

Bioraffinerie du lactosérum

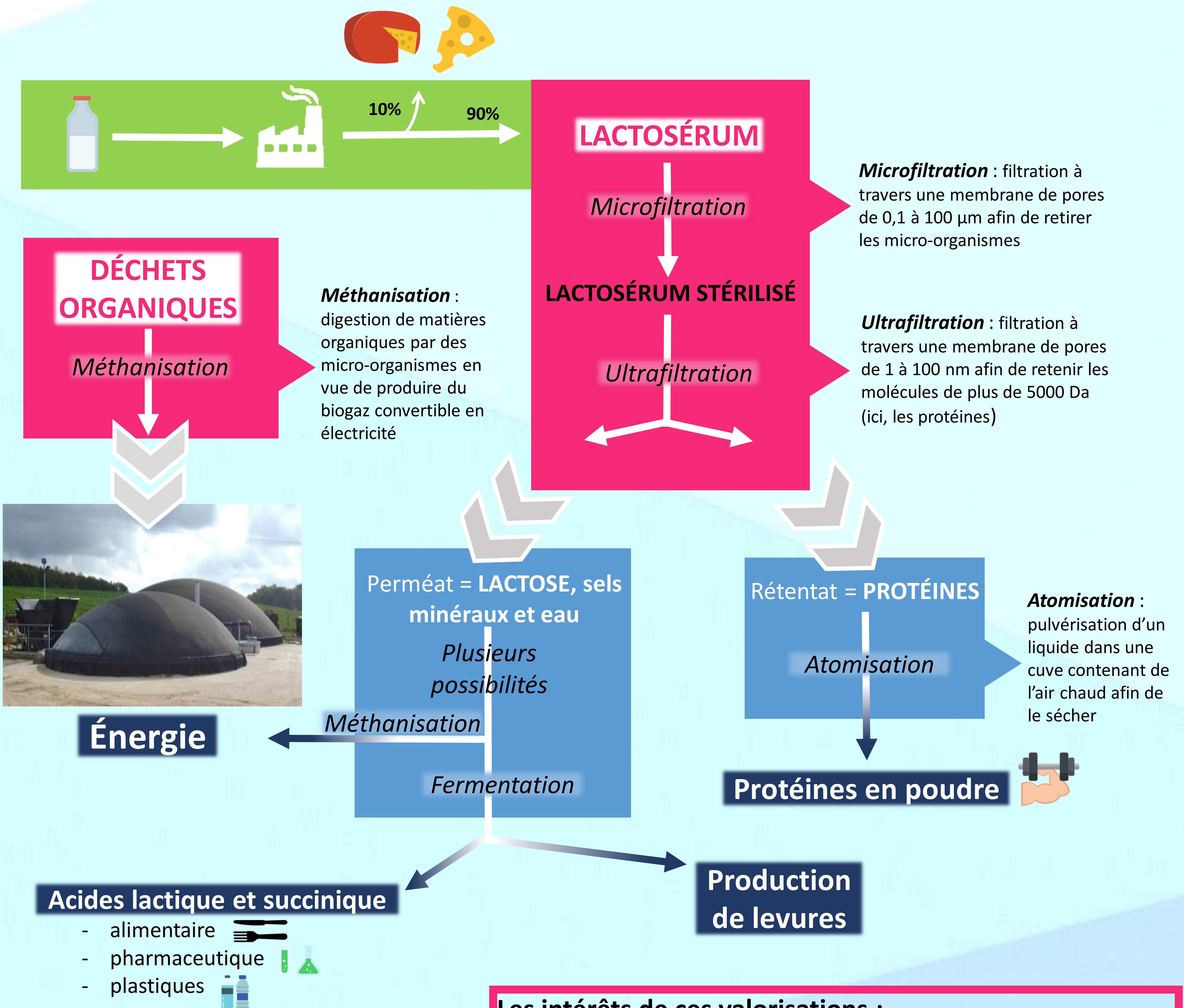
Le **lactosérum** ou « petit lait » est un **co-produit** de l'industrie fromagère qui peut se révéler polluant s'il n'est pas valorisé.

Il est riche en protéines, lactose, minéraux et vitamines hydrosolubles.

La démarche de **bioraffinerie** peut lui être appliquée.

Elle consiste à s'intéresser à la **valorisation de l'ensemble de ses éléments**.

La commune de Neufchâteau s'intéresse à l'intention de coupler cette multivalorisation du lactosérum à un procédé de **méthanisation** des principaux déchets de son territoire.



Les intérêts de ces valorisations :

- valorisation de plus de 200 000 T/an de déchets → **écologique**
 - fabrication de produits à haute valeur ajoutée → **économique**
 - dynamisation de l'activité locale du territoire lorrain
 - éventuelles créations d'emplois
- **social**

ENSAIA

Valorisation du lactosérum

Rapport de projet

Sarah Bardy, Mathilde Bentz, Thalys Bussière, Jérémy Chatras , Louise Fontaine, Maelle
Gaugler, Audrey Lechat, Ombeline Lengronne.

Tuteur : FICK Michel



Mai 2016

Résumé

Le lactosérum, coproduit de l'industrie fromagère, est composé principalement de lactose, protéines et sels minéraux. Malgré sa composition intéressante, celui-ci présente des inconvénients puisque c'est un polluant qui ne peut être rejeté dans la nature et dont le transport est coûteux. Ainsi, il est actuellement valorisé sous forme de poudre pour l'alimentation humaine et animale. Cependant, ce type de valorisation n'aboutit pas à un produit à haute valeur ajoutée. En conséquence, le but de ce projet est la bio-raffinerie du lactosérum, par l'étude et la mise en œuvre de nouvelles voies de valorisation de chacun des composants.

La première étape du travail a consisté à rechercher différents procédés permettant la séparation des constituants du lactosérum ainsi que leurs possibles voies de valorisation. Dans un second temps, les procédés de valorisation choisis seront dimensionnés et une étude concernant les prix d'installation, de fonctionnement et de rendement sera réalisée. De part cette analyse technico-économique, le projet sera éventuellement réalisé, dans la commune de Neufchâteau, notre commanditaire.

Partie 1

Rapport bibliographique

Décembre 2015

Table des matières

I. Lactosérum	3
1. La fabrication du lactosérum.	6
2. Composition des lactosérums	9
II. Séparations des principaux constituants du lactosérum	10
1. Extraction des protéines	10
1.1. Thermocoagulation	10
1.2. Ultrafiltration	10
1.3. Précipitation	11
1.4. Chromatographie	12
2. Extraction du lactose	14
2.1. L'ultrafiltration	14
2.2. La cristallisation	15
2.3. L'extraction par l'alcool	16
3. Extraction des sels minéraux et des vitamines	17
3.1 Par filtration	17
3.2 Electrodialyse et chromatographie.	18
III. Valorisations du lactosérum et de ses composés	19
1. Usage agricole	19
1.1 Nutrition animale	19
1.2 Compost et dépollution	20
2. Valorisation pour un usage alimentaire.	21
2.1 Alimentation générale	21
2.2 Compléments alimentaires	26
3. Valorisation pharmaceutique et cosmétique	29
3.1. À partir du lactose	29
3.2 À partir des protéines	32
3.3. A partir des sels minéraux	33
4. Valorisation énergétique	33
4.1. Les biocarburants	33
4.2. La méthanisation	34

Introduction

Autrefois considéré comme déchet de la fabrication fromagère et donc comme sous-produit, le lactosérum est désormais considéré comme un co-produit. Représentant au moins 85% du lait transformé en fromage, sa valorisation est un enjeu à la fois économique et écologique puisqu'il possède une Demande Chimique en Oxygène (DCO) de 50 à 70g/L ce qui en fait donc un produit polluant ne pouvant plus être rejeté dans la nature. L'intérêt relativement nouveau pour ce produit résulte essentiellement de sa composition riche en protéines, en lactose et en vitamines hydrosolubles.

Le lactosérum frais, sous forme liquide, n'est pas facilement valorisable pour la consommation humaine et n'est donc quasiment pas utilisé sous cette forme. Néanmoins, plusieurs produits à haute valeur ajoutée ont vu le jour depuis 1970, sous une forme concentrée et fractionnée de ce lactosérum. C'est notamment le cas des protéines, grâce à leurs propriétés technico-fonctionnelles et nutritionnelles particulièrement intéressantes en Industrie Alimentaire (Mulvihill and Fox, 1989; Hambraeus, 1992). Il serait également intéressant d'étudier les différentes manières de valoriser tous les composants de ce co-produit. C'est pourquoi, cette étude consistera à étudier le lactosérum dans sa globalité, puis l'extraction des différents composés et enfin les différentes voies de valorisation.

I. Lactosérum

1. La fabrication du lactosérum.

La fabrication des différents types de fromages est illustrée dans le schéma ci-dessous (Fig.1).

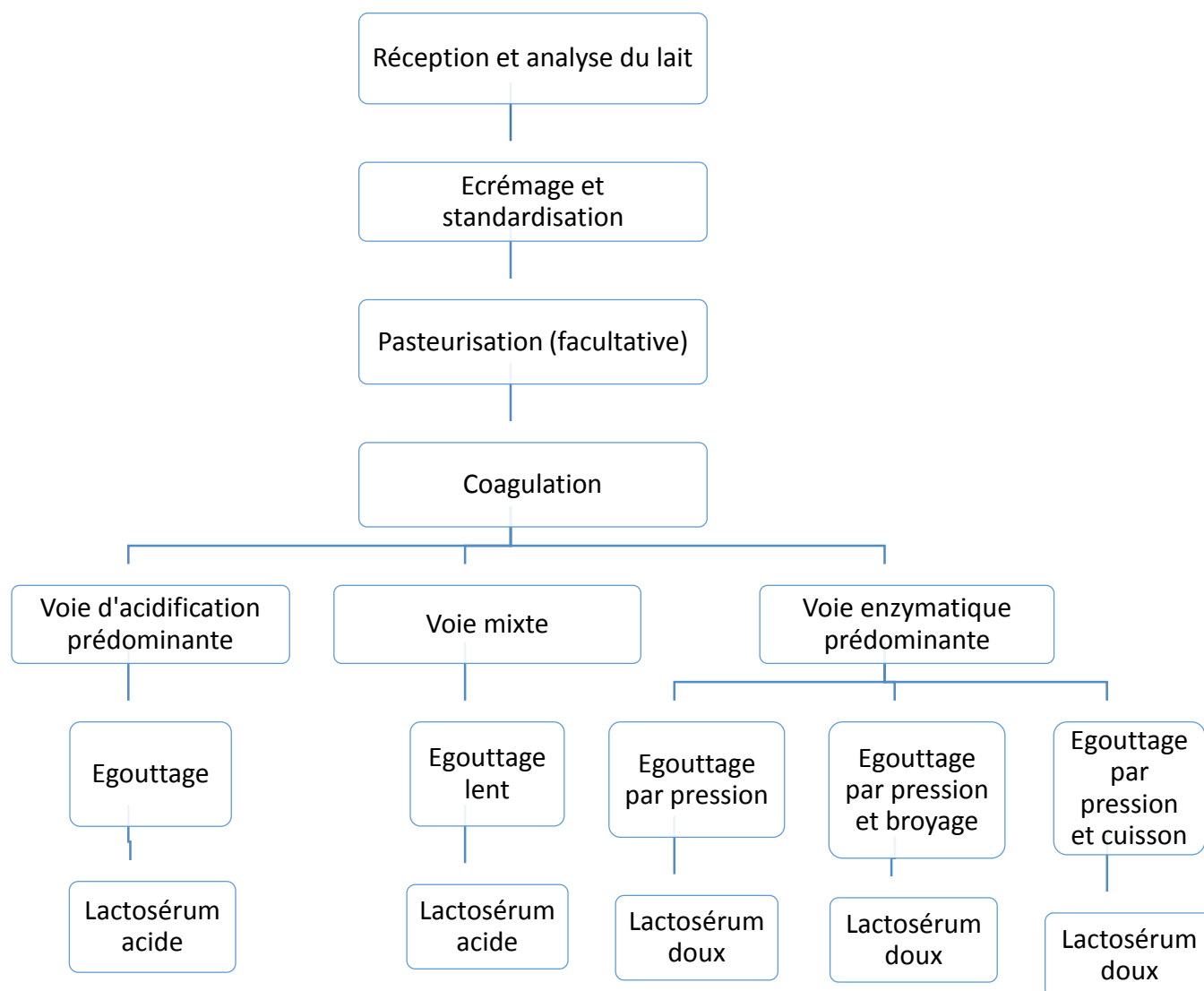


Figure 1 : Production des différents types de lactosérum. Source : personnelle.

1.1. Réception et analyse du lait

Lors de sa réception à la laiterie, le lait entier doit passer un rapide test de qualité au niveau de sa couleur et son odeur.

1.2. Ecrémage et standardisation

Le lait entier est chauffé (généralement à 63°C) et fractionné par une écrémeuse à assiettes coniques qui, par centrifugation, va séparer le lait écrémé de la crème. Par analyse de la composition du lait, le lait est standardisé de manière à avoir la même composition des fromages tout au long de l'année.

1.3. Pasteurisation

La pasteurisation est une étape facultative selon le produit désiré (fromage au lait cru ou au lait pasteurisé). Elle résulte de la combinaison temps-température, afin de se débarrasser de certains micro-organismes indésirables. Le lait sera ainsi chauffé pendant 15 secondes à 72°C, généralement par un échangeur à plaques.

1.4. Caillage

Le caillage est l'une des étapes essentielles de la fabrication fromagère puisqu'elle permet l'obtention du caillé et du « petit-lait » ou lactosérum. Cette étape de coagulation est effectuée soit par voie enzymatique, soit par voie acidifiante.

Dans les techniques fromagères classiques, les deux modes de coagulation ne sont, en réalité, pas utilisés séparément. Seuls leurs ratios varient en fonction du produit désiré.

1.4.1 Voie enzymatique

Le lait coagule généralement par ajout de présure, extraite de la caillette des jeunes ruminants. Celle-ci est constituée de deux enzymes : la chymosine et la pepsine qui vont agir sur les micelles de caséine (Ruettiman, 1987). Les micelles de cette protéine du lait sont constituées de quatre types de caséine : α_{s1} , α_{s2} , β et κ . La stabilité des micelles est dépendante de la κ -caséine qui possède des régions hydrophiles, puisqu'elle est à l'interface entre les caséines hydrophobes de l'intérieur de la micelle et le milieu aqueux environnant.

Les trois phases de la coagulation enzymatique (Guthy, 1977 ; Green, 1981) sont illustrées sur la figure suivante (Fig.2) :

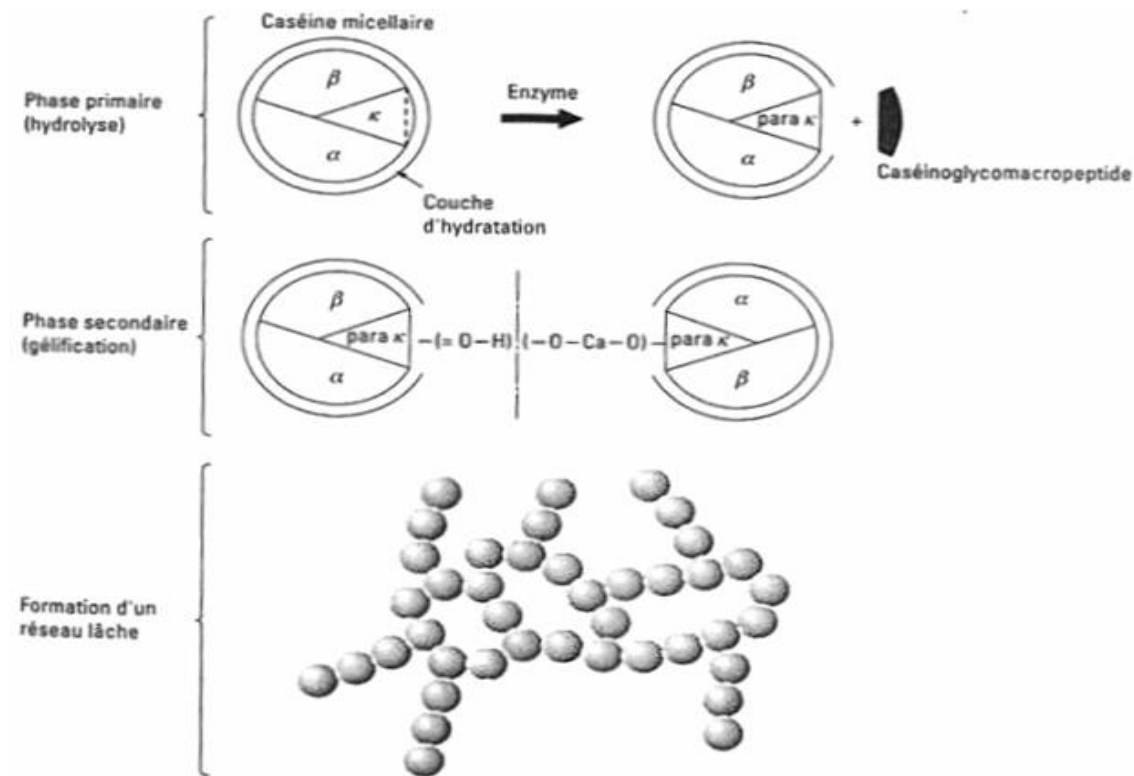


Figure 2: Phases du processus de coagulation enzymatique du lait. Source : St-Gelais, 2002.

Lors de la première étape, la κ -caséine est hydrolysée par l'ajout de la chymosine libérant un caséinomacropeptide et la para- κ -caséine. Le peptide sera relargué dans le sérum alors que la para- κ -caséine reste à la surface des micelles de caséines.

Lors de la deuxième étape, les micelles de caséines commencent à s'agréger entre elles puisque la para- κ -caséine n'a pas la propriété stabilisante de la κ -caséine.

Lors de la troisième phase, l'agréation des micelles va provoquer la formation d'un gel qui devient de plus en plus organisé et structuré (Schmidt, 1973).

1.4.2. Voie d'acidification

La coagulation acide se fait généralement par ajout de bactéries lactiques, comme les Streptocoques et les Lactobacilles, qui vont fermenter le lactose en acide lactique. Ainsi, ce dernier va provoquer une acidification du milieu et induire la déstabilisation et l'agréation des micelles de caséines par diminution de la charge électronégative de celles-ci. Leurs répulsions diminuent jusqu'à atteindre leur point isoélectrique à pH 4,6

et causer l'agrégation des micelles de caséines (Walstra, 1990). Un gel est ainsi formé, comme illustré dans la figure 3 :

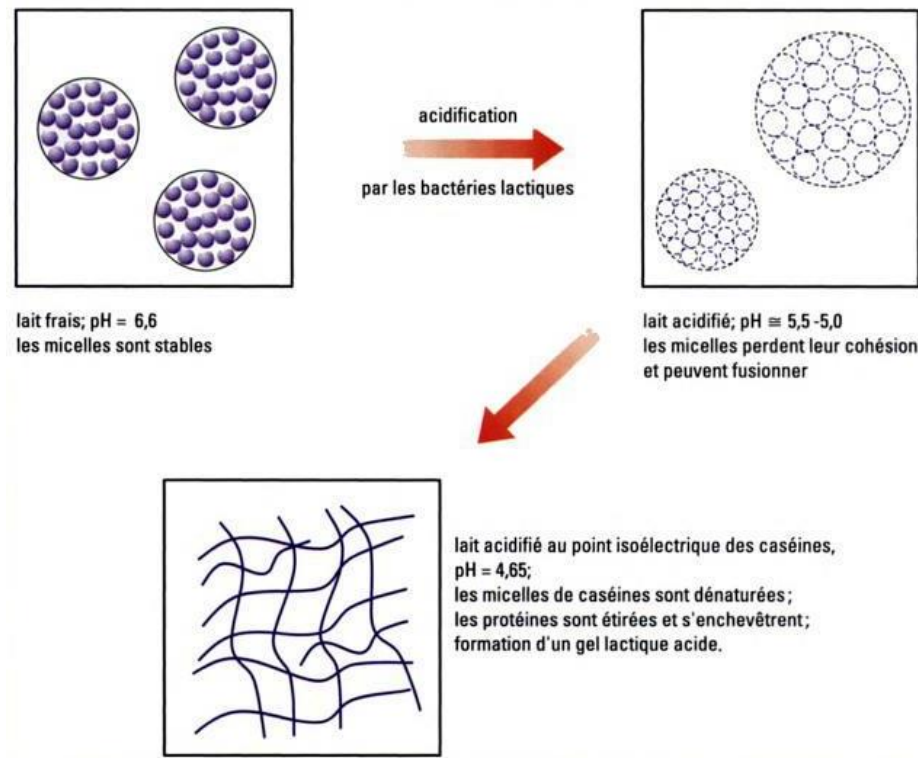


Figure 3 : Formation du gel lactique. Source : Vignola, 2002

1.5 Synérèse et égouttage

Un gel est une matrice protéique qui retient entre ses mailles un liquide. Ce dernier va avoir tendance à être expulsé par la contraction du gel lors de la synérèse. Ainsi, il y aura obtention d'une phase solide (le caillé) et d'une phase aqueuse (le lactosérum). Cet égouttage naturel peut être accéléré et amélioré par des procédés plus complexes (Figure 1).

Le lactosérum obtenu sera acide s'il est produit sous l'effet des bactéries lactiques ou doux par ajout de la présure. Il représente environ 85% du volume initial du lait utilisé dans ces procédés et contient approximativement 50 % des constituants initiaux.

2. Composition des lactosérums

Qu'il soit doux ou acide, le lactosérum est constitué principalement de lactose, de protéines solubles et d'ions minéraux. En fonction des différents paramètres de production utilisés dans les industries laitières, la teneur en caséines résiduelles, en matières grasses et en certains ions minéraux peut varier. La composition des différents lactosérums est décrite dans le tableau ci-dessous (Tab.1).

Tableau 1 : Composition des lactosérums.

	Lactosérum doux (g/L)	Lactosérum acide (g/L)
E.S.T (Extrait Sec Total)	66	63
Protéines	6,6	6,1
Lactose	52	44
Lipides	0,2	0,3
Minéraux	5	7,5
Calcium	0,5	1,6
Phosphore	1	2
Sodium	0,53	0,51
Zinc	0,3	2,3
pH	6	4,6

Le lactosérum doux possède un peu plus de protéines et de lactose puisque ce dernier n'est pas fermenté en acide lactique, contrairement au lactosérum acide qui a été produit par fermentation lactique.

2.1 Composition en protéines

Les protéines sont des molécules constituées d'acides aminés, qui sont soit synthétisées à partir des gènes, soit apportées par l'alimentation. Celles retrouvées dans les lactosérums sont majoritairement la β -lactoglobuline et l' α -lactalbumine. Ces dernières représentent donc entre 65 et 80% des protéines du lactosérum. Le tableau ci-dessous énumère quelques caractéristiques de ces protéines (Tab.2).

Tableau 2 : Caractéristiques et proportion des principales protéines du lactosérum

	Poids moléculaire (kDa)	Concentration (g/L)	Point isoélectrique
β -lactoglobuline	18,36	2,5 - 3	5,4
α -lactalbumine	14,2	1,2	4,4
sérum albumine	66	0,3 - 0,4	5,1
lactoferrine	80	0,10	7,9

La β -lactoglobuline, absente dans le lait humain, possède tous les acides aminés naturels et comporte 58% d'acides aminés indispensables. Elle présente un dipeptide (Glu-Cys) qui peut servir à la synthèse du glutathion, très impliqué dans les réactions d'oxydo-réduction cellulaires, et elle peut aussi servir de transporteur pour la vitamine A et la vitamine D. Du fait de sa forte concentration et de sa composition, elle est la protéine du lactosérum ayant la plus forte valeur nutritive.

L' α -lactalbumine contient également tous les acides aminés naturels et 57% d'acides aminés indispensables. Une stimulation des défenses immunitaire, des propriétés dites « anti-cancéreuses » et antivirales ainsi qu'un peptide bactéricide sont caractéristiques de cette protéine.

La lactoferrine, quant à elle, est une métalloprotéine qui peut se lier à deux atomes de fer ferrique et permet donc son transport et son absorption. En jouant sur le taux de fer, la lactoferrine bovine peut avoir un rôle antibactérien.

2.2. Composition en lactose

Le lactose est le composé majeur de l'extrait sec du lactosérum. Il est un diholoside, composé de deux oses, le galactose et le glucose, reliés par une liaison β 1-4, comme illustré ci-dessous (Fig.4).

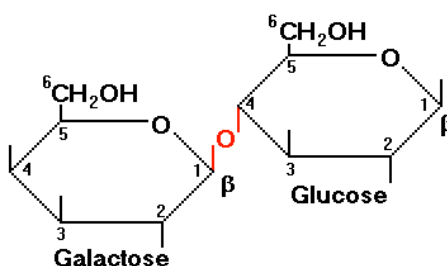


Figure 4 : Le lactose. Source : laitsanslactose.com.

2.3 Composition en sels minéraux et vitamines

Les sels minéraux principaux présents dans le lactosérum sont le sulfate est observée : chlorures, phosphates, citrates de calcium, sodium, magnésium et potassium. Il est à noter que les caractéristiques du lait sont variables selon les espèces, les races, l'environnement, l'alimentation et les états physiologiques et sanitaires des animaux. Toutefois, on estime qu'en moyenne, un litre de lait est composé de 8,5 à 9 g de sels minéraux dont 1,2 g de calcium et 0,95 g de phosphate. Après réalisation du processus de transformation du lait, le lactosérum doux aura une teneur de 2,5 à 4,7 g de minéraux par litre de lactosérum et le lactosérum acide en contiendra entre 4,3 à 7,2 g. Ainsi, le lactosérum contient en moyenne 4,8 g de sels minéraux, soit une réduction d'environ 50 % par rapport à la teneur initiale du lait.

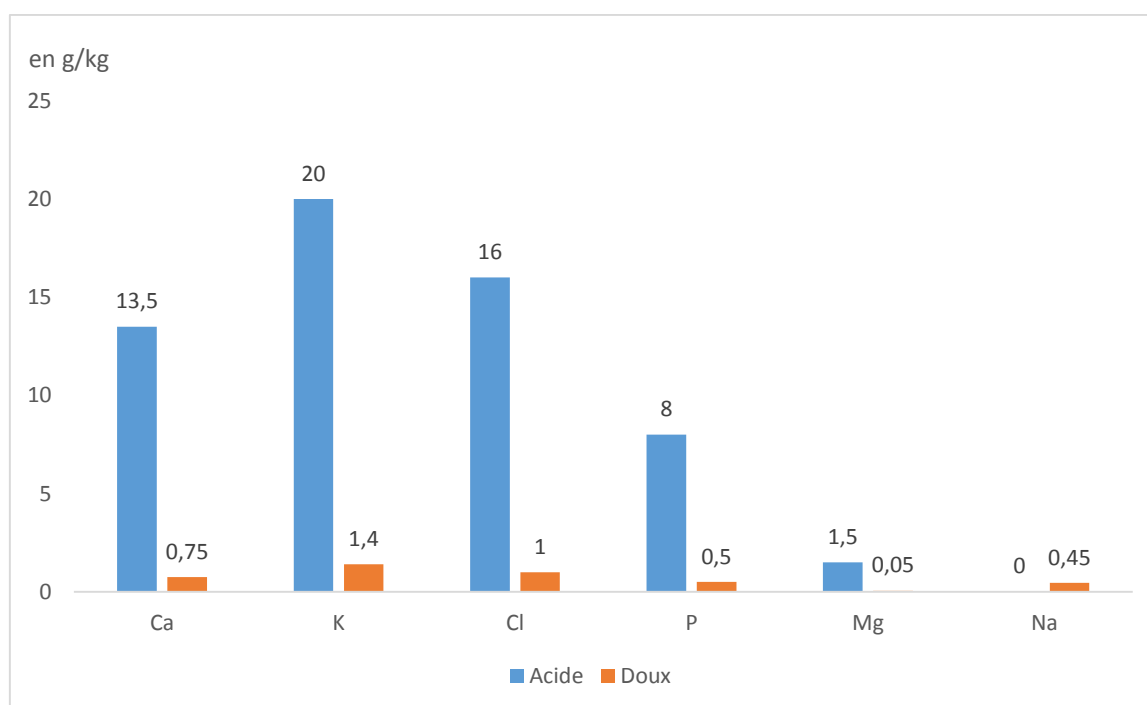


Figure n° 5 : Composition en sels minéraux pour 1 kg de lactosérum

Le lactosérum contient également des vitamines essentielles pour notre organisme et plus précisément des vitamines B2, B5, B12, B6 et C, qui peuvent être utilisées en industrie pharmaceutique ou alimentaire.

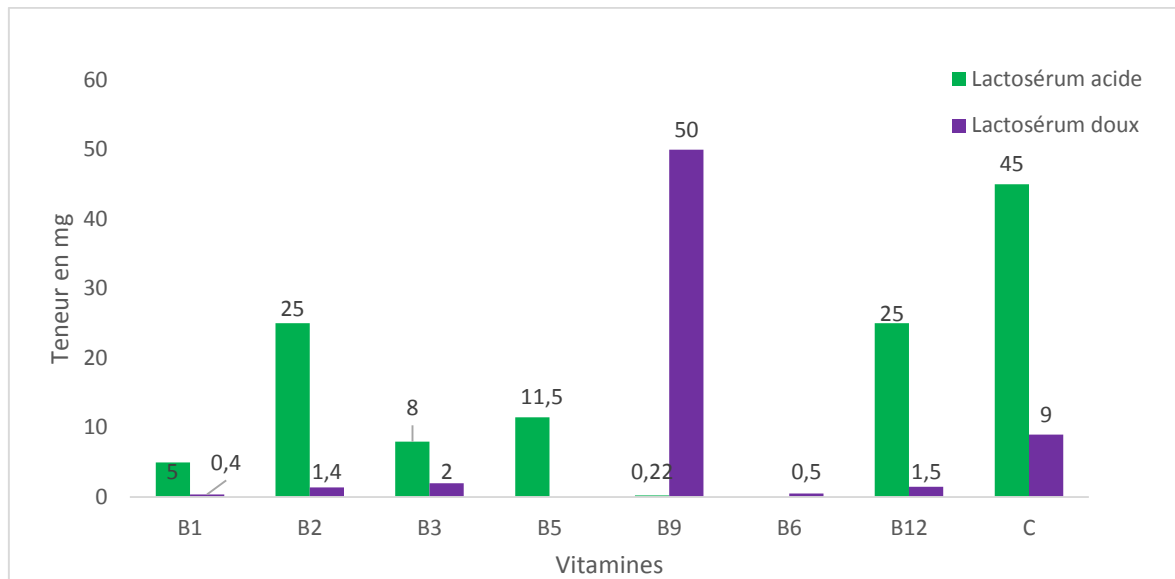


Figure 6 : Composition en vitamines pour 1 kg de lactosérum

II. Séparations des principaux constituants du lactosérum

1. Extraction des protéines

L'apport alimentaire en protéines est indispensable car il existe des acides aminés essentiels qui ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme. De plus, elles possèdent des activités biologiques très variées (enzymatiques, hormonales, structurales et motrices). C'est pourquoi leurs extractions et purifications, visant à obtenir des concentrés, se révèlent utiles.

1.1. Thermocoagulation

Il s'agit du procédé le plus ancien. Il s'agit de porter à ébullition du lactosérum acidifié à pH 4,6-4,7 pour que les protéines précipitent. Leur récupération se fait par filtration ou décantation. La concentration finale du filtrat est environ de 88% pour les protéines. En revanche, les propriétés fonctionnelles des protéines sont altérées.

1.2. Ultrafiltration

L'ultrafiltration permet de récupérer les protéines du lactosérum tout en éliminant le lactose et sels minéraux. Ces opérations assurent la rétention des protéines en amont de la membrane filtrante (rétentat) et laissent apparaître un perméat constitué essentiellement d'eau, de lactose et sels minéraux. Ces procédés peuvent

permettre d'obtenir des concentrés à 80% de protéines. De plus, ils n'altèrent pas la forme initiale de la protéine.

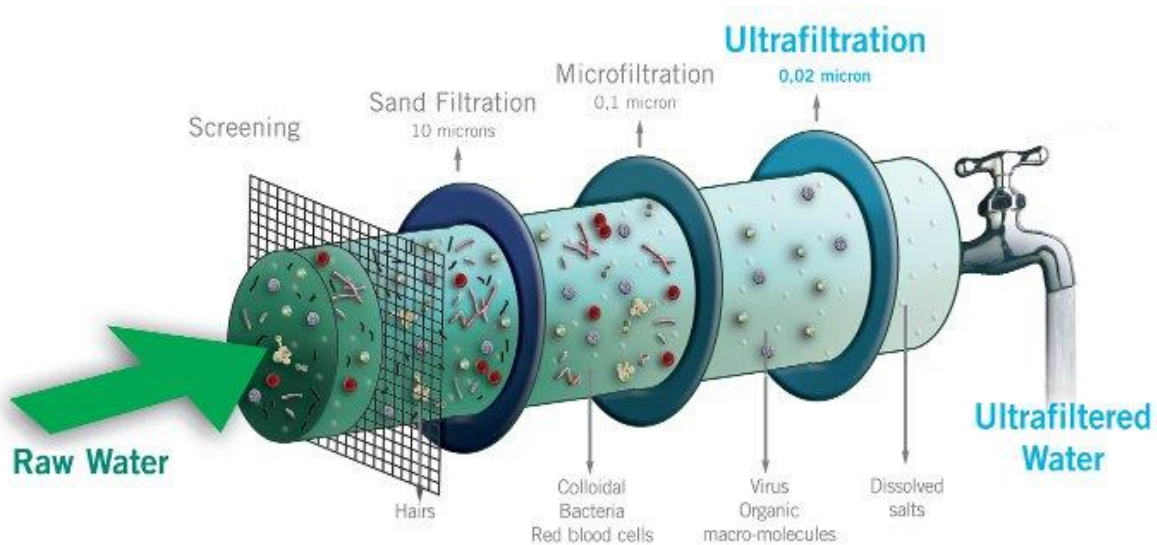


Figure 7 : Représentation des différents types de filtration.

Les protéines peuvent enfin être séparées du rétentat par des techniques de chromatographie et précipitation décrites ci-dessous.

1.3. Précipitation

La précipitation au sulfate d'ammonium permet la séparation des protéines. Cette technique fait appel à leur solubilité différentielle. En changeant la force ionique du milieu, il est possible de faire précipiter et séparer plus ou moins rapidement les différentes protéines. À force ionique faible, les protéines sont solubles dans le milieu (salting in), mais lorsque l'on augmente la force ionique du milieu, elles vont être privées de leur couronne d'eau, vont s'agglomérer et former un précipité (= salting out).

Tableau 3 : Méthode de séparation des protéines par précipitation

Etapas	Manipulation
1 : Ajustement à 20% sulfate	Centrifugation et récupération du culot (fraction C20)
2 : Ajustement du surnageant à 40% sulfate	Centrifugation et récupération du culot (fraction C40)
3 : Ajustement du surnageant à 60% sulfate	Centrifugation et récupération du culot (fraction C60)
4 : Ajustement du surnageant à 80% sulfate	Centrifugation et récupération du culot (fraction C80)
5 : Ajustement du surnageant à 100% sulfate	Centrifugation et récupération du culot (fraction C100)

1.4. Chromatographie

La chromatographie est une méthode de séparation et d'analyse des constituants d'un mélange consistant à faire migrer sur une phase stationnaire (solide ou liquide fixé) une phase mobile (soluté). Le principe est basé sur les différences d'affinité des composés entre la phase stationnaire et la phase mobile. Il existe plusieurs types de chromatographie selon la séparation que l'on souhaite opérer.

Premièrement, on trouve la chromatographie gel-filtration qui est une méthode de séparation des protéines selon leur masse moléculaire. Le support est constitué de billes poreuses avec des trous de taille variable, ce qui permet de séparer les protéines de tailles différentes selon le domaine de fractionnement. Les grosses molécules vont être éluées les premières car elles ne passent pas dans les billes, en revanche les petites

molécules vont pouvoir entrer dans les billes poreuses et vont ainsi mettre plus de temps à migrer (Fig 8).

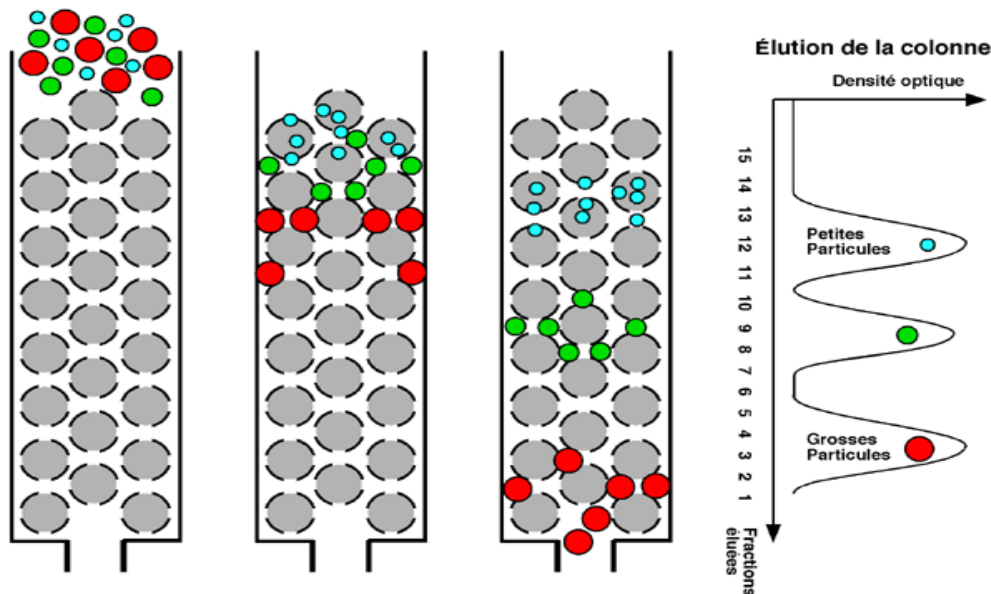


Figure 8 : Principe de la chromatographie gel filtration

Deuxièmement, les échanges d'ions correspondent à une interaction électrostatique entre les protéines du mélange et la résine chargée. Si la résine est chargée positivement, une chromatographie échangeuse d'anions va fixer les protéines chargées négativement et les autres molécules vont être éluées, inversement pour une chromatographie échangeuse de cations. Pour éliminer les molécules fixées sur le support, un tampon d'élution chargé + ou – selon l'échange est ajouté, et il va rentrer en compétition avec les protéines fixées. En augmentant peu à peu la force ionique, l'élution progressive des molécules à moindre interaction électrostatique pour le support est favorisée.

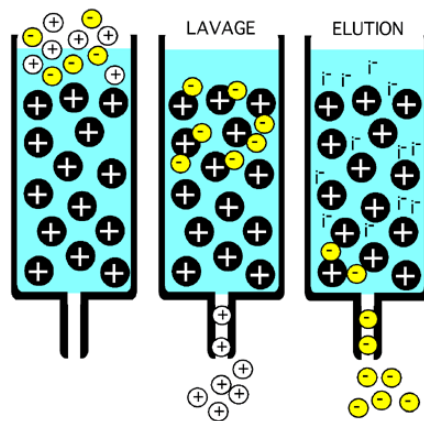


Figure 9 : Méthode de la chromatographie échangeuse d'ions.

Pour finir, le dernier type de chromatographie dite hydrophobe repose sur les interactions hydrophobes entre les protéines et la résine. Cette chromatographie débute avec une force ionique élevée qui avantage ces interactions, puis une diminution de cette force ionique au cours du temps est effectuée pour éluer les protéines selon leur hydrophobicité (Fig.10).

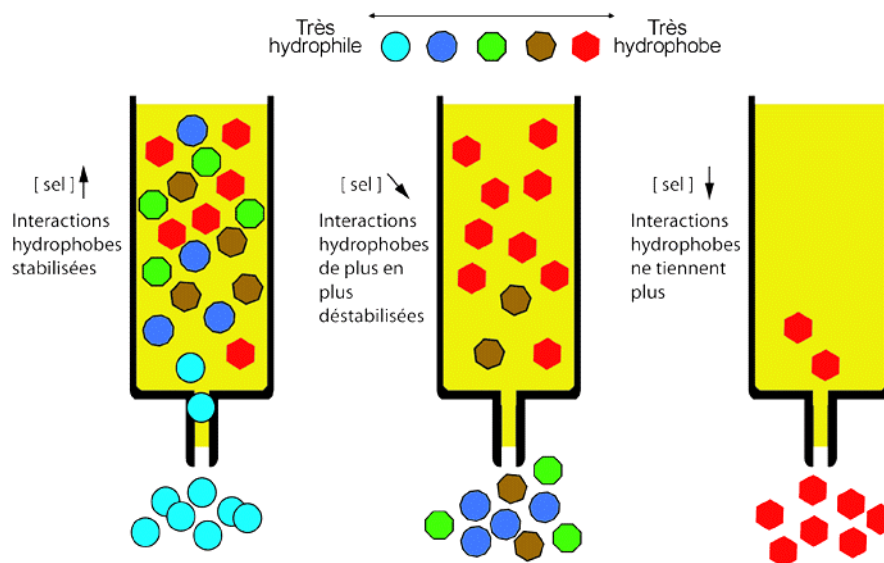


Figure 10 : Principe de la chromatographie hydrophobe.

2. Extraction du lactose

2.1. L'ultrafiltration

L'ultrafiltration, dont le principe est expliqué précédemment, permet de séparer les protéines du perméat de lactosérum. On obtient alors d'un côté le perméat contenant le lactose et les sels minéraux, et de l'autre le rétentat où se trouvent les protéines

(Figure 11). Cette technique est donc une méthode d'extraction du lactose, cependant elle ne permet pas d'obtenir du lactose dépourvu de sels minéraux.

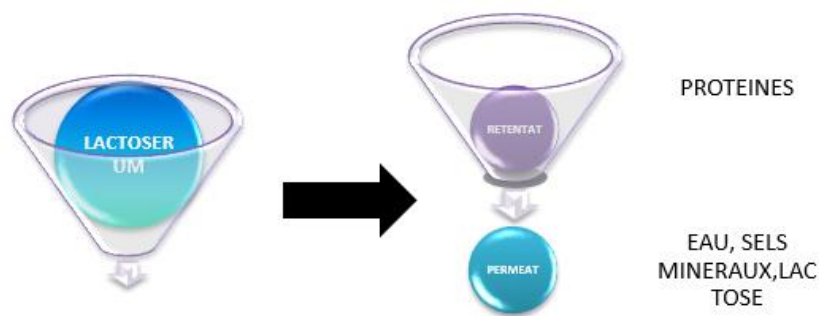


Figure 11 : Principe de l'ultrafiltration

2.2. La cristallisation

L'extraction du lactose peut se faire par un procédé de cristallisation. Préalablement, il faut enlever les protéines (dénaturées ou non) du lactosérum car elles rendent ce procédé moins efficace. La cristallisation est une opération qui a pour but d'isoler un produit, ici le lactose, sous forme de cristaux.

La première étape consiste à concentrer le lactosérum par évaporation. Une fois concentré, ce dernier est soumis à une cristallisation par refroidissement. Les cristaux de lactose obtenus sont séparés puis broyés (ils peuvent parfois être soumis à un raffinage).

La cristallisation se fait généralement en refroidissant la solution mais, pour le lactose, un simple refroidissement ne permet pas d'obtenir un bon rendement. En effet, certains composés peuvent être cristallisés par refroidissement avec un rendement significatif (Figure 11, courbe rose), ce qui n'est pas le cas du lactose. Il faut donc le concentrer auparavant (Figure 11, courbe bleue).

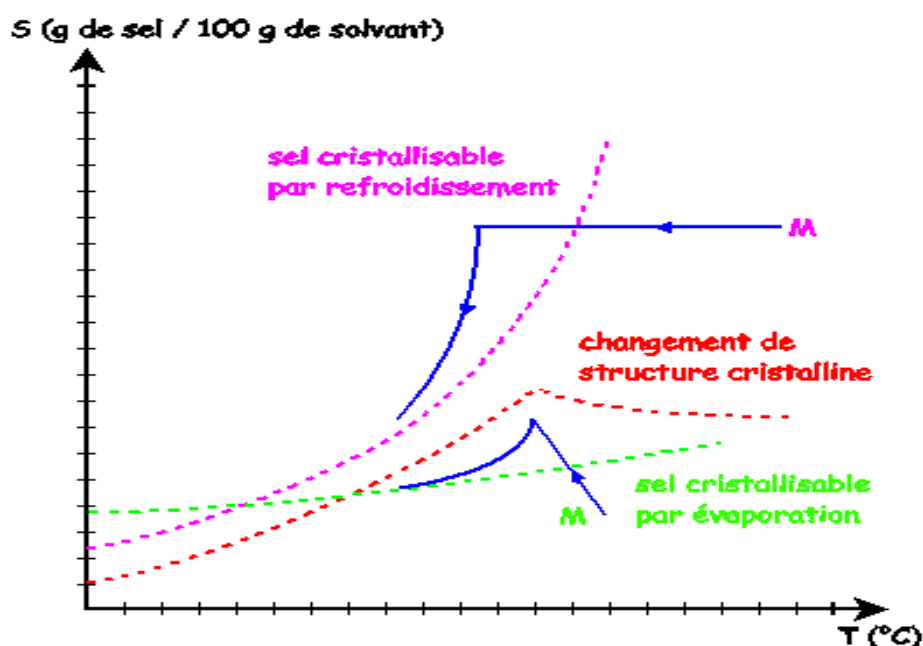


Figure 12 : Allure des courbes de solubilité pour différents sels

Pour augmenter encore le rendement, la cristallisation peut s'effectuer en deux étapes. Au cours de la première phase de cristallisation, on amène le lactosérum concentré à l'état sursaturé et on lui ajoute des germes de cristallisation, puis on maintient cet état saturé par évaporation. On a ainsi un début de cristallisation et donc un mélange eau-mère et cristaux. On procède à un premier essorage par centrifugation pour récupérer les gros cristaux. La deuxième phase de cristallisation consiste à refroidir l'eau-mère afin de provoquer le grossissement des cristaux qu'elle contient. On procède ensuite à un deuxième essorage centrifuge pour récupérer le reste des cristaux.

2.3. L'extraction par l'alcool

En plus de la simple cristallisation, il est possible de réaliser une étape supplémentaire en amont afin d'améliorer le rendement et la qualité du lactose extrait : il s'agit de l'extraction par l'alcool. En effet, différentes études expérimentales ont montré qu'il était possible d'extraire certains composés du petit-lait en utilisant des solutions alcooliques à des concentrations données.

Cependant, la détermination de la concentration et des températures idéales à utiliser pour ce procédé d'extraction a été complexe. Le risque était que les protéines soient dénaturées à cause d'une température trop élevée, ou alors que le rendement et la pureté du lactose obtenu soient diminués.

Au final, il a été constaté que pour une concentration en alcool de 70,7%, il existe une phase où la précipitation par l'alcool n'a aucune conséquence sur les propriétés des protéines mais permet, en additionnant cet alcool au lactosérum, d'obtenir une solution sursaturée en lactose. Le procédé est simple : le galactose engage sa fonction réductrice pour se condenser avec un alcool, ceci crée une liaison O-osidique. Cette liaison permet de le lier avec du glucose et donc d'obtenir du lactose afin de saturer le lactosérum.

Pour séparer les constituants du sérum, il suffit ensuite de les séparer par ultrafiltration comme il a été décrit précédemment puis de faire cristalliser le lactose qui a été récupéré du filtrat (Fig. 13). Le produit obtenu est alors un lactose de très bonne qualité et avec un rendement de 80%.

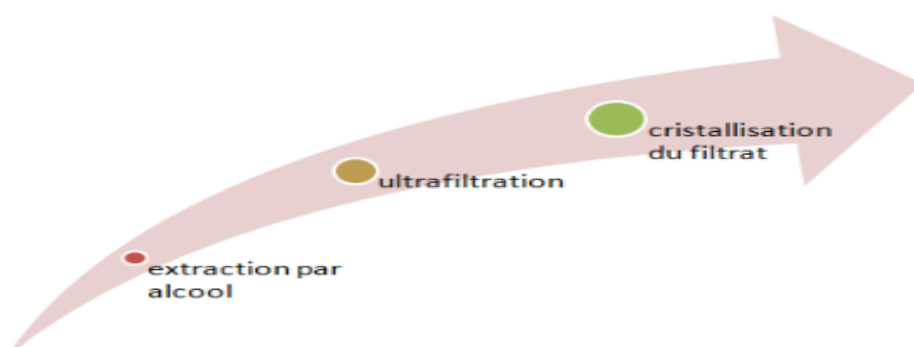


Figure 13 : Améliorations de la séparation du lactose

Ces trois étapes associées permettent alors de séparer le lactose, les protéines et les sels minéraux sans nuire aux propriétés des protéines, d'obtenir un plus grand rendement, d'augmenter la pureté du lactose obtenu.

3. Extraction des sels minéraux et des vitamines

Il existe différents procédés, de nature stérique ou ionique, pour réaliser la séparation des sels minéraux des autres constituants du lactosérum.

3.1 Par filtration

Premièrement, la nanofiltration permet d'isoler les sels minéraux des protéines et des molécules de lactose, on parle alors de déminéralisation du lactosérum. Elle nécessite l'emploi de membranes semi-perméables formées de polymères ou à base de céramique dont la taille des pores est comprise entre 10^{-3} et 10^{-2} μm . L'application d'une

pression de 20 à 40 bar permet de séparer le rétentat, retenu au niveau de la membrane, du perméat, qui passera la membrane. La différence de pression hydrostatique, créée au sein de ce système par l'association d'une pompe et d'une valve, est le moteur de la séparation. Le perméat sera donc uniquement constitué d'eau et de sels minéraux.

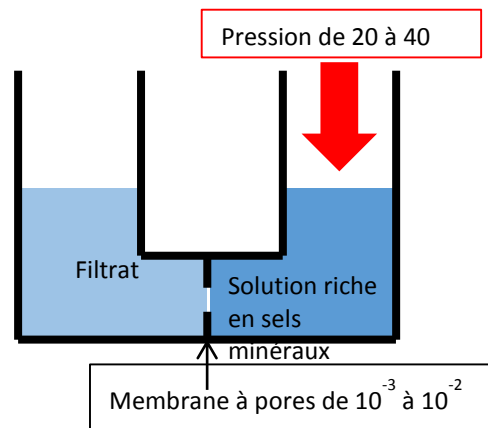


Figure 14 : Principe de la nanofiltration

Afin de pouvoir isoler complètement les sels minéraux de cette phase aqueuse, on peut ensuite réaliser une osmose inverse. Elle utilise une membrane dont les pores possèdent une taille de 10^{-4} à 10^{-3} μm et nécessite une pression de 30 à 60 bar. Le principe de cette séparation est basé sur une différence de pression osmotique entre le rétentat et le perméat.

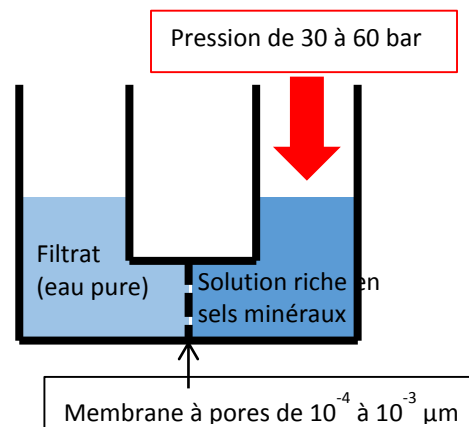


Figure 15 : Principe de l'Osmose Inverse

3.2 Electrodialyse et chromatographie.

L'électrodialyse est une autre technique qui permet de récupérer uniquement les espèces ioniques du lactosérum. Cette extraction implique un échange d'ions à travers

des membranes sélectives implantées entre deux électrodes. La force motrice résulte d'un champ électrique. Deux types de membranes interviennent, les premières sont chargées positivement (anioniques) et les autres le sont négativement (cationiques). Le lactosérum passe au niveau des enveloppes constituées des différentes couches de membrane tandis que de l'eau circule entre ces enveloppes. Les cations du lactosérum vont migrer vers la cathode et ses anions vers l'anode.

La chromatographie à échange d'ions permet aussi d'isoler les ions minéraux. (Fig.9)

Il est à noter que la récupération des sels minéraux à partir de lactosérum liquide est globalement plus élevée que lorsqu'on récupère les minéraux après séchage du lactosérum en poudre. La poudre de lactosérum déminéralisé est obtenue à partir de lactosérum dont on a retiré de façon sélective la plupart des minéraux (70 à 90 %).

III. Valorisations du lactosérum et de ses composés

1. Usage agricole

1.1 Nutrition animale

Depuis de nombreuses années, le lactosérum fait partie de l'alimentation porcine. Aujourd'hui, on évalue à un peu plus d'un million, le nombre de tonnes distribuées chaque année aux porcs. C'est le cas en Franche-Comté où un peu moins de 70% de ces animaux en consomment. Les éleveurs faisant leurs propres fromages (morbier, comté...) donnent le petit-lait directement à leurs porcs alors que certaines fermes en achètent à des coopératives. Le lactosérum représente environ un quart de la ration alimentaire du cochon. L'absorption de lactosérum doit être limitée pour chaque porc car une trop grande consommation induit un porc davantage gras. Cependant, l'engraissement pour un porc consommant du petit-lait est plus long. Ainsi, sa croissance est moins rapide mais le coût de l'alimentation est plus faible pour l'éleveur, le prix des céréales étant une charge importante pour celui-ci. Par ailleurs, un cahier des charges ayant été créé en Franche-Comté, fixe à 182 jours la durée minimum d'engraissement d'un porc consommant du lactosérum. Aujourd'hui, des aides encouragent les éleveurs à utiliser le lactosérum pour leurs animaux.

Certaines entreprises préfèrent récupérer le lactosérum dans les coopératives, puis elles le déshydratent avant de l'incorporer dans la composition de granulés pour les animaux. Entre quinze et vingt litres de petit-lait correspondent à la valeur nutritionnelle d'un kg d'aliment destiné à l'engraissement.

L'intérêt de l'utilisation du lactosérum à des fins de nutrition dans le domaine animal permet de valoriser un sous-produit de bonne valeur énergétique mais aussi de réduire la pollution organique.

1.2 Compost et dépollution

Le lactosérum peut être utilisé dans le compost. Il est introduit dans une cuve recouverte par le biais d'une bâche comme illustrée figure 17. Des vers permettent d'aérer le compost. De l'oxygène est disponible grâce à un tuyau pour renouveler l'air, celui-ci est important car des nombreuses bactéries vont détériorer le lactosérum. Le lactose et d'autres composés organiques sont donc dégradés. Le liquide résiduel de ce compost est moins polluant que le lactosérum initial et peut être traité via une station d'épuration.

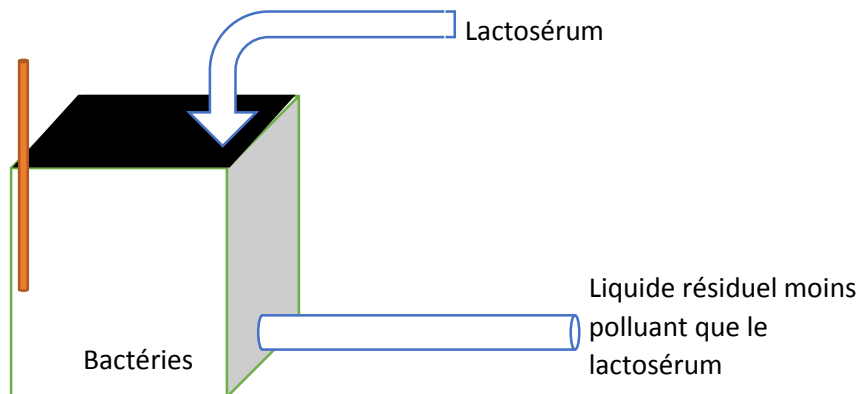


Figure 17 : Schéma de la valorisation via le compost

Un autre procédé a également pour but de rejeter un liquide moins polluant dans l'environnement. Il s'agit d'une filtration sur la pouzzolane qui est une roche volcanique à forte porosité. Le lactosérum est stocké dans une cuve, puis pendant quelques jours, il est filtré sur 80 cm de pouzzolane et 40 cm de galets et cailloux comme illustré figure 18. Des bactéries situées au sein des roches dégradent le lactosérum. Une fois le passage dans la pouzzolane réalisée plusieurs fois, un liquide résiduel est extrait. De même que pour le compost, ce liquide est moins polluant que le lactosérum initial.

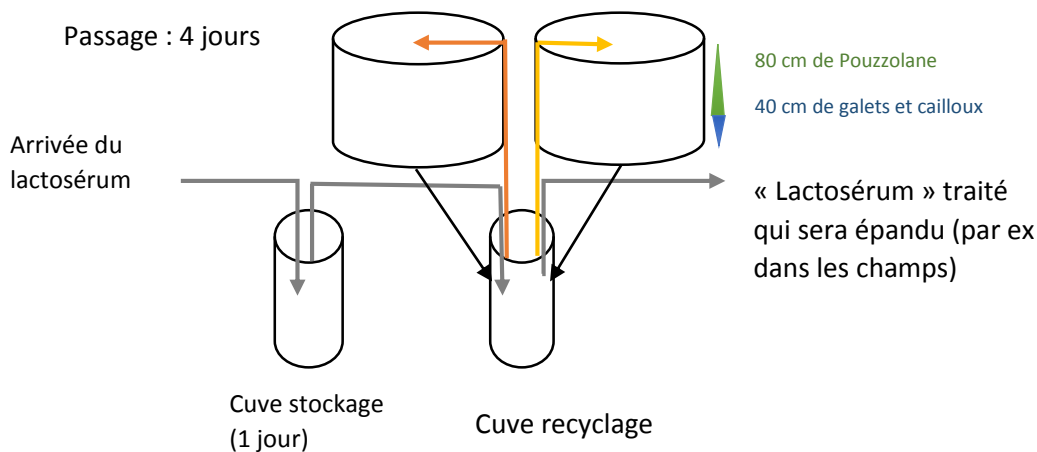


Figure 18 : Schéma de la valorisation via les filtres à pouzzolane

2. Valorisation pour un usage alimentaire.

2.1 Alimentation générale

2.1.1 Le lactose

Le lactose récupéré peut être utilisé directement ou alors après sa transformation, ce qui présente un grand intérêt pour l'industrie alimentaire puisqu'il possède une forte valeur nutritive et de nombreuses propriétés.

D'une part, il est employé dans plusieurs préparations d'aliments destinées aux enfants ou aux animaux. D'autre part, il est considéré comme étant un sucre pur soluble et de faible pouvoir sucrant, capable d'améliorer la texture des aliments. En ce sens, son utilisation dans des préparations alimentaires en poudre ou en tablettes est relativement récurrente. De même, il est souvent un composant de produits diététiques puisque son ajout aurait tendance à diminuer la teneur en graisse de certains produits comme les boissons chocolatées, tout en conservant leurs qualités. Ainsi, les produits finaux obtenus seront donc moins riches en calories. Il peut également servir à réduire l'intensité de la saveur sucrée, ainsi son rôle d'édulcorant est exploité. Par ailleurs, ce sucre cristallise facilement et permet donc d'envisager son incorporation dans des confiseries ou autres produits intégrant du chocolat. Cette cristallisation joue un rôle fondamental dans l'aspect du produit final. Pour l'élaboration des produits en poudre, il

peut faciliter les opérations de séchage et de dispersion. Il intervient aussi en tant que stabilisant des colorants.

En ce qui concerne la valorisation directe, c'est-à-dire sans transformation, il est employé comme substrat de culture pour les bactéries lactiques en charcuterie, mais également dans les domaines de la confiserie, la boulangerie ou la pâtisserie. Il est aussi utilisé comme substrat pour les réactions de Maillard. Cette réaction, aussi connue sous le nom de brunissement non-enzymatique, correspond à l'action d'un sucre réducteur sur une protéine. Globalement, son rôle est de produire des odeurs ainsi que de fixer des arômes et des pigments aux aliments cuits. Plus particulièrement, la réaction de Maillard répond à trois enjeux de l'industrie agroalimentaire : le contrôle du brunissement des aliments (par exemple, les chips ou les pommes de terre frites), l'élaboration d'arômes artificiels et la mise en place des saveurs dans des procédés de fabrication de produits et la prolongation de la durée de conservation.

Pour la valorisation indirecte, il y a nécessairement une hydrolyse du lactose et/ou une fermentation.

Premièrement, il est souvent nécessaire de réaliser l'hydrolyse de ce lactose pour pouvoir le valoriser ensuite. On obtient alors, en présence d'eau, deux monosaccharides, le glucose et le galactose, comme illustré sur la figure 19. Cette hydrolyse peut être chimique ou biologique grâce à des enzymes.

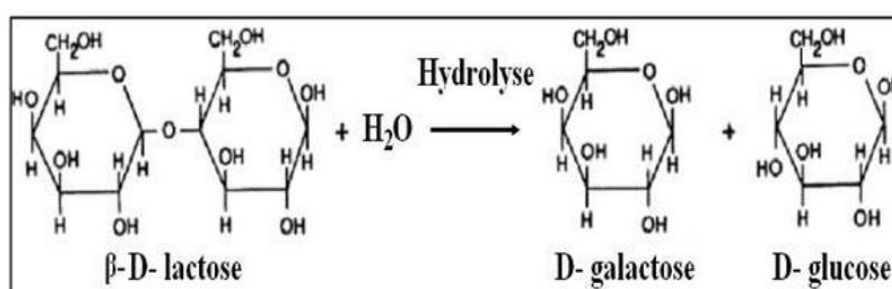


Figure 19 : Hydrolyse du lactose. Source : Thomet (2005)

Elle peut aussi être effectuée à partir de CO₂ (figure 20) :

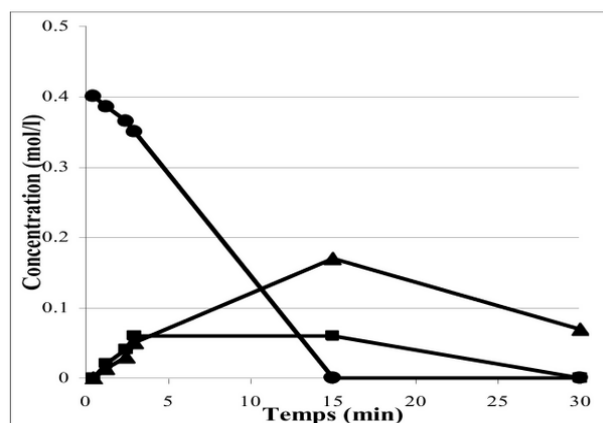


Figure 20 : Hydrolyse du lactose à 200°C et 2758 kPa (g) par le dioxyde de carbone (CO₂), Source : Eloutassi,2011.

Une fois hydrolysé, le lactose propose d'intéressantes applications et ce, particulièrement dans les confiseries, les desserts, les glaces, la biscotterie et la biscuiterie. Il peut aussi intervenir dans l'alimentation animale.

D'un autre côté, la fermentation est également un moyen de valoriser le lactose. La voie de fermentation est une des voies les plus importantes de la valorisation du lactose. Il en existe différentes sortes comme la fermentation lactique, la fermentation bactérienne et la fermentation à base de levures entre autres.

En ce qui concerne la fermentation lactique, elle permet de synthétiser de l'acide lactique à base du glucose récupéré après hydrolyse et de certaines bactéries (par exemple, *L.Bulgaricus*). Ce processus est souvent utilisé en fromagerie. L'intérêt de la formation de l'acide lactique est qu'il permet une meilleure conservation des aliments. En effet, sa production a pour conséquence une acidification du milieu. Celle-ci neutralise alors le développement des micro-organismes lorsqu'ils sont laissés à l'air libre, c'est-à-dire la putréfaction. Certaines bactéries, dont des pathogènes, sont même éliminées. Ce processus s'arrête automatiquement lorsque le pH se situe aux environs de 4. L'équation bilan de cette réaction est la suivante :



Enfin, elle peut être employée dans différents domaines comme les produits laitiers, ceux à base de viande ou de poisson, ou encore certains fruits et légumes (chou fermenté pour fabriquer de la choucroute, carottes, cornichons). Il est donc nécessaire

de posséder du substrat en grande quantité, la valorisation du lactose hydrolysé en glucose est donc particulièrement intéressante.

Deuxièmement, la fermentation bactérienne est également un point important dans la valorisation du lactosérum. divers produits sont obtenus comme, par exemple, l'acide succinique qui est un acidifiant (E363). Il sert aussi à modifier la saveur d'un produit, plus particulièrement dans les confiseries ou les jus de fruits. Tout comme l'acide lactique, certains de ses dérivés ont pour rôle d'améliorer la conservation en éliminant les micro-organismes à la surface des aliments. D'autres produits, tels que des acides gras, peuvent aussi être produits à base de lactose par la fermentation bactérienne. Il s'agit de l'acide acétique, l'acide propionique et l'acide butyrique. Ces derniers ont un rôle d'agent de conservation comme ceux cités précédemment, mais ce sont en plus des précurseurs d'aromate. Par exemple, pour la formation d'acide propionique et de l'acide acétique, on utilise la bactérie *Propionibacterium* qui va fermenter le glucose issu du lactose. L'ensemble des réactions ayant lieu est représenté dans les figures 21 et 22.

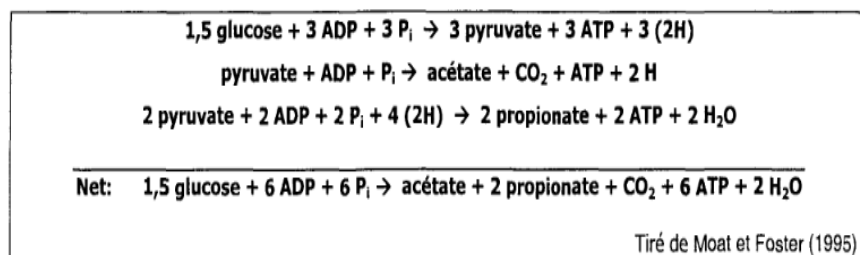


Figure 21: Séquence de réactions de la fermentation du glucose chez *Propionibacterium*. Source : Moat, 1995.

La demande en ces produits étant particulièrement forte, ce procédé est très utile puisqu'il permet d'obtenir, en conditions anaérobies, 2 moles d'acide propionique et 1 mole d'acide acétique en consommant 1,5 mole de glucose. De plus, le rendement est maximal lorsque le pH est de 5,5 et lorsque la réaction a lieu en système discontinu, aussi appelé batch.

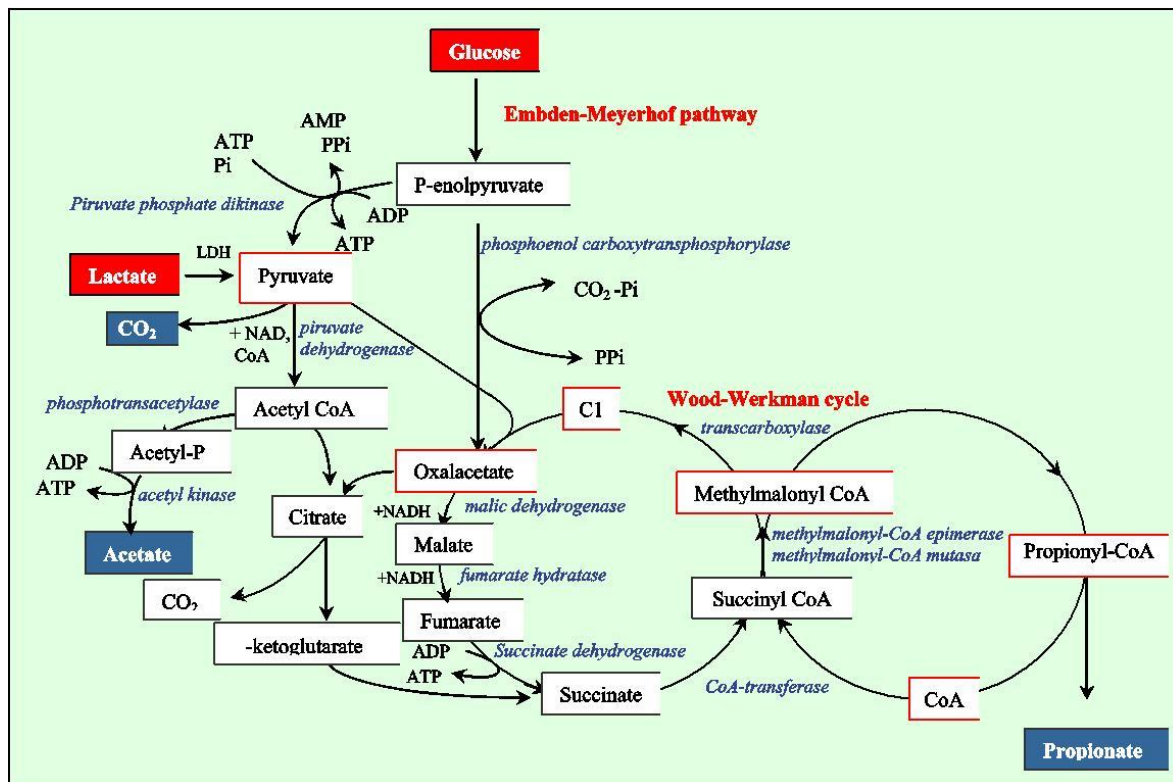


Figure 22 : Processus se déroulant dans les bactéries. Source : www.zoelho.com

Un troisième type de fermentation utilise des levures. Celles-ci transforment les sucres contenus dans le milieu en alcool et également en CO_2 , ce qui permet d'obtenir de la bière. Les sucres pouvant être utilisés pour ce type de fermentation sont ceux obtenus après hydrolyse du lactose.

2.1.2 Les protéines

Elles possèdent une haute valeur nutritionnelle mais sont aussi utiles pour élaborer des produits diététiques et thérapeutiques. En effet, ces protéines laitières présentent plusieurs caractéristiques intéressantes, elles sont employées pour leurs bonnes solubilités (environ 95 % de de pH 1 à 4 et de pH 6 à 8), leurs propriétés moussantes et émulsifiantes. Enfin, leurs structures et propriétés fonctionnelles sont également à la base de la texturisation de certaines préparations alimentaires. Il est à noter que la gélification, qui regroupe le pouvoir moussant et émulsifiant, est généralement obtenue par acidification ou par coagulation enzymatique.

A partir du lactosérum, on peut aussi former des co-précipités en modifiant la teneur de certains éléments qui le composent. Ainsi, on peut parvenir à concentrer davantage les protéines dans la poudre résiduelle pour ensuite améliorer la teneur protéique des produits laitiers tels que les yaourts ou encore dans des produits de boulangerie ou

réservés à l'alimentation infantile. Ce procédé s'effectue à basse température pour préserver la conformation native des protéines. Ces dernières viennent donc enrichir les aliments. On parle de WPC (Whey Protein Concentrate) : il contient en général 35 à 85 % de protéines.

Par ailleurs, la technique d'hydrolyse, par une digestion enzymatique, appliquée aux protéines du lactosérum permet l'obtention d'hydrolysats de protéines riches sur le plan nutritionnel et facilement valorisables dans des préparations diététiques. L'hydrolyse maîtrisée des protéines peut également permettre de supprimer leur pouvoir allergisant, et elles pourront donc être utilisées pour la fabrication de produits hypoallergéniques. Enfin, une hydrolyse très poussée conduit à l'obtention de petits peptides constitués d'uniquement 2 à 5 acides aminés. Ces derniers ont souvent un rôle biologiquement très actif.

Plus particulièrement, les protéines sériques sont celles qui présentent un intérêt majeur étant donné qu'elles sont riches en acides aminés essentiels. De plus, elles entrent dans la confection de plats cuisinés en favorisant la rétention d'eau. Elles peuvent être introduites dans tout type de boissons car solubles à n'importe quel pH et leur pouvoir moussant est employé en confiserie. Elles sont généralement préalablement coagulées par chauffage ou concentrées par ultracentrifugation. Lorsqu'elles sont coagulées, elles sont surtout ajoutées aux produits laitiers fermentés et aux fromages. En revanche, si elles subissent une ultracentrifugation, on les utilisera principalement en diététique infantile. Cette technique d'ultracentrifugation permet notamment d'enrichir des fromages en lactoprotéines : par ultrafiltration du lait de fromagerie, on conservera les protéines sériques dans le fromage (15 % au lieu de 2,5% sans appliquer ce traitement).

2.2 Compléments alimentaires

2.2.1 Les protéines

Les protéines participent à la structure de différents éléments comme les tissus, le collagène, hormones et enzymes. Chez les sportifs, la connaissance des protéines et de leurs fonctionnements est donc très importante puisque ces molécules participent au développement musculaire et à la formation d'énergie. La production d'ATP à partir des

acides aminés est essentielle à la contraction musculaire car elle favorise l'interaction entre les filaments d'actine et de myosine.

Les BCAA (branched-chain amino acid) ou communément appelé acides aminés ramifiés (leucine, la valine et l'isoleucine) sont principalement utilisés comme substrats énergétiques du fait de leur abondance dans les muscles. De nombreux produits à base de protéines et d'acides aminés pour « accroître les performances physiques » sont présents dans le commerce. La leucine est une molécule dite « signale » qui agit sur l'activation de l'anabolisme musculaire en optimisant le temps de récupération. L'association de ces BCAA à des glucides, le plus tôt possible après l'effort, favorise par ailleurs un hyperinsulinisme facilitant la pénétration tissulaire des acides aminés. Une concentration plus élevée de leucine dans le sang déclenchera une forte augmentation de la synthèse des protéines musculaires.

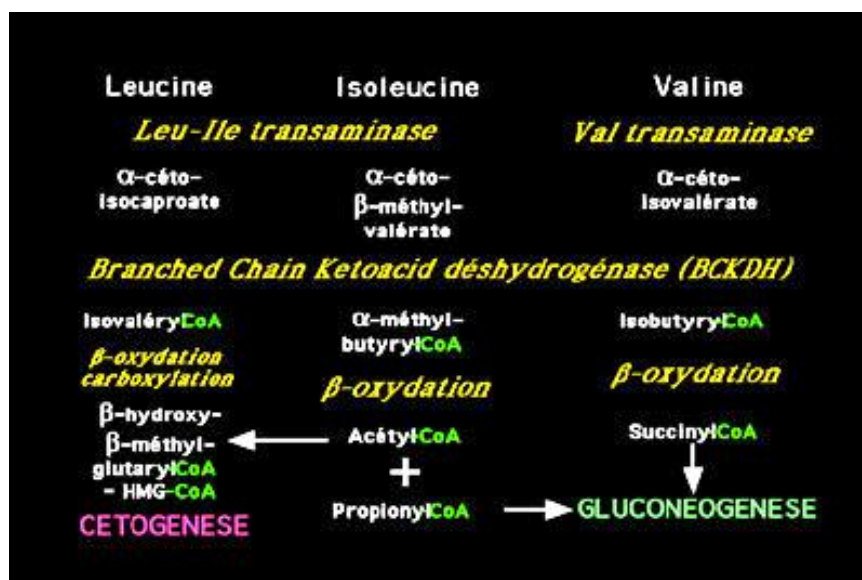


Figure 23 : Voies d'utilisation du BCAA.

Néanmoins, certaines protéines nécessitent d'être préalablement hydrolysées avant de pouvoir servir de substrat aux muscles : c'est le cas de la caséine qui est utilisée pour la régénération musculaire. La caséine, en tant que complément alimentaire, est le plus souvent vendue sous forme de poudre aromatisée.

2.2.2 Sels minéraux et vitamines

Les sels minéraux recueillis à partir du lactosérum peuvent venir enrichir des préparations alimentaires où l'on désire obtenir un contrôle strict des quantités et des types de sels minéraux ajoutés. Par exemple, la plupart des sels minéraux sont stables

dans les eaux minérales. Les réutiliser dans la fabrication d'eaux minérales initialement faiblement minéralisée pourrait être éventuellement envisagé. Ils peuvent aussi être introduits dans les boissons destinées à la récupération du sportif où un apport contrôlé permettrait de combler les déficits en sels minéraux dus à l'effort prolongé effectué. Ces boissons contiennent surtout du sodium, du potassium et du magnésium. Les vitamines B et C sont aussi des composants majeurs de ces boissons énergétiques mais leurs bienfaits seraient contestés.

Les vitamines sont aussi des acteurs majeurs des voies métaboliques des mammifères. Le lactosérum contient en majorité des vitamines B1, B2, B3, B5, B6, B9 et de la vitamine C.

Parmi les vitamines B évoquées, les vitamines B1, B2 et B3 participent au métabolisme des glucides, des lipides et des protéines. Les vitamines B3, B5 et B6 sont impliquées dans la synthèse de neurotransmetteurs et/ou d'hormones. Enfin, les vitamines B8, B9 et B12 jouent un rôle dans la division cellulaire et éventuellement dans la formation d'ADN et d'ARN.

Elles sont présentes dans de nombreux compléments alimentaires destinés à contrer un déficit ou une carence en ces éléments. La vitamine B2 a un rôle particulier dans le domaine des industries agroalimentaires où elle agit comme additif alimentaire en tant que colorant.

Néanmoins, la stabilité des sels minéraux et des vitamines est relativement peu importante. En effet, ils sont sensibles à une mauvaise conservation, à une cuisson trop intense ou longue et à la congélation. Leur destruction peut donc altérer les propriétés de certains aliments. Il devient alors intéressant de réincorporer ces éléments détruits lors des processus de transformation, conservation ou transport dans les préparations pour récupérer toutes les qualités nutritionnelles initiales du produit. Par exemple, la grande majorité des vitamines sont détruites à des températures voisines de 100°C, et sont vulnérables à lumière, aux agents d'oxydation et aux catalyseurs minéraux. A cette même température de 100°C, il y a précipitation des sels minéraux et ils deviennent alors non assimilables par l'organisme. Ainsi, une minéralisation ultérieure aux processus de cuisson, de concentration par distillation, de pasteurisation, ou encore de transport serait envisageable pour restaurer les qualités nutritionnelles du produit. Si

on prend l'exemple du jus d'orange, on pourrait réincorporer des vitamines C après la concentration et la pasteurisation qui lui sont appliquées.

3. Valorisation pharmaceutique et cosmétique

3.1. À partir du lactose

Le lactose peut être utilisé directement, sans transformation, en tant qu'excipient dans le domaine pharmaceutique et plus particulièrement dans celui de la pharmacie galénique (mise en forme médicamenteuse). Un excipient est un élément inerte qui donne une plus grande stabilité aux substances actives. Il a également des propriétés physiques qui confèrent leur forme, leur solubilité, leur dissolution correcte et ciblée aux comprimés. On retrouve ces caractéristiques propres à un bon excipient sur la figure X.

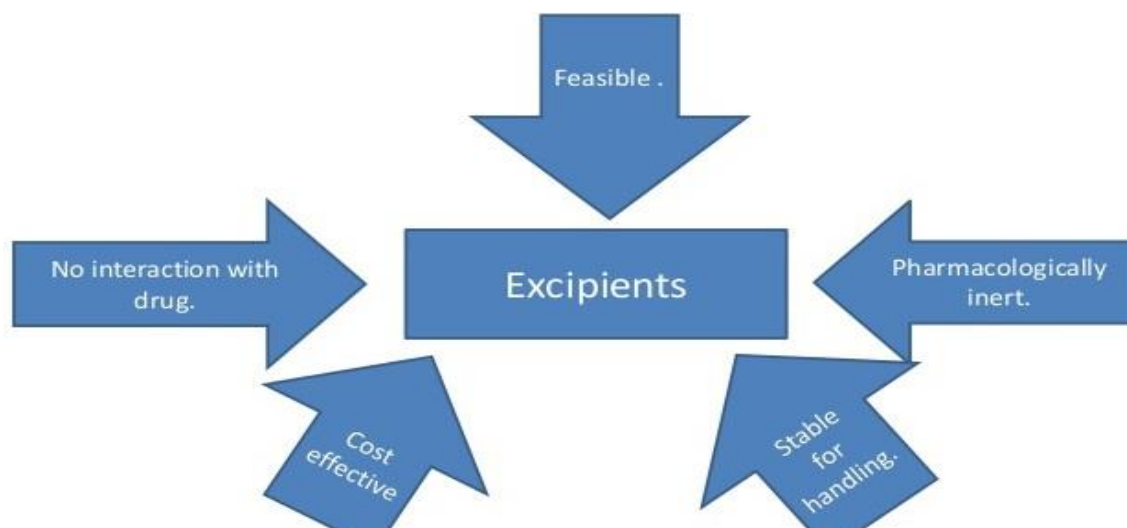


Figure 24 : Propriétés idéales des excipients

Utiliser le lactose comme excipient est économiquement intéressant car il est peu coûteux, compatible avec un bon nombre de substances actives, très stable et a une excellente solubilité avec l'eau. Il faut tout de même noter le fait qu'une partie non négligeable de la population est intolérante au lactose.

En plus de sa valorisation directe, il existe des transformations du lactose qui aboutissent à des produits utilisés en pharmaceutique.

Le lactose permet d'obtenir, par isomérisation, le lactulose qui est fréquemment utilisé en tant que laxatif pour traiter la constipation et pour traiter des maladies telles que l'encéphalopathie hépatique (cirrhose du foie).

A partir du lactose, il peut également y avoir obtention d'acide succinique ($C_4H_6O_4$). Il est actuellement majoritairement produit par l'industrie pétrochimique mais il est, de plus en plus, produit par des procédés biotechnologiques, notamment par la fermentation bactérienne du lactose. Actuellement, les deux meilleures souches bactériennes productrices d'acide succinique sont *Actinobacillus succinogenes* et *Mannheimia succiniciproducens*. Le procédé peut être séparé en plusieurs étapes. Tout d'abord, la fermentation en elle-même puis la récupération de la molécule d'intérêt, sa concentration et sa purification. Pour cela, il existe plusieurs méthodes telles que l'électrodialyse (séparation des molécules par une membrane échangeuse d'ions), la précipitation sous forme de sels (suivi d'une filtration) et l'extraction à base d'amines tertiaires hydrophobes. L'acide succinique est utilisé particulièrement dans l'industrie chimique (pour la production de polymères biodégradables, de solvants « verts », de surfactants et de détergents), dans l'industrie alimentaire, pharmaceutique, additifs pour stimuler la croissance des animaux et plantes. Dans l'industrie pharmaceutique, il est utilisé comme excipient et donc comme un stabilisateur tout comme le lactose. Il entre également dans la fabrication de certains antibiotiques, acides aminés et vitamines alimentaires.

Ces applications sont résumées dans la figure 26 ci-dessous, qui recense les différentes utilisations de l'acide succinique ainsi que les molécules dont il est précurseur.

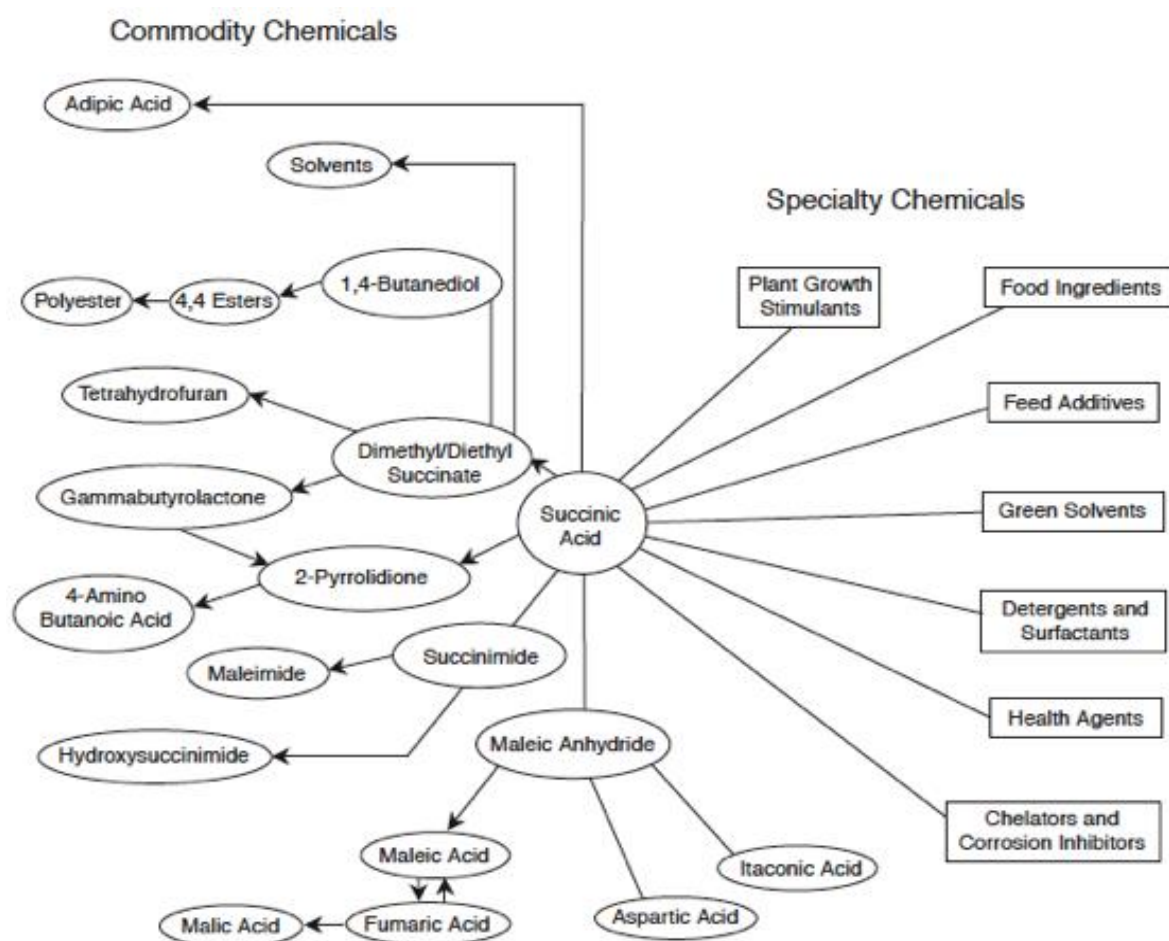


Figure 26: Eléments chimiques et produits pouvant être synthétisés à partir de l'acide succinique.

Source : biochimie.j.univ-angers.fr

Il est possible de synthétiser l'acide lactobionique en oxydant le lactose. Cet acide dérivé du lactose est utilisé en cosmétique en tant qu'antioxydant, mais aussi en tant qu'excipient car il donne la texture et les propriétés physico-chimiques des produits cosmétiques.

Il est également possible de synthétiser des esters de l'acide propionique servant à la fabrication de composant de parfum ou d'arôme. L'acide propionique est également employé dans la synthèse de médicaments, comme CALCIDOSE, vitamine D3.

3.2 À partir des protéines

Les isolats de protéines sont particulièrement riches en immunoglobulines qui jouent le rôle d'anticorps et ont pour effet de stimuler le système immunitaire. Cet effet thérapeutique a également été observé chez l' α -lactalbumine, en effet son hydrolyse libérerait certains di- et tri-peptides capables d'amplifier la réponse immunitaire en augmentant le nombre de lymphocytes sanguins. Des résultats similaires ont été observés avec la lactoferrine. De manière générale, des essais ont montré que l'ingestion de quelques grammes d'isolat de lactosérum chaque jour chez des patients immunodéficients avait des résultats positifs sur les fonctions immunitaires ; particulièrement chez des personnes atteintes du sida et de l'hépatite B. En effet, l' α -lactalbumine, la β -lactoglobuline et la lactoferrine possèdent toutes des propriétés anti-virales remarquables. C'est le plus souvent une forme modifiée de ces protéines qui est la plus efficace. Dans le cas de l' α -lactalbumine, alors que sa forme naturelle n'a aucun effet, sa forme succinylée a une grande affinité pour la protéine gp120 du VIH-1 ce qui permet d'inhiber l'infection des cellules. La β -lactoglobuline modifiée a également des capacités d'inhibition de l'infection par le VIH importantes. La protéine du lactosérum ayant le plus d'activité anti-virale reste la lactoferrine ; puisqu'elle inhibe plusieurs virus tels que le VIH, l'hépatite C, l'herpès et le cytomegalovirus humain.

Des propriétés anti-bactériennes ont également été révélées chez les protéines du lactosérum. C'est, en général, l'hydrolyse de ces protéines par des endopeptidases qui libère des peptides aux propriétés bactéricides ou bactériostatiques. Grâce à sa capacité de liaison au fer, la lactoferrine peut faire baisser le niveau de fer d'un milieu et ainsi inhiber la croissance des bactéries le métabolisant. Elle jouerait aussi un rôle sur la modification des membranes bactériennes, ce qui lui confère des propriétés bactériostatiques. L'utilisation de la lactoferrine est donc courante dans les dentifrices ou les bains de bouches puisqu'elle empêche l'adhésion de certaines bactéries sur la plaque dentaire.

Enfin, les protéines de lactosérum attirent l'attention de par leur effet sur le cancer. Par exemple, certaines formes de l' α -lactalbumine humaine seraient capables de provoquer l'apoptose des cellules cancéreuses. Ces propriétés anti-tumorales ont aussi été détectées chez la lactoferrine : selon des expériences menées sur des rats mâles à qui on a administré de la lactoferrine sur plusieurs semaines, cette protéine a pour effet de

freiner significativement le développement du cancer du côlon et des poumons. Enfin, de récentes études se sont penchées sur l'impact des protéines de lactosérum sur la chimiothérapie : bien que les données restent insuffisantes pour le moment, les premiers résultats tendent à montrer que l'isolat de lactosérum augmente l'efficacité du traitement. Ainsi, certaines protéines, en concentration suffisante, auraient pour effet de sensibiliser les cellules atteintes à la chimiothérapie ; ce qui constitue une piste prometteuse.

3.3. A partir des sels minéraux

Dans le domaine pharmaceutique, ils interviennent notamment dans les contrôles du pH, de l'équilibre hydrique et participent à la catalyse de réactions lors du métabolisme de l'organisme. On les retrouve aussi comme constituants des os, dents. Enfin, ils sont des composants majeurs des enzymes et des hormones. Le domaine pharmacologique les intègre donc dans des compléments alimentaires ou des traitements.

Il y a également un intérêt à les incorporer dans la préparation de dentifrices. Actuellement, le calcium utilisé dans le dentifrice est issu d'os d'animaux ou de chaux. Il serait donc intéressant de pouvoir réutiliser un déchet des transformations laitières pour permettre une valorisation au niveau de sa teneur en calcium.

4. Valorisation énergétique

4.1. Les biocarburants

Le lactosérum pourrait également être valorisé en biocarburant. Certaines levures seraient capables de réaliser la transformation de lactose en éthanol par le biais de la fermentation. L'hydrolyse au préalable du lactose est nécessaire, ce qui donne du glucose et du galactose. L'avantage de ce procédé est la faible surface utilisée par rapport à une culture (colza...). En plus d'être bénéfique pour l'environnement, cette solution pourrait l'être aussi pour de nombreux acteurs, de la fromagerie aux distributeurs.

4.2. La Méthanisation

La méthanisation est une digestion anaérobie (en l'absence d'oxygène) permettant la dégradation de la matière organique par l'intervention de microorganismes. Cette dégradation produit deux résidus : le biogaz, constitué de 60% de méthane, de dioxyde de carbone et d'eau ; et le digestat composé de la matière organique non dégradée et des minéraux.

Le lactosérum possède une charge organique importante ce qui en fait un effluent polluant. Celui-ci possède une DCO (Demande Chimique en Oxygène) de 50 à 70 g/L et les eaux blanches (eaux de nettoyage) possèdent une DCO de 2 à 3 g/L. La DCO représente ce qui est susceptible de consommer de l'oxygène dans de l'eau comme la matière organique et les sels minéraux : elle caractérise la charge polluante. Ainsi, la méthanisation, par transformation de la matière organique permet de réduire la DCO en rendant l'effluent moins polluant et moins nocif pour l'environnement.

Dans le cas du lactosérum et des eaux blanches, la méthanisation doit être effectuée après un prétraitement : l'aéroflotation, comme indiqué sur la figure 27. Elle permet d'éliminer les matières en suspension et les graisses par microbullage.

Ensuite, l'effluent arrive à la méthanisation. Celle-ci peut se faire sous deux températures différentes : entre 30 et 40°C (mésophile) ou entre 50 et 60°C (thermophile). Dans le deuxième cas, la digestion sera plus rapide mais plus difficile à mettre en place.

La méthanisation se déroule en trois parties, comme illustré sur la figure 28. La première, l'hydrolyse est l'acidogénèse, les bactéries hydrolytiques transforment la matière organique complexe (protéines, lipides, polysaccharides) en acides gras volatils ou alcools et en libérant du gaz composé de H_2 et CO_2 . Deuxièmement, l'acétogénèse permet la transformation des composés issus de l'étape précédente par des bactéries acétogènes en précurseurs direct du méthane : l'acétate, le dioxyde de carbone et de l'hydrogène. Lors de la dernière étape, la méthanogénèse, il y a production de méthane par des micro-organismes anaérobies stricts. Les espèces hydrogénotrophes utilisent l'hydrogène et le dioxyde de carbone alors que les acétotrophes utilisent l'acétate. Le méthane, biogaz, peut alors être transformé en électricité ou en chaleur.

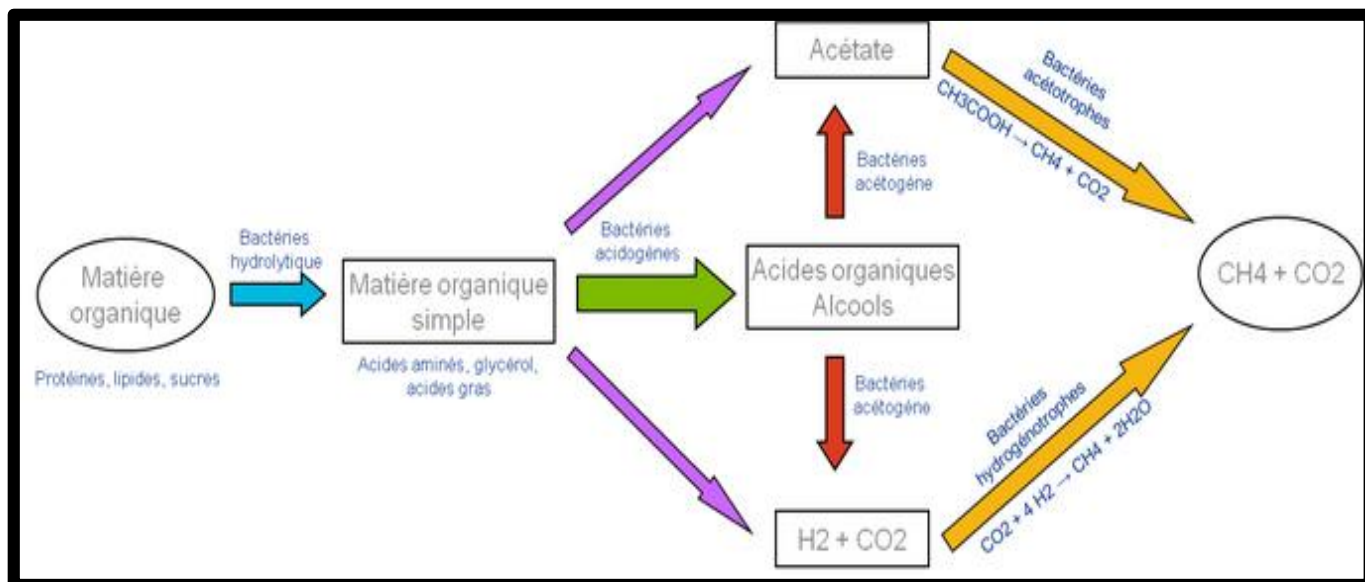


Figure 27 : Production de méthane à partir de matière organique

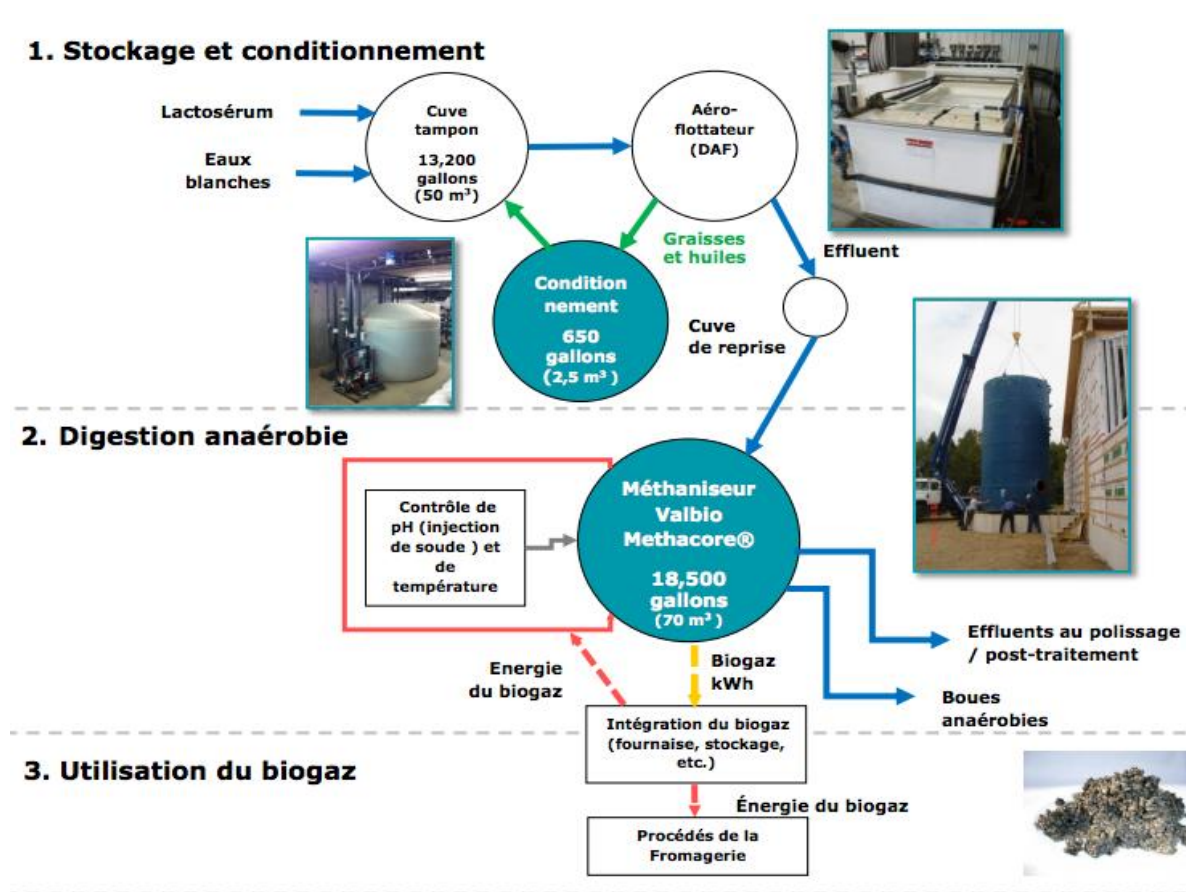


Figure 28 : Process pour la fromagerie Charlevoix par l'entreprise

Après ces traitements, le digestat obtenu peut subir d'autres traitements purificateurs au sein d'un bassin d'anoxie puis d'un aérobie permettant d'éliminer respectivement l'azote et le phosphore par précipitation et décantation. L'effluent peut

ainsi être rejeté dans la nature sans problème environnemental. En effet, en sortie de méthanisateur, la DCO est $\approx 1\text{g/L}$ et en sortie des post-traitements elle est inférieure à $0,8\text{ g/L}$.

La méthanisation lactosérum est une alternative intéressante au procédé de traitements les plus utilisés. En plus de l'aspect épuratoire, elle permet de valoriser sa matière organique en énergie renouvelable, par la production de biogaz. Il est considéré que pour 1 m^3 de lactosérum, 265 kW de biogaz peuvent être obtenus ou 100 kWh d'électricité et 100 kW de chaleur.

Conclusion

Le lactosérum est aujourd'hui un coproduit peu valorisé de la fabrication fromagère. En plus d'un enjeu économique pour les industries laitières, c'est également un enjeu environnemental puisqu'il ne peut être rejeté directement dans la nature car trop polluant.

Lors de cette étude, son potentiel a particulièrement été mis en valeur de part sa composition en protéines, lactose, vitamines et sels minéraux potentiellement extractibles par diverses méthodes de séparations. Suites à leurs extractions, les propriétés de ces molécules sont valorisées directement ou encore indirectement dans des domaines variés tel que l'alimentaire, la pharmacie, la cosmétique ou encore pour la production d'énergie.

En revanche, certains des procédés étudiés sont relativement difficiles à mettre en œuvre et offrent des rentabilités peu importantes. Il conviendra donc de choisir les procédés d'extraction ainsi que les voies de valorisation se révélant être les plus économiquement intéressants.

Bibliographie

ADRIAN, et al. Composition minérale du lactosérum - Influence des facteurs technologiques, saisonniers et géographiques. In : Le Lait, 1980, 60 :447-457.

ALICE, et al, *The scientific evidence for the role of milk protein-derived bioactive peptides in humans: A Review*(consulté en novembre 2015)

BERTRAND. Suivi de l'ATP et des protéines du biofilm dans un bioréacteur à lit fluidisé fermentant un perméat de lactosérum reconstitué, 2002.

CASTILLON et al. Essai de traitement du lactosérum pur issu de la fromagerie pilote de la ferme caprine du Pradel par la méthanisation, 2012.

GREEN, et al. Mechanism of aggregation of casein micelles in rennet-treated milk. In : Journal of dairy research, 1981, 48 :57-63.

GUTHY, et al. Observations on primary phase of milk coagulation by rennet under standardized conditions. In : Journal of dairy research, 1977, 44 :363-366.

JEANTET et al. Les produits laitiers, 2008, 2^e édition, 184 pages

JOUAN. Lactoprotéines et lactopeptides propriétés biologiques, 2002, INRA éditions.

LE ROUX. Energie et territoire : Valorisation de la chaleur produite par la méthanisation. Projet pro. Institut National Polytechnique de Lorraine : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires, 2013.

LEFRILEUX. Methanisation du Lactoserum à La Ferme. In : Renc. Rech. Ruminants, 2013, 20, 323-326.

PAN, et al, *Antiviral properties of milk proteins and peptides dans International Dairy Journal 16 (2006) 1252-1261* (consulté en novembre 2015)

SCHMIDT, et al. Size distribution of casein micelles in cows milk. In : netherlands milk and dairy journal, 1973, 27 :128-142.

SPĂLĂȚELU, et al. Innovative Romanian Food Biotechnology. In: Biotechnological valorization of whey, 2012, Vol.10

RUETTIMANN, et al. Casein micelles – structures, properties and enzymatic coagulation. In : Enzyme and microbial technology, 1987, 9 :578-589.

VIGNOLA. Sciences et technologie du lait, 2002.

WALSTRA, et al. On the stability of casein micelles. In : Journal of dairy science, 1990, 73 :1965-1979.

Webographie

ABBAYE DE TAMIE. Traitement des eaux blanches et du lactosérum par méthanisation. Disponible sur <http://moletta-methanisation.fr/diaporama/3Nathanael.pdf> [consulté en novembre 2015]

Applications des molécules biologiques et des enzymes dans l'industrie. Biochimie industrielle. Disponible sur <http://biochimej.univangers.fr/Page2/COURS/3CoursdeBiochSTRUCT/4BiochimieIndustrielle/1BiochIndust.htm> [consulté en décembre 2015]

BLACKBURN. La méthanisation, une solution d'avenir. Disponible sur <http://www.fromagerieblackburn.com/index.php?id=27> [consulté en novembre 2015]

CUN, et al. Les techniques membranaires : différences et usages, 2003. Disponible sur <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/les-techniques-membranaires-differences-et-usages-842> [consulté en novembre 2015]

ESETA. La méthanisation. Disponible sur <http://www.eseta.fr/index.php/fr/services/methanisation/77-societe/77> [consulté en novembre 2015]

FAO, Département de l'agriculture, Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine, Chapitre 7 Lactosérum, disponible sur <http://www.fao.org/docrep/t4280f/t4280f0h.htm> [consulté en novembre 2015]

Lactosérum, disponible sur <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lactos%C3%A9rum> [consulté en novembre 2015]

Fermentation du lactose, disponible sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Fermentation#Fermentation_du_lactose [consulté en novembre 2015]

GENIN. Séparation du lactose et des protéines solubles contenues dans le sérum du lait par extraction par l'alcool, disponible sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00927806> [consulté en novembre 2015]

LAITERIE DE LA CÔTE FROMAGERIE GAUGRY. Quand les déchets deviennent sources d'énergie, 2004.

LAKHIARI. Cours glucides, disponible sur <http://fr.slideshare.net/Lakhiari/cours-glucides-lakhiari> [consulté en novembre 2015]

Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine. Chapitre 7 : Lactosérum. Disponible sur <http://www.fao.org/docrep/t4280f/t4280f0h.htm> [consulté en novembre 2015]

NOUREDDINE. Valorisation du Lactosérum, disponible sur <http://www.youscribe.com/catalogue/tous/savoirs/science-de-la-nature/valorisation-de-lactoserum-1856791> [consulté en novembre 2015]

Procédé de production de lactose cristallisé et installation pour la mise en œuvre de ce procédé. Google Brevets. Disponible sur <http://www.google.com/patents/EP0052541B1?cl=fr> [consulté en novembre 2015]

Production d'acide succinique par fermentation. Actualité et innovation agroalimentaire. Disponible sur <http://www.blogagroalimentaire.com/production-dacide-succinique-par-fermentation> [consulté en décembre 2015]

Production d'acide succinique biosourcé par l'entreprise Roquette. Disponible sur http://biologie.polytechnice.fr/jahia/webdav/site/biologie/shared/document_public/Polypharm12/PolyPharm_n14.pdf [consulté en décembre 2015]

VALBIO. Un projet novateur en biométhanisation et récupération d'énergie. Disponible sur [http://www.aqme.org/DATA/TEXTEDOC/robert la Roche et bruno labbe.pdf](http://www.aqme.org/DATA/TEXTEDOC/robert%20la%20Roche%20et%20bruno%20labbe.pdf) [consulté en novembre 2015]

Partie 2

Rapport de projet

Table des matières

Introduction	1
I. Filtrations.....	2
1. Microfiltration	2
2. Ultrafiltration	6
II. Séchage	7
1. Pré-évaporation.....	7
2. Atomisation	10
III. Utilisation de lactose	12
1. Fabrication d'acide lactique	12
2. Fabrication acide succinique	15
3. Fabrication de levures	17
4. Mise en commun des opérations unitaires de fermentation	19
5. Méthanisation	19
Conclusion.....	22
Sources.....	23

Introduction

Le lactosérum ou « petit lait » est un co-produit de l'industrie fromagère.

Une valorisation de ce produit a été envisagée dans le but de réduire son impact environnemental négatif et de dynamiser sur le plan économique son utilisation au niveau de la commune de Neufchâteau. Cette étude a pour objectif de valoriser les protéines, le lactose, les minéraux et vitamines hydrosolubles contenus dans le lactosérum. L'élaboration d'un procédé selon le principe de bioraffinerie a été réalisée. Tout d'abord, le lactosérum est filtré par une microfiltration et une ultrafiltration dans le but d'éliminer les principaux micro-organismes et de séparer les protéines, traitées séparément, des autres éléments. La solution protéique ainsi obtenue est pré-évacuée puis atomisée en une poudre commercialisable. D'un autre côté, le lactose sera employé dans trois processus de fermentation aboutissant à des molécules à plus haute valeur ajoutée. La production d'acide lactique est un procédé connu de valorisation du lactose du perméat. Cependant, il est possible de se demander si sa production est réellement rentable. De même, la fabrication d'acide succinique à partir du lactose est potentiellement une voie de valorisation d'avenir sur laquelle il faut encore se pencher. Enfin, le lactose peut être utilisé comme milieu de culture pour la production en masse de levures lactiques en tant que telles.

Par ailleurs, la commune de Neufchâteau envisage également de coupler cette multivalorisation du lactosérum à un méthaniseur. Ce projet consiste en la collecte des principaux déchets organiques de ce territoire, ainsi que le lactosérum non valorisé pour produire du biogaz et donc de l'électricité ou de la chaleur.

Dans les calculs, nous considérons que le volume à traiter est de 50 m³ par jour, ce qui correspond au gisement maximum que l'on puisse espérer au lancement de l'installation, une journée de travail durant 10 heures (sans compter l'entretien des machines). Nous supposons également que la composition du lactosérum est standard, c'est-à-dire qu'il contient 60 g/L de lactose et que les protéines représentent 10% de sa masse sèche.

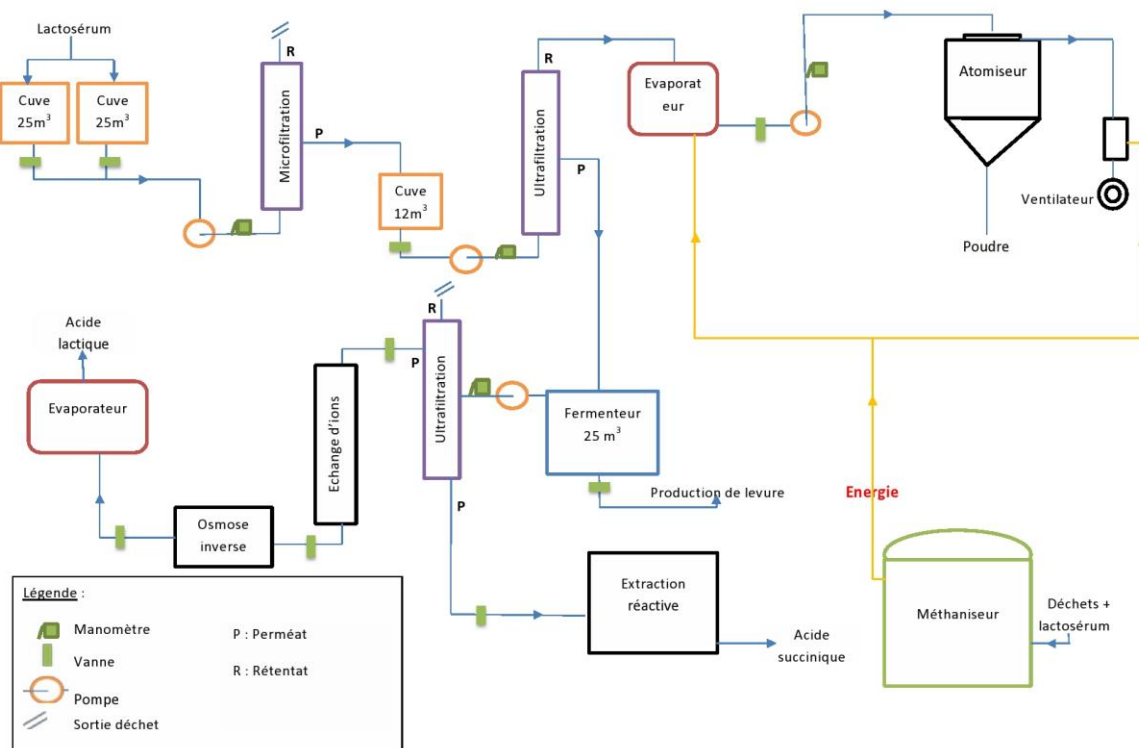


Figure 1 : Procédé global de la bioraffinerie du lactosérum

I. Filtrations

Lors du procédé, deux filtrations sont effectuées : une microfiltration puis une ultrafiltration.

1. Microfiltration

1.1. Principe

La microfiltration est une technique de séparation membranaire. Le but de ce procédé est d'éliminer les micro-organismes présents dans le lactosérum en continu et ainsi, permettre de prolonger la durée de vie du lactosérum. La réduction bactérienne est réalisée par élimination mécanique. Les bactéries seront donc bloquées dans le rétentat alors que les protéines et autres molécules (lactose...) seront dans le perméat. En effet, les protéines du lactosérum présentent de bonnes qualités, il est donc intéressant de les récupérer. L'objectif est donc de retenir les bactéries tout en laissant passer un maximum de composés d'intérêts (lactose, protéines...).

Cette membrane semi-perméable comporte des pores d'une taille comprise entre 0,1 et 10 μm . Par un gradient de pression compris entre 1 et 3 bars de part et d'autre de la membrane, les composants de taille inférieure à celle des pores traverseront la membrane. Les espèces dissoutes initialement dans le lactosérum vont pouvoir être davantage concentrées. Cependant, différents facteurs influencent la filtration tels que le type de membrane choisie (surface de filtration effective, dimension, distribution des pores), le procédé et ses paramètres (pression, débit...), le produit (viscosité, caractéristiques physico-chimiques) et les micro-organismes (dimension, nombre...).

La filtration tangentielle a été privilégiée par rapport à la filtration frontale pour laquelle la circulation du fluide est perpendiculaire à la membrane. Ainsi, avec la première, les phénomènes de colmatage sont moins importants. Cependant, les performances de la microfiltration peuvent être restreintes par des phénomènes de colmatage. Le colmatage est un phénomène s'opposant à la filtration. En effet, la matière peut s'accumuler ce qui diminue le transfert à travers la membrane et donc diminue l'efficacité du procédé. De plus, une filtration tangentielle n'abîme quasiment pas la structure des protéines, il s'agit d'un procédé qualifié de "doux". Un autre atout de cette filtration est sa facilité à mettre en œuvre. De plus, elle est plus respectueuse de l'environnement que la filtration frontale.

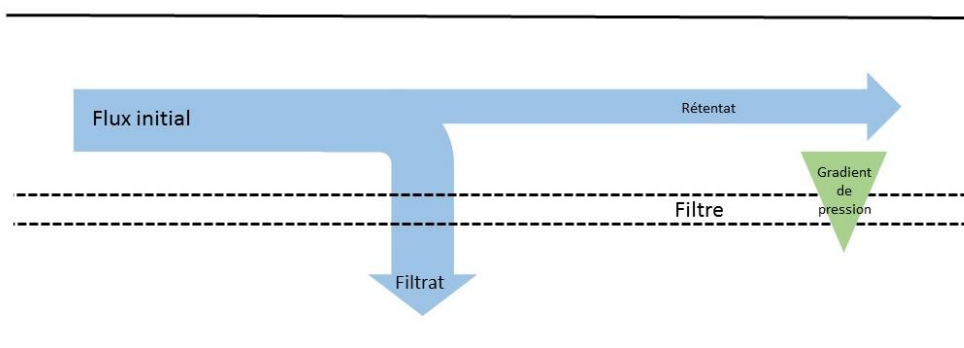


Figure 2 : Schéma de filtration tangentielle (source personnelle)

Par ailleurs, nous avons choisi un module spiralé, formé d'une alternance de couches de membranes et d'écrans séparateurs. Le flux de lactosérum s'écoule le long de l'axe central du module. Le filtrat traverse la membrane et s'écoule au cœur du module. Ce procédé permet une filtration efficace à bas coût notamment pour des solutions alimentaires.

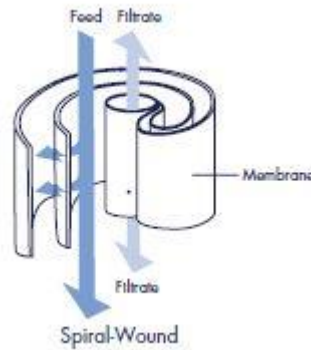


Figure 3 : schéma de module spiralée (source : Millipore)

Le choix du type de membrane s'est porté sur une membrane inorganique, en céramique. En effet, elles ont une plus grande durée de vie que les membranes organiques et sont plus stables d'un point de vue thermique et chimique.

La mise en œuvre du procédé de microfiltration nécessite de prendre en compte le dimensionnement des tuyaux, la surface de la membrane utilisée, le choix de vannes, etc. De plus, il faut connaître le débit d'entrée du lactosérum. Il est également nécessaire de déterminer la pression utilisée pour la filtration.

Par ailleurs, une recirculation du perméat à co-courant du rétentat pourrait améliorer les performances de la microfiltration. Cependant, ce procédé nécessiterait une installation plus complexe.

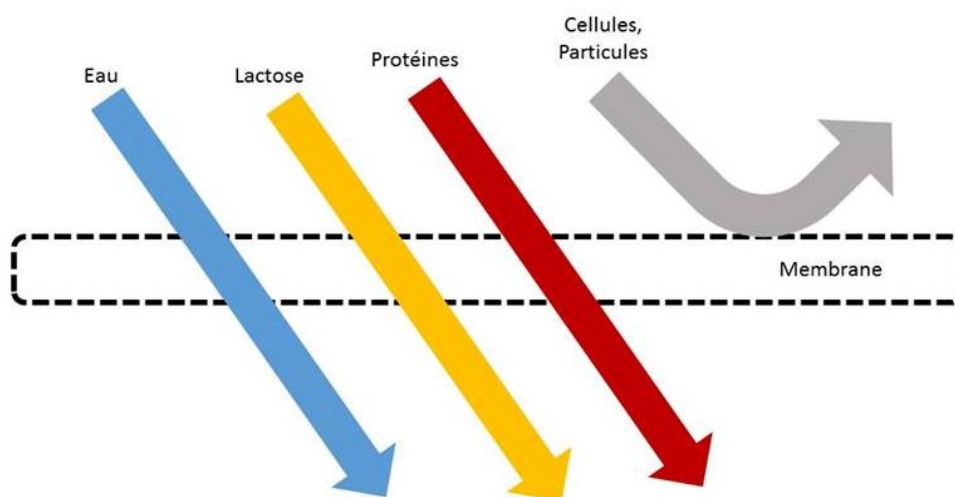


Figure 4 : schéma de microfiltration (source personnelle)

1.2. Calculs

En accord avec les objectifs précédemment établis, nous avons estimé les taux de passage (i.e. le rapport de la masse passée dans le filtrat sur la masse initiale) du lactose, des protéines et de l'eau à 95%. Un bilan de matière en kg a été établi.

Les masses du rétentat représentent 5% des valeurs d'entrée. Celles en sortie filtrat, correspondent à 95% des masses en entrée.

La masse totale en entrée est obtenue en multipliant le volume (50 m^3) par la masse volumique du lactosérum (1060 kg/m^3). On en déduit la masse de protéines qui est de 10% de la masse totale. La masse de lactose est obtenue en multipliant le volume par la concentration massique en lactose (55 g/L). La masse restante correspond alors à la masse d'eau, les autres composants du lactosérum ayant une masse négligeable.

Tableau 1 : Bilan matière de la microfiltration (kg/s)

	Entrée	Sortie (rétentat)	Sortie (filtrat)
Matière totale	1,472	0,072	1,370
Eau	1,354	0,068	1,287
Protéines	0,012	0,001	0,011
Lactose	0,076	0,004	0,073

1.3. Budget

La membrane céramique est plus chère qu'une membrane organique. En effet, son prix s'élève à $1\,500 \text{ €/m}^2$. Cependant, étant plus efficace, la surface nécessaire est moindre (50 m^2) pour un total de $75\,000 \text{ €}$.

2. Ultrafiltration

2.1. Principe

L'ultrafiltration est une méthode de séparation membranaire qui repose sur le même principe que la microfiltration, excepté que la taille des pores sur la membrane est différente et ne sépare donc pas les mêmes constituants. Pour séparer des particules dissoutes, l'ultrafiltration est le plus souvent utilisée alors que la microfiltration concerne plutôt les particules en suspension. La taille des pores de la membrane varie entre 2 et 50 nm (mésopores), ce qui permet la séparation du lactose, qui se retrouve dans le perméat, des protéines et sels minéraux que l'on retrouve dans le rétentat.

Cette séparation se fait à la suite d'un gradient de pression à travers une membrane semi-perméable entre 1 et 10 bars, il s'agit de membrane « basse pression ». Elle permet de concentrer en partie la fraction protéique avant de l'envoyer dans l'évaporateur puis l'atomiseur.

Comme lors de la microfiltration, un filtre à flux tangentiel est utilisé pour limiter le phénomène de colmatage et ainsi obtenir un meilleur rendement de filtration.

Cette fois, le choix de la membrane s'est porté sur une membrane organique en polyéthersulfone (PES) au sein d'un module spiralé. Ce type de membrane est disponible à des coûts moins élevés et est plus présente dans le commerce. De plus, ces membranes retiennent des molécules à partir d'un poids moléculaire de 5000 Da ce qui suffit puisque la plus petite des protéines du lactosérum que l'on cherche à récupérer (α -lactalbumine) fait 14,2 kDa. Elles possèdent également de bonnes stabilités mécanique, thermique et chimique. En effet, pour les membranes PES la stabilité mécanique est due aux groupes phényl sulfone de la chaîne.

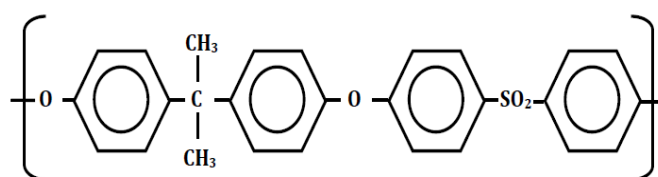


Figure 5 : Schéma de la structure du polysulfone

L'intérêt de cette membrane est également sa résistance aux fortes températures puisqu'elle peut être utilisée à des températures allant jusqu'à 150-200 °C. Cette propriété peut donc être utile lors de nettoyage ou en cas d'augmentation de température lors de la filtration. (BOUCIF, 2012)

Sachant que ce type de membrane peut supporter des flux allant de 50 à 300 L/h/m², nous avons choisi un flux de 50 L/h/m². En considérant un volume légèrement inférieur à 50 m³ en sortie de microfiltration et que ce volume doit être traité sur une durée de 10 h par ultrafiltration, il faudrait donc 100 m² de membrane pour cette étape.

2.2. Calculs

Ici, le taux de rétention des protéines a été estimé à 95% et le taux de passage du lactose à 50%. Un bilan matière instantané en kg/s a été établi dans lequel les débits massiques d'entrée correspondent aux débits massiques du filtrat en sortie de microfiltration.

Tableau 2 : Bilan matière instantané de l'ultrafiltration (kg/s)

	Entrée	Sortie (Rétentat)	Sortie (Filtrat)
Matière totale	1,370	0,685	0,686
Eau	1,287	0,638	0,649
Protéines	0,011	0,011	0,001
Lactose	0,073	0,036	0,036

2.3. Budget

Concernant la membrane, le coût est limité par rapport à d'autres types de membrane puisqu'il s'élèverait à 750 €/m² au maximum. En prenant 100 m² de membrane, elle coûterait donc 75 000 €.

II. Séchage

Le séchage des protéines est une opération délicate car particulièrement coûteuse en énergie. Il convient donc de porter une attention toute particulière à son optimisation. Dans cette optique, nous avons décidé d'insérer une étape de pré-évaporation avant l'atomiseur afin de diminuer la teneur en eau de la solution protéique jusqu'à environ 40%. L'atomisation viendra finaliser le procédé en diminuant la teneur en eau au-delà de 5%.

1. Pré-évaporation

Il existe sur le marché trois types d'évaporateur : les évaporateurs à plaques, les évaporateurs à tubes (horizontaux, inclinés ou verticaux) et les évaporateurs sous vide.

Notre matière première est un produit laitier thermosensible (puisque les protéines et le lactose sont les composés d'intérêt) et potentiellement visqueux, étant préalablement filtré par microfiltration

et ultrafiltration. Pour ce type de produits, l'évaporateur à tubes est généralement conseillé en industrie alimentaire. D'autre part, il est moins coûteux qu'un échangeur à plaques qui présente aussi un risque de colmatage. Il est aussi moins volumineux qu'un évaporateur sous vide qui occupe beaucoup de place pour des contenances faibles.

Le choix s'est donc porté sur un évaporateur à tubes simple effet, vertical et à flot tombant. Un simple effet permet un moindre coût d'investissement, de plus les débits à traiter sont trop peu importants pour que le recyclage des vapeurs soit rentable. La verticalité permet d'économiser l'espace, c'est pourquoi, il est très utilisé en industrie alimentaire. En outre, au vu de la thermosensibilité et de l'importante viscosité du produit, le flot tombant est à privilégier puisque le temps de séjour est faible.

1.1. Principe

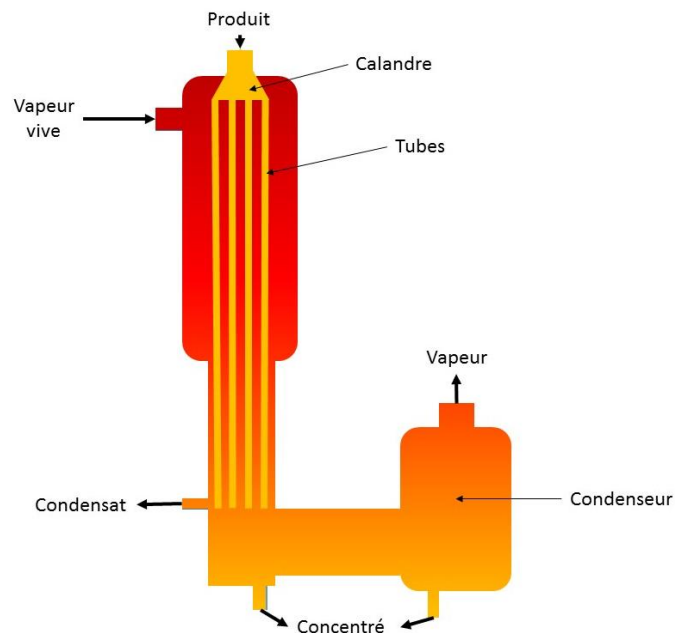


Figure 6 : Schéma d'évaporateur à flot tombant (source personnelle)

Les tubes verticaux de l'évaporateur sont regroupés dans une calandre. Le produit à traiter est introduit au sommet de la calandre, et s'écoule dans les tubes par simple gravité en créant un film liquide sur leurs parois. Les tubes sont traversés par un fluide caloporteur (vapeur de chaudière ou vapeur vive) à co-courant ou contre-courant, qui permet le chauffage du produit jusqu'à son évaporation. Pour des échangeurs industriels à grande échelle, une circulation à contre-courant est généralement plus efficace, et donc beaucoup plus utilisée. La vapeur issue du produit est par la suite recondensée dans le condenseur.

1.2. Calculs

L'objectif de cette opération est de passer de 10% à 60% de matière sèche par évaporation en amont de l'atomisation. En effet, si cette étape est négligée, il faudrait fournir beaucoup plus d'énergie pour l'atomisation, ce qui serait moins rentable.

Un bilan matière a donc été établi (en kg/s) :

Tableau 3 : Bilan massique de la pré-évaporation

	Entrée	Production	Sortie	Sortie (par évaporation)
Total	0,685	0	0,078	0,607
Eau	0,638	0	0,031	0,607
Matière sèche	0,047	0	0,047	0

Ainsi, 0,607 kg/s d'eau doivent être évaporés. A l'entrée, le lactosérum est à une température de 30°C, il faut donc fournir l'énergie pour que l'ensemble atteigne 100°C, on réalise donc un calcul grâce à l'enthalpie :

$$h_c = D_{eau} \times C_p \times (100 - 30)$$

$$h_c = 178 \text{ kW}$$

Il faut ensuite que cette eau change d'état par une enthalpie h_e :

$$h_e = D_{\text{évaporé}} \times L$$

$$h_e = 1\,372 \text{ kW}$$

avec L la chaleur latente de vaporisation massique

L'énergie totale à apporter en une journée est donc de 1550 kW.

1.3. Budget

Les prix des évaporateurs sont très variables selon le cahier des charges. Pour un évaporateur simple effet à flot tombant, le prix approcherait de 500 000 euros.

2. Atomisation

La mise en place d'un atomiseur triple-effet permettrait d'obtenir une poudre de meilleure qualité et de diminuer les coûts de fonctionnement, notamment pour des questions énergétiques. Toutefois, l'investissement serait nettement supérieur (cf figure 7) et nécessiterait un délai bien plus important pour rentabiliser l'installation. On se contentera donc d'un atomiseur simple-effet.

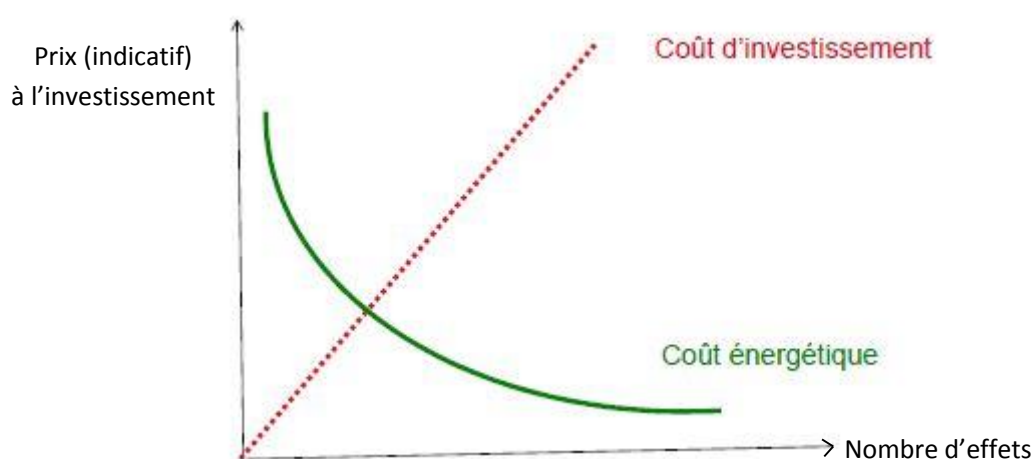


Figure 7 : Investissement selon nombre d'effets

2.1. Principe

Le produit à sécher est pulvérisé sous forme d'un brouillard de fines gouttelettes au sommet d'une conduite cylindrique, la chambre de séchage. Celle-ci est traversée par un courant d'air chaud (à environ 180°C et à co-courant), qui va sécher les gouttelettes et ainsi permettre l'obtention d'une poudre, récupérée facilement en sortie de l'atomiseur grâce à la forme conique du fond.

Il existe des atomiseurs verticaux et horizontaux. Ici, le produit à traiter étant potentiellement thermosensible, on choisit de préférence un atomiseur vertical, où le temps de séjour est réduit puisque les gouttelettes tombent au fond du cylindre par gravité.

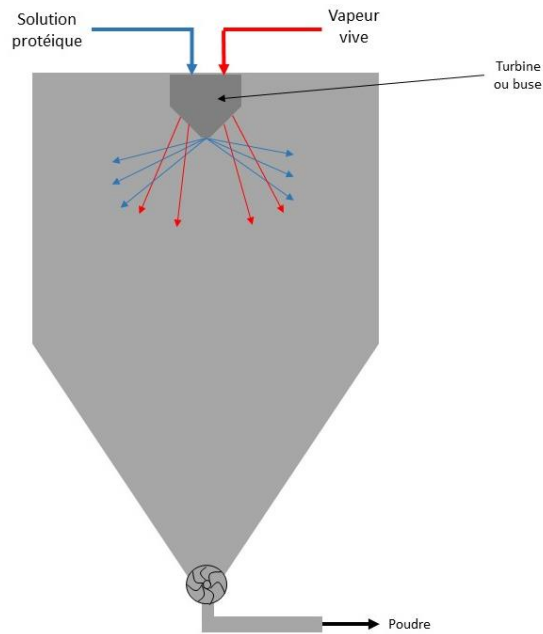


Figure 8 : Schéma d'atomiseur co-courant

Ce procédé a pour avantage un temps de séchage très court, inférieur à une minute, et un maintien de la qualité du produit, sans l'altérer.

1.2. Calculs

L'objectif de cette opération est de passer de 60% à 95% de matière sèche par évaporation. On établit donc le bilan de matière en kg suivant :

Tableau 4 : Bilan matière de l'atomisation (kg)

	Entrée	Production	Sortie	Variation
Total	0,078	0	0,049	0,029
Eau	0,031	0	0,002	0,029
Matière sèche	0,047	0	0,047	0

Alors, 0,029 kg d'eau doivent être évaporés.

Pour cela, l'eau doit être portée à la bonne température, ce qui nécessite une enthalpie h_c :

$$h_c = D_{eau} \times C_p \times (100-60)$$

$$h_c = 4\,872 \text{ W}$$

Il faut ensuite que cette eau change d'état par une enthalpie h_e :

$$h_e = D_{\text{évaporé}} \times L$$

$$h_e = 65,5 \text{ kW}$$

L'énergie totale à apporter à l'atomiseur en une journée s'élève à 70,4 kW. L'évaporation nécessite donc 1620 kW pour obtenir 1,76 tonne de poudre.

1.3. Budget

De même que pour l'évaporateur, les coûts dépendent très largement des paramètres fixés. Ainsi, pour un atomiseur simple effet, le prix sera compris entre un et deux millions d'euros, tandis qu'il approche 4 millions d'euros pour un triple effet.

III. Utilisation de lactose

Tous les types de valorisation du lactose étudiés comportent une étape de fermentation. Par économie de coût, une seule cuve sera utilisée. Après ultrafiltration, il a été estimé qu'un cinquième du volume total de 50 m³ est récupéré en tant que perméat, soit 10 m³. En se basant sur une concentration de 60 g/L de lactose dans le perméat, il faudrait donc traiter 0,6 tonnes de lactose par jour.

1. Fabrication d'acide lactique

L'acide lactique est un acide organique, pouvant porter le nom d'acide du lait. Sa production a été découverte en 1780. Pour un usage commercial, il est réparti en quatre catégories.

Il existe une catégorie où il est synthétisé chimiquement. Cependant cette voie est très coûteuse.

Les trois autres catégories sont des produits de fermentation mais à des taux de pureté différents. Dans cette étude, la production d'acide lactique à 50% (w/w) a été préférée pour des critères de rendement et de coût.

Le procédé global est présenté ci-dessous. (Fig. 9)



Figure 9 : Procédé global de production d'acide lactique à partir de perméat. Source : personnelle.

1.1. Fermentation

Cette étape nécessite la production d'une solution fille représentant 10% du volume total (10m³) préparée avec un ensemencement à 2,5 g/L de *Lactobacillus helveticus*. Ensuite, elle est ajoutée à la solution totale de 10 m³. Le pH doit être de 5,6 et la température de 42 °C. Cette étape dure 40 heures et permet d'aboutir à 0,6 T d'acide lactique pour une concentration initiale d'environ 60 g/L de lactose.

1.2. Purification

1.2.1. Par ultrafiltration

Cette étape permet l'élimination de la biomasse et la rétention de 100% des microorganismes, 100% des protéines, et 1,4% d'acide lactique. Une membrane tubulaire en céramique est utilisée avec un seuil de coupure de 15 kDa. La céramique est utilisée car elle est résistante chimiquement et aux hautes températures rendant possible sa stérilisation. La température et la pression utilisées sont respectivement de 40 °C et de 3 bars (Gonzalez, 2006).

1.2.2. Par échange d'ions

Cette opération est divisée en deux : l'échange de cations puis d'anions. Premièrement, l'échange de cations permet l'élimination du potassium, magnésium, sodium et calcium. L'échange d'anions élimine le chlorure et le phosphate. Ces deux étapes permettent d'aboutir à un taux de purification de l'acide lactique supérieur à 99%.

1.3. Concentration

1.3.1. Préconcentration par osmose inverse

Selon Gonzalez et al., les conditions optimales sont à 25°C et 30 bars. Cette étape permet de préconcentrer la solution d'acide lactique à 100g/L.

1.3.2. Concentration par évaporation

Cette opération aboutit à une solution à 50% (w/w) d'acide lactique. Un évaporateur simple effet a décidé d'être utilisé compte tenu du faible volume par jour à traiter.

1.4. Estimations des coûts

Le tableau ci-dessous représente une estimation des coûts de production à partir de 500 m² de lactosérum, soit 10 fois plus que notre production.

Tableau 5 : Récapitulatif économique du procédé à partir de perméat. (Gonzalez, 2006, Alibaba.com)

	Fermentation	Ultrafiltration	Echangeur d'ions	Osmose inverse	Evaporation
Consommation d'énergie (kWh/an)	5 400 000	558 000	8 778	83 472	21 300
Coût du capital (US\$)	545 000	873 250	174 250	266 500	664 125
Coût annuel (US\$/an)	1 062 500	246 375	68 750	121 000	220 500

Dans ces estimations de coûts sont pris en compte la consommation de produits chimique et de nettoyage, l'énergie, l'eau et également le remplacement des membranes tous les deux ans. Cependant, il ne concerne que la production d'acide à partir du perméat. Ainsi, de manière à avoir une vision globale, il a été fait l'hypothèse que les ultrafiltrations, du lactosérum et du perméat, avaient les mêmes coûts. Aux coûts annuels s'ajoute le travail représentant 220 500 US\$.

Si l'entreprise prévoit de rembourser les coûts du capital sur 15 ans avec un taux d'emprunt de 3% (banque-France.com), la fabrication revient à 2 658 089 US\$/an soit à 1,38 US\$/kg. Ce coût est divisé par 1,2 pour avoir une estimation avec une production 10 fois moins importante soit 1,15 \$/kg.

Le coût de l'acide lactique 50% (w/w) en 2003, (chemicalsmarketreporter.com) est estimé en moyenne à 1,5 US\$/kg.

Ainsi, à partir de 50 m³ de lactosérum par jour, 0,6 T d'acide lactique serait produit, soit 192 T/an, en estimant que une année de travail est égale à 320 jours. Ainsi, le profil de l'entreprise serait de 67 200 \$/an pour la production de l'acide à partir de perméat.

2. Fabrication acide succinique

Actuellement, l'acide succinique est fabriqué à partir de gaz pétrole liquéfié ou de pétrole. Or, ces matières premières se font de plus en plus rares, chères et polluantes. Il faut donc trouver un autre moyen de produire celui-ci.

Ce moyen existe puisque, comme dit dans notre bibliographie, l'acide succinique peut être obtenu d'une manière plus propre par fermentation du lactosérum. Cet acide, de formule semi-développée $\text{HOOC-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$, a de nombreuses applications dans différents domaines (alimentaire, cosmétique, pharmaceutique, textile, plastique...). Par exemple, il permet la fabrication du vin et du vinaigre, la régulation de l'acidité des jus de fruits, etc. Pour le secteur pharmaceutique, ses propriétés régulatrices et conservatrices sont utilisées lors de la production d'antibiotiques. On retrouve également ce composé dans les détergents et les agents moussants. Cependant, une autre de ses applications représente un grand intérêt pour l'avenir : la production de polymères biodégradables dont nous pouvons noter la présence dans les sacs et films d'emballage.

Il représente donc un enjeu économique considérable (son marché est en effet estimé à 2,5 millions d'euros) mais est encore trop peu développé.

2.1. Procédé de fermentation

D'après le mémoire d'Abidi Nabil présenté en 2009 à la faculté des études supérieures de l'Université Laval, nous avons pu obtenir les conditions optimales de la fermentation du lactose en acide succinique. En effet, différentes expériences ont été réalisées afin de savoir quel mode utiliser, quelles concentrations de substrats et biomasse sont nécessaires, quel temps est nécessaire, etc.

Premièrement, il est à noter qu'il vaut mieux fermenter du lactose que du lactosérum pour produire l'acide succinique car la fermentation du lactosérum favorise plutôt la croissance de la biomasse. La fermentation est en mode batch, c'est-à-dire qu'il n'y a ni entrée de substrats, ni sortie de produits durant la fermentation. Ainsi, celle-ci est terminée lorsque l'activité métabolique s'arrête.

Le microorganisme à utiliser est *Actinobacillus succinogenes* souche 130Z, issu du rumen bovin.

Les concentrations nécessaires se trouvent dans le tableau suivant :

Tableau 6 : concentrations optimales de fermentation

Substrats	Levure	Lactose	CO2	Produit qui nous intéresse	Acide succinique
Concentrations optimales	7,5 g/L	25 g/L	0,32 vvm	Concentration maximale	18,7 g/L

Le rendement, élevé, de cette réaction est de 76%.

Il faut désormais calculer le volume de la cuve. D'après le tableau précédent, il nous faut 25 g/L de lactose. Ainsi, en partant des 0,6 tonnes de lactose, le volume contenu dans notre cuve est 24 m³ :

$$V = \frac{\text{masse}}{\text{concentration}} = \frac{6.10^5}{25} = 24\,000\,L = 24\,m^3.$$

Les masses suivantes sont donc placées dans la cuve : $m_{\text{levure}} = 0,18\,T$ et $m_{\text{lactose}} = 0,6\,T$
Ainsi, $m_{\text{acide succinique}} = 0,45\,T$.

2.2. Extraction du moût de fermentation

Après la fermentation, il est nécessaire d'extraire l'acide succinique du reste. Pour cela, trois méthodes sont possibles : électrodialyse, précipitation ou extraction réactive. D'après le tableau suivant, l'extraction réactive est la plus efficace.

Tableau 7 : Comparaison des méthodes d'extraction de l'acide succinique (Abidi Nabil, 2009)

Procédé	Pureté d'acide succinique	Avantages et inconvénients
Électrodialyse	79.6%	- Contamination par l'acide acétique - Couteux
Précipitation	94.2%	- Traces de protéines non éliminées - Contamination par le gypse
Extraction réactive	99.8%	- Pureté élevée - Faible coût de purification

Ce procédé est assez récent et a lieu en différentes étapes. Après la fermentation, il faut procéder à une ultrafiltration ou une centrifugation. L'ultrafiltration sera privilégiée afin de pouvoir mettre en commun au maximum le matériel de production d'acide lactique et celui d'acide succinique. Vient ensuite l'étape d'extraction réactive à proprement parler : le moût de fermentation est mélangé avec un solvant organique puis centrifugé afin de séparer la phase organique, qui contient l'acide qui nous intéresse, de la phase aqueuse. Cette étape est réalisée trois fois pour de meilleurs résultats. Pour finir ce procédé, une distillation sous vide, une cristallisation à basse température et faible pH puis un séchage

de 5h à 100 °C sont à effectuer. Un acide succinique avec une plus grande pureté et à plus faibles coûts que d'autres méthodes est obtenu.

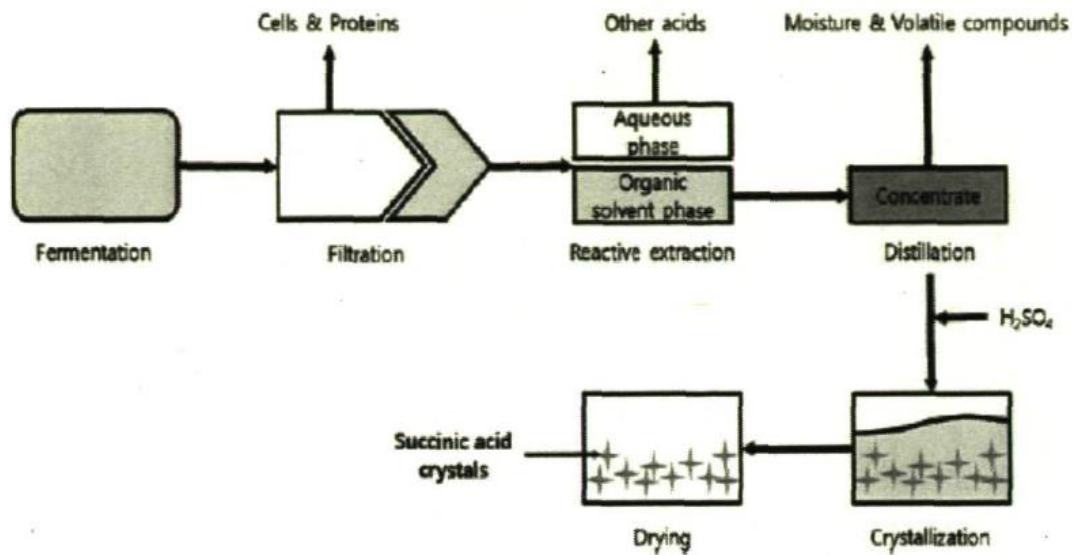


Figure 10 : Procédé d'extraction réactive (Abidi Nabil, 2009)

3. Fabrication de levures

Le lactose peut être utilisé pour produire de la biomasse lors d'une fermentation lactique. Dans ce cas, le but est de diriger la réaction vers la croissance de la biomasse et non vers la production d'un produit. La fermentation est réalisée avec des levures lactiques.

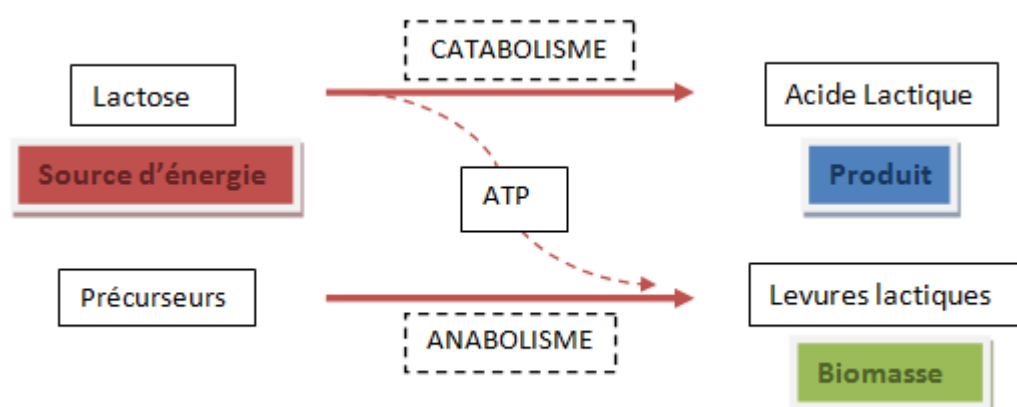


Figure 11 : Schéma métabolique de la production d'acide lactique et de la croissance de levures lactiques

3.1. Choix des éléments nécessaires au procédé

3.1.1. Choix du type de réacteur

Pour produire de la biomasse il faut éviter l'effet Crabtree, c'est-à-dire que si le flux de lactose est élevé, les levures vont avoir plus tendance à produire de l'acide lactique qu'à se développer. Afin de limiter le flux entrant en lactose, il est préférable d'utiliser un mode de fermentation en discontinu. De cette façon, le lactose est ajouté progressivement dans le réacteur, le débit est contrôlé et il peut être ajusté si nécessaire.

3.1.2. Choix de la souche

De nombreuses souches peuvent être utilisées pour réaliser une fermentation lactique. Cependant, les études montrent que *Kluyveromyces fragilis* (Kf) est la souche la plus adaptée à la production de biomasse : le taux de croissance est plus élevé avec cette souche.

3.1.3. Choix du milieu de culture

Pour favoriser la croissance de la biomasse, il est important de mettre dans le milieu de culture, les bons précurseurs, comme il est indiqué sur la figure 11. Des précurseurs des peptones en faible quantité (2% du milieu de culture) et des extraits de levures (0.1% du milieu de culture) sont utilisés. Enfin, la source de carbone est le lactose.

3.2. Dimensionnement du procédé

Le perméat reçu est à 60 g/L de lactose. Or dans la littérature, la concentration optimale en lactose pour la production de biomasse est de 30 g/L. Avec ces informations, il est possible de déterminer le volume de cuve nécessaire pour traiter 0.6 tonnes de lactose par jour. Ainsi, on obtient un volume de 20 000 litres, soit 20 m³. Le rendement en biomasse de cette fermentation, dans les conditions détaillées ci-dessus est de 55%.

3.3. Obtention des levures lactiques

La finalité de cette fermentation est la production de biomasse. Il est donc important de récupérer les levures lactiques produites. Grâce à une filtration de taille adaptée, les levures sont immobilisées sur la membrane et leur récupération est possible.

4. Mise en commun des opérations unitaires de fermentation

Le but de notre projet est de fabriquer les trois produits pour pouvoir s'adapter à la demande. C'est pourquoi la mise en commun d'un maximum de matériel en commun était indispensable pour la diminution des coûts. Pour cela, la première cuve de fermentation sera commune et d'un volume de 25 m³. Pour la fabrication de l'acide succinique et lactique, la membrane d'ultrafiltration sera réutilisée d'où l'intérêt d'une en céramique. En effet, elle est résistante aux hautes températures et peut être stérilisée entre les deux types de productions.

5. Méthanisation

5.1. Principe

Un couplage entre une unité de méthanisation, de 500 kW de puissance électrique et de 600 kW de puissance thermique, et la bioraffinerie du lactosérum a été envisagé. L'objectif est de valoriser le lactosérum en biogaz afin de produire de l'électricité ou de la chaleur directement utilisables pour alimenter en vapeur l'opération de séchage du procédé.

La commune de Neufchâteau dispose déjà d'un méthaniseur pour valoriser les déchets organiques fermentescibles. La production de méthane s'établit alors à environ 967 459 m³. (*FRANTZ. Etude des gisements en déchets organiques et besoins en chaleur du territoire, 2015*)

Nous considérons un débit d'alimentation de l'installation de $Q = 50 \text{ m}^3$ de lactosérum par jour. De plus, le moteur du méthaniseur possède un système de cogénération. Celui-ci lui permet de produire de l'électricité et de la chaleur, dont les rendements sont respectivement de 38% et de 40%.

Trois choix sont alors possibles. Le premier consiste à envoyer directement tout le lactosérum disponible vers le méthaniseur (scénario 1). On ne tiendra pas compte des autres déchets organiques de ce territoire.

Le deuxième scénario vise à utiliser les déchets organiques autres que le lactosérum comme intrants pour le méthaniseur, c'est-à-dire que tout le lactose est valorisé par fermentation (scénario 2). Seuls les déchets organiques de ce territoire sont pris en compte, en excluant le lactosérum.

Enfin, le troisième est un scénario intermédiaire où l'on répartit le lactosérum de manière équitable entre le méthaniseur et la valorisation (scénario 3). Une nouvelle fois, les autres déchets organiques de ce territoire ne sont pas pris en compte.

5.2. Calculs

Le pouvoir méthanogène du lactosérum est voisin de 40 m³ de CH₄ par tonne de matière brute (TMB). De plus, le pouvoir calorifique de 1 m³ de CH₄ est de 10 kWh.

Le tableau ci-dessous décrit les résultats de chaque voie.

Tableau 8 : Caractéristiques de chaque scénario

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Volume de lactosérum	50 m ³	0 m ³ mais autres déchets organiques	25 m ³
Production de CH ₄	2000 m ³	967 459 m ³	1000 m ³
Energie primaire	20 000 kWh	9 674 590 kWh	10 000 kWh
Puissance électrique de l'unité de méthanisation	500 kW	500 kW	500 kW
Production d'électricité	2111 W	975 610 W	1056 W
Puissance thermique du moteur	600 kW	600 kW	600 kW
Production de chaleur	2500 W	1 155 327 W	1250 W

Seuls les calculs du scénario 1 sont présentés ici. Nous disposons alors de 50 m³ de lactosérum.

Calcul de la production CH₄

$$\text{Production CH}_4 = \text{volume lactosérum} \times \text{rendement production CH}_4$$

$$= 50 \times 40 = 2000 \text{ m}^3$$

Calcul de l'énergie primaire CH₄

$$\text{Energie primaire CH}_4 = \text{Energie d'1 m}^3 \text{ de CH}_4 \times \text{Production CH}_4$$

$$= 10 \times 2000 = 20\,000 \text{ kWh}$$

Le calcul de la production totale d'électricité correspond au rendement électrique multiplié par l'énergie primaire du CH₄. De même pour la production totale thermique, elle correspond au rendement thermique multiplié par l'énergie primaire du CH₄.

Production d'électricité

Puissance électrique du moteur = 500 kW

Rendement du moteur = 0,9

$$\begin{aligned} \text{Puissance utilisable} &= \text{Rendement moteur} \times \text{Puissance électrique du moteur} \\ &= 500 \times 0,9 = 450 \text{ kW} \end{aligned}$$

Rendement électrique du moteur de cogénération = 38%

$$\begin{aligned} \text{Production totale d'électricité} &= \text{Rendement électrique du moteur} \times \text{Energie primaire CH}_4 \\ &= 0,38 \times 20\,000 = 7\,600 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\text{Puissance produite} = \frac{(\text{Production totale d'électricité} \times 1000)}{3600} = 2\,111 \text{ W}$$

Production de chaleur

Puissance thermique du moteur = 600 kW

Rendement thermique du moteur de cogénération = 45%

$$\begin{aligned} \text{Production totale de chaleur} &= \text{Rendement thermique du moteur} \times \text{Energie primaire CH}_4 \\ &= 0,45 \times 20\,000 = 9\,000 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\text{Puissance produite} = \frac{(\text{Production totale de chaleur} \times 1000)}{3600} = 2\,500 \text{ W}$$

L'apport énergétique de la méthanisation du lactosérum est négligeable vis-à-vis de l'énergie obtenue par la méthanisation des déchets organiques. Cependant, l'ajout de lactosérum à ces déchets organiques permet de baisser le taux de matière sèche.

Ce type d'installation nécessite un investissement moyen de 6500€/kW électrique. Mais, l'amortissement est assez rapide car, d'une part, le rachat par EDF rapporte entre 8,121 et 13,37 c€/kWh selon la nature du biogaz et la puissance de l'installation, et, d'autre part, les économies d'énergies que l'on peut faire au niveau de la bioraffinerie sont conséquentes.

Ainsi, cette unité de méthanisation permet de s'inscrire dans un contexte de réduction des émissions de gaz à effet de serre, tout en assurant une autonomie en énergie.

Conclusion

Le séchage des protéines est un processus déjà bien connu et exploité, notamment à destination des sportifs. Toutefois, le procédé proposé ici pourrait facilement être amélioré en limitant ses dépenses énergétiques par des systèmes à triple-effet et un recyclage des vapeurs pour peu que l'on ait la possibilité d'investir.

Concernant la production d'acide lactique, à partir d'une étude économique réalisée avec une laiterie en Espagne, il a été démontré que sa production est rentable, pour un profit de 72 000 \$/an. Ce produit a de nombreuses applications, que ce soit en alimentaire ou en industrie plastique. Cependant, il reste à étudier si sa production est toujours rentable dans le cas d'une production partagée entre l'acide succinique, l'acide lactique et la production de levures. Pour ce qui est des levures lactiques, elles sont très utilisées dans le domaine de l'agro-alimentaire. Le procédé de production des levures est efficace, cependant il peut être plus intéressant de se tourner vers des valorisations à plus haute valeur ajoutée telle que la fabrication d'acide succinique. En effet, cet acide trouve des utilisations dans divers domaines, tels que l'industrie plastique ou pharmaceutique par exemple. Il est ainsi intéressant de le produire de manière plus propre puisqu'il est actuellement fabriqué à partir de pétrole. Cependant, les recherches sont, à ce stade, trop peu développées pour dire que la valorisation du lactose en acide succinique est rentable, mais ceci pourra certainement être envisagé dans quelques années.

La méthanisation des déchets organiques et du lactosérum permet de produire du biogaz et donc de l'énergie et de la chaleur, qui viendront alimenter le procédé au niveau de l'opération de séchage. Cet apport d'électricité et de chaleur contribue à assurer l'autonomie énergétique de l'installation et s'inscrit dans un contexte de gestion des déchets du territoire tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre.

Sources

ABIDI NABIL. Valorisation du lactose et du lactosérum en acide succinique par fermentation bactérienne (2008)

ALIBABA. Disponible sur www.alibaba.com. [Consulté en avril 2016]

BOUCIF Noureddine, Thèse : Modélisation et simulation de contacteurs membranaires pour les procédés d'absorption de gaz acides par solvant chimique, 2012.

EDF. Tarifs rachat d'électricité. Disponible sur : <https://www.edf.fr/groupe-edf/responsable-et-engage/responsabilite-societale/mission-de-service-public/rachat-d-electricite> [consulté le 19/04/16 et le 17/05/16]

FRANTZ. Etude des gisements de déchets organiques et besoins en chaleur de la Communauté de Communes du bassin de Neufchâteau, 2015

GANNA et TOUZI. Valorisation du lactosérum par la production de levures lactiques avec des procédés de fermentation discontinue et continue, 2001.

GONZALEZ. Adaptive control of lactic acid production process from wheat flour. In : IFAC 48-8, 2015, 1087-1092.

GONZALEZ. Economic evaluation of an integrated process for lactic acid production from ultrafiltered whey. In: Journal of Food Engineering 80, 2007, 553-561.

KAUFMAN VERONIKA et al. La microfiltration, le traitement thermique et la conservation du lait.

MILLIPORE. Protein Concentration and Diafiltration by Tangential Flow Filtration [consulté en Février 2016]

NARAYANAN. L(+) lactic acid fermentation and its product polymerization. In : Journal of Biotechnology, 7, 2004.

ROJAN. Production of lactic acid. In: Journal of basic microbiology 47 :25-30, 2007