelles, quotidiennes (Badinand, 1994). En ce qui concerne l'environnement et les conditions de traite, ces facteurs ne semblent jouer qu'un rôle mineur dans les variations cellulaires.

Le taux cellulaire subit donc de nombreuses fluctuations, Badinand (7) estime qu'une mamelle saine a toujours un lait contenant moins de 70 000 cellules/ml et qu'une élévation de cette concentration serait due à un phénomène inflammatoire.

5.1.2 Importance hygiénique de la concentration en cellules somatiques

Comme nous l'avons précédemment écrit, le statut infectieux de la mamelle est le facteur influençant le plus le taux cellulaire du lait.

Lors d'une infection, il est courant de distinguer deux types d'agents pathogènes :

- **les majeurs** responsables des formes cliniques et entraînant une forte réponse inflammatoire donc une élévation conséquente du taux cellulaire (jusqu'à 80 000 cellules/ml), ces dernières sont dues à *Staphylococcus aureus*, des streptocoques (*St. Agalactiae*, *St. Dysgalactiae*) ou des entérobactéries (*E. Coli*, *Klebsiella*).
- **Les mineurs** qui entraînent une réaction inflammatoire modérée, les laits contiennent en général moins de 300 000 cellules/ml ; on dénombre les staphylocoques non aureus, les autres streptocoques, *Corynebacterium bovis* et divers bacillus. (Badinand, 1994).

Lors d'une invasion des bactéries dans la mamelle, celle ci réagit et se défend en mobilisant ses enzymes et en déclenchant une réponse inflammatoire par un afflux de polynucléaires neutrophiles qui phagocytent les bactéries.

5.1.3 Les autres bactéries

Outre la flore pathogène responsable des mammites (voir chapitre 5.3) et d'un taux cellulaire élevé, le lait cru peut être contaminé par d'autres variétés de micro-organismes qui peuvent être des agents d'altération (par dégradation des composants du lait : lipolyse et protéolyse) ou peuvent être, tout simplement, le reflet d'une mauvaise hygiène à la ferme (89) et auront des conséquences en technologie laitière (tels que les bactéries du genre *Clostridium* responsable du gonflement tardif des fromages à pâtes pressées).

La contamination du lait par ces bactéries est souvent due à une mauvaise hygiène de la traite (contamination de la mamelle par l'environnement ou par un matériel de traite mal entretenu) ou par contamination externe par l'intermédiaire d'aliments ou eau souillés (Clostridium) (63).

5.2 Obtention d'un lait de bonne qualité

5.2.1 Généralités

Au cours des dernières années, les critères de paiement du lait au producteur ont évolué et si les modes de paiement sont conçus pour orienter la production laitière en fonction des besoins technologiques, ils le sont également, et de plus en plus, en fonction des exigences en matière d'hygiène et de qualité du lait.

Aujourd'hui, le lait doit provenir d'une exploitation dans laquelle la qualité est suffisamment maîtrisée pour respecter les conformités aux normes :

- moins de 50 000 germes (flore totale) par ml,
- moins de 250 000 à 300 000 cellules somatiques par ml,
- moins de 1 000 spores butyriques par litre
- un indice de lipolyse inférieur à 0,18 g d'acide oléique par 100 g de matière grasse (ou 0,64 meq d'acides gras libres)
- absence de résidus d'antibiotique ou d'antiseptique à effet inhibiteur (10).

En effet, certains germes peuvent être source d'altération lors de la transformation du lait et même si le niveau global de l'hygiène s'est nettement amélioré, il n'en reste pas moins que certains micro-organismes subsistent, si les règles sanitaires ne sont pas convenablement respectées.

Enfin, posons rapidement le problème des résidus à effet inhibiteur dans le lait, suite au traitement des animaux pour lequel le temps d'attente n'a pas été suffisamment respecté. Il s'agit, ici, d'un problème de sécurité alimentaire très sensible pour le consommateur et ayant une réglementation stricte. Le producteur doit maintenir une grande vigilance vis à vis de la conduite de son troupeau et des traitements qu'il pratique.

5.2.2 La traite, conséquence sur la qualité du lait

La traite constitue la première étape de récolte du lait : son but est l'extraction d'une quantité maximale de lait de la mamelle. Le bon déroulement de cette étape est primordial pour obtenir un lait d'une bonne qualité sanitaire.

En effet, au cours des opérations de traite, le lait est l'objet de contamination et d'altérations plus ou moins importantes :

- elles peuvent être microbiennes : contamination d'une vache saine avec des germes pathogènes par pénétration des micro-organismes dans le trayon,
- ou elles peuvent provoquer des modifications d'ordre physico-chimique : activation de la lipolyse (38,69).

Une mauvaise technique et hygiène de traite est donc à l'origine d'introduction de germes dans la mamelle et de contamination du lait.

Plusieurs phénomènes expliquent les contaminations de la mamelle au cours d'une traite (36,38,95) :

- transmission de germes présents dans l'environnement à l'animal par l'utilisation d'un matériel de traite en mauvais état, mal nettoyé ou contaminé par une autre vache,
- pénétration de micro-organismes dans les trayons par un fonctionnement en sens inverse de la machine à traire : entrée de lait déjà extrait d'un trayon vers un autre ; ce phénomène est lié à une mauvaise évacuation du lait dans le circuit,
- chute des faisceaux trayeurs lors de la traite due à une dépression trop faible pour supporter le poids du faisceau ou à des variations cycliques de vide, cette dernière occasionne des blessures du trayon et le fragilise.

Par une manipulation trop brusque et une hygiène défectueuse, le trayon est souvent endommagé, affaibli et sujet à des contaminations.

5.2.3 Conservation du lait à la ferme

Malgré de nombreuses précautions, le lait à la sortie de la mamelle est très souvent contaminé, il importe alors de stopper le développement des micro-organismes et d'éviter toute altération du lait jusqu'à son utilisation.

Aujourd'hui, la technique la plus répandue est le stockage du produit de la traite dans des tanks réfrigérés à +4°C au maximum.

Cette méthode n'est pas toujours totalement efficace car la température des tanks est parfois trop élevée. Durant les périodes de grandes productions, la capacité des tanks n'étant pas suffisante, l'éleveur est amené à conserver son lait dans des bidons non réfrigérés (68).

Par ailleurs, pour des raisons sociale et économique, une collecte en vrac du lait réfrigéré s'est développée, cette dernière permet de diminuer la fréquence des ramassages du lait à la ferme qui reste ainsi, à la ferme, durant des périodes pouvant s'élever à 5 ou 6 jours, laissant alors à la population bactérienne tout le temps pour se développer (6).

5.2.4 Transport du lait vers les laiteries

Pour éviter toute contamination du lait par l'air, le passage des tanks vers le camion citerne s'effectue par des tuyaux.

Le refroidissement du lait à la ferme permet un ramassage collectif tous les 2 à 3 jours mais ce mode de transport permet un mélange de laits issus de fermes différentes et donc de qualité différente. Il y a alors un risque de contamination des laits sains par un lait de classe inférieure (38). Il arrive également que le lait ne soit pas bien refroidi dans une ferme, ce lait tiède réchauffe alors le lait de citerne de transport dont la température peut atteindre 8 à 10°C et facilite le développement des micro-organismes.

De plus, le matériel de collecte (la citerne en particulier) doit être précieusement nettoyé après chaque tournée afin de ne pas contaminer le lait des tournées suivantes (6).

CONCLUSION : pour obtenir un lait de bonne qualité bactériologique à la laiterie, il est nécessaire d'obéir à certaines règles d'hygiène : une réfrigération à basse température (< 4°C) et en continu du lait, de la traite à l'usine ; une conservation la plus courte possible du lait cru et un nettoyage et une désinfection stricts de tout le matériel de récolte et de collecte.

A la laiterie le lait doit être traité dès réception (68).

5.3 Conduite d'élevage et état sanitaire du troupeau

5.3.1 Généralités

On suppose qu'un lait produit par des animaux atteints de mammites aiguës n'est pas livré à la laiterie ; mais tous les autres laits le sont (on considère que les mammites cliniques ne représentent que 2 à 5% des cas – (68)).

C'est pourquoi, il est intéressant d'étudier les variations de la composition physico-chimique du lait qu'impose la présence d'un lait mammitique et les conséquences qui découlent en technologie laitière (100).

Selon le degré de gravité de la mammitite, on obtient un lait plus ou moins modifié qui peut aller d'une modification à peine perceptible à une modification très visible.

D'une façon générale, l'infection des mamelles entraîne une perturbation de la glande : on constate une diminution des éléments produits par les cellules de l'épithélium sécrétoire (matière grasse, caséine, lactose) et une augmentation des éléments provenant du flux sanguin par augmentation de la perméabilité des tissus malades (sels minéraux, protéines solubles, cellules) (93).

La baisse de production laitière est un facteur constant mais elle est variable en fonction du germe responsable de la mammitite. Un état sanitaire défectueux d'un troupeau se traduit, donc, pour un producteur, par une diminution de la rentabilité et une perte de production (90).

Les principaux facteurs prédisposants à une mammitite sont une mauvaise hygiène de la traite, les blessures et traumatismes des trayons, la rétention lactée ou autre stress.

5.3.2 Conséquence sur le TP

La teneur en protéines totales issues du lait mammitique est constante voire plus élevée. Ce taux est le reflet d'un grand nombre de remaniement dans les teneurs respectives des différentes protéines du lait : on observe une baisse de la teneur en caséine et une augmentation de la teneur en protéines solubles.

La baisse des teneurs en caséines concernent surtout les caséines α et β alors que les résultats trouvés dans la littérature concernant la caséine κ sont beaucoup plus contradictoires (93).

La variation de la teneur en protéines solubles dans le lait est fonction de leur origine : les protéines synthétisées localement (β lactoglobuline et l' α lactalbumine) diminuent tandis que celles provenant du sang (Immunoglobuline G, sérumalbumine, transferrine et lactoferrine) augmentent.

Tous ces remaniement perturbent gravement les capacités fromagères du lait : en effet, la fraction caséine/protéines totales étant beaucoup plus faible, on constate avec de tel lait, un retard à la coagulation et à l'exsudation (90), et une fermeté du caillé amoindrie (100).

Les fromages fabriqués sont de moindre qualité et présentent souvent un goût amer, un arôme douteux et parfois un dégagement de gaz (100).

5.3.3 Conséquence sur le TB

A l'issue de nombreuses observations effectuées par Carroll, Schalm et Jain (1977) sur les laits mammiteux, une baisse de la quantité de matière grasse (de 5 à 9%) est constatée.

La composition de cette matière grasse est également modifiée : on observe une augmentation des acides gras libres et notamment des acides gras à chaînes longues et une baisse des phospholipides (93). Le diamètre des globules gras diminue.

Ces différents changements sont assez peu perceptibles en technologie beurrière, on constate une baisse de la qualité du beurre mais aucune altération macroscopique (100).

5.3.4 Conséquences sur les autres constituants du lait

Le lactose est le composant du lait dont le taux, en cas de lait de mammite, est le plus affecté. Ce phénomène est dû à la moindre capacité d'élaboration de la glande et de la présence d'un taux inférieur à la normale d' α lactalbumine (cette protéine est un facteur enzymatique, en partie responsable de la synthèse du lactose).

La pression osmotique est maintenue par le passage de chlore et de sodium du sang vers le lait ; de ce fait, la teneur minérale du lait évolue vers celle du sérum sanguin ; on constate, outre l'élévation du chlore et du sodium, une diminution du taux de potassium, du taux de calcium et de phosphore, et du taux de citrate. A ce bouleversement des équilibres minéraux, s'associe une augmentation du pH qui passe de 6,6 à 6,9 en cas de mammite (100).

On trouve dans le lait de mammite, de très nombreuses enzymes d'origines diverses généralement absentes de la composition normale du lait et notamment des lipases et des protéases qui peuvent jouer un rôle dans la stabilité des produits laitiers : leurs qualités organoleptiques peuvent être altérées (93).

CONCLUSION : A la suite de cette étude, et en observant les multiples variations des laits mammites et de leur conséquence en technologie laitière, on conçoit l'importance de la détection des mammites subcliniques et surtout des méthodes pour lutter contre l'apparition de cet état sanitaire amoindri.

5.4 Exemple de bactéries ou de leurs produits pathogènes et leurs conséquences en technologie laitière

5.4.1 Spores butyriques et gonflements tardifs des fromages

Une trop forte quantité de spores butyriques dans le lait peut avoir une incidence sur la maturation des fromages à pâte dures : en effet, ceux-ci peuvent être sujets à des défauts liés à la fermentation butyrique : le gonflement tardif pouvant provoquer l'éclatement des meules, des trous irréguliers ou encore des odeurs désagréables.

Ces défauts sont à l'origine d'un déclassement des fromages voire d'une perte.

Ces accidents de maturation des fromages sont souvent en rapport avec l'introduction d'ensilage de mauvaise qualité dans la ration des vaches laitières. C'est pourquoi, en zone de production de gruyère ou de gouda, l'emploi des ensilages dans l'alimentation des vaches laitières est « quasiment » interdit.

La principale espèce responsable de ces défauts de fabrication est *Clostridium butyricum*, cette bactérie d'origine tellurique se multiplie en condition d'anaérobiose. Elle fermente le glucose, le fructose et le lactose en présence d'acétate pour donner de l'acide butyrique et acétique, de l'hydrogène et du gaz carbonique.

Ces bactéries peuvent sporuler et sont capables de résister à des hautes températures.

Le lait est contaminé selon la chaîne classique sol – fourrage – bouse – lait, la source de contamination la plus commune est représentée par les ensilages mal conservés à pH trop élevé ; la contamination du lait est externe à la vache et n'intervient, donc, que pendant ou après la traite et notamment par contamination du lait par les matières fécales.

La prévention de ce type d'accident passe par la rupture de la chaîne de contamination, et elle peut se faire à différents niveaux :

- réalisation d'un fourrage de bonne qualité avec une acidification la plus rapide possible et suffisante pour inhiber les développements des clostridies,
- hygiène rigoureuse de l'enfouragement des animaux, de la traite, et du lait afin d'éviter au maximum la contamination de ce dernier. On peut, en particulier, distribuer l'ensilage après la traite et pratiquer un nettoyage complet de la mamelle, du matériel de traite et de la salle de traite,
- inhibition ou élimination sélective des clostridies dans le lait, sans pour autant supprimer les germes utiles à la maturation du fromage : ultracentrifugation, stérilisation du lait par upérisation, antibiosuppression par la Nisine.

Mais toutes ces méthodes possèdent leur propre inconvénient, il est donc conseillé, dans les régions de fabrication des fromages à pâte dure, de limiter la contamination du lait voire de supprimer l'emploi d'ensilage.

5.4.2 La protéolyse et les problèmes de conservation

De même que pour la lipolyse, la protéolyse peut être due à une protéase naturelle du lait (protéase alcaline ou plasmine) qui libère des caillots de purine ou à des protéases microbiennes synthétisées par des bactéries psychotrophes (*Pseudomonas* notamment) au cours du stockage (70).

La plasmine naturelle est présente dans tous les laits mais des écarts notables existent entre les individus, son taux dépend également du stade de lactation (3 fois supérieur en fin de lactation) ou de l'état sanitaire des mamelles (43).

Les protéases microbiennes sont très thermostables et peuvent résister à des traitements de 150°C pendant quelques secondes (on peut donc en retrouver dans les laits UHT). Ces protéases hydrolysent les protéines du lait et notamment les caséines κ , β et α_{s1} .

Les conséquences de cette protéolyse en industrie laitière concerne deux types de produit. Elle peut provoquer la gélification et l'amertume du lait UHT ou des pertes en rendement fromager (58) avec des fortes pertes d'azote dans le lactosérum (signalé lors de la fabrication de fromage à pâte molle ou de cheddar).

PARTIE 6 :

**ACTION SUR LE LAIT POUR UNE MEILLEURE
UTILISATION EN TECHNOLOGIE LAITIERE**

Comme nous l'avons vu, au cours des chapitres précédents, le lait est une matière première aux multiples ressources. La variabilité de cette matière première a amené les industriels à développer de nouvelles techniques pour l'adapter aux différentes transformations dont elle est à l'origine.

Aujourd'hui, le lait est payé en fonction de sa composition physico-chimique et de sa qualité microbiologique. Dans un souci de rendement optimal, les scientifiques ont cherché à améliorer cette matière première.

Nous verrons comment les industriels orientent les technologies pour s'adapter aux contraintes des variations du lait, et les utilisent pour fractionner les différents constituants du lait et comment les producteurs utilisent des outils telles que l'amélioration génétique pour améliorer leurs rendements, dans une politique de quotas qui limite la production laitière.

6.1 Exigences des industriels laitiers et nouvelles technologies

Les industriels laitiers ont, jusqu'à ces dernières années, subi les fluctuations de la variation du lait. Certains facteurs ne peuvent être maîtrisés (tels que la saison, l'âge ou l'état physiologique de la vache), les laitiers ont donc répondu à cette dépendance en adaptant la technologie à la matière première.

Aujourd'hui, la mise en place d'une politique qualité et une meilleure maîtrise de la science (en exploitant les progrès génétiques et les acquis techniques dans le domaine de l'alimentation) permettent aux industriels d'obtenir des laits plus constants et plus adaptés aux transformations, malgré cela, il existe encore une certaine variabilité qu'il y a lieu d'atténuer au niveau de l'usine.

La difficulté réside dans le fait que le lait, matière première est à l'origine de la transformation et de l'obtention de très nombreux produits.

Nous pouvons classer en quatre grandes familles les produits issus du lait :

- les laits de consommation, standardisé, pasteurisé ou UHT,
- les fromages issus de la coagulation, il en résulte un coproduit : le lactosérum,
- les beurres et crèmes générant deux coproduits : le babeurre et le lait écrémé,
- les ingrédients laitiers de nature protéique et glucidique.

Si, pour la première catégorie de produits, on souhaite avoir un lait stable aussi bien au niveau physico-chimique que biologique, on cherche pour la deuxième catégorie des laits aptes à la déstabilisation avec un potentiel intervenant dans l'affinage.

En ce qui concerne les ingrédients laitiers de nature protéique et glucidique, on recherche avant tout de bonnes caractéristiques fonctionnelles : tartinabilité, plasticité ... et une bonne stabilité dans le temps.

Les mêmes exigences en matière de caractéristiques physico-chimiques existent et sont souvent contradictoires en fonction de la nature du produit fini désiré.

L'adaptation des laits pour leur transformation au sein des usines est donc une nécessité (16).

A partir d'une matière première variable, tant dans sa composition physico-chimique que bactériologique, l'industriel devra réaliser un produit à qualité physiques, chimiques, bactériologiques et organoleptiques les plus constantes possibles, et ce quels que soient les saisons, les années et même les lieux géographiques.

C'est ainsi que parallèlement à l'acquisition de connaissances en sciences laitières, nous avons assisté au développement de méthodes et à l'émergence de technique de séparation des constituants du lait. Ces méthodes permettent de modifier la composition des laits, leurs caractéristiques physico-chimiques et leurs propriétés technologiques.

La recherche de la régularité qualitative et à meilleur coût des produits finis tend de plus en plus à s'obtenir par une meilleure maîtrise de la préparation des laits mis en œuvre et en recherchant une parfaite standardisation des composants du lait

L'industriel cherche désormais à obtenir un lait le plus constant possible, la standardisation de la matière grasse est, depuis longtemps, pratique courante, et la standardisation de la matière protéique de plus en plus utilisée. Elle est aujourd'hui devenue une réalité industrielle grâce aux développements de nouvelles technologies, l'ultrafiltration tangentielle entre autres.

L'ultrafiltration est une technique de séparation purement physique qui ne dégrade pas les produits et permet d'augmenter le rapport protéines/extrait sec de 30 à 65%.

Le coproduit issu de cette filtration, constitué essentiellement de lactose, peut devenir un support de fermentation ou être utilisé pour abaisser les taux protéiques des laits de consommation par dilution.

6.2 Fractionnement et utilisation des composants du lait

Aujourd'hui, les protéines laitières présentent un potentiel très important à titre d'ingrédients pouvant être utilisés dans différents type de produits.

Les recherches sur le fractionnement et les propriétés fonctionnelles des protéines laitières sont donc en plein essor car les débouchés industriels se multiplient.

6.2.1 Le fractionnement du lait : généralités (81, 83)

Comme nous l'avons vu au cours de notre premier chapitre, le lait est une suspension colloïdale complexe où dans laquelle certains constituants sont en solution vraie et d'autres en suspension.

Les diverses populations de particules du lait ont des tailles moyennes différentes (cf. tableau 1.1).

Théoriquement, un fractionnement pouvant être envisagé pour chaque grande classe de taille, le lait offre donc un grand éventail de possibilité de fractionnement :

- **la microfiltration peut permettre d'effectuer une épuration bactérienne ou un écrémage du lait.**

La microfiltration met en jeu des membranes avec des pores de $20\mu\text{m}$ à $0,1\mu\text{m}$, avec une pression transmembranaire constante tout au long de la membrane.

La microfiltration élimine donc les cellules somatiques qui pourraient entraîner une dégradation des constituants du lait, leur élimination contribuant à augmenter la stabilité du lait, ainsi que les bactéries qui peuvent être nombreuses si la collecte n'a pas été effectuée selon les règles d'hygiène recommandées.

Lors de la micro-filtration, la taille moyenne d'une bactérie étant de $1\mu\text{m}$, les globules gras ($5\mu\text{m}$) sont également retenus. L'élimination des micro-organisme ne peut donc se faire que sur du lait écrémé.

- **L'ultrafiltration** permet le passage des constituants de faible masse moléculaire, tels que les particules en solution qui forme le perméat tandis que les particules au poids moléculaire plus élevé sont retenues dans le rétentat.

Cette technique est utilisée pour la standardisation des laits ou dans la fabrication fromagère à partir de lait ultrafiltré.

- **La nanofiltration** permet de séparer les sels ionisés et les solutés organiques de masse molaire < à 0,2 kg/mol, des sels ionisés et des solutés organiques de masse molaire > à 0,2 kg/mol.

Cette technologie peut être appliquée pour la fabrication de yaourts.

6.2.3 Utilisation du fractionnement des protéines en fromagerie

Les technologies de séparation par membranes permettent d'isoler et de purifier les protéines et ainsi permettent d'améliorer les qualités fonctionnelles des ingrédients protéiques.

a. Le traitement du lait écrémé par microfiltration sur une membrane ayant un diamètre de pores voisin de 0,2 µm permet la séparation et la purification de la caséine micellaire dans l'état où elle se trouve dans le lait (ce que ne permet pas les techniques d'extraction usuelle de la caséine). Ces micelles seront les seules particules du rétentat, ce nouveau produit est dénommé phosphocasinat natif (PPCN).

L'utilisation d'un tel produit en fromagerie sur du lait cru à prouver que le temps de coagulation par la présure diminuait de moitié, et que la formation du gel était accélérée. En effet, l'abaissement de la teneur en lactose et en sels minéraux facilite la diffusion de l'enzyme vers son substrat (82).

b. La réduction du rapport protéines solubles / caséines par micro-filtration permet d'obtenir un lait dit « primin ». Cette technique est utilisée quand le lait doit subir un fort traitement thermique, un tel traitement inhibant partiellement l'action de la présure sur la caséine k.

La diminution de la teneur en protéines solubles permet de minimiser ce phénomène et de retrouver une coagulation normale.

c. L'ultrafiltration du lait crée un nouveau produit appelé « pré-fromage ». Cette technique est aujourd'hui largement utilisée pour la production de fromage à pâte fraîche, à pâte molle et le fromage blanc saumuré (72b) puisque ce lait est enrichi en protéine.

L'ultrafiltration produit une concentration sélective des protéines du lait et des sels minéraux qui leur sont liés, la concentration de ce rétentat est fonction de la durée de l'ultrafiltration.

On peut obtenir un rétentat à concentration intermédiaire dont la teneur en éléments fromageables est supérieure à celle du lait mais inférieure à celle du fromage, un égouttage sera donc nécessaire pour obtenir un fromage frais, cette égouttage sera d'autant moins long que le rétentat sera concentré.

A concentration totale, on obtient un pré-fromage de composition voisine de celle d'un fromage juste égoutté. Ce pré-fromage estensemencé et emprésuré puis versé dans un moule pour acquérir sa forme définitive.

Cette technique dans laquelle l'égouttage est minimisé permet une rétention maximale des protéines contenues dans le lait.

CONCLUSION : ces techniques de filtration sont à l'origine de procédés novateurs en technologie laitière et fromagère notamment.

6.2.4 Le fractionnement de la matière grasse

Comme pour le fractionnement des protéines du lait, la matière grasse peut également subir des traitements analogues. Ainsi le fractionnement de la matière grasse permet le développement de nouveaux produits et aussi l'optimisation de technologies déjà existantes.

Si pendant longtemps, sous les idées du « régime méditerranéen », la matière grasse animale a été rejetée, aujourd'hui de nouveaux marchés se sont créés et l'on commence à parler de l'intérêt nutritionnel de certaines fractions lipidiques du lait.

Les nombreuses recherches sur le fractionnement de la matière grasse se tournent essentiellement sur la maîtrise de la tartinabilité du beurre aussi bien pour les industriels du beurre que les industriels du fromage.

La modification de la tartinabilité du beurre entraîne d'une part un changement de la perception organoleptique qu'est la fraîcheur de fusion et d'autre part, permet en fromagerie d'agir sur la texture du fromage (en influençant la fondance en bouche par exemple).

La technologie la plus connue et la plus courante est le fractionnement des triglycérides qui composent les globules gras, les industriels disposent ainsi de techniques pour modifier la composition de la matière grasse utilisée et peuvent obtenir des beurres liquides à température réfrigérée.

La microfiltration tangentielle est utilisée pour séparer les globules gras selon leur dimension, la taille des globules gras possédant un rôle dans la texture et la saveur des produits laitiers (39b)

6.3 l'amélioration génétique

L'amélioration génétique, tout comme la conduite de l'alimentation, est un des moyens pour agir sur la composition physico-chimique du lait. Si l'alimentation permet d'agir à court terme, la génétique est, elle, un moyen de sélection à moyen et long terme.

En effet la composition du lait dépend pour une part non négligeable du génotype de la vache laitière.

Nous verrons quel rôle joue la race de vache laitière dans la composition du lait avant de tenter d'expliquer les données techniques de l'amélioration génétique et leurs conséquences sur la composition du lait et sa maîtrise.

6.3.1 Variabilité génétique inter-race

6.3.1.1 Tableau comparatif de la composition du lait des différentes races de vaches laitières

Voir tableau ci-contre

6.3.1.2 Différences entre les races

La comparaison de la composition du lait des principales races laitières fait apparaître de grande différence pour la plupart des variables.

Par exemple, si on compare la race Normande et la race Pie-Noire, la première produit moins de lait mais avec des taux protéiques (+2 à +2,5‰), butyreux (+2 à +3‰) et calciques (+0,1‰) plus élevés et des micelles de caséine plus petites.

D'une manière générale, les races les plus laitières présentent des taux butyreux et protéiques les plus faibles. Ceci contribue au fait que les éleveurs se détournent des races ayant un lait riche au profit de celles ayant une production élevée, le choix d'une race reposant sur un bilan économique global qui tient compte de la composition du lait mais aussi des critères de fertilité ou de l'aptitude bouchère ; ainsi la race frisonne Pie Noire conserve sur la Normande un net avantage économique (9).

Par ailleurs, il est nécessaire de noter que même si la Prim'holstein est souvent préférée pour son aptitude à produire beaucoup de lait, d'autres races (telles que la Normande) sont

Tableau 6.1 :

Performance moyenne par race en 1998 dans les résultats nationaux du Contrôle Laitier

– Institut de l’Elevage

Races	Nombre de résultats	Prod moy en Kg	*TB ‰	*TP ‰	*TMU ‰
Primholstein	1 970 635	7 506	41,1	31,7	72,8
Montbéliarde	338 213	6 045	38,6	32,5	71,1
Normande	286 307	5 392	44,1	34,1	78,3
Mixte	34 365	5 907	40,6	32,3	72,9
Abondance	16 675	4 910	37,1	32,6	69,7
Brune	13 575	6 414	40,0	33,2	73,2
Simmenthal	13 159	5 160	39,7	33,1	72,8
Pie Rouge Plaine	10 349	6 160	41,8	32,7	74,5
Tarentaise	6 673	3 941	36,0	31,8	67,9
Salers	3 021	2 492	33,6	32,9	66,5
Jersiaise	1 309	4 216	58,2	38,9	97,1
Flamande	1 081	5 548	40,3	32,4	72,7
Vosgienne	1 015	3 675	37,6	32,1	69,7
Moyenne France	2 697 721	7 020	41,0	32,0	73,1

*TB : taux butyreux

TP : taux protéique

TMU : taux de matière utile

Ces résultats se rapportent à l’ensemble des vaches laitières contrôlées en 1998. Ils représentent une bonne moyenne de la totalité de la population bovine laitière.

La Jersiaise représente un cas particulier, c'est une vache qui produit du lait très riche ayant de très bonnes aptitudes beurrières. Mais sa taille réduite pose des problèmes d'élevage et son rendement en boucherie lors des réformes est médiocre, ce qui fait qu'elle est peu choisie (3).

Bien sur, il convient de préciser que les comparaisons entre les différentes races sont globales et portent à la fois sur le caractère racial (effet génétique) et celui des systèmes d'élevage (effet du milieu). Seul le cas expérimental dans lequel on prend une femelle de chaque race qu'on exploite dans des conditions d'élevage identiques permet de mesurer les différences des niveaux génétiques sans tenir compte des facteurs d'élevage (94)

6.3.2 Amélioration génétique d'une race

6.3.2.1 Historique

La sélection génétique des espèces laitières a toujours eu pour but l'obtention d'animaux de mieux en mieux adaptés au contexte économique général ; or ce contexte change au cours du temps et les progrès scientifiques doivent le suivre. Les critères économiques à prendre en compte sont multiples : quantité de matières utiles, taux de matières utiles, conformation de la mamelle, aptitude à la traite...

De plus, aujourd'hui, la tendance est de sélectionner les espèces laitières non plus sur leur seule capacité à produire un lait riche mais également sur des critères liés à des coûts de production : longévité, résistance aux maladies, efficacité alimentaire ... (27).

Si on se contente d'analyser l'évolution des taux en matières utiles du lait depuis quelques années, on constate que la politique de sélection a beaucoup changé : depuis 1980, on a une augmentation modeste mais continue du TP et une croissance sensible jusqu'en 93-95 puis une décroissance du TB (voir tableau 6.2). Aujourd'hui, les objectifs sont une croissance régulière du TP et une stabilisation du TB (62).

Tableau 6.2 :
Evolution du TP et du TB au cours des dix dernières années
(ITEB, 1999)

Année	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
TP (g/kg)	31,2	31,2	31,2	31,3	31,4	31,6	31,9	31,9	32,0
TB (g/kg)	39,5	40,1	40,3	40,6	40,7	40,5	40,9	41,1	41,0

En terme d'outils, avant 1989, on disposait d'index sur la quantité de lait et la quantité de matière utile (MG + MP). En 1989, les index de taux se rajoutent à ceux de la quantité et est crée l'INEL (Index Economique Laitier) qui est une estimation de la valeur génétique des reproducteurs combinant plusieurs caractères : ce dernier évolue en fonction du contexte économique global ; c'est ainsi que depuis 1993, l'INEL correspond à un objectif de stabilisation du TB et d'augmentation du TP (Seegers, 1994). Cette tendance semble soutenue dans les principales races laitières françaises : en races Prim'holstein et Normande, on a une augmentation régulière du TP (+ 0,2 à 0,5 g/kg) accompagnée d'une stagnation de l'index TB (-0,6 à -0,4 g/kg), tandis qu'en race Montbéliarde, la stagnation du TB (-0,6 g/kg) est accompagnée d'une tendance à la baisse du TP (-0,2 g/kg) (19).

6.3.2.2 Paramètres génétiques de base en sélection laitière et corrélation génétique

L'amélioration génétique d'un troupeau est un travail laborieux. Il est nécessaire d'être patient et de réaliser un effort de sélection continu. L'objectif de l'action d'amélioration de la composition du lait doit être mener en parallèle avec d'autres critères car l'enjeu est d'accroître le résultat économique global de l'exploitation tandis qu'une sélection monocritère entraînerait des réponses corrélatives plus ou moins favorables dans un autre contexte (94,53).

- **Variabilité et héritabilité des caractères laitiers**

Les variables de quantités sont différentes de celles relatives à la composition du lait. En effet, la valeur génétique d'une vache peut être mesurée avec plus de précision pour les taux que pour les quantités et, au contraire, les progrès génétiques espérés sont beaucoup plus importants en quantité sur la sélection descendante (24).

Par ailleurs, les caractères liés aux matières grasses (MG) sont plus variables que ceux liés aux matières protéiques (MP). Ceci permet des progrès plus important pour les MG que pour les MP. (13).

Tous ces résultats sont synthétisés dans le tableau 6.3.

Tableau 6.3
Paramètres génétiques de base en sélection laitière (94)

Paramètres	Quantités	TP	TB
------------	-----------	----	----

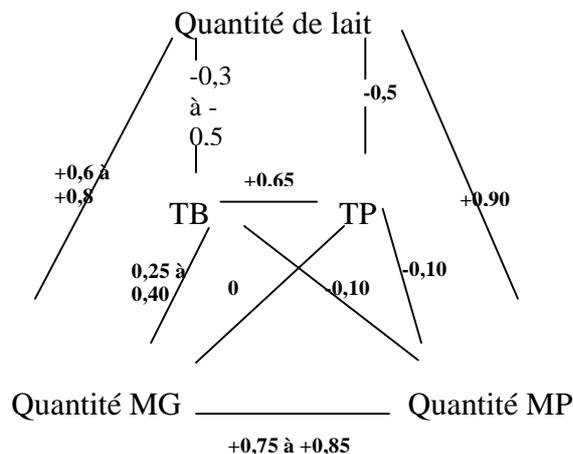
Héritabilité h^2	0,3	0,55	0,50-0,70
Ecart type génétique	600 kg	1,4 g/kg	3,0 g/kg
Coefficient de variation	10%	4,5%	7,5%

- **Corrélations génétiques entre les quantités et les taux.**

On a (selon figure 6.1) :

- une forte corrélation positive entre la quantité de lait et la quantité de MP et MG, une sélection sur un de ces critères apportent un progrès indirect sur les deux autres ;
- la corrélation entre TB et TP est plus faible qu'avec son homologue quantité ;
- la corrélation génétique entre les quantités de matière d'une part et les taux d'autre part sont faible ;
- la quantité de lait est liée négativement aux taux.

Figure 6.1
Principales corrélations génétiques intra-raciales en sélection laitière
(d'après diverses sources)



On constate que la sélection sur la quantité de lait réduit la richesse de ce lait alors qu'une sélection sur la quantité des matières permet de garder des taux constants (13).

6.3.2.3 Méthode d'évaluation des reproducteurs laitiers

L'estimation de la valeur génétique des reproducteurs se traduit par le calcul d'index élémentaires et globaux.

De manière générale, la sélection s'effectue sur quatre critères maximums : la quantité de MG, de MP et les taux (TP et TB).

Le principal critère porte sur la quantité de matière utile on a : $QMU = d_1QMG$ et d_2QMP et on en déduit le deuxième critère qui porte sur les taux moyens : $MTX = d_1TB$ et d_2TP . Sachant que la corrélation génétique entre quantité de matière et taux est proche de 0 (voir figure 6.1), toute sélection sur QMU se traduit par le maintien constant des taux.

L'INRA et L'ITEB ont défini un index global, l'INEL (Index Economique Laitier) à partir de la formule de paiement du lait :

$$INEL = 1,15(MP + 3TP)$$

Cet INEL a évolué au cours des années puisque avant 1993, il prenait en compte le critère MG ($INEL = 0,37 (MG + 2MP + 6TP)$), aujourd'hui l'effort de sélection n'est plus basé sur la MG (conséquence économique suite à une non prise en compte de la MG dans le paiement du lait) (50).

L'UPRA a également édité un index ISU (Index de Synthèse Utile) qui traduit un objectif global de sélection combinant les caractères de production laitière (= index INEL) avec la morphologie et la vitesse de traite (voir tableau 6.4) ; cet index est donc propre à chaque race.

Tableau 6.4
Poids des constituants de l'index ISU (Index de Synthèse Utile)
dans les trois principales races laitières (12)

race	INEL	Morphologie	Vitesse de traite
Prim'holstein	70%	25%	5%
Normande	59%	35%	6%
Montbéliarde	66%	28%	5%

Ce dispositif concernant les caractères secondaires a été complété par une évaluation sur les comptages cellulaires (91) et sur la longévité (33).

Le critère prioritaire utilisé sera un index global tel que l'INEL ou l'ISU mais d'autres possibilités existent selon la situation dans laquelle se trouve le troupeau : choix sur la MP si le niveau de production est bas et le TP déjà élevé ou augmentation du poids de TP dans un INEL revu si le niveau de production est déjà élevé et le TP bas.

Par ailleurs, on sait que l'effet génétique n'est pas le seul effet à prendre en compte dans la variation de la composition du lait, le milieu et les conditions d'élevage ont également un rôle très important ; c'est pourquoi, depuis 1990, la méthode BLUP (Best Linear Unbiased Prediction), ou modèle animal, a été élaborée : elle permet d'évaluer toute l'information disponible sur un individu (= effet génétique + effet du milieu) en minimisant les approximations ; cette méthode donne une bonne comparaison des animaux entre eux et permet également de mesurer des différences génétiques entre troupeaux et régions (50,94).

Les reproducteurs sont ainsi estimés d'après leur propre performance et celle de leurs apparentés quelles qu'elles soient (27).

6.3.2.4 Mise en œuvre dans l'élevage

La première étape consiste à évaluer les besoins de renouvellement, puis à classer les reproducteurs en fonction du critère principal retenu (index INEL ou ISU ...) et des critères secondaires (morphologie, résistance aux maladies ...). On peut également tenir compte de la forme allélique de la κ caséine en notant supérieurement les taureaux AB ou BB.

Il est nécessaire de retenir plusieurs taureaux afin d'éviter de miser sur une seule estimation (puisque les résultats n'apparaissent que quelques années plus tard : les jeunes taureaux présents aujourd'hui dans les coopératives d'insémination seront les pères des vaches de l'an 2005 et au-delà). Pour les vaches, on inclut également les génisses qui s'intégreront prochainement au troupeau (94).

Avec un fort taux de renouvellement des vaches laitières (1 sur 3 tous les ans) et donc une prolificité faible, le gain génétique dépend essentiellement de la valeur génétique des taureaux utilisés qu'on choisira à l'extérieur pour éviter les effets défavorables de la dérive génétique et de la consanguinité.

Ensuite, on pratique l'insémination artificielle (cas le plus répandu actuellement) sur les vaches du troupeau et on attend patiemment les résultats de la descendance.

CONCLUSION :

L'amélioration génétique de la composition du lait peut entraîner une réelle avancée pour les éleveurs et les transformateurs mais elle nécessite également de peser l'importance économique des taux et de la quantité de lait.

De plus, les réponses attendues à cette amélioration ne se fait sentir que quelques années plus tard, il faut également recentrer tous les efforts sur des facteurs de conduite du troupeau responsables de variation à court et moyen termes tel que l'alimentation.

CONCLUSION

Le but de cette étude a été de démontrer que le lait, matière première de l'industrie laitière est une ressource considérable mais complexe.

A travers son homogénéité apparente, le lait révèle de nombreuses variations aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif qui rend toute transformation difficile.

En effet, à partir d'une matière première variable, l'industriel doit fabriquer, un produit laitier stable et constant et cela en respectant les contraintes technologiques, économiques et hygiéniques.

L'industrie laitière a donc mis en œuvre une technologie qui permet d'une part d'exploiter tous les constituants du lait et d'autre part de s'adapter aux variations liées à l'animal, au milieu ou encore à la conduite d'élevage.

Nous avons donc vu que l'homme pouvait agir à plusieurs niveaux :

- sur la production du lait, elle-même, en maîtrisant les outils génétiques et en adaptant les performances des races laitières aux besoins des transformateurs et à la demande des différents intervenants de la filière.
- sur la transformation du lait, en développant les techniques de séparation des constituants, permettant ainsi d'agir sur chacun des composants indépendamment les uns des autres.

Le lait est donc une matière première aux multiples ressources et ouvert encore à de nombreux progrès technologiques qui permettront d'améliorer la rentabilité industrielle et de répondre aux besoins des consommateurs toujours en quête de plus d'innovation et de sécurité

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 Maîtrise de l'hygiène et de la sécurité dans la filière lait : les acteurs et partenaires principaux

Figure 1.2 Composition moyenne du lait de vache

Figure 1.3 Evolution du lait cru abandonné vers 20°C

Figure 2.1 Synthèse du lactose

Figure 2.2 Structure du lactose

Figure 2.3 Evolution annuelle des teneurs du lait en vitamines

Figure 3.1 Structure primaire de la caséine k-CN-B-1P

Figure 3.2 Evolution annuelle du TP et liaison avec le rendement laitier

Figure 6.1 Principales corrélations génétiques intra-raciales en sélection laitière

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Phases, subdivisions et dimensions des constituants du lait à la traite

Tableau 2.1 Composition glucidique du lait et du colostrum

Tableau 2.2 Constante physique du lactose

Tableau 2.3 Classification des protéines

Tableau 2.4 Les trois groupes principaux des protéines du lactosérum

Tableau 2.5 Propriétés et caractéristiques des protéines solubles

Tableau 2.6 Composition vitaminique moyenne du lait cru

Tableau 3.1 Composition moyenne d'une micelle de caséine

Tableau 3.2 Fréquences alléliques aux locus de 6 lactoprotéines principales dans les principales races bovines françaises

Tableau 4.1 Matière grasse du lait : contenu du globule gras en émulsion dans la phase aqueuse

Tableau 4.2 Estimation de la composition de la membrane du globule gras

Tableau 5.1 Différents types cellulaires du lait en absence d'infection

Tableau 6.1 Performance moyenne par race en 1998 dans les résultats nationaux du Contrôle Laitier

Tableau 6.2 Evolution du TP et TB au cours des dix dernières années

Tableau 6.3 Paramètres génétiques de base en sélection laitière

Tableau 6.4 Poids des constituants de l'index ISU dans les trois principales races laitières

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) ADRIAN, J. Les vitamines. In : CEPIL. Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL - INRA, Paris, 1987,113-119.
- (2) ALAIS, C. Science du lait. Sépaic, Paris 1984.
- (3) ALCOUFFE, B Transformation du lait par le producteur : techniques, réglementations, économie. Thèse de doctorat vétérinaire, Alfort 1988.
- (4) AMRAM, Y, DELESPAUL, G, VANDEWEGHE, J, et al Le refroidissement du lait et son comportement en fromagerie. *Rev Lait Fr* 1982 , **404** : 53-57.
- (5) ANNET, P La lipolyse du lait, généralités, influence du transport. Thèse de doctorat vétérinaire, Lyon 1987.
- (6) AUCLAIR J. Conservation du lait à la ferme, collecte et transport aux laiteries. In : CEPIL . Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL – INRA, Paris, 1987, 231-239.
- (7) BADINAND, F. Maîtrise du taux cellulaire du lait. *Rec. Méd. Vét.*, **170** (6/7) : 1994, 419-427.
- (8) BANKS W . Milk lipids. *International Dairy Federation, Bull*, 1991, **260**, 3-6.
- (9) BARILLET, F ; BONAÏTI, B, BOICHARD, D. Amélioration génétique de la composition du lait des brebis, des chèvres et des vaches. In : CEPIL . Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL – INRA, Paris, 1987, 129-138.
- (10) BEGUIN, M . La qualité du lait : point de vue des transformateurs et conséquences sur le système de paiement. *Rec. Méd. Vét.*, 1994, **170** : 345-351. Bitman J, Wood D,
- (11) BLANC . Les protéines du lait à activité enzymatique et hormonale. *Lait*, **62** : 1982, 350-395.
- (12) BLOCH, N, BONNEFOY, J, LE MEZEC, P, VERRIERE E. La sélection et les index chez les bovins laitiers, 1^{ère} édition remise à jour, INRA ITEB INAB. 1994
- (13) BONAÏTI, B. Composition du lait et sélection laitière chez les bovins. *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix, INRA*,1985, **59** : 51-56.
- (14) BONTEMPS, S. Mise au point d'une nouvelle méthode de numération des cellules du lait : utilisation du proche IR. Thèse de doctorat vétérinaire, Alfort 1999.
- (15) BRULE, G. Les minéraux. In : CEPIL. Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL - INRA, Paris, 1987,87-98.
- (16) BRULE, G. Adaptation des laits aux contraintes technologiques. In : CREAL. Quel(s) lait(s) pour demain. ARILAIT-RECHERCHE, Paris, 1996, 39-46
- (17) BRULE, G, LENOIR J. La coagulation du lait. In : Eck A.,. Le fromage. Lavoisier, Paris, 1987, 1-21.
- (18) BRUNNER J (). Cow milk proteins : twenty five years of progress. *J dairy Sci*, 1981, **64** : 1038-1054.

- (19) BRUNSCHWIG, P, HEUCHEL, V. Bilan des recherches en France sur l'incidence des facteurs génétiques et alimentaires. In : Quel(s) lait(s) pour demain ?. CREAL, 2d. Arilait Recherche, Paris, 1996.
- (20) CAYOT, P, LORIENT, D. Structures et technofonctions des protéines du lait. Arilait Recherche, Lavoisier, Paris, 1998.
- (21) CHILLIARD, Y, LAMBERET, G. La lipolyse. In : CEPIL Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL – INRA, Paris, 1987, 231-239.
- (24) CHIN, D, NG-KWAI-HANG, KF. Application of mass spectrometry for the identification of genetic variants of milk proteins. In : Milk protein polymorphism . *International Dairy Federation*, 1997, 334-340.
- (25) COGITORE A. Traité pratique de réglementation laitière (mise à jour permanente). Sapin d'or, Epinal, 1999.
- (26) COLIN, O, LAURENT, F, VIGNON, B . Variations du rendement fromager en pâte molle. Relations avec la composition du lait et les paramètres de la coagulation. *Lait*, 1992, 72 : 307-319.
- (27) COLLEAU, JJ, MOCQUOT, Jc, BARILLET, F, *et al.* Evolution de la sélection des espèces laitières en France. *Renc. Rech. Ruminants*, 1997, 4 : 163-170.
- (28) COULON, JB. Facteurs de variation du taux protéique du lait de vache en exploitation. *INRA Prod. Anim.*, 1991 ,4 (4) : 303-309.
- (29) COULON, JB (Effets du stade physiologique et de la saison sur la composition chimique du lait de vache et ses caractéristiques technologiques. *Rec. Med. Vét.*, 1994, **170** (6/7) : 367-374.
- (30) COULON, JB. Influence des facteurs nutritionnels sur le taux protéique du lait. *Rec. Med. Vét.*, 1994, **170** (6/7) : 375-380.
- (31) DESTOUET, JL . Les protéines du lait : variations de leurs concentrations et applications. Thèse de doctorat vétérinaire, Toulouse, 1989.
- (32) DOHOO, IR, Meek AH . Somatic cell counts in bovine milk. *Can. Vet. J.* 1984, **23** :119-125.
- (33) DUCROCQ, V . Mise en place et premiers résultats de l'évaluation génétique des taureaux laitiers sur la longévité de leur filles. *Renc. Rech. Ruminants*, 1997, **4** : 215-218.
- (34) EIGEL, WN, BUTLER, JE, ERNSTROM *et al.* . Nomenclature of proteins of cow's milk : fifth revision.. *J dairy Sci*, 1984, **67** : 1599-1631.
- (35) EL-NEGOUMY AM . Effects of polymorphic composition of calcium caseinate sols on their stability to rennin. *J Dairy Res* 1972, **39** : 373-379.
- (36) ENGEL C . Influence de l'installation de traite, de la technique de traite et des lésions des trayons sur la concentration du lait de vache en cellules somatiques. Thèse de doctorat vétérinaire, Nantes, 1998.
- (37) ENJALBERT F. Alimentation et composition du lait de vache. *Point Vét.* 1993, **25** (156) : 769-778.
- (38) GAUCHOT, JY. Machine à traire et hygiène de la mamelle, approche pratique. Thèse de doctorat vétérinaire, Toulouse, 1993.

- (39) GILLIS, JC. Les contraintes et besoins des transformateurs. In : CREAL, Quel(s) lait(s) pour demain ?. Arilait-recherche, Paris, 1996, 23-28.
- (39b) GOUDEDRANCHE, FAUQUANT, MAUBOIS. Fractionation of globular milk fat by membrane microfiltration. INRA : 1995, 93-98.
- (40) GOURSAUD, J. Le contrôle de la qualité du lait, matière première de l'industrie. In : CEPIL . Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL - INRA, Paris, 1987, 385-394.
- (41) GOURSAUD J. Coagulation enzymatique du lait. In : Scriban R. Biotechnologie. Lavoisier, Paris, 1999, 365-401.
- (42) GOT R. Les enzymes du lait. *Ann Nutr Alim*, 1997, **25** : A291-A311.
- (43) GRIPPON, JC. La protéolyse. In : CEPIL. Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL – INRA, Paris, 1987, 231-239.
- (44) GROSCLAUDE, F (1988). Le polymorphisme génétique des principales lactoprotéines bovines. *INRA Prod. Anim.* **1** : 5-17.
- (45) GRUMMER R . Effect of feed on the composition of milk fat. *J Dairy Sci*, 1991, **74** : 3244-3257.
- (46) GUEGUEN L. Apports minéraux par le lait et les produits laitiers. *Cah. Nutr. Diet.*, 1995, **3**, 213-217
- (47) HARDING, F, MARSCHALL, KR . Terminology for milk protein fractions. *International Dairy Federation Bull.*, 1998, **329**, 30-31.
- (48) HARTHEISE, M . La maîtrise de la contamination du lait par les spores butyriques. *Rec. Méd. Vét*, 1994, **170** : 429-436.
- (49) HODEN, A, COULON JB. Maîtrise de la composition du lait : influence des facteurs nutritionnels sur la quantité et les taux de matières grasses et protéiques. *INRA Prod. Anim.*, 1991, **4** (5) : 361-367.
- (50) HOERNER, G. Contribution à l'étude de la qualité du lait : objectifs, stratégies, importance de la traite ; impact de l'opération M.I.L.L.Q. Thèse de doctorat vétérinaire, Lyon, 1995.
- (51) ICHILCZYK-LEONE, J, AMRAM, Y, SCHNEID N, LENOIR J. Le refroidissement du lait et son comportement en fromagerie. *Revue laitière française*, 1991, **401** : 7-14.
- (52) JACQUET J. Les cellules somatiques du lait. In : CEPIL. Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL - INRA, Paris, 1987, 113-119.
- (53) JAKOB, E. Genetic polymorphism of milk proteins. *Bulletin of the IDF*, 1994, **298** : 17-27.
- (54) JENSEN, RG. Handbook of milk composition. Academic Press, San Diego, 1995.
- (55) JENSEN, RG, BLANC, B, PATTON S. Particulate constituents in human and bovine milks. In : JENSEN, RG . Handbook of milk composition. Academic Press, San Diego, 1995, 50-62.
- (56) JENSEN, RG, NEWBURG, DS. Bovine milk lipids. In : JENSEN, RG . Handbook of milk composition. Academic Press, San Diego, 1995, 543-575.
- (57) KEENAN, TW, PATTON S. The milk lipid globule membrane. In : JENSEN, RG Handbook of milk composition. Academic Press, San Diego, 1995, 5-50.

- (58) LABADIE, JC, DOUSSET, X. Les pseudomonas. In : BOURGEOIS, MESCLE, ZUCCA. Microbiologie alimentaire, vol 1. ed. Lavoisier, Paris, 1988.
- (59) LAMY DEHOVE, Réglementation des produits, Qualité, Répression des fraudes (mise à jour permanente), Lamy SA, Paris, 1999.
- (60) LANDRY, S, MAURISSON, E. L'économie laitière en chiffres. CNIEL, Paris, 1999.
- (61) LEE, CS, WOODING, FBP, KEMP, P. Identification, properties and differential counts of cell populations using microscopy of dry secretions, colostrum and milk from normal cows. *J. Dairy Res*, 1980, **47** :39-50.
- (62) LE MEZEC, P, BOULANGER, P. Le taux de matière grasse : impact de la sélection sur son évolution passée et prévisible. *Renc. Rech. Ruminants*, 1997, **4** : 179-182.
- (63) LEGRY, P. Influence de la collecte sur la qualité du lait. Thèse de doctorat vétérinaire, Lyon, 1988.
- (64) LENOIR, J. Les caséines du lait. *Rev lait franç*, 1985, **440** : 17-23.
- (65) LENOIR, J, REMEUF, F, SCHNEID, N. L'aptitude du lait à la coagulation par la présure. In :ECK, Le fromage. Lavoisier, Paris, 1994.
- (66) LINDEN, G. Les enzymes. In : CEPIL. Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL-INRA, Paris, 1987, 121-127.
- (67) LIU Y Contribution à l'étude des relations entre numérations cellulaires et bactériologie des laits de quartiers en cas d'infection subclinique chez la vache. Mémoire de maître ES sciences vétérinaires Alfort, 1988.
- (68) MAHIEU. Collecte du lait. In : LUQUET, FM. Laits et produits laitiers. Lavoisier, Paris, 1985, tome 1.
- (69) MAHIEU. Facteurs de variation de la composition du lait. In : LUQUET, FM. Laits et produits laitiers. Lavoisier, Paris, 1985, tome 1.
- (70) MAHIEU. Modification du lait après récolte. In : LUQUET FM. Laits et produits laitiers. Lavoisier, Paris, 1985, tome 1.
- (71) MARTIN, B, COULON, JB. Facteurs de production du lait et caractéristiques des fromages. I. Influence des facteurs de production sur l'aptitude à la coagulation des laits de troupeaux. *Lait*, 1995, **75** : 61-80.
- (72) MAUBOIS, JL., BRULE, G. Utilisation des techniques à membranes pour la séparation, la purification et la fragmentation des protéines laitières. *Le Lait*, 1982, **62** : 484-510.
- (73) MC MAHON, DJ, BROWN RJ. Composition, structure and integrity of casein micelles : a review. *J dairy Sci*, 1984, **67** : 499-512.
- (74) MC MAHON, DJ, MC MANUS, WR. Rethinking casein micelle structure using Electron microscopy. *J. dairy Sci.*, 1998, **81** : 2985-2993.
- (75) MEFFE, N. La lipolyse dans le lait de vache : bien en comprendre les mécanismes et les causes pour mieux la prévenir. *Rec. Med. Vét.* 1994, **170** (6/7) : 399-410.
- (76) MENDY, F. Le rôle essentiel des acides linoléiques conjugués. *Rev lait franc*, 1996, **596** : 19.
- (77) MONTREUIL, J. Les glucides du lait. *Bull Soc Chim Biol*, 1960, **42**, 1399.

- (78) MORRISSEY, PA. Lactose : chemical and physicochemical properties. In : FOX, PF. Developments in dairy chemistry -3. Elsevier, London, 1995, 1-34.
- (79) NEVILLE, MC, ZHANG, P, ALLEN, JC. Minerals, ions, and trace elements in milk. A-ionic interactions in milk. In : Jensen RG. Handbook of milk composition. Academic Press, San Diego, 1995, 577-592.
- (80) NG-KWAI-HANG, KF. A review of the relationship between milk protein polymorphism and milk composition. In : Milk protein polymorphism. International Dairy Federation, 1997, 22-37.
- (81) PAQUES, P. – La clé de la valeur ajoutée : fractionnement et utilisation des constituants du lait. *Canadian Journal of Science*, 1998, **78** : 149-157.
- (81b) PIEN, J. Physicochimie du lait. *Tech Lait*, 1975, **841** : 13-14, **844** : 21-23.
- (82) PIERRE, A. FAUQUANT, T *et al.* Préparation des phosphocaséinates natifs par microfiltration sur membrane. *Le Lait*, 1992, **72** : 461-474.
- (83) PIERRE, A., GOUDEDRANCHE, H., GAREM. Le lait, In : les séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire. Tec et Doc, Londres, 1997.
- (84) POINTURIER, H, ADDA, J. Beurrerie industrielle. La Maison Rustique, Paris, 1969.
- (85) RATTRAY, W , GALLMAN, P, JELEN, P. Nutritional, sensory and physicochemical characterization of protein standardized UHT milk. *Le Lait*, 1997, **77** : 279-296.
- (86) REMEUF, F. Relations entre les caractéristiques physico-chimiques et aptitudes fromagères des laits. *Rec. Méd. Vét.*, 1994, **170** (6/7) : 359-365.
- (87) REMOND, B. Influence du stade de lactation et de l'âge sur la composition du lait. In : Le lait, matière première de l'industrie laitière. INRA publication, Versailles. 1987, 151-159.
- (88) REMOND, B , JOURNET, M. Effet de l'alimentation et de la saison sur la composition du lait. In : Le lait, matière première de l'industrie laitière. INRA publication, Versailles. 1987, 171-185.
- (89) RICHARD, J. La flore microbienne du lait cru, influence des conditions de traite. In : CEPIL. Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL - INRA, Paris, 1987, 113-119.
- (90) ROGUINSKY, M. Influence de la mammite sur la composition, l'analyse et la technologie du lait. *Bulletin des G.T.V.*, 1978, **78** (3) : 1-4.
- (91) RUPP, R.. Evaluation génétique des bovins laitiers sur les comptages de cellules somatiques pour l'amélioration de la résistance aux mammites. *Renc. Rech. Ruminants*, 1997, **4** : 211-214.
- (92) SERIEYS, F. Concentration cellulaire du lait individuel de vache : influence de l'état d'infection mammaire, du numéro, du stade de lactation et de la production laitière. *Ann. Rech. Vét.* 1995, **16** : 255-261.
- (93) SERIEYS, F, AUCLAIR, J, POUTREL, B . Influence des infections mammaires sur la composition chimique du lait. In : CEPIL. Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL – INRA, Paris, 1987, 161-170.
- (94) SEEGERS, H, GRIMARD-BALLIF B. Amélioration génétique de la composition en matières utiles du lait d'un troupeau. *Rec. Méd. Vét.*, 1994, **170** (6/7) : 391-398.

- (95) SIMON, M. Traite mécanique et mammite, mise au point bibliographique. Thèse de doctorat vétérinaire, Toulouse, 1989.
- (96) SOTTIEZ, P. Produits dérivés des fabrications fromagères. In : LUQUET. Laits et produits laitiers Vol 2, Les produits laitiers, transformation et technologies. Ed Lavoisier, Paris, 1985.
- (97) STORRY, JE, GRANDISSON, AS, MILLARD, FORD GD Chemical composition coagulating properties of renning from different breeds and species. *J Dairy Res*, 1983 **50** : 215-229.
- (98) SUREL, O, ALI-HAIMOUD-LEKHAL, D. Composition de la matière grasse du lait de vache et influence des traitements technologiques. *Revue Méd. Vét.*, 1999, **150** (8-9), 681-690.
- (99) SWAISGOOD, HE. Protein and amino acid composition of bovine milk. In : JENSEN, RG. Handbook of milk composition. Academic Press, San Diego, 1995, 464-468
- (100) WAES G, VAN BELLEGHEM, M. Influence de la mammite sur les propriétés technologiques du lait et sur la qualité des produits laitiers. *Le Lait*, 1969, **485-486** : 266-289.
- (101) WALSTRA, P. The milk fat globule natural and synthetic, XX International Dairy Congress, Paris, *International Dairy Federation*, Brussels, 75 5T, 1978, 1-18.
- (102) WEBER, F. Les incidences technologiques des variations de composition du lait. . In : CEPIL. Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL – INRA, Paris, 1987, 297-303.
- (103) WOLSTER, R. Alimentation de la vache laitière. Ed. France Agricole - 3^e édition, Paris, 1997.

TOULOUSE, 2001

NOM : POUGHEON

PRENOM : SANDRA

TITRE :

Contribution à l'étude des variations de la composition du lait et ses conséquences en technologies laitières.

RESUME :

Le lait est une matière première aux ressources considérables mais dont la composition est variable.

Le but de cette thèse est donc l'étude des variations des différents composants du lait en fonction des facteurs intrinsèques (liés à l'animal : race, stade de lactation ..) et des facteurs extrinsèques (liés à l'environnement : alimentation – saison – techniques de récolte et de traitements du lait) de la production laitière.

Cette étude permet en parallèle d'approcher les différentes techniques utilisées par les intervenants de la filière : éleveurs, industriels laitiers, qui permettent de fabriquer des produits laitiers aux caractéristiques constantes et répondant aux exigences des consommateurs, à partir d'une matière première variable.

Nous verrons en particulier l'importance des recherches en matière de génétique animale pour améliorer le rendement de la lactation et l'utilisation, en industrie laitière, des techniques de séparation par membrane, pour séparer les différents constituants du lait.

MOTS – CLES : Lait, Vache, Composition physico-chimique, Variation, Technologie laitière, Amélioration génétique, Techniques membranaires

ENGLISH TITLE : Study of the milk composition's variations of and dairy technology's result .

ABSTRACT :

First of all, in this study, we will investigate what are the internal and external factors which impact the milk component.

Milk producers provide different kinds of milk.

Unfortunately, dairy industries have strong constraints regarding their production.

So, in the second time, we will study what are the various methods which allow to build constant dairy products with different varieties of milk.

KEY WORDS : Milk, Cow, Variations, Dairy technologies, Milk composition, Genetic improvement