

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de TIZI- OUZOU



Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Département des Sciences Agronomiques

Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master académique en Science Alimentaire

Spécialité: Agroalimentaire et contrôle de qualité

Thème

**Valorisation du lactosérum : étude de l'état des lieux et
impact environnemental**

Présenté par :

ABDENOURI Anies et FOUCHEL Assia

Devant le jury :

Président : **Mr BENGANA M**, maître de conférences à l'UMMTO.

Examineur : **Mme REMANE-BENMALLEM Y**, maître assistante à l'UMMTO.

Promotrice : **Mme LAMMI-MEFIDENE S**, maître de conférences à l'UMMTO.

2020/2021

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce modeste travail.

C'est un grand honneur pour nous d'avoir eu la chance de travailler avec Mme LAMMI-MEFIDENE Sarah, notre promotrice. Aussi, nous tenons à lui exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements les plus chaleureux pour son aide la plus précieuse, son apport constructif, ses encouragements, ses conseils et surtout sa modestie qui est aussi grande que son mérite.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury Mr BENGANA M et Mme REMANE-BENMALLEM Y pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons également à exprimer nos remerciements les plus sincères à tous nos enseignants du département des Sciences agronomiques de l'université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou pour leurs compétences et expertises.

Anies et Assia

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

À mes très chers parents RACHID et DALILA à qui je dois le mérite d'en arriver là, un grand et tout particulier « merci », de m'avoir transmis de vraies valeurs et pour leur inépuisable affection, leur soutien inconditionnel, leur sacrifice et leur amour infini. Qu'Allah les garde en bonne santé.

Je souhaite qu'ils trouvent en ce modeste travail le témoignage de ma reconnaissance et toutes mes affections.

À ma sœur KATIA, qui a été toujours à mes côtés.

À mes chers frères : SOFIANE, ABDENOUR et ADEL.

À mes neveux : MOHAMED et AMINA.

À ma grand-mère ROSA que dieu la garde pour nous.

À mes chers oncles et tantes.

À mes chers cousins et cousines.

À toute ma famille FOUCHEL.

À mon amie et mon binôme ANIES, avec qui j'ai eu l'honneur de réaliser ce travail.

À tous mes chers amis surtout DIHIA et HAFIDA.

À tous mes camarades de la promotion « Agroalimentaire et Contrôle de Qualité ».

ASSIA

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

MES CHERS PARENTS « KAMAL et HASSINA »

Qui sont une source de motivation et un exemple de réussite pour moi.

*Qui m'ont soutenue et encouragée dans toutes les circonstances et qui
ont toujours cru en moi et en mes capacités.*

*Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude, mon respect, ma reconnaissance et
mon amour inconditionnel.*

*Que ce travail soit l'accomplissement et le fruit de tous leurs sacrifices et
soutiens.*

Que dieu leur procure une bonne santé et une longue vie.

*Ma CHÈRE SCEUR LYRIA et mon CHER FRÈRE WASSIM qui ont
toujours été là pour moi et qui ne cessent de m'encourager et de me
donner de la force pour avancer dans ma vie.*

Toute la FAMILLE ABDENOURI et HASSOUN.

*Mon amie et mon binôme ASSIA, avec qui j'ai eu l'honneur de réaliser ce
travail.*

Tous mes CHERS AMIS que j'affectionne particulièrement.

*Tous mes camarades de la promotion « Agroalimentaire et Contrôle de
Qualité ».*

ANIES

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction	1
---------------------------	----------

Partie I : Généralités sur le lactosérum

I. 1 Définition	2
I. 2 Composition biochimique	2
I. 2. 1 Eau.....	2
I. 2. 2 Lactose	2
I. 2. 3 Minéraux	3
I. 2. 4 Vitamines	3
I. 2. 5 Matière grasse	3
I. 2. 6 Fraction protéique	4
I. 3 Sources industrielles	4
I. 3.1 Fromagerie	4
I. 3.2 Beurrerie.....	5
I. 4 Différents types	5
I. 4. 1 Lactosérum doux	5
I. 4.2 Lactosérum acide	5
I.5 Marché mondial	7
I. 6 Altération	9
I. 7 Pouvoir polluant.....	9

Partie II : Voies de valorisation du lactosérum

II. 1 Intérêts de la valorisation.....	10
II. 1. 1 Intérêts écologiques	10
II. 1. 2 Intérêts économiques	10
II. 1. 3 Intérêts nutritionnels	11
II. 1. 4 Intérêts sociaux économiques	14
II. 2 Voies de valorisation du lactosérum.....	14

II. 2. 1 Extraction de molécules d'intérêts.....	16
II. 2. 2 Usages alimentaires	25
II. 2. 3 Usages agricoles	27
II. 2. 4 Applications en biotechnologie	28
II. 2. 5 Applications pharmaceutiques.....	30
II. 2. 6 Applications cosmétiques	32
II. 2. 7 Valorisation en Algérie.....	32
II. 2. 8 Législation Algérienne.....	33

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

III. 1. Analyse de cycle de vie	35
III. 1. 1. Définition.....	35
III. 1. 2. Méthodologie.....	35
Conclusion.....	48

Références bibliographiques

Résumé

Liste des abréviations

α -La: *α -lactalbumine.*

β -Lg: *β -lactoglobuline.*

AA: Acide aminé.

ACV: Analyse de cycle de vie.

AG: Acide gras.

AGLC: Acide gras à longue chaîne.

AGV: Acide gras volatil.

BSA: *Bovin serum albumin.*

CC: Changement climatique.

CEI: Chromatographie par échange d'ions.

CPL: Concentré de protéines du lactosérum.

CV: Cycle de vie.

DA: Digestion anaérobie.

DALY: *Disabled adjusted life years.*

DBO: Demande biochimique en oxygène.

DCO: Demande chimique en oxygène.

EICV: Evaluation des impacts de cycle de vie.

Éq: Équivalent.

FOB: *Free on board.*

GES: Gaz à effet de serre.

GMP: Glycomacropéptide.

H&G: Huile et graisse.

Ig: Immunoglobuline.

INRA: Institut National de la Recherche Agronomique.

KWh: Kilowatt/heure.

LF: Lactoferrine.

LP: Lactoperoxydase.

MG: Matière grasse.

MJ: Mégajoules.

MO: Matière organique.

MS: Matière sèche.

Mt: Mégatonne.

OHPA: *Obligate hydrogen producing acetogens.*

ONS: *Office for National Statistic.*

PDF: *Potentially disappeared fraction.*

PL: Poudre de lactosérum.

QE: Qualité des écosystèmes.

SCGAE: Société Canadienne de Génie Agroalimentaire, de la bio-ingénierie et de l'Environnement.

SH: Santé humaine.

Liste des tableaux

Tableau I : Quantités des principales vitamines présentes dans le lactosérum.....	03
Tableau II : Caractéristiques physicochimiques des protéines du lactosérum	04
Tableau III : Composition moyenne du lactosérum doux et acide.....	06
Tableau IV : Propriétés fonctionnelles des protéines de lactosérum	12
Tableau V : Propriétés biologiques des protéines de lactosérum	13
Tableau VI : Etapes de séparation des protéines du lactosérum par précipitation	22
Tableau VII : Usages du lactosérum dans les industries agroalimentaires	26
Tableau VIII : Comparaison générale entre la production de la PL et la production du biogaz	47

Liste des figures

Figure 01 : Lactosérum	02
Figure 02 : Schéma technologique d'obtention des principaux types de sérums issus de la première transformation du lait	06
Figure 03 : Prix FOB (<i>Free on board</i> = sans frais à bord) en Europe de l'ouest et aux USA de la PL	07
Figure 04 : Volumes des exportations mondiales de la PL.....	08
Figure 05 : Schéma des différents processus appliqués pour la valorisation du lactosérum	15
Figure 06 : Principe d'un procédé de filtration sur membrane à partir du Lactosérum	19
Figure 07 : Principe de la chromatographie gel-filtration	20
Figure 08 : Méthode de la chromatographie échangeuse d'ions	20
Figure 09 : Principe de la chromatographie hydrophobe	21
Figure 10 : Schéma de la valorisation du lactosérum via le compost	27
Figure 11 : Schéma de la méthanisation.....	38
Figure 12 : Schéma du processus de production de biogaz à partir du lactosérum.....	39
Figure 13 : Séparation des fines de caséines et de la graisse de lactosérum	40
Figure 14 : Principe de fonctionnement d'un atomiseur spray	42
Figure 15 : Schéma du processus de production de PL.....	42
Figure 16 : Catégories de dommage et catégories d'impacts de la méthode IMPACT 2002+. .	44
Figure 17 : Analyse et comparaison des catégories d'impacts des productions de PL et de biogaz	45
Figure 18 : Analyse des étapes de production de PL	46
Figure 19 : Analyse des étapes de production de biogaz	46

Introduction

L'industrie laitière produit annuellement, des quantités importantes de lactosérum. Son rejet dans l'environnement constitue de ce fait une source de pollution. Cette problématique est due, d'une part, à ses volumes abondants générés et d'autre part, à sa teneur élevée en matières organiques, ce qui empêche son élimination à l'état brut dans la nature.

La production mondiale de lactosérum a été estimée à environ 180 à 190 million de tonnes par an (Mollea *et al.*, 2013). Cette production augmente à peu près au même rythme que celle du lait (42 % par an) (Papademas et Kotsaki, 2019). Selon les estimations de l'ONS (2007), l'Algérie produit des quantités très importantes de lactosérum dépassant 10 millions de litres par an. Cette aisance, au lieu d'être exploitée pour sa richesse en nutriments, est déversée dans les cours d'eau.

La valorisation du lactosérum serait intéressante sur le plan économique, en permettant une meilleure exploitation de la matière première et donc augmenterait les bénéfices, aiderait aussi à diversifier la production et diminuer ainsi le taux de chômage. Sur le plan écologique, elle pourrait limiter le problème de pollution environnementale engendrée par ce sous-produit, produire de l'énergie renouvelable et de ce fait, diminuer le recours aux énergies fossiles.

L'objectif de notre travail est de revoir les différentes voies de valorisation du lactosérum disponibles à ce jour ; ensuite, de comparer l'impact sur l'environnement de deux d'entre elles.

Partie I

Généralités sur le lactosérum

I. 1 Définition

Le petit-lait a été découvert il y a environ 3000 ans, lorsque les estomacs des veaux étaient utilisés pour stocker et transporter le lait. Grâce à l'action de l'enzyme naturelle chymosine (présure) présente dans l'estomac des veaux, le lait coagulait pendant le stockage et le transport, ce qui donnait du caillé et du lactosérum (Smithers, 2008).

Le lactosérum est la partie aqueuse du lait obtenue par coagulation acide, la chaleur ou l'action de la présure. C'est un liquide opaque ayant une couleur jaune-verdâtre comme le montre la figure 01, avec une teneur en solide généralement de 6 à 6.5% (Poids/Volume) mg/L (Pintado *et al.*, 2001).



Figure 01 : Lactosérum (Medinbio, 2015).

I. 2 Composition Biochimique**I. 2. 1 Eau**

Le lactosérum se caractérise par une très grande dilution, il contient en moyenne 94% d'eau (Morr et Ha, 1993; Linden et Lorient, 1994).

I. 2. 2 Lactose

Le lactose est le principal constituant du lactosérum, il représente 70% de la matière sèche (MS), mais aussi une source d'énergie très importante. La plupart des glucides du lait passent dans le lactosérum après la fabrication du fromage, 90 % d'entre eux sont composés de lactose en grande partie, glucose, galactose, oligosaccharides et sucres aminés en petite

quantité, il peut être récupéré à partir du lactosérum ou plus probablement à partir du perméat de lactosérum par cristallisation (Paterson, 2009).

I. 2. 3 Minéraux

Toutes les matières minérales en solution dans le lait se retrouvent dans le lactosérum et selon certaines pratiques fromagères avec des sels ajoutés, donc le lactosérum a une forte teneur en matière minérale, qui dépend du pH au moment de la fabrication. Les 8 à 10% de la matière saline de l'extrait sec du sérum sont constitués pour plus de 50% de chlorure de sodium (NaCl) et de potassium (KCl) et pour le reste de différents sels de calcium principalement sous forme de phosphate de calcium $[Ca_3(PO_4)_2]$ (Berrocal, 2000).

I. 2. 4 Vitamines

Les vitamines du lactosérum sont hydrosolubles, parmi lesquelles, on note des quantités importantes de riboflavine (B2) (c'est ce qui donne la couleur jaune verdâtre au lactosérum), d'acide pantothénique (B5), d'acide nicotinique (B3), de thiamine (B1), de pyridoxine (B6) et d'acide ascorbique (C) (Woo, 2002).

Les quantités des vitamines les plus importantes, sont présentées dans le tableau I.

Tableau I : Quantités des principales vitamines présentes dans le lactosérum (Mereo, 1971).

Vitamines	Quantités (mg/l)
Thiamine (B1)	0.83
Riboflavine (B2)	1.24
Acide nicotinique (B3)	0.85
Acide pantothénique (B5)	3.34
Pyridoxine (B6)	0.85
Cobalamine (B12)	0.03
Acide ascorbique (C)	2.2

I. 2. 5 Matière grasse

Le lactosérum contient très peu de matières grasses (MG) : 0.3 g pour 100 g de lactosérum liquide. Cette quantité est en principe négligeable ; dans la pratique, le lactosérum est considéré comme étant sans graisse. Cela en fait, entre autres, un aliment idéal pour les personnes qui suivent un régime amaigrissant (Vasey, 2006).

I. 2. 6 Fraction protéique

Les protéines du lactosérum représentent environ 20% des protéines totales du lait et les principales fractions sont β -lactoglobuline (β -Lg), α -lactalbumine (α -La), le glycomacropéptide (GMP), immunoglobuline (Ig), tandis que les protéines mineures sont le bovin serum albumin (BSA), lactoferrine (LF) et la lactoperoxydase (LP) (Walzem *et al.*, 2002; Sharma, 2018). Ces protéines globulaires (α -La et β -Lg) sont plus solubles dans l'eau que les caséines, sont sensibles à la chaleur et peuvent être précipitées par traitement thermique dans des conditions appropriées de pH et de force ionique (Zadow, 2003). Tous les composants protéiques sont naturellement présents dans le lactosérum, à l'exception des GMPs qui sont produites à partir de la caséine lors de la première étape de la transformation enzymatique du fromage (Madureira *et al.*, 2007).

La composition des protéines du lactosérum et le rapport caséine/protéine de lactosérum dépendent des laits des différentes espèces de mammifères et des variations saisonnières, ils peuvent varier de 6 à 10 g/L de protéines (Uniacke-Lowe, 2010). Les caractéristiques physicochimiques des protéines du lactosérum sont représentées dans le tableau II.

Tableau II : Caractéristiques physicochimiques des protéines du lactosérum

(Adapté de : Papademas et Kotsaki, 2019).

Protéines	% de protéines	Concentration (g/L)	Poids moléculaire (kDa)	point isoélectrique
β -Lg	50 - 55	3.3	18.4	5.13
α -La	20 - 25	0.7	14.2	4.2 - 4.5
Ig	10 - 15	0.7	161 - 1000	5.5 - 8.3
GMP	10 - 15	1	7	3.08 - 3.58
BSA	5 - 10	0.3	66.4	4.7 - 4.9
LF	1 - 2	0.1	76,1	8.81
LP	0.50	0.03	78	7.7 - 9.6

I. 3 Sources industrielles

I. 3. 1 Fromagerie

C'est l'ensemble des procédés qui conduisent à la fabrication des fromages à partir du lait nature. Ce dernier subit les processus de coagulation et de synérèse, aboutissant d'une part

à une phase solide le « fromage », d'une autre part à une phase liquide « lactosérum » (Laplanche, 2004).

I. 3. 2 Beurrerie

C'est l'ensemble des procédés qui conduisent à la fabrication du beurre à partir du lait nature. Après écrémage de ce dernier suivi d'une extraction de la caséine par précipitation, on obtient du « lactosérum écrémé » (Laplanche, 2004).

I. 4 Différents types

I. 4. 1 Lactosérum doux

Il est obtenu après la coagulation de la caséine sous l'action de la présure sans acidification préalable; on obtient alors un sérum doux, pauvre en sels minéraux et riche en lactose et en protéines. En plus des protéines solubles du lait, ce type de lactosérum contient une glycoprotéine qui provient de l'hydrolyse de la caséine Kappa par la présure (GMP) (Sottiez, 1990; De La Fuente *et al.*, 2002).

Le lactosérum doux issu de la fabrication de fromage à pâte pressée cuite ou non cuite (Emmenthal, Saint Paulin, Edam, etc.), est de pH variant entre 5 et 6.3 (Morret Ha, 1993). Lorsque le lactosérum doux n'est pas traité avec toutes les précautions nécessaires, la poursuite de la fermentation naturelle augmente son acidité.

I. 4. 2 Lactosérum acide

Il est obtenu après la coagulation du lait par précipitation des caséines à leur pH isoélectrique de 4.6 par ajout d'acide fort ou d'acide lactique (Violeau, 1999). La caséine est combinée à des sels de calcium, l'acidification entraîne sa déminéralisation qui fait passer dans le sérum une part importante d'éléments minéraux, notamment le calcium et le phosphore (Sottiez, 1990). Le lactosérum acide provient de la fabrication des pâtes fraîches et des pâtes molles, son pH varie entre 4.5 - 5 (Adrian *et al.*, 1991). Les lactosérums acides sont moins riches en lactose et plus riche en minéraux. Ils sont aussi plusensemencés en germes lactiques et moins sujets à des fermentations que les lactosérums doux.

Les principaux types de sérums issus de la première transformation du lait sont présentés dans la figure 02.

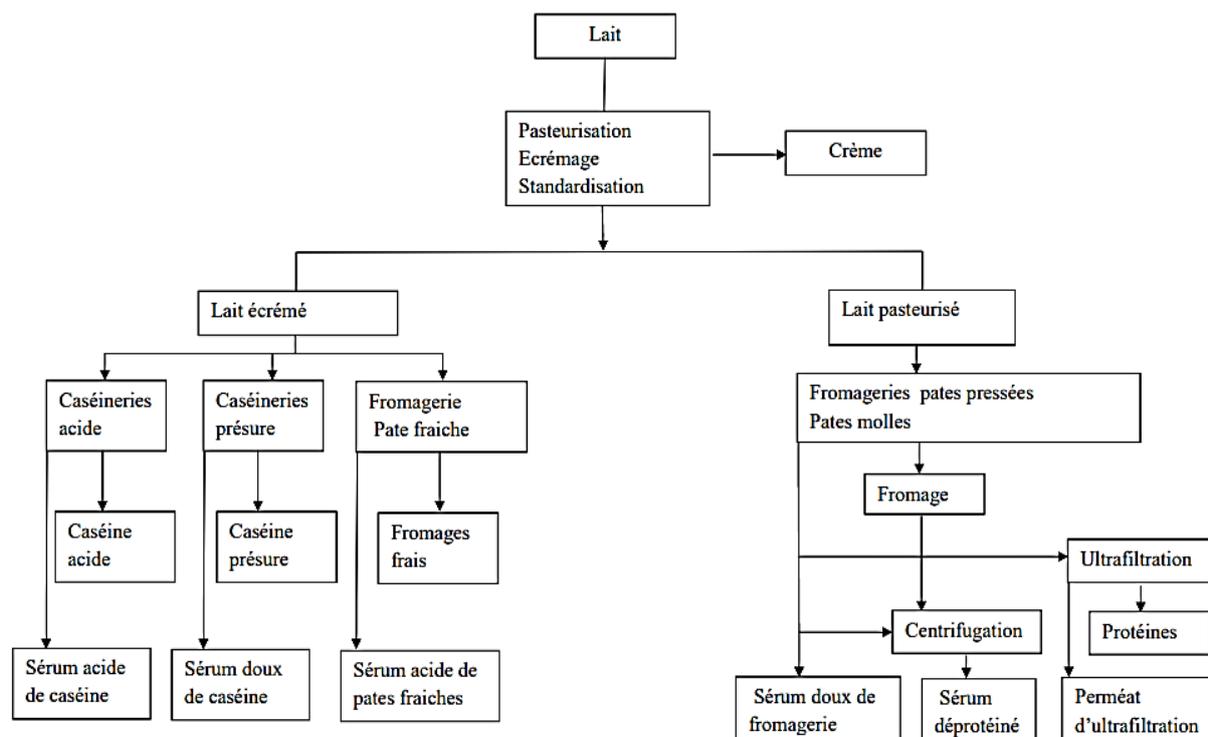


Figure 02 : Schéma technologique d'obtention des principaux types de sérums issus de la première transformation du lait (Sottiez, 1990).

La composition du lactosérum dépend du lait utilisé au départ et du type de coagulation dont il est issu. En général, le lactosérum est majoritairement composé d'eau, de lactose, de protéines, de MG et de minéraux. Les teneurs de ces différents éléments sont présentées dans le tableau III.

Tableau III : Composition moyenne du lactosérum doux et acide
(Adapté de : Morr et Ha, 1993; Linden et Lorient, 1994).

Composants	Lactosérum doux (%)	Lactosérum acide (%)
Eau	93	93.5
MS	7	6.5
Lactose	4.77	4.71
Protéines	0.82	0.77
Minéraux	0.53	0.69
MG	0.07	0.03

I. 5 Marché mondial

L'industrie du lactosérum s'est considérablement développée depuis l'an 2000 et a vu la progression de marchés se chiffrant en milliards d'euros : poudre de lactosérum (PL), protéines de lactosérum, sans parler du marché du lactose, du lactose pharmaceutique et des dérivés du lactose ([Dossier technique], s. d.). Les volumes des exportations mondiales de la PL sont représentés dans la figure 04.

Au niveau mondial, cette valorisation attire le marché, dynamisé par une demande de plus en plus importante. Alors que le prix moyen de la PL était relativement stable (400-600 €/tonne) entre 2000 et 2006, il se situe en 2013 à environ 1000 €/tonne, après de fortes fluctuations, comme le montre la figure 03. Comme l'ensemble des produits laitiers industriels, il a connu une flambée des prix en 2007 jusqu'à un niveau historique de 1400 €/tonne avec une hausse de presque 40% entre 2006 et 2007. Il a ensuite chuté de 30% entre 2007 et 2008, puis de 15% l'année suivante, retrouvant ainsi les niveaux observés entre 2000 et 2006. Ces mouvements s'expliquent par une hausse de la demande mondiale en produits laitiers plus forte que celle de la collecte mondiale de lait, puis après 2007 et jusqu'en 2009 par un excédent d'offre vis-à-vis de la demande. Depuis 2009, les prix sont de nouveau portés par une demande croissante sur le marché international. Les cours semblent se stabiliser depuis 2011 autour de 1 000 €/tonne (FranceAgriMer, 2013).

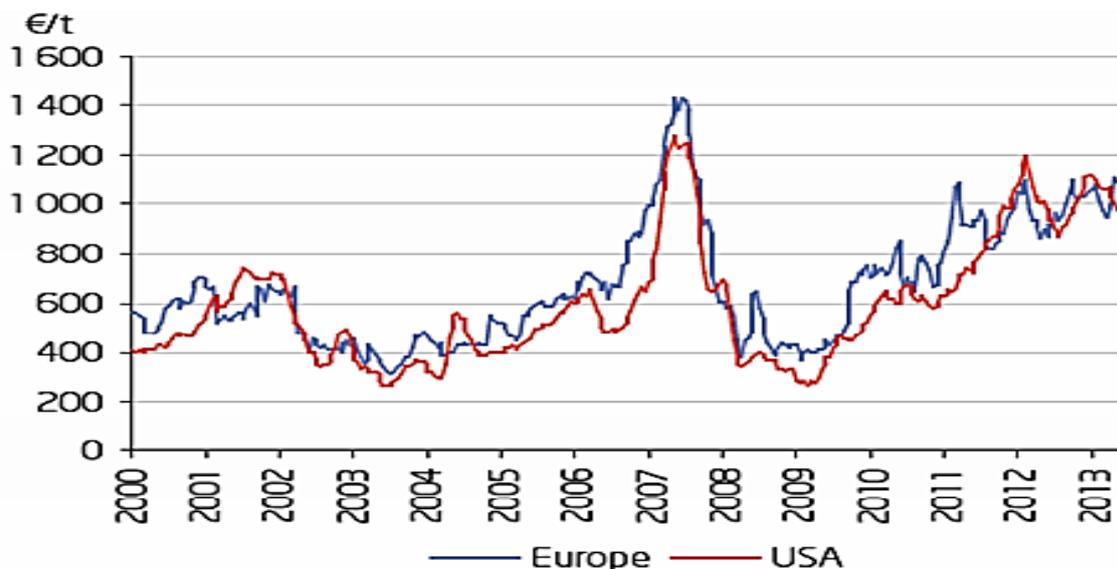


Figure 03 : Prix FOB (*Free on board* = sans frais à bord) en Europe de l'ouest et aux USA de la PL (FranceAgriMer, 2013).

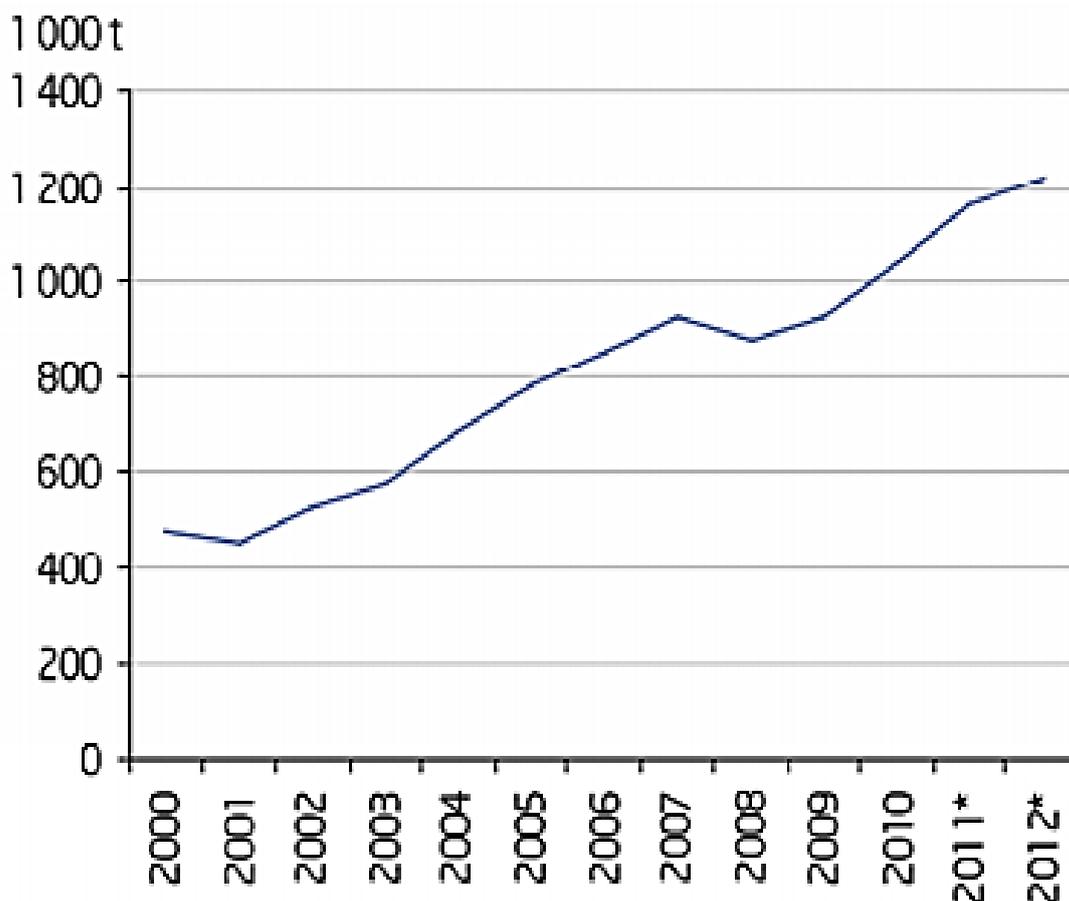


Figure 04 : Volumes des exportations mondiales de la PL (FranceAgriMer, 2013).

Depuis 2009, selon la FAO, la production mondiale de la PL s'est élevée à plus de 100 Mégatonne (Mt). Les principaux fabricants sont l'Union Européenne et les Etats-Unis, à l'origine de 50% et 20% respectivement, des fabrications mondiales de lactosérum. Ces deux entités sont aussi les principaux fournisseurs du marché mondial et représentent, à elles seules, près de 75% des volumes échangés en 2010. La demande internationale se situe principalement en Asie, tirée par la Chine, premier importateur mondial représentant 27% des volumes échangés. Les autres principaux pays importateurs sont l'Indonésie (7%), la Malaisie (6%), le Japon (5%) et la Russie (5%). Entre 2000 et 2010, les importations de ces pays ont fortement augmenté, sauf sur le marché mature du Japon. La forte demande de pays dépendants des importations rend les équilibres sur ce marché assez fragiles, et une hausse de la demande (comme en 2007) ou une baisse de l'offre, comme celle de début 2013, entraîne rapidement une variation marquée des cours mondiaux (FranceAgriMer, 2013).

I. 6 Altération

Le lactosérum est principalement biodégradable puisqu'il contient une grande portion de matières organiques (MO) telles que des glucides, des protéines et des huiles et graisses (H&G). Il est estimé que 97.7% de la demande chimique en oxygène (DCO) totale est comptabilisée par ces MO (Hwang *et al.*, 1998). Le lactose est le plus rapidement biodégradable et les composés dérivés de sa dégradation sont les acides gras volatils (AGV), le lactate, le formate et l'éthanol (Kisaalita *et al.*, 1987).

Les protéines sont moins facilement biodégradables que les glucides, leur dégradation se fait très bien lorsque elles sont acclimatées à la biomasse. Les acides aminés (AA), produits dérivés de la dégradation de protéines, sont dégradés en AGV et en hydrogène (H₂) (Perle *et al.*, 1995).

La biodégradation des H&G est la plus lente (Fang *et al.*, 2000), elles sont premièrement hydrolysées au glycérol et aux acides gras à longue chaîne (AGLC) de C10 à C50 et ces derniers sont réduits en AG plus courts avec la coenzyme A, pour finalement être réduit en AGV et en H₂ (Madigan *et al.*, 2006).

I. 7 Pouvoir polluant

Pendant de très nombreuses années, le lactosérum était considéré comme un déchet organique de l'industrie agroalimentaire. Il n'était pas bien exploité mais il était généralement épandu dans les champs ou déversé dans les rivières et les cours d'eau (Essadaoui, 2012). Ainsi, il représentait un sérieux problème environnemental à cause de :

- **Sa demande biologique en oxygène (DBO) et sa DCO élevées**

DBO de 40 000 à 60 000 mg/L, DCO de 50 000 à 80 000 mg/L, c'est-à-dire qu'un litre de lactosérum nécessite environ 60 g d'oxygène pour que ses MO soient détruites par oxydation microbienne (Papademas et Kotsaki, 2019).

- **Ses volumes abondants générés**

Pour produire 1 kg de fromage, on obtient environ 9 L de lactosérum à partir de 10 L de lait (Essadaoui, 2012). En effet, l'industrie fromagère produit environ 115 millions de tonnes de lactosérum par an et 47 % de celui-ci est directement évacué dans les égouts (Papademas et Kotsaki, 2019).

Partie II

Voies de valorisation du lactosérum

II. 1 Intérêts de la valorisation**II. 1. 1 Intérêts écologiques**

Le rejet du lactosérum dans le milieu naturel diminue le rendement des cultures et influence également sur la vie aquatique, par l'épuisement de la teneur en oxygène dissous dans l'eau (Essadaoui, 2012).

On estime que 4000 L de lactosérum pourraient causer des dommages environnementaux équivalents à ceux causés par les déchets fécaux produits par 1900 personnes. Ainsi un litre de lactosérum correspond à environ 85% de la pollution journalière générée par un habitant (Laplanche *et al.*, 2006). Ces torts causés à l'environnement pourraient être évités d'autant que le lactosérum est une matière noble dont il y a encore beaucoup à tirer.

Avantages écologiques de la valorisation du lactosérum :

- Réduction de son volume final rejeté dans l'environnement (Banu *et al.*, 2020).
- Diminution du pouvoir contaminant des eaux usées des industries laitières (Interreg Sudoe AGROSMARTcoop, 2017).
- Diminution de la consommation de ressources hydriques et de combustibles fossile.
- Production de l'énergie renouvelable : biogaz, biocarburant, électricité et chaleur.
- Conception d'emballages biodégradables (Cinelli *et al.*, 2014).
- Réduction de l'utilisation de fertilisants chimiques.

II. 1. 2 Intérêts économiques

La relance économique et la politique environnementale ont fortement accru l'intérêt pour la valorisation des sous-produits. Aujourd'hui, aucune conception de processus de production n'est concevable sans prendre en compte ces aspects. Le grand effort dans cette direction est prouvé par le grand nombre de conférences organisées sur ces sujets, la naissance de revues spécifiques, d'articles et de brevets. De toute évidence, seule une partie de ces nouvelles propositions est réellement prometteuse.

En fait, seules les études d'optimisation et de mise à l'échelle peuvent permettre une réelle évaluation de leur faisabilité technique. D'autre part, l'évaluation de la faisabilité économique des procédés proposés est indispensable. Pour cette raison, il est important

d'estimer le prix commercial du bioproduit potentiel et la gamme d'applications; les coûts de stockage et de transport ; la taille, la flexibilité et la localisation des installations ; les économies réalisées sur les coûts d'élimination ou de traitement des déchets (Petruccioli et *al.*, 2011). D'après Interreg Sudoe AGROSMARTcoop (2017), les avantages et les inconvénients économiques de la valorisation sont les suivants :

Avantages économiques de la valorisation :

- Une meilleure exploitation de la matière première permettant d'augmenter les bénéfices.
- Une réduction des coûts de dépuración des déchets finaux. L'utilisation correcte de cette technologie permet de déverser les eaux usées directement dans le réseau d'assainissement.
- Permettre un traitement intégral d'un volume moyen/important de lactosérum.
- Certains systèmes peuvent être utilisés dans le cas d'autres procédés industriels, comme la régénération de saumures.
- Diversification de la production de l'entreprise : obtention de nouveaux produits.
- Des bénéfices économiques dérivés de la valorisation : Entreprise plus compétitive.
- Capacité d'absorber la production complète de lactosérum d'une entreprise et même de se charger de la production d'autres industries des alentours, ce qui permet une meilleure rentabilité des installations.

Inconvénients économiques de la valorisation :

- Coût des études de viabilité économique et technique.
- Coûts des équipements, des installations et de la formation du personnel.
- Coûts de maintenance et de nettoyage des équipements.
- Besoin de volumes moyens/importants de lactosérum pour que le procédé soit rentable.

II. 1. 3 Intérêts nutritionnels

La valeur nutritionnelle et les propriétés fonctionnelles du lactosérum sont liées au lactose et aux protéines (Lupin, 1998).

- **Protéine**

Bien que le lactosérum soit source d'une variété de nutriments, ce sont les protéines qui constituent son principal intérêt. Cela est expliqué par leurs multiples propriétés biologiques et fonctionnelles qui sont représentées dans les tableaux IV et V respectivement (Madureira *et al.*, 2007; Smithers, 2008).

Tableau IV : Propriétés fonctionnelles des protéines de lactosérum dans le système alimentaire (Adapté de : De Wit, 2001).

Propriétés fonctionnelles	Produits alimentaires
Solubilité	Boissons
Hydratation	Viande/Boulangerie
Viscosité	Soupes/Sauces
Gélification	Viande/poisson
Propriétés émulsifiantes	Lait maternisé
Absorption des graisses	Saucisses
Propriétés moussantes	Mousses
Rétention d'arômes	Aliments préparés
Liant minéral	Aliments nutritionnels

Tableau V: Propriétés biologiques des protéines de lactosérum.

Protéines	Activités biologiques	Références
<i>β</i>-Lg	Source de peptides bioactifs. Liaison et transport de substances hydrophobes (vitamine A et E, AG libres) Source d'aa essentiels et à chaînes ramifiées. Facilite la digestion. Stimulation de la lipolyse. Activité antioxydante. Effets antibactériens et antiviraux. Effets hypocholestérolémiques.	(Jauregi et Welderufael, 2010) (Marshall, 2004) (Woo, 2002) (Fox <i>et al.</i> , 2015) (Guo, 2019)
GMP	Effet antiadhésif contre les bactéries pathogènes. Source d'aa à chaînes ramifiées. Source rare d'aa que les patients atteints de phénylcétonurie peuvent tolérer, car il ne contient pas de phénylalanine. Favorisent la croissance bifidobactérienne et modulent le système immunitaire. Facilite la digestion.	(Jauregi et Welderufael, 2010) (Papademas et Kotsaki, 2019). (Woo, 2002).
<i>α</i>-La	Effet antiadhésif contre les bactéries pathogènes. Source d'aa essentiels à chaînes ramifiée. Réduit le stress oxydatif grâce à ses propriétés de chélation du fer. Anticancérigène. Régule la biosynthèse du lactose; porteur de calcium ; immunomodulateur. Favorise l'absorption de minéraux.	(Jauregi et Welderufael, 2010) (Marshall, 2004) (Woo, 2002) (Fox <i>et al.</i> , 2015)
Ig	Prestations immunitaires modulantes.	(Marshall, 2004)
LF	Activité antimicrobienne (propriétés de fixation du fer). Activité antioxydante. Favorise la croissance des bactéries bénéfiques. Anti-inflammatoire. Immunomodulateur, anticancérigène ; antimétastatique. Activité antivirale et agit comme facteur de croissance des cellules.	(Jauregi et Welderufael, 2010) (Marshall, 2004) (Woo, 2002) (Fox <i>et al.</i> , 2015)
LP	Activité antimicrobienne (élimination des peroxydes).	(Jauregi et Welderufael, 2010)
BSA	Propriétés anticancéreuses. Source d'aa essentiels. Contrôle la pression osmotique du sang. Transporte : les hormones, les acides gras, de la bilirubine, et divers ions métalliques. Fixe le calcium et tamponne le pH. Activité antioxydante.	(Jauregi et Welderufael, 2010) (Marshall, 2004) (Fox <i>et al.</i> , 2015) (Guo, 2019)

- **Lactose**

Le lactose présente de nombreux aspects bénéfiques et possède des propriétés semblables à celles des fibres alimentaires et des prébiotiques (Papademas et Kotsaki, 2019), parmi ses valeurs nutritionnelles :

- Constituant essentiel des cérébrosides composant les tissus nerveux (Debry et Gerard, 2001).
- Représente un intérêt diététique fondamental puisqu'il constitue la seule source d'hydrate de carbone de tous les mammifères y compris l'homme à la naissance (Sottiez, 1985; Lupin, 1998).
- Très bon support d'arôme et un bon substrat de culture pour les ferments de maturation (Sottiez, 1990).
- Facilite l'absorption intestinale de plusieurs minéraux tels que le calcium, le phosphore et le magnésium (Papademas et Kotsaki, 2019).
- Provoque une réaction légèrement acide dans l'intestin et donc la croissance et la multiplication des bactéries nocives est empêchée.
- Possède un faible pouvoir sucrant, d'où son utilisation dans l'alimentation diététique et la confiserie.
- Utilisé dans la boulangerie pour favoriser le brunissement de la croûte par la réaction de Maillard.

II. 1. 4 Intérêts sociaux économiques

- Diminution de problèmes sanitaires dérivés de la pollution de l'environnement (Interreg Sudoe AGROSMARTcoop, 2017).
- Diversification de l'offre au sein de l'entreprise permettra de consolider les postes de travail.
- Répondre à la demande du public et des consommateurs (Banu *et al.*, 2020).
- Améliorer l'opinion publique à l'égard des industries de valorisation.

II. 2 Voies de valorisation du lactosérum

En général, il existe deux voies possibles pour intégrer le lactosérum dans les produits à valeur ajoutée. La première implique un traitement direct, c'est-à-dire un traitement physique ou thermique du lactosérum. Le résultat de ces procédés est la transformation du

lactosérum en plusieurs fractions fonctionnelles à valeur ajoutée telles que la PL, le concentré de protéines de lactosérum (CPL), l'isolat de protéines de lactosérum, le perméat de lactosérum et le lactose (Nagar *et al.*, 2013).

La deuxième voie de valorisation possible est orientée vers la mise en œuvre de systèmes de biotransformation appropriés, en utilisant le lactosérum comme matière première pour la production d'aliments fonctionnels ou d'ingrédients d'origine biologique. Dans ce cas, le lactosérum est utilisé, comme substrat pour diverses bioconversions microbiennes ou enzymatiques, conduisant à la production de plusieurs produits à valeur ajoutée tels que les bio-protéines, les enzymes, les biomasses, les biopigments, les bio-conservateurs, l'éthanol, le biogaz, les acides organiques et les bioplastiques (Dimou *et al.*, 2017; Kopsahelis *et al.*, 2018; Smithers *et al.*, 2015; Barilea *et al.*, 2009; Atra *et al.*, 2005). La figure 05 illustre les grandes lignes des différents processus biotechnologiques et physico-chimiques pour la valorisation du lactosérum.

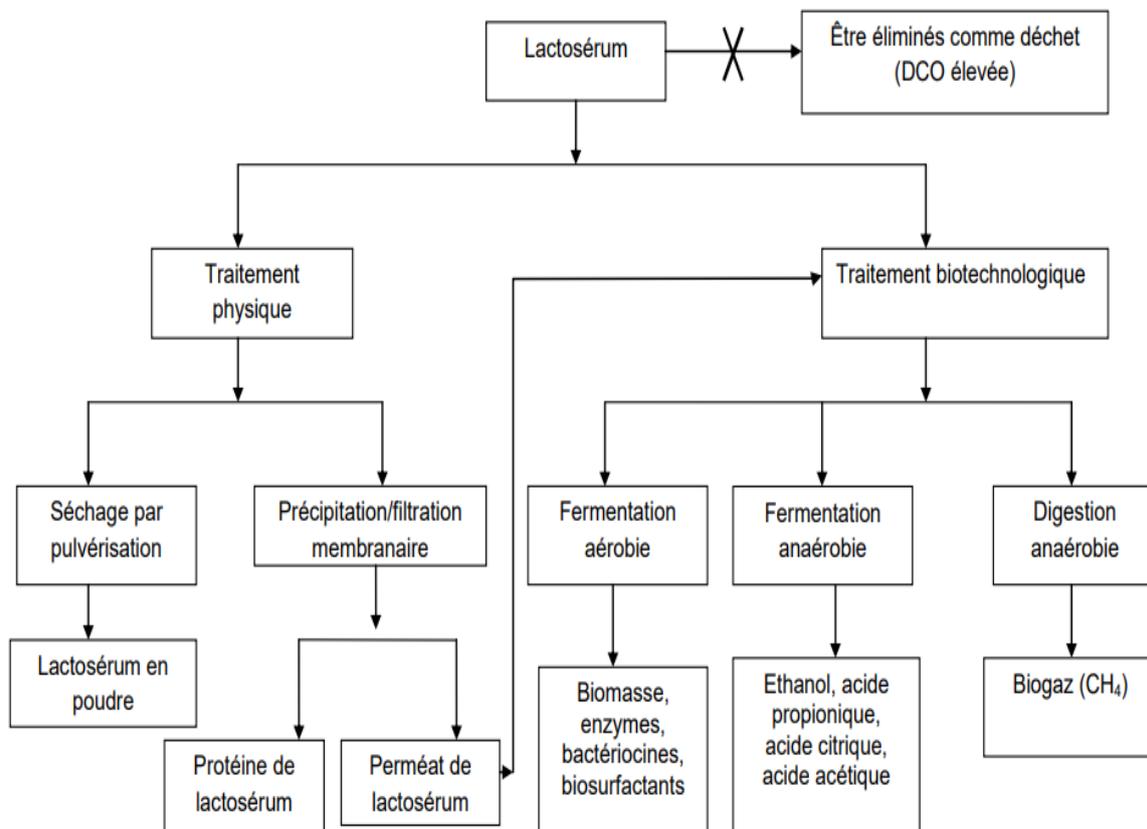


Figure 05 : Schéma des différents processus appliqués pour la valorisation du lactosérum

(Adapté Yadav *et al.*, 2015).

II. 2. 1 Extraction de molécules d'intérêts

Le CPL, la PL, le perméat du lactosérum en poudre ou encore le lactose, sont les produits prédominants issus de la valorisation du lactosérum. Ces produits sont le fruit de technologies très maîtrisées qui s'insèrent convenablement dans les sites industriels de fabrication des produits laitiers. La récupération des protéines représente la première étape de la majorité des procédés de valorisation du lactosérum.

En général, elle est effectuée par ultrafiltration, méthode économique, présentant l'avantage de préserver la qualité des protéines extraites, sans les dénaturer. Le produit issu de cette technologie peut être concentré par séchage pour aboutir à la production d'un CPL, un produit ayant une valeur marchande garantie et reconnue en alimentation et en nutrition humaine de par son profil d'aa très intéressant et sa richesse en lysine et en cystéine (Bylund, 1995; Kosikowski, 1979).

1) Elimination d'eau

La concentration a comme but d'éliminer le principal constituant du lactosérum qui est l'eau (15 à 20 kg d'eau accompagnent 1 kg de MS du lactosérum). Ce procédé permet de réduire le volume du lactosérum afin de faciliter le transport et d'obtenir un produit de valeur ajoutée comme la PL (Spreer, 1998). L'élimination d'eau est réalisée par :

- **Osmose inverse**

L'osmose inverse est un procédé baromembranaire qui permet de concentrer les solides totaux du lactosérum de 6 à 18% (Rodem, 2010). Elle se distingue par le diamètre de pores ($\leq 0.1\text{nm}$) et la pression d'opération utilisée (entre 30 et 50 bars). L'équipement est constitué d'un réservoir d'alimentation, d'une membrane, de deux manomètres et d'au moins une pompe. Le lactosérum entre dans le système tangentiellement à la membrane, qui sous pression, permet de séparer le retentât (retenue) et le perméat (résidu) (Lapointe-Vignola, 2002).

- **Evaporation sous vide**

C'est un procédé qui permet de retirer par ébullition l'eau présente dans le lactosérum. Le produit est chauffé avec de la vapeur dans un échangeur de chaleur, qui a besoin d'une grande quantité d'énergie pour faire bouillir l'eau (Lapointe-Vignola, 2002). L'évaporation permet la concentration de solides totaux entre 45 et 60%. Pour réduire la quantité de vapeur nécessaire, il existe des évaporateurs à effets multiples (deux ou plus). Plus d'effets a le

système, moins de vapeur est nécessaire ; puisque la vapeur produite dans le premier effet peut être utilisée en tant que milieu de chauffage dans l'effet suivant (Tetra pack, 2003).

- **Séchage**

Il consiste à chauffer le lactosérum dans des conditions contrôlées afin d'évaporer la majorité de l'eau qu'il contient. Le séchage sur rouleaux, le séchage sur lit fluidisé et le séchage par atomisation sont quelques technologies utilisées (Lapointe-Vignola, 2002).

Le séchage sur rouleaux est beaucoup moins cher que le séchage par atomisation, mais il a été éliminé progressivement car il provoque des dommages thermiques indésirables aux protéines du lactosérum affectant les propriétés fonctionnelles et les applications des poudres qui en résultent (Bhandari *et al.*, 2008).

Cependant, le séchage par atomisation est le plus courant dans l'industrie laitière (Lapointe-Vignola, 2002). Il améliore la fonctionnalité du produit dans lequel les particules de poudre sont grandes et ont un faible volume et ces poudres sont non hygroscopiques et facilement mouillable (Bhandari *et al.*, 2008). Le séchage par atomisation consiste à transformer un liquide en brouillard ou en gouttelettes. Les gouttelettes sont formées par un atomiseur, une roue rotative ou à haute pression. Ces gouttelettes sont mises en contact avec de l'air chaud et sec dans une chambre de séchage, la poudre produite en continu est évacuée de la chambre de séchage et récupérée en utilisant des cyclones, des filtres à manches ou une combinaison des deux (Westergaard, 2010). En fonction des besoins du processus, des tailles de 10 à 500 microns peuvent être obtenues (Tetra pack, 2003).

2) Extraction des protéines

Le lactosérum contient presque 0.8% de protéines, lequel correspondent à 20% des protéines totales du lait (Spreer, 1998). Les protéines du lactosérum ne représentent que 10 % du total des solides. Par conséquent, la transformation de ces protéines nécessite au moins une étape de concentration avant un nouveau fractionnement (Modler, 2000).

Selon Vuilleumard (2015), les protéines constituent la fraction la plus intéressante du lactosérum, soit du point de vue nutritionnel, fonctionnel ou économique.

C'est pourquoi leurs extractions et purifications, visant à obtenir des concentrés se révèlent utiles. Il existe divers procédés pour réaliser la séparation des protéines du lactosérum : la thermo-coagulation, l'ultrafiltration, la précipitation, la chromatographie, etc.

- **Thermo-coagulation**

Grâce à la combinaison d'un traitement thermique (90 - 95°C) et un ajustement de pH (4.4 – 4.8), la coagulation des protéines de lactosérum est possible (Tetra pack, 2003). La thermo-coagulation utilise d'abord la chaleur et l'acidification pour précipiter les protéines et les séparer du lactosérum, ensuite la récupération des protéines se fait par filtration ou décantation et enfin, le précipité est lavé et séché. Le produit obtenu est connu sous le nom de lactalbumine (Lapointe-Vignola, 2002). Selon Spreer (1998), à partir de 1000 L de lactosérum, il est possible de produire 20 à 25 kg de protéines coagulées avec un contenu d'humidité inférieur à 80%. La concentration finale du filtrat est environ de 88% pour les protéines. En revanche, les propriétés fonctionnelles des protéines sont altérées (Bardy *et al.*, 2016).

- **Ultrafiltration**

L'ultrafiltration est une technique de séparation physico-chimique à pression moyenne qui consiste à faire passer le lactosérum sur des membranes dont la taille des pores est comprise entre 0.001 et 0.1 µm et dont la masse moléculaire est comprise entre 1 et 200 kilo dalton (García-Garibay *et al.*, 2008). Les membranes facilitent la séparation des petites molécules telles que le lactose, les sels minéraux et l'eau en tant que perméat, tandis que les protéines, les globules gras et les solides en suspension, sont concentrés par rapport aux autres solutés dans le rétentat (Ramchandran et Vasiljevic, 2013). La température optimale à laquelle l'ultrafiltration est effectuée est d'environ 50°C à 55°C maximum. C'est la plage de température dans laquelle les problèmes liés à l'encrassement des membranes, à la dénaturation thermique des protéines et à la croissance des micro-organismes peuvent être évités et où des flux acceptables sont obtenus (Hobman, 1992 ; De Wit, 2001 ; Bylund, 2003) (Figure 06).

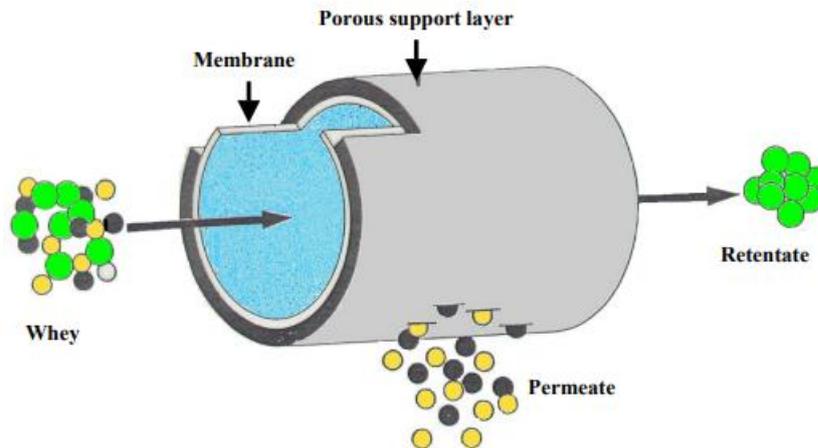


Figure 06 : Principe d'un procédé de filtration sur membrane à partir du lactosérum (De Wit, 2001).

- **Chromatographie**

Les différentes protéines du lactosérum, sont souvent classées en fonction de leur charge, de leur hydrophobie relative et de leur poids moléculaire. Les méthodes chromatographiques de séparation sont dominantes pour le fractionnement et la purification des protéines individuelles du lactosérum avec une grande pureté (EI-Sayed *et al.*, 2011). Il existe plusieurs méthodes utiles dans cette catégorie pour isoler les protéines du lactosérum en fonction de leurs propriétés spécifiques. Bien connues sont la chromatographie par filtration sur gel basée sur les différences de tailles moléculaires, la chromatographie d'échange ionique basée sur les différences de charge et la chromatographie hydrophobe (De Wit, 2001).

- **Chromatographie gel-filtration**

La filtration sur gel est généralement appliquée pour la séparation des protéines des autres composants dans le lactosérum. Le principe est basé sur les différences de vitesse de diffusion de molécules de tailles différentes à travers une colonne remplie de billes de résine poreuse. Lorsque le petit-lait passe à travers la colonne, les billes de résine poreuse ne laissent entrer dans leurs pores que de petites molécules telles que les sels, le lactose et une partie d'azote non protéique. Le passage de ces petits constituants à travers la colonne est donc retardé. Les plus grosses protéines du lactosérum ne peuvent pas entrer dans ces billes et passent à travers la colonne à un rythme plus élevé, comme l'illustre la figure 07 (De Wit, 2001).

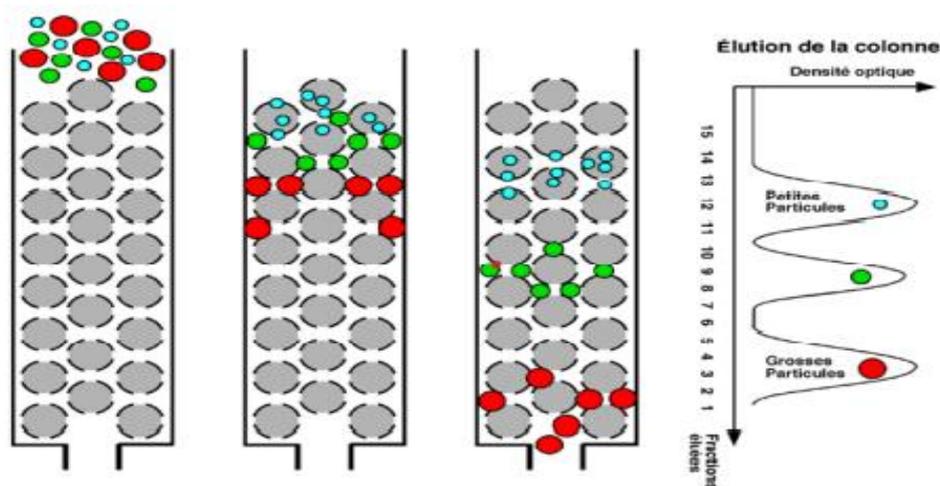


Figure 07 : Principe de la chromatographie gel-filtration (Bardy *et al.*, 2016).

➤ Chromatographie par échange d'ions

En chromatographie par échange d'ions (CEI), les molécules de protéines de lactosérum d'intérêt portent une charge opposée à celle des particules de résine de l'échangeur d'ions, comme le montre la figure 08. La CEI est une technique extrêmement utile pour isoler des protéines de lactosérum spécifiques. Les paramètres importants pour contrôler la liaison des protéines et des billes de la colonne sont le pH du lactosérum, la charge nette de la protéine et la capacité de liaison des billes. La variation de ces paramètres permet l'élution sélective des protéines. L'élution des protéines liées à partir des billes est réalisée en utilisant une solution saline de concentration croissante (De Wit, 2001).

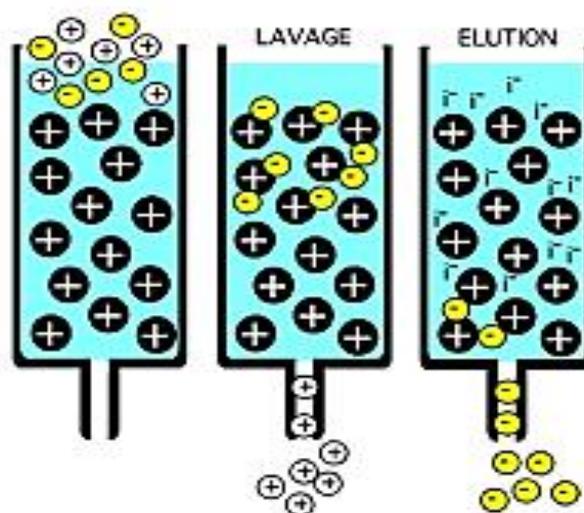


Figure 08 : Méthode de la chromatographie échangeuse d'ions (Bardy *et al.*, 2016).

➤ Chromatographie 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, comme le montre la figure 09 (Bardy *et al.*, 2016).

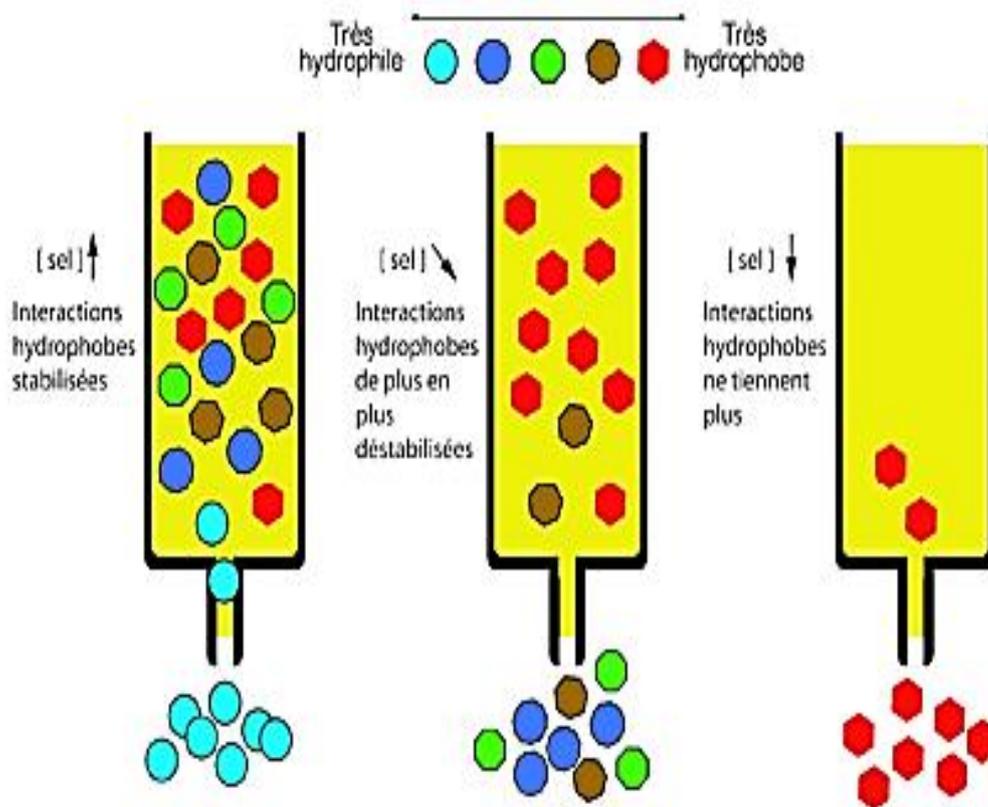


Figure 09 : Principe de la chromatographie hydrophobe (Bardy *et al.*, 2016).

➤ 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*) (Bardy *et al.*, 2016). Les différentes étapes de précipitation sont présentées dans le tableau VI.

Tableau VI : Etapes de séparation des protéines du lactosérum par précipitation

(Adapté de : De Wit, 2001).

Etapes	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).

3) Extraction du lactose

Le lactose est le principal composant du lactosérum, sa récupération peut se faire à partir du concentré de lactosérum ou de lactosérum déprotéiné (Tetra pack, 2003). Cependant, l'extraction de lactose à partir de lactosérum peut générer la dénaturation partielle des protéines et réduire les rendements d'extraction. C'est pour cela que le fractionnement de lactose se fait généralement à partir de lactosérum déprotéiné (Lapointe-Vignola, 2002; Vuilleumard, 2015). Deux principales options sont disponibles pour extraire le lactose du lactosérum : la cristallisation et l'hydrolyse (Spreer, 1998).

- **La cristallisation**

La cristallisation du lactose se fait en trois étapes : la concentration, la cristallisation et la séparation de cristaux. Le procédé d'évaporation permet de concentrer le lactosérum entre 55 et 65% de solides totaux (Vuilleumard, 2015). Après l'évaporation, la cristallisation débute, le lactosérum concentré est transféré dans des cuves de cristallisation à une température d'environ 50°C. Le concentré est soumis sous légère agitation, à un programme temps/température prédéterminé pour être refroidi à 10°C. En raison de la sursaturation, le lactose se cristallise principalement en cristaux de lactose. L'ajout de cristaux d'ensemencement de lactose accélère ce processus de cristallisation (De Wit, 2001).

Pendant la cristallisation, le lactose peut cristalliser sous deux formes : le lactose α -monohydraté et le lactose β -anhydre. Après la cristallisation, la boue est envoyée dans un décanteur centrifuge pour séparer les cristaux du fluide. Après la séparation la teneur en eau du lactose varie entre 10 et 14%. Cependant, la teneur peut être réduite à 0.5% par un séchage au lit fluidisé (Lapointe-Vignola, 2002).

- **Extraction par 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. 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 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 puis de faire cristalliser le lactose qui a été récupéré du filtrat. Le produit obtenu est alors un lactose de très bonne qualité et avec un rendement de 80% (Bardy *et al.*, 2016).

- **Hydrolyse**

L'hydrolyse du lactose permet de produire des sirops de glucose-galactose, lesquels peuvent être produits par voie enzymatique ou par voie chimique. Ce dernier, consiste à soumettre le lactosérum déprotéiné à un traitement thermique à température élevée (90°C - 140°C) dans un milieu très acide (pH : 1.2-1.5).

Dans la voie enzymatique, de la lactase (β -galactosidase) est utilisé (Vuilleumard, 2015). Cette enzyme est inactivée par le chauffage du concentré de lactosérum lors du traitement ultérieur (Bylund, 2003). Le mélange de glucose-galactose possède une hygroscopicité élevée, raison pour laquelle les produits sont difficiles à sécher et à conserver, car lors du séchage par atomisation, le mélange peut coller aux surfaces métalliques chaudes

de l'installation et former un dépôt. Ce comportement connu comme le phénomène de thermo-plasticité ou collage (Bimben et Dumoulin, 1998; Hynd, 1980). Ils sont donc produits et commercialisés sous forme de concentrés liquides (Vuilleumard, 2015).

4) Extraction des sels minéraux et des vitamines

Les minéraux affectent la flaveur, la fonctionnalité et la valeur des produits dérivés du lactosérum. En effet, la séparation des minéraux du lactosérum permet d'améliorer l'efficacité d'évaporation et l'aptitude à la cristallisation (Lapointe-Vignola, 2002). C'est pour cela que la déminéralisation est une opération importante dans la valorisation de lactosérum. Il existe principalement trois méthodes industrielles permettant de déminéraliser le lactosérum : l'échange ionique, l'électrodialyse et la séparation membranaire (Vuilleumard, 2015).

- **Nano-filtration**

Séparation membranaire qui 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 bars 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 (Bardy *et al.*, 2016).

- **Echange ionique**

L'échange ionique implique un changement entre les ions présents dans le lactosérum et les groupements H^+ ou OH^- , fixés aux résines utilisées (Vuilleumard, 2015). Un premier passage du lactosérum à travers une colonne échangeuse de cations (H^+) permet d'éliminer les ions calciques (Ca^{2+}) et sodiques (Na^+). Un deuxième passage du lactosérum partiellement déminéralisé à travers une colonne d'anions (OH^-), complète le processus avec l'élimination des ions chlore (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), phosphate (PO_4^{3-}), etc. (Tetra pack, 2003).

- **Electrodialyse**

L'électrodialyse est un procédé électrochimique basé sur la migration d'espèces ioniques à travers des membranes sélectives, sous l'influence d'un champ électrique créé par l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes (Lapointe-Vignola, 2002). En d'autres mots, l'application d'une force électrique génère le déplacement des ions vers la

cathode ou l'anode selon la charge qu'ils portent. Les membranes (selon la charge) permettent le passage sélectif, soit des ions positifs, soit des ions négatifs, contribuant à isoler les minéraux.

Contrairement à l'échange ionique, il est difficile d'atteindre un taux de déminéralisation supérieur à 90%, il est plus réaliste d'atteindre une déminéralisation de 50% (Vuilleumard, 2015). Au niveau énergétique, la demande d'énergie électrique s'élève fortement avec le niveau de déminéralisation, car la conductivité du milieu diminue.

II. 2. 2 Usages alimentaires

La présence de nutriments résiduels du lait a suscité un intérêt pour la transformation du lactosérum en produits à valeur ajoutée. Environ 50 % du lactosérum total produit dans le monde est transformé en différents produits alimentaires. Ces denrées alimentaires comprennent environ 45 % sous forme liquide, 30 % sous forme de PL, 15% sous forme de lactose et divers sous-produits issus de son élimination et restant sous forme de CPL (Kosseva *et al.*, 2009; Panesar *et al.*, 2013).

- **Alimentation animale**

L'alimentation animale constitue le principal débouché du lactosérum, qui a un contenu nutritionnel élevé et un intérêt zootechnique important pour les éleveurs de porcs et de bovins (Alonso-Fauste *et al.*, 2012). Il est destiné à l'élevage industriel des porcs ou bien, incorporé dans la ration alimentaire des vaches laitières. Il peut également être ajouté aux aliments d'allaitement pour veaux (Agnes, 1986).

- **Alimentation humaine**

Le lactosérum est utilisé dans plusieurs secteurs de l'industrie agroalimentaire, ses différents usages sont présentés dans le tableau VII.

Tableau VII : Usages du lactosérum dans les industries agroalimentaires.

Domaines d'utilisation	Fonctions	Références
Alimentation infantile	Le lactosérum permet en effet de retrouver l'équilibre protéique (rapport caséines/ protéines sériques) du lait maternel, ainsi que les taux des minéraux et de lactose présents dans ce dernier.	(Belhout et Belkaid, 2015)
Industrie laitière	La PL est aussi utilisée dans plusieurs produits laitiers tels que la crème glacée, les desserts congelés et les préparations de fromage fondu. Le lactosérum pourrait remplacer la poudre de lait écrémé ou une partie de celle-ci. Cette substitution est très avantageuse due au coût inférieur de la PL. La PL acide peut remplacer la poudre de lait écrémé à des taux précis pour la fabrication des yaourts, sans atteinte à la qualité ni à l'arôme de ces derniers.	(Vuilleumard, 2015) (Boudier et Luquiet, 1989)
Industrie de boisson	Le lactosérum a également de nombreuses propriétés qui le rend apte d'une part, à la préparation des boissons aromatisées de façon que le mélange de lactosérum acide avec des jus de fruits donne une boisson d'une flaveur et un gout de fruit amplifié, d'autre part à la préparation de boissons alcoolisées, comme la bière, le vin ou champagne qui doivent être transparentes et claires.	(Boudier et Luquiet, 1989)
Confiserie	Le lactosérum remplace le lait car il est moins couteux que les produits laitiers utilisés en confiserie. Il doit avoir un goût lacté sucré franc, ainsi qu'une perception saline modérée.	(Belhout et Belkaid, 2015)
Boulangerie	Le lactosérum doux connaît un emploi croissant dans les produits de boulangerie, du fait de nombreux avantages qu'il présente : Amélioration de la valeur nutritionnelle des produits due à l'apport d'aa indispensables et augmentation du rendement.	(Boudier et Luquiet, 1989)

II. 2. 3 Usages agricoles

- **Compost**

Le lactosérum peut être utilisé dans le compost. Il est introduit dans une cuve recouverte par une bâche comme illustrée dans la figure 10. 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 (Bardy *et al.*, 2016).

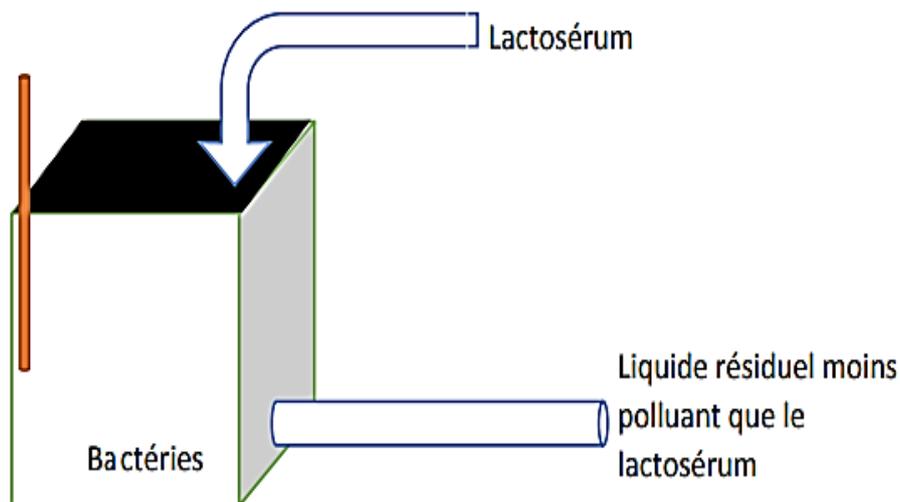


Figure 10 : Schéma de la valorisation du lactosérum via le compost (Bardy *et al.*, 2016).

- **Engrais**

Le lactosérum peut être utilisé pour l'irrigation des terres agricoles où il apporte à la fois de l'eau et des nutriments au sol, pour favoriser la croissance des plantes (Oborn et Piggott, 1968). Cette méthode d'élimination du lactosérum fonctionne bien pour les sols presque neutres ou légèrement alcalins. Dans les sols acides, le lactosérum ajouté favorise le compactage du sol, ce qui inhibe la propagation des micro-organismes du sol qui biodégradent les éléments nutritifs ajoutés à partir du lactosérum.

La pulvérisation est la méthode préférée pour appliquer le lactosérum au sol car elle évite la formation de flaques stagnantes qui inhibent les micro-organismes du sol à biodégrader les éléments nutritifs ajoutés. La quantité de lactosérum qui peut être utilisée comme engrais par épandage est limitée à environ 45 à 90 tonnes/acre (111 à 222 tonnes/hectare). Le dépassement de ces limites constitue une menace pour l'environnement due au ruissellement et à la production d'odeurs. Le petit-lait améliore la fertilité des sols en fournissant des nutriments précieux et en favorisant une structure ouverte et poreuse qui augmente l'infiltration de l'eau (Gillies, 1974).

II. 2. 4 Applications en biotechnologie

1) Fermentation

Les procédés de fermentation microbienne sont considérés comme les alternatives les plus profitables pour la valorisation du surplus de perméat du lactosérum (Panesar et Kennedy, 2012; Siso, 1996). En effet, beaucoup de technologies ont été développées en se basant sur l'utilisation du perméat comme substrat pour la culture et la production de plusieurs souches microbiennes ainsi que leurs bioproduits. En effet, son contenu en lactose représente une source de carbone de choix pour les microorganismes capables de l'assimiler. De même, son contenu en minéraux et en vitamines est susceptible de soutenir la croissance de plusieurs microorganismes. Il est très courant qu'une supplémentation du perméat en sources d'azote, en facteurs de croissance ou en éléments traces soit requis afin d'empêcher tout risque de limitation pouvant engendrer des rendements et des productivités non optimales, avec des répercussions économiques conséquentes (Ugalde et Castrillo, 2002).

- **Bioéthanol**

La conversion du lactose en éthanol sous l'action des levures peut être directe, en utilisant principalement des levures du genre *Kluyveromyces sp*, capables de sécréter la perméase et la β -galactosidase (lactase), enzymes nécessaires pour le transport transmembranaire et l'hydrolyse du lactose, respectivement. La conversion du lactose peut également se faire indirectement, en l'hydrolysant en glucose et en galactose sous l'action de la lactase, puis en fermentant les deux glucides par *S. cerevisiae* (Champagne *et al.*, 1990).

Cependant, le fait que l'assimilation du galactose via cette levure soit soumise à la répression catabolique par le glucose provoque l'avènement d'une diauxie dans la fermentation des deux glucides, entraînant ainsi une réduction des rendements de conversion

en éthanol ;le recours à des souches recombinantes de *S. cerevisiae*, exprimant les gènes LAC4 et LAC12 codant pour la lactase et la perméase, respectivement, offre une perspective économique pour la production d'éthanol à partir du lactosérum (Domingues *et al.*, 2001).

Une des contraintes technologiques reliées à ce procédé consiste à concentrer le lactose dans le lactosérum afin de rendre l'opération de distillation de l'alcool produit économiquement viable. Cependant, les concentrations de lactose requises pour atteindre des rendements de conversion optimaux (12 - 20 % Poids/Volume) engendrent des temps de fermentation trop longs, affectant ainsi la productivité du procédé.

- **Autres bioproduits**

Plusieurs acides organiques utilisés en alimentaires (lactique, acétique, propionique, citrique, gluconique), des vitamines (riboflavine et cobalamine), des AA (glutamique, lysine, thréonine) ou encore des enzymes sont produits par fermentation du lactosérum par différents types de microorganismes :

L'acide lactique est produit par conversion du lactose sous l'action de bactéries lactiques telles que *Lactobacillus bulgaricus*.

- L'acide citrique est en général produit par le champignon *Aspergillus niger* cultivé sur le perméat enrichi en lactose afin de maximiser les rendements de production.
- La cobalamine (vitamine B12) a été produite par *Propionibacterium shermanii* cultivée sur le lactosérum.
- L'enzyme la plus produite sur le lactosérum est la β -galactosidase des levures du genre *Kluyveromyces sp.*
- D'autres procédés ont utilisé le lactosérum comme substrat pour la production de protéases, d'amylases et de polygalacturonases (Panesar et Kennedy, 2012).

À partir du lactose, il peut également y avoir obtention d'acide succinique (C₄H₆O₄). 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 succiniciproducen*.

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, 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 alimentaire, pharmaceutique, additifs pour stimuler la croissance des animaux et plantes (Bardy *et al.*, 2016).

2) Digestion anaérobie

• Biogaz

La digestion anaérobie (DA) pour la production de méthane, source d'énergie disponible *in situ*, a longtemps été utilisée en traitement des eaux usées industrielles (Siso, 1996). Selon les experts de cette technologie, 1m³ du lactosérum peut être transformé en 266 kilowattheures (kWh) de biogaz substituable à une énergie fossile. Le biogaz produit peut être utilisé comme combustible de chaudière servant pour le chauffage des installations de l'usine ou pour la maintenance de la température du digesteur. La production de méthane à partir de la DA du lactosérum permet d'atteindre des taux d'abattement de la charge organique intéressants, allant jusqu'à 95% (Mawson, 1994).

II. 2. 5 Applications pharmaceutiques

• Lactose

- L'industrie pharmaceutique utilise de grandes quantités de lactose raffiné comme charge dans la préparation de nombreux médicaments. En effet, le lactose est considéré comme l'un des glucides les mieux adaptés à la préparation des milieux de fermentation destinés au développement des moisissures dans la fabrication des antibiotiques (Harper, 1992).
- Le lactose est utilisé pour ses propriétés en tant qu'agent d'enrobage et d'adsorption (Bylund, 1995).
- L'acide succinique est utilisé comme excipient et donc comme un stabilisateur tout comme le lactose. Il entre également dans la fabrication de certains antibiotiques, AA et vitamines (Bardy *et al.*, 2016).
- Le lactulose, produit par isomérisation du lactose, possède une valeur élevée sur le marché mondial où il trouve une application en pharmaceutique (Kosikowski, 1979).

• Protéines

- En industrie pharmaceutique la LF et la LP, possédant des propriétés antibactériennes, sont utilisées pour fabriquer différents produits de désinfection utilisés en oto-rhino-

laryngologie, comme les solutions pour bain de bouche, les pastilles pour la gorge et les dentifrices.

- La β -Lg peut remplacer le sérum de veau fœtal dans la culture de cellules d'hybridomes de souris avec des résultats satisfaisants tant en croissance qu'en production d'anticorps, avec un prix de revient beaucoup moins cher (Capiaumont *et al.*, 1994).
- L' α -La, permettrait de lutter contre la déficience hormonale en sérotonine, puisqu'elle contient dans sa chaîne, en 4 exemplaires, un AA rare, le tryptophane, qui rentre dans la composition de la sérotonine. Les expériences de production par génie génétique de cet AA, aux Etats-Unis et au Japon, ne semblent pas concluantes (Pearce, 1983).
- Pour certains types d'alimentation spécifique ou généralement pour tous ceux qui pour une raison quelconque (ablation partielle de l'intestin, maladie immunodéficitaire, syndromes allergiques...) ne peuvent s'alimenter normalement. L'INRA (France) a mis au point, à partir du lactosérum, une solution nutritive composé uniquement de petits fragments protéiques, directement assimilables par l'organisme pour synthétiser les protéines dont il a besoin (Roger, 1979).
- Elles sont utilisées dans le monde du conditionnement physique et "*bodybuilding*", car ces protéines jouent un grand rôle dans la construction des fibres musculaires qui ont subi des micro-déchirures lors de l'entraînement (FAO, 1995).
- Les protéines de lactosérum attirent l'attention de par leur effet sur le cancer. Par exemple, certaines formes de l' α -La humaine seraient capables de provoquer l'apoptose des cellules cancéreuses. Ces propriétés anti-tumorales ont aussi été détectées chez la LF.
- 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 (Bardy *et al.*, 2016).

- **Sels minéraux**

- 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 comme constituants des os et dents.

- Ils sont des composants majeurs des enzymes et des hormones. Le domaine pharmacologique les intègre donc dans des compléments alimentaires ou des traitements.

II. 2. 6 Applications cosmétiques

- **Lactose**

- 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 possible aussi de synthétiser des esters de l'acide propionique servant à la fabrication de composant de parfum ou d'arôme (Bardy *et al.*, 2016).

- **Protéines**

L'utilisation de la LF est courante dans les dentifrices ou les bains de bouches puisqu'elle empêche l'adhésion de certaines bactéries sur la plaque dentaire.

- **Sels minéraux**

Il y a 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.

II. 2. 7 Valorisation en Algérie

Au cours de ces dernières années, plusieurs travaux apportant de nouvelles connaissances sur la valorisation du lactosérum ont fait l'objet d'études réalisées au niveau des universités algériennes ; parmi lesquelles, on cite :

- **Incorporation du lactosérum dans les produits alimentaires**

- Yaourts infantiles (Belhout *et al.*, 2015).
- Fromages fondus (Setouti et Beggar, 2017).
- L'ben (Djemat, 2017).
- Crèmes glacées (sorbet) (Benabbou et Bentalab, 2016).
- Produits laitiers (Dahache et Messaoudi, 2019).
- Pâtes alimentaires (Zemmouchi, 2016).

- Boissons lactées (Chenanfa et Aoudia, 2017).
- Gâteaux secs (Djebairia et Hasnaoui, 2016).
- **Production de bioproduit**
 - Acide lactique (Benaïssa, 2018).
 - Enzymes (Sia *et al.*, 2020).
- **Utilisation du lactosérum comme milieu de culture** (Ali- Mahamane et Yacouba-Mai-Kodomi, 2016)
- **Formulation d'un aliment de bétail** (Rabhi et Belhadi, 2017).

Cependant, peu de valorisations sont réalisées à l'échelle industrielle.

II. 2. 8 Législation Algérienne

Décret exécutif n° 09-209 du 17 Jomada Ethania 1430 correspondant au 11 juin 2009 fixant les modalités d'octroi de l'autorisation de déversement des eaux usées autres que domestiques dans un réseau public d'assainissement ou dans une station d'épuration :

Art. 3 : La teneur en substances nocives des eaux usées autres que domestiques ne peut, en aucun cas, dépasser, au moment de leur déversement dans un réseau public d'assainissement ou dans une station d'épuration, les valeurs limites maximales définies en annexe du présent décret.

Art. 4 : Toute eau usée autre que domestique dont les caractéristiques ne sont pas conformes aux prescriptions du présent décret devra subir un prétraitement avant son déversement dans un réseau public d'assainissement ou dans une station d'épuration.

Art. 6 : Le dossier de demande d'autorisation de déversement doit indiquer :

- Le nom, prénom, qualité et domicile du demandeur ou si la demande émane d'une personne morale, la raison sociale et l'adresse du siège social.
- La description de l'activité de l'établissement concerné.
- Les caractéristiques physico-chimiques et biologiques ainsi que le débit maximum d'eaux usées autres que domestiques à déverser.
- Les caractéristiques techniques du branchement au réseau public, d'assainissement ou à la station d'épuration.

- Le cas échéant, la description technique des installations de prétraitement permettant de respecter les conditions de déversement des eaux usées, conformément aux prescriptions du présent décret.

- Les valeurs limites maximales de la DBO5 (DBO pendant 5 jours) et la DCO :
 - **DBO5 : 500 mg/L.**
 - **DCO : 1000mg/L.**

Partie III

**Comparaison des impacts
environnementaux de deux processus
de valorisation de lactosérum**

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

Dans cette partie, nous nous sommes appuyées sur les analyses et les résultats d'une étude réalisée par un groupe de chercheurs de la société canadienne de génie agroalimentaire, de la bio-ingénierie et de l'environnement (SCGABE), pour effectuer une comparaison environnementale entre deux voies de valorisation de lactosérum. Les paramètres utilisés pour cela sont les impacts environnementaux. Les deux procédés concernés sont :

- ✚ La production de biogaz (figure 12).
- ✚ La production de la PL (figure 15).

Le choix s'est porté sur la PL et le biogaz pour plusieurs raisons. La PL, parce que c'est le dérivé du lactosérum le plus produit et exporté dans le monde (figure 03 et 04). Le biogaz, car il représente un exemple vivant de développement durable, en effet il permet la production de bioénergies et réduit par conséquent le recours aux énergies fossiles. L'objectif de cette partie est d'orienter les industriels dans leur choix de processus de gestion du lactosérum.

III. 1. Analyse de cycle de vie

III. 1. 1. Définition

Il s'agit de la compilation et évaluation des consommations d'énergie, des utilisations de matières premières et des rejets dans l'environnement, ainsi que de l'évaluation de l'impact potentiel sur l'environnement associé à un produit, un procédé ou un service, sur la totalité de son cycle de vie (CV) (ISO, 2006).

L'ACV dans la gestion des déchets par rapport à d'autres secteurs se concentre sur l'étape de fin de vie, ce qui correspond à une approche « *gate to grave* » : du berceau à la tombe (Record, 2011). Dans les applications de ce type, les ACV n'intègrent pas les émissions et consommations associées aux étapes précédentes de CV, avant que le produit ne devienne un déchet. La méthode consiste à réaliser des bilans exhaustifs de consommation de ressources naturelles, d'énergie et d'émissions dans l'environnement de l'ensemble des processus étudiés (Rispe, 2012).

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

III. 1. 2. Méthodologie

- **Définition des objectifs**

Dans ce travail, on a une comparaison des impacts environnementaux de deux scénarios de valorisation de lactosérum. Les impacts environnementaux sont analysés à l'aide d'une méthodologie d'ACV conforme aux normes ISO. Ces informations constituent un outil d'aide à l'intégration des performances environnementales dans la prise de décision et favorisent le développement de procédés moins polluants pour la valorisation du lactosérum (Trivino *et al.*, 2016).

- **Unité fonctionnelle**

L'unité fonctionnelle est définie comme étant une tonne de lactosérum gérée. L'étude tentera de répondre à la question suivante : quelle est la meilleure technologie pour la valorisation d'une quantité donnée de lactosérum?

- **Les limites du système**

L'approche « *gate to gate* » ou « porte à porte » est une ACV partielle qui n'examine qu'un seul processus à valeur ajoutée dans l'ensemble de la chaîne de production (Jimenez, 2000). Cette approche est utilisée en considérant toutes les étapes depuis la porte de sortie de la fromagerie jusqu'à la porte d'entrée de l'usine de valorisation. Le CV de la production de lait et de fromage est omis dans cette évaluation car il est supposé être identique dans les deux scénarios étudiés. Les limites incluent également l'énergie et les matières premières nécessaires au traitement du lactosérum.

1) Production de biogaz par méthanisation

- **Principe général de la méthanisation**

La méthanisation, aussi appelée DA, est une voie de dégradation naturelle de la MO complexe en méthane (CH₄) et en dioxyde de carbone (CO₂) par des microorganismes fonctionnant en anaérobiose (Mata-Alvares, 2003). Cette dégradation produit deux résidus : le biogaz constitué principalement de CH₄ (55 - 70%), de CO₂ (25 - 40%), avec des traces d'hydrogène (H₂) et le digestat composé de la MO non dégradée (Bardy *et al.*, 2016).

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

- **Processus de méthanisation**

Un prétraitement doit être effectué avant la méthanisation: l'aéroflotation. Le lactosérum est d'abord homogénéisé dans un réservoir tampon. Ensuite, par flottation à l'air, les solides en suspension et les graisses résiduelles sont éliminés. Les résidus vont dans un réservoir de récupération tandis que le lactosérum purifié passe dans un bassin anaérobie pour commencer la digestion des MO (Trivino *et al.*, 2016).

Selon Degrémont (1989), la transformation de lactosérum passe par une succession d'intermédiaires métaboliques qui sont transformés par différents types de population de microorganismes. Les différentes étapes de la DA sont présentées dans la figure 11. Elle comprend généralement quatre étapes, qui sont l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse.

- **Hydrolyse**

L'étape d'hydrolyse est un procédé de dégradation des composés particuliers de haut poids moléculaire, mettant en jeu des microorganismes hydrolytiques anaérobies, mésophiles (30°C - 40°C) ou thermophiles (50°C - 60°C). Elle consiste à la solubilisation de molécules complexes (protéines, lactose, lipides) en composés plus simples : AA, AG et oses. Cette transformation lente permet de rendre assimilable le substrat par les bactéries.

- **Acidogénèse**

Cette étape consiste à dégrader les composés issus de l'étape d'hydrolyse et ce par l'action de bactéries acidogènes et fermentatives. Elle conduit à la formation d'un mélange de composés tels que : les acides organiques, les alcools, H₂, CO₂. Les bactéries impliquées dans cette réaction sont du genre *Clostridium enterobacteriaceae* et les *bacteroides*.

- **Acétogénèse**

Elle permet la transformation des acides issus de la phase d'acidogénèse, en acétate (C₂H₄O₂), H₂ et CO₂ par l'action des bactéries acétogènes. Cette opération est réalisée par deux types de bactéries :

- ❖ **Les bactéries productrices obligées d'hydrogène**

Ce sont des bactéries anaérobies strictes, également appelées *Obligate hydrogen producing acetogens* (OHPA). Elles sont capables de produire de C₂H₄O₂ et de H₂ à partir des

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

métabolites réduits issus de l'acidogénèse.

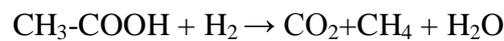
❖ Les bactéries acétogènes non syntrophes

Leur métabolisme est majoritairement orienté vers la production de $C_2H_4O_2$ à partir de CO_2 et de H_2 .

➤ Méthanogénèse

La méthanogénèse consiste à transformer le $C_2H_4O_2$, le H_2 et le CO_2 en CH_4 . Pour cela, il existe deux grandes voies de méthanogénèse, faisant chacune appel à des bactéries anaérobies strictes :

❖ Les méthanogènes acétotrophes



❖ les méthanogènes hydrogénotrophes

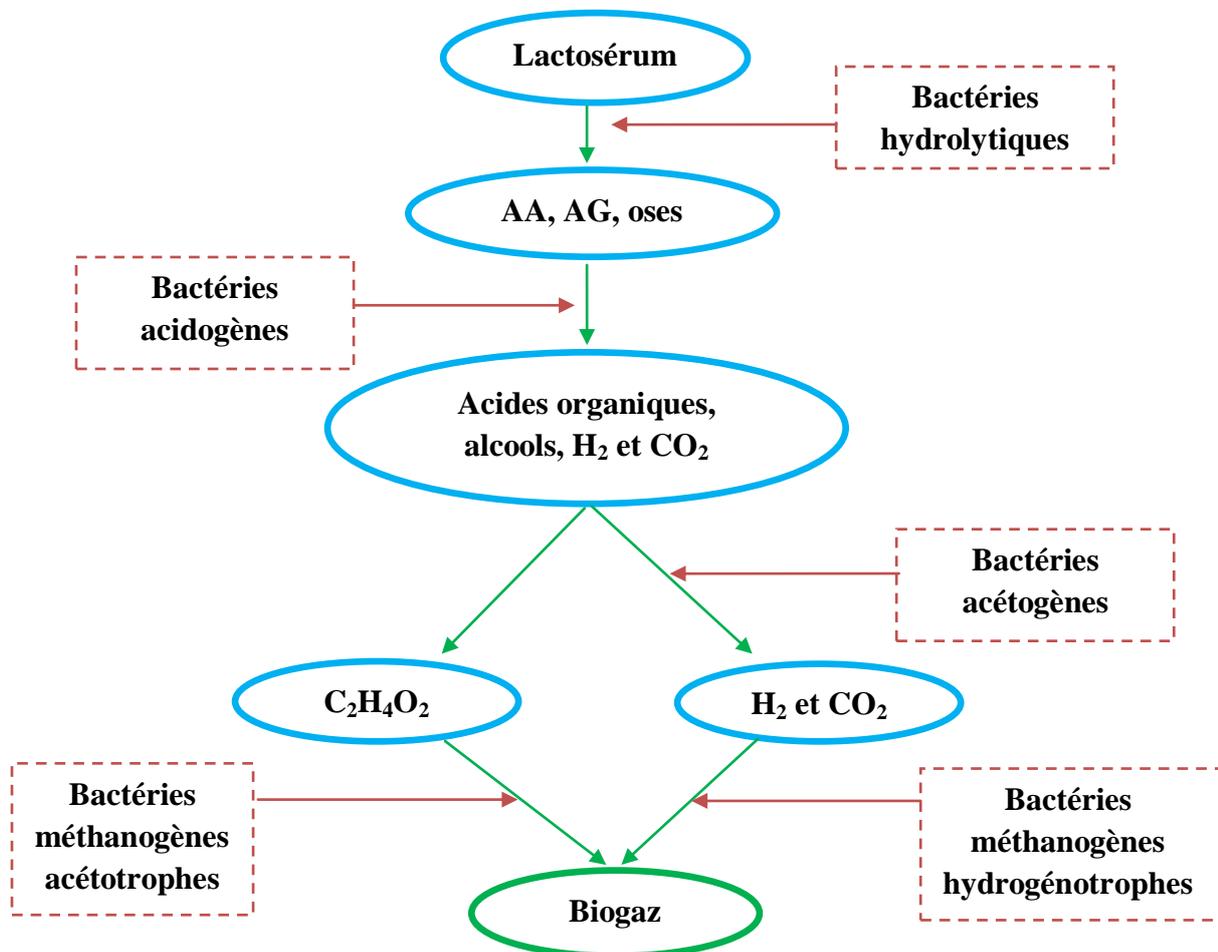
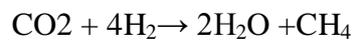


Figure 11 : Schéma de la méthanisation.

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

Le procédé général de la production de biogaz à partir du lactosérum est représenté dans la figure 12.

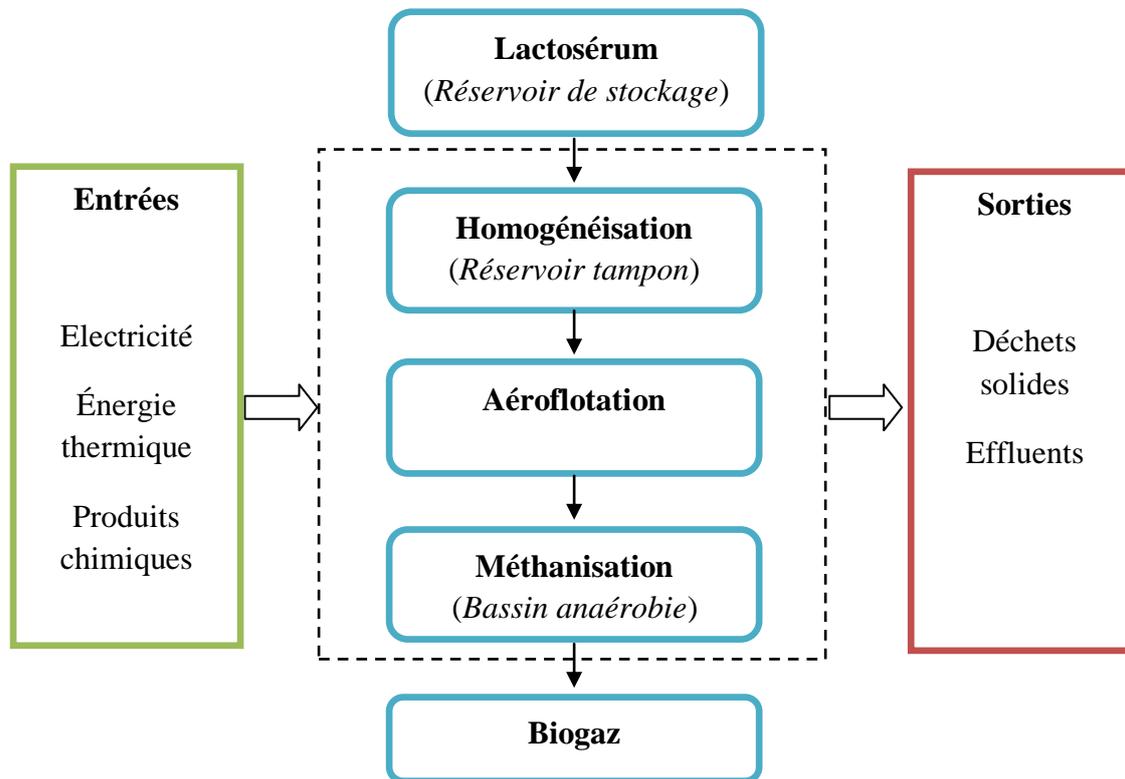


Figure 12 : Schéma du processus de production de biogaz à partir du lactosérum.

Il est à signaler qu'environ 60 à 70 % du méthane sont produits par les méthanogènes acétotrophes.

2) Production de la PL

Le lactosérum doit être traité dès que possible, car sa composition favorise la croissance des bactéries. Ces dernières sont les responsables de la dégradation des protéines et de la formation d'acide lactique (Tetra pack, 2003) (figure 15).

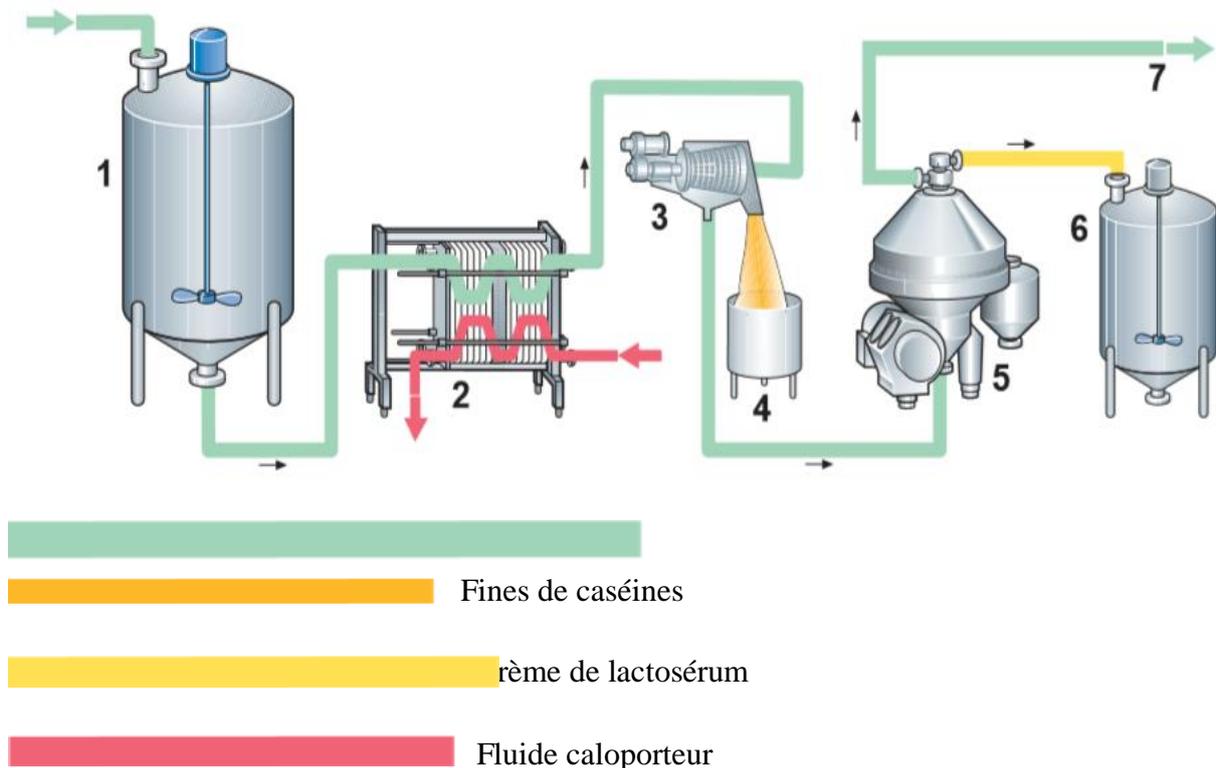
- **Prétraitement**

Les MG, les caséines résiduelles (fines) et les bactéries sont des constituants indésirables du lactosérum. C'est pour cette raison que les étapes de prétraitement de lactosérum incluent les opérations unitaires de clarification, de séparation de gras et refroidissement (Emond, 2014).

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

➤ Clarification

Cette étape consiste en la récupération de petites agglomérations des caséines (Spreer, 1998). Elles doivent être les premières à être éliminées, afin de diminuer leur influence sur la séparation des graisses et de prévenir des problèmes de colmatage (Lapointe-Vignola, 2002) (figure 13). Le lactosérum entre tangentiellement dans l'équipement (cyclone ou séparateur centrifuge) et en raison de la force centrifuge, les fines se déplacent vers la paroi extérieure de l'équipement où elles sont recueillies. Les tamis vibrants sont également utilisés pour la séparation des fines. Le lactosérum est entreposé dans un bassin, après il passe à travers les tamis, où la vibration permet la rétention des fines pendant que le lactosérum clarifié passe à travers les tamis (Spreer, 1998).



- 1:** Réservoir de collecte de lactosérum, **2:** Réchauffeur de plaque, **3:** Crépine rotative,
4: Réservoir de collecte des fines, **5:** Séparateur de crème de lactosérum,
6: Réservoir de crème de lactosérum, **7:** Lactosérum pour traitement ultérieur.

Figure 13: Séparation des fines de caséines et de la graisse de lactosérum (Bylund, 2003).

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

➤ **Écrémage**

C'est le procédé de séparation de la MG contenue dans le lactosérum. Cette étape utilise le principe de la centrifugation : la MG de basse densité est dirigée à l'intérieur des canaux de l'équipement pendant que le lactosérum écrémé se déplace vers l'extérieur des canaux (Lapointe-Vignola, 2002). Selon IDF (1997), la teneur en MG du lactosérum écrémé est de moins de 0.05%. La crème de lactosérum est souvent d'une teneur en MG de 25 à 40%, peut être partiellement réutilisée dans la fabrication du fromage. Dans certains cas, la crème de lactosérum est convertie en beurre de lactosérum (Tetra pack, 2003).

➤ **Refroidissement et entreposage**

Le lactosérum doit être réfrigéré ou pasteurisé et refroidi dès que les graisses et les fines ont été enlevées. Pour un stockage de courte durée (10- 24 heures), le refroidissement à 5°C est généralement suffisant pour réduire l'activité bactérienne (Spreer, 1998; Tetra pack, 2003). Des périodes plus longues de stockage nécessitent une pasteurisation du lactosérum directement après l'élimination des graisses et des fines (Tetra pack, 2003).

• **Concentration**

La concentration a comme but d'éliminer la quantité d'eau présente dans le lactosérum. Ce procédé permet de réduire le volume du lactosérum (Spreer, 1998).

➤ **Osmose inverse**

La définition et le mécanisme de l'osmose inverse ont été expliqués dans la partie II.

➤ **Évaporation**

La définition et le mécanisme de l'évaporation ont été expliqués dans la partie II.

➤ **Séchage**

La définition et le mécanisme du séchage ont été expliqués dans la partie II (Figure 14).

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

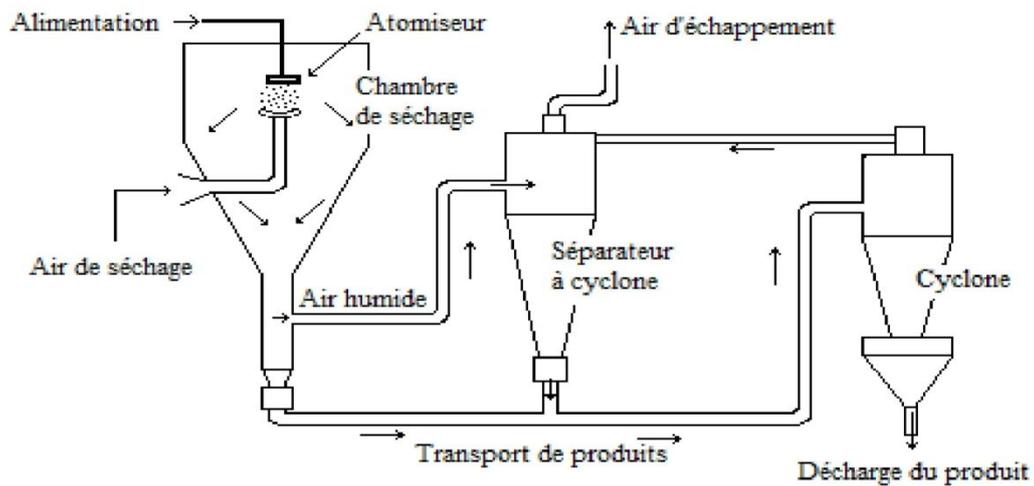


Figure 14 : Principe de fonctionnement d'un atomiseur spray (Nguyen, 2014).

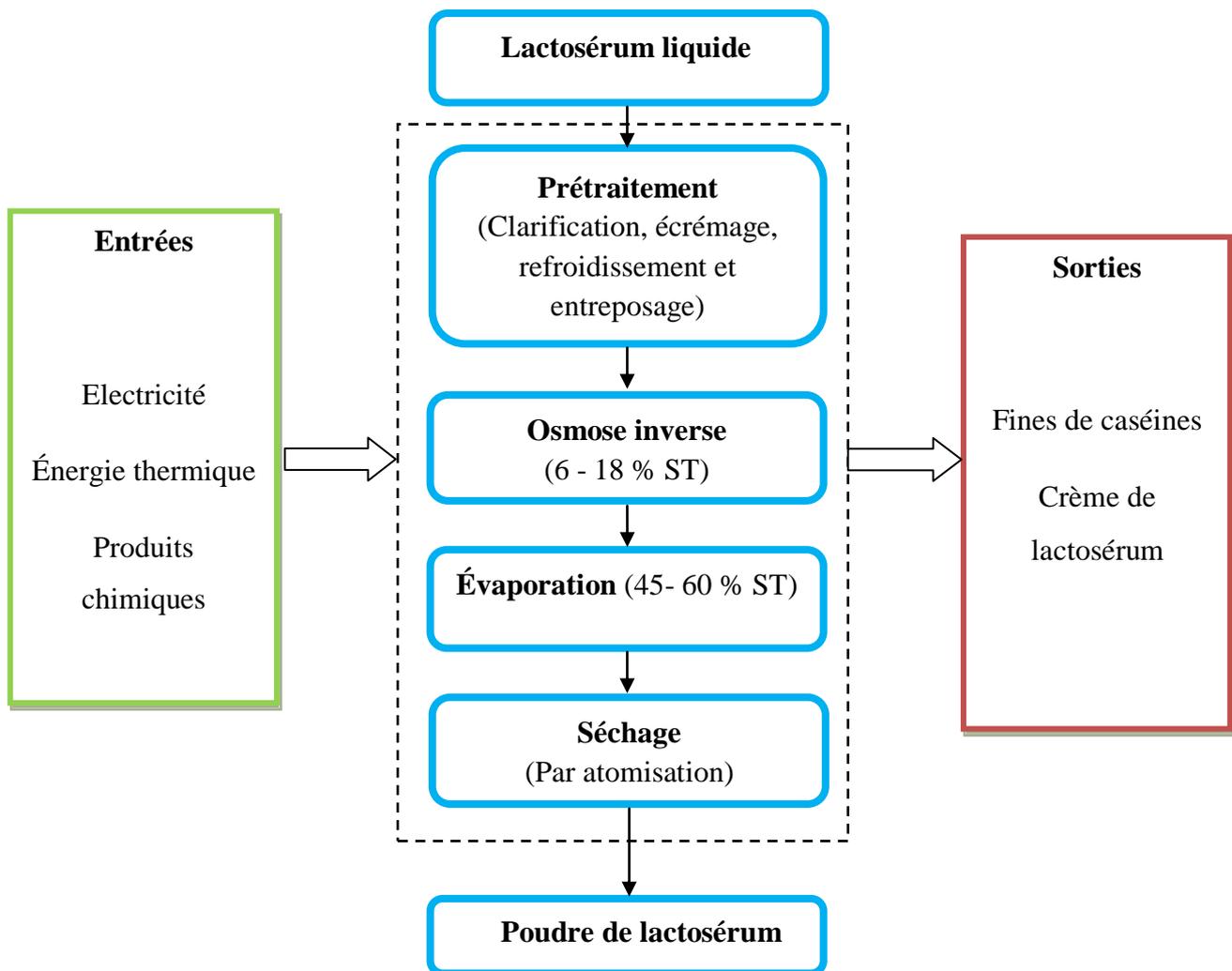


Figure 15 : Schéma du processus de production de PL.

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

- **Evaluation d'impacts de cycle de vie (IMPACT 2002⁺)**

La méthode européenne IMPACT 2002⁺, reconnue internationalement a été choisie pour effectuer l'évaluation des impacts de cycle de vie (EICV) des scénarios comparés. En plus de fournir les résultats pour 15 catégories d'impacts, IMPACT 2002⁺ permet une agrégation en quatre catégories de dommage (Figure 16) (Jolliet *et al.*, 2003).

Selon Geneviève (2011), les catégories de dommage peuvent se résumer ainsi :

a) Changement climatique

Le potentiel de chaque gaz à effet de serre (GES) est calculé en kg de CO₂ équivalent (kg CO₂ éq.), basé sur les données de forçage radiatif infrarouge. Les effets potentiels des émissions sont quantifiés sur une période de 500 ans.

b) Ressources

Cette catégorie prend en compte l'utilisation de ressources non renouvelables et l'extraction de minéraux, quantifiés en mégajoules d'énergie (MJ).

c) Santé humaine

Cette catégorie prend en compte les substances ayant des effets toxiques (cancérogène et non cancérogène) et respiratoires, produisant des radiations ionisantes qui contribuent à la destruction de la couche d'ozone. Afin d'évaluer le facteur de dommage, la gravité de la maladie est exprimée en DALY (*Disabled Adjusted Life Years*), unité reflétant le dommage sur la SH.

d) Qualité des écosystèmes

Cette catégorie regroupe les impacts liés à la toxicité aquatique et terrestre, à l'acidification et la nitrification terrestre et à l'occupation des terres. Elle est quantifiée en fraction d'habitats potentiellement disparus, sur une surface donnée et durant une certaine période de temps, par kg de substance émise (*Potentially disappeared fraction.m².an/kg*) ou (*PDF.m².an/kg*).

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

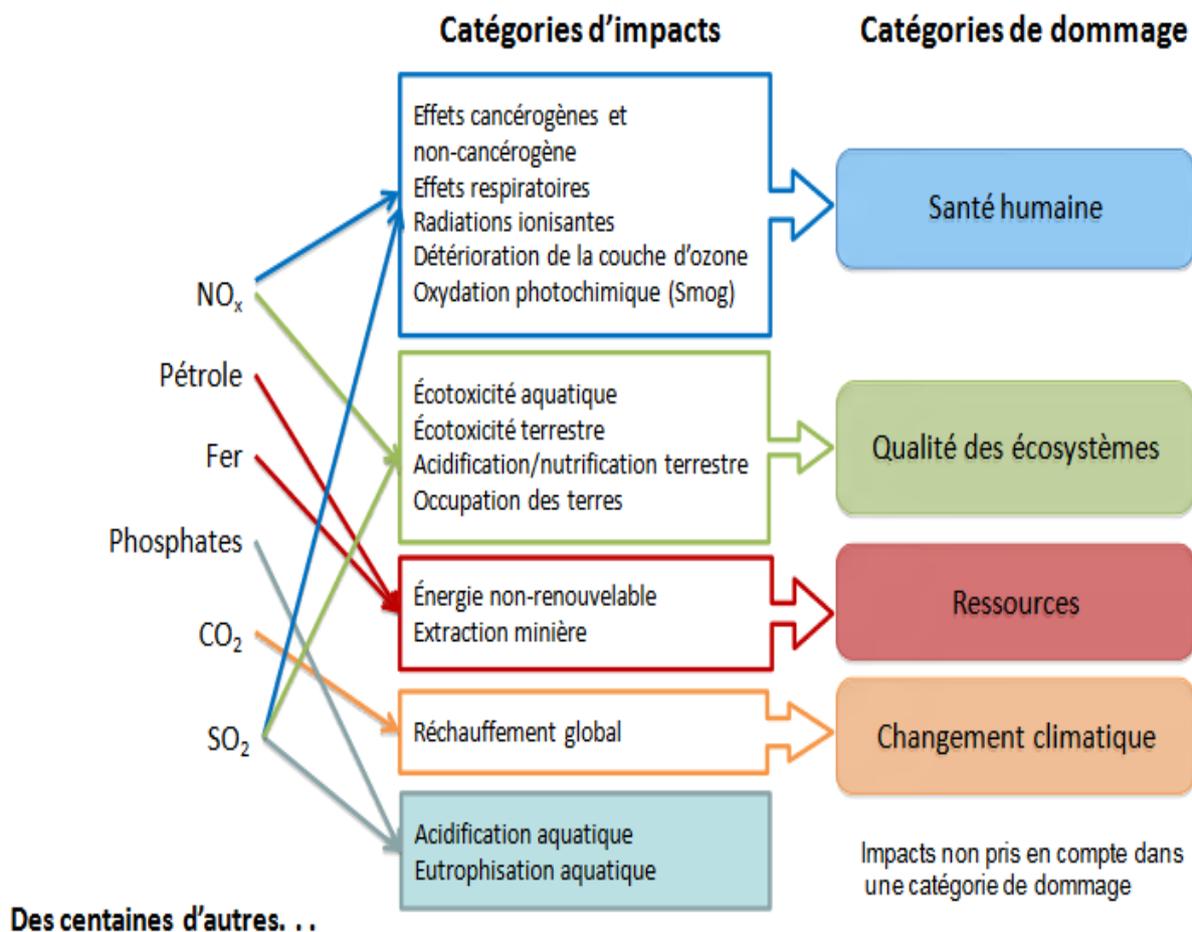


Figure 16 : Catégories de dommage et catégories d'impacts de la méthode IMPACT 2002⁺.

• Résultats

Dans un premier temps, il est possible de constater que globalement, la production de PL a moins d'impact que la production de biogaz pour les trois catégories d'impacts suivantes: le CC, la QE et la SH. En revanche, au niveau de la catégorie des ressources, la production de PL a un impact presque 4 fois plus supérieure à celui de la production de biogaz. Sachant que pour une même unité fonctionnelle, la production de biogaz est plus performante (48% contre 6% de lactosérum sec) parce que l'émission de CH₄ et de CO₂ sera plus élevée, cela se reflète dans les résultats représentés dans la figure 17 (Trivino *et al.*, 2016).

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

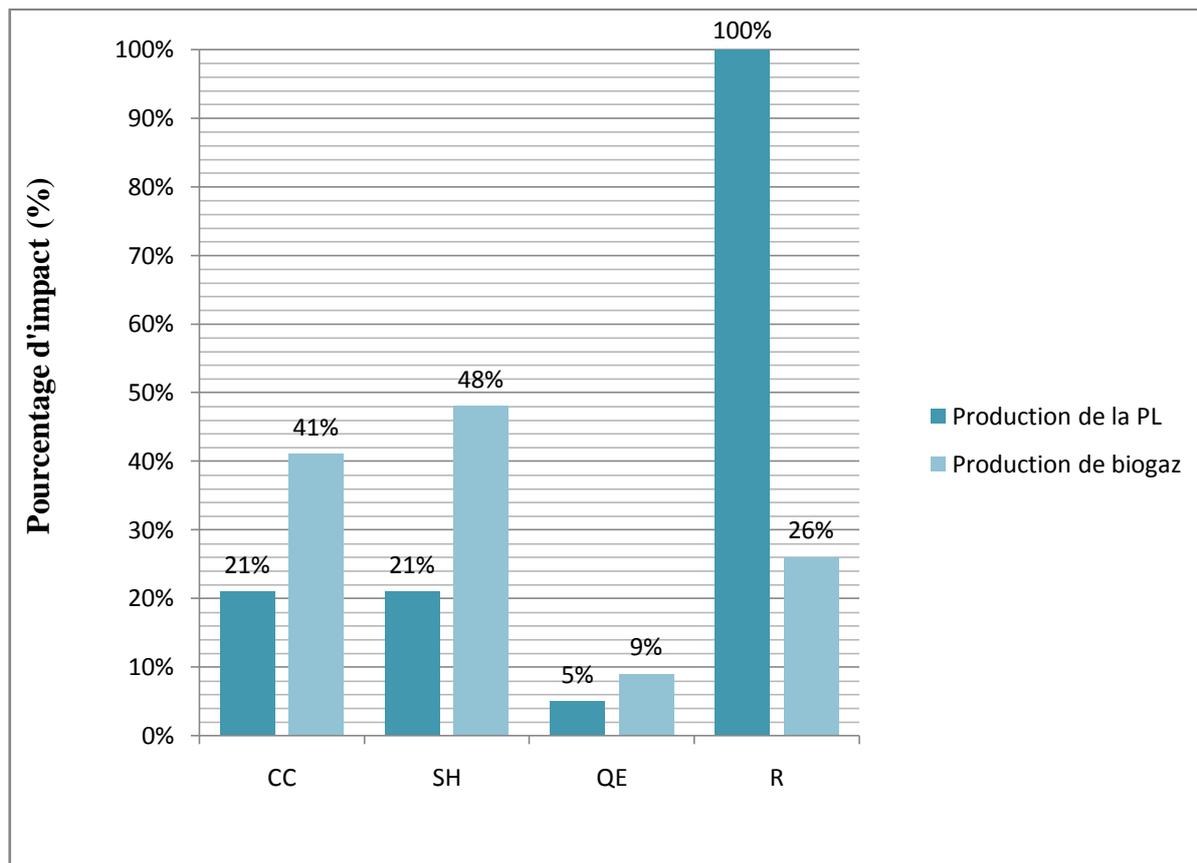


Figure 17 : Analyse et comparaison des catégories d'impacts des productions de PL et de biogaz.

Les résultats ont montré que 19.7 kg CO₂éq sont émis après le traitement d'une tonne de lactosérum transformé en poudre. Alors que pour la production de biogaz, 38 kg CO₂ éq sont émis dans l'environnement. L'impact sur la SH est faible avec un impact de 0.00002 DALY pour la production de PL et 0.00003 DALY pour la production de biogaz. Cependant, on observe que l'énergie utilisée par le procédé de production de PL (1370 MJ) est beaucoup plus élevée que celle utilisée par le procédé de production de biogaz.

Pour comprendre l'impact environnemental de chaque processus, une étude comparant les étapes de CV de chaque procédé a été réalisée. Pour toutes les catégories d'impacts, l'étape de la pasteurisation et la concentration (Osmose inverse, évaporation et séchage) sont les facteurs importants (figure 18). En effet, la pasteurisation elle seule, représente entre 38 - 50% de l'impact total. Par conséquent, ces procédés sont les plus polluants, principalement en raison de l'énergie qu'elles consomment. Pour réduire l'impact environnemental, la meilleure alternative est une industrie d'optimisation énergétique.

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

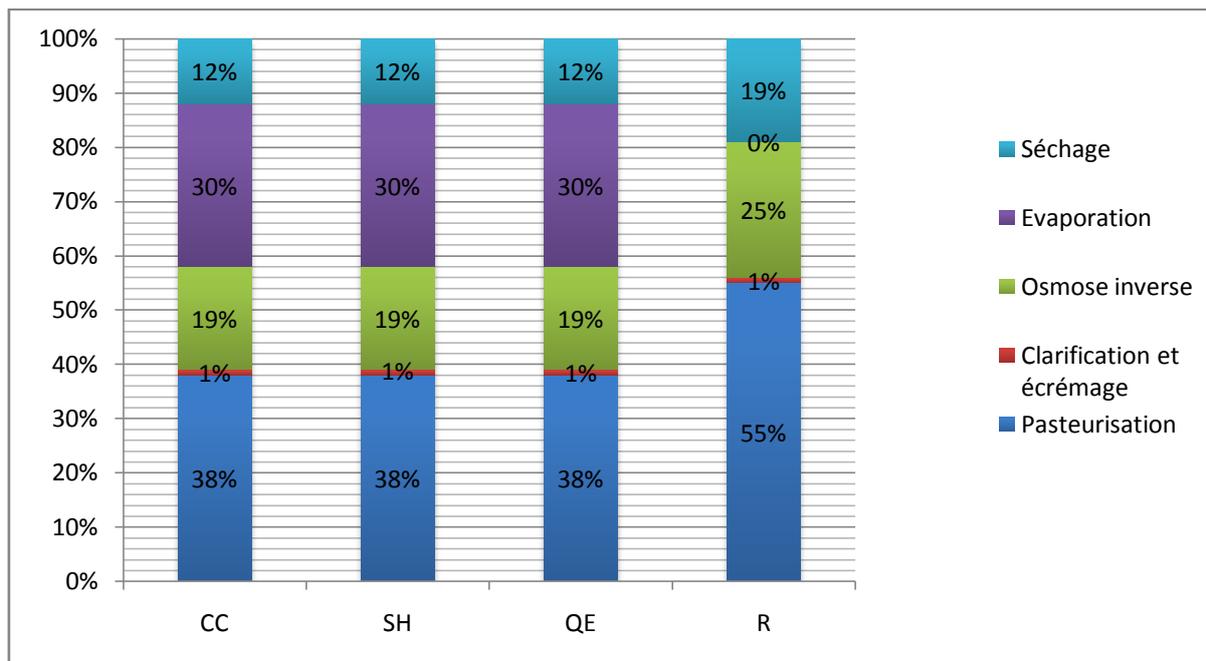


Figure 18 : Analyse des étapes de production de PL.

L'étape de la méthanisation contribue largement à l'impact total, avec 60 à 75% (figure 19). Le principal facteur de pollution est l'émission de gaz lors de la DA. Cependant, l'utilisation du biogaz pour produire de la chaleur ou de l'électricité, peut réduire l'impact négatif de ce dernier et convertir la charge polluante en points positifs (points verts), pour la production d'énergies alternatives, afin d'éviter l'utilisation de combustibles fossiles.

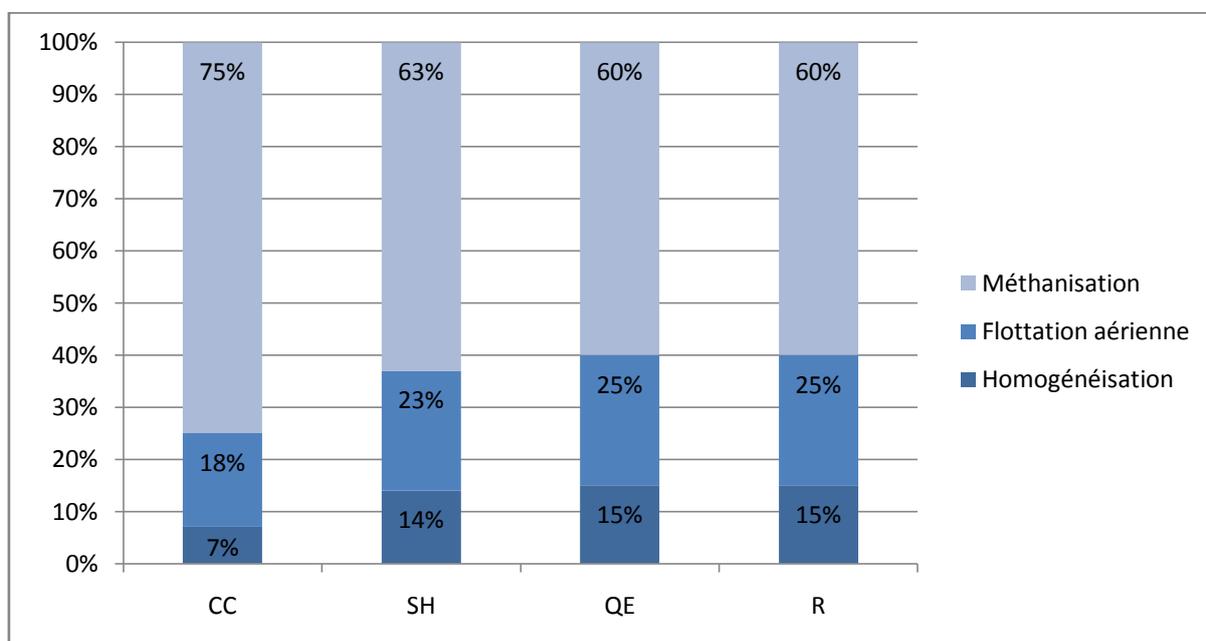


Figure 19 : Analyse des étapes de production de biogaz.

Partie III : Comparaison des impacts environnementaux de deux processus de valorisation de lactosérum

Une extension des frontières du procédé de production de PL ne donne pas de points verts, parce que ce produit est mis sur le marché. Cependant, ce procédé donne une valeur économique à l'industrie.

Tableau VIII : Comparaison générale entre la production de la PL et la production du biogaz.

Type de production	Production de PL	Production de biogaz
Applications	Alimentaire	Non alimentaire
Processus	Physico-chimique	Biotechnologique
Procédé le plus polluant	Pasteurisation	Méthanisation
Impacts environnementaux	Ressources	CC, SH et QE
Avantages	Réduction de volume et facilité de transport. Substitution du lait et remise de prix. Création de nouveaux produits. Source de nutriments.	Production d'énergie renouvelable. Diminution de l'utilisation d'énergie fossile. Contribution au développement durable

**Conclusion
et
perspectives**

Le lactosérum est de plus en plus reconnu dans le monde comme une matière noble et non comme un simple flux de déchets. C'est un substrat abondant, renouvelable et à faible coût, mais qui nécessite une gestion adéquate. Il existe différentes voies de valorisation qui permettent l'exploitation de ce sous-produit. Il peut être utilisé dans différents domaines. Le choix de son utilisation, dépend des intérêts des industriels et de leurs objectifs. En effet, les possibilités de mise en valeur du lactosérum semblent nombreuses et les différents produits dérivés, ainsi que les recherches effectuées en témoignent.

Nous nous sommes intéressées à ce sujet pour encourager les industries à valoriser le lactosérum. L'objectif de cette étude est de leur fournir les outils nécessaires pour choisir entre deux voies de valorisation. Et cela, en effectuant une étude comparative sur les empreintes environnementales de chacun des processus : la production de PL et la production de biogaz.

Il est aussi possible de combiner ces deux scénarios suivant : la production des protéines en poudre et celle du biogaz. Ce sont des processus qui peuvent se compléter parfaitement. En effet, le lactosérum est d'abord valorisé en protéines en poudre. Ensuite, la partie restante constituée principalement de lactose (perméat) est redirigée vers l'unité de méthanisation.

La production de biogaz permet donc d'avoir une valorisation complète du lactosérum d'une part et d'autre part, elle donne la possibilité à l'industrie laitière d'atteindre une autonomie énergétique, qu'elle pourra utiliser dans la fabrication des protéines en poudre. En outre, cette combinaison permettra aux industries d'élargir leur production et de s'ouvrir aux nouveaux débouchés commerciaux, tout en devenant producteurs d'une énergie verte 100% renouvelable.

À travers cette analyse, on conclut que la production de la PL est le processus le moins polluant pour 3 des 4 catégories d'impacts étudiées (CC, SH et QE). En revanche, au niveau de la catégorie des ressources, ce processus a un impact presque 4 fois plus supérieure à celui de la production de biogaz. L'étude a montré que les procédés les plus polluants sont la pasteurisation et la concentration. Cependant, Afin de réduire l'impact environnemental, la meilleure alternative est d'optimiser la consommation d'énergie, principalement celle sous forme thermique.

Bien que la production de biogaz soit plus polluante, l'utilisation de ses émissions en méthane et en dioxyde de carbone, peut réduire considérablement l'impact environnemental. Les conclusions tirées de cette étude ne sont valables que dans le cadre du processus indiqué. De nombreux autres facteurs non couverts ici, peuvent conduire à des conclusions différentes.

La minimisation de l'impact environnemental doit être prise en compte pendant la phase de développement technologique au même titre que la diminution des coûts pour atteindre la compétitivité économique. C'est pourquoi cette étude environnementale doit être accompagnée d'une étude économique pour trouver l'équilibre entre l'impact environnemental et les bénéfices économiques.

Cependant, en Algérie, malgré les nombreux travaux effectués au sein des universités, aucun d'entre eux n'a été mis en œuvre sur le terrain par les industries fromagères. Les solutions qu'on propose sont les suivantes :

- Suivi régulier de l'état vis-à-vis de l'application des lois ;
- Évaluation continue des ingénieurs contrôle qualité pour les industries fromagères ;
- Pénalités et sanctions sévères pour toute personne n'ayant pas respecté les lois ;
- Aide financière de la part de l'état pour permettre aux industriels de mettre en place des unités de valorisation. Et ceci, dans le but de les encourager à investir dans ce secteur, exemple : subvention des appareils de traitement de lactosérum qui coûtent très cher.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[Dossier technique]. (s. d.). https://www.ac-strasbourg.fr/fileadmin/pedagogie/biotechnologies/Enseignement_technologique/Ressources_pedagogiques/Concours_general_STL/CGbio_admission_2015_docts.pdf.

Adrian, J., Legrand, G. et Frangne, R. (1991). *Dictionnaire de biochimie alimentaire et de nutrition*. Tec et doc. Lavoisier. 3ème édition : 116p.

Agnès, N. (1986). *Production de Protéines à partir de Lactosérum Brut* (Doctoral dissertation, Thèse de 3ème cycle, Université de Lyon).

Ali- Mahamane, O. et Yacouba-Mai-Kodomi, A. (2016). Valorisation du lactosérum comme milieu de culture pour la production de métabolites d'*Aspegillus niger*.

Alonso-Fauste, I., Andrés, M., Iturralde, M., Lampreave, F., Gallart, J. et Álava, M.A. (2012). Proteomic characterization by 2-DE in bovine serum and whey from healthy and mastitis affected farm animals. *Journal of proteomics*, 75(10), 3015-3030.

Atra, R., Vatai, G., Bekassy-Molnar, E. et Balint, A. (2005). Investigation of ultra and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. *Journal of food engineering*, 67(3), 325-332.

Banu, R., Kumar, G., Gunasekaran, M., et Kavitha, S. (Dir.) (2020). Food Waste to Valuable Resources: Applications and Management. *Academic Press*.

Bardy, S., Bentz, M., Bussière, T., Chatras, J., Fontaine, L., Gaugler, M., Lechat, A. et Lengronne, O. (2016). *Valorisation du lactosérum*. Rapport de projet. Université de lorraine, ENSAIA, Vandœuvre-lès-Nancy, France.

Barilea, D., Tao, N., Lebrilla, C.B., Coisson, J.D., Arlorio, M. et German, J.B. (2009). Permeate from cheese whey ultrafiltration is a source of milk oligosaccharides. *International Dairy Journal*, 19(9), 524-530.

Belhout, A., Belkaid, R. (2015). *Essai de la mise au point d'un yaourt infantile à base du lactosérum* [Mémoire de fin d'étude, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou].

Benabbou, A. et Bentalab, S-M. (2016). Valorisation du lactosérum liquide en l'incorporant dans la fabrication des crèmes glacées de type sorbet.

Benaissa, M. (2018). Valorisation du lactosérum par les bactéries lactiques.

Références bibliographiques

- Berrical, R. (2000).** Le lait aliment de santé. *Résumés des conférences*. INPL. 1-14.
- Bhandari, B., Patel, K. et Chen, X.D. (2008).** Spray drying of food materials: process and product characteristics. Chen XD, Mujumdar AS (dir.). *Drying technologies in food processing*. Blackwell, Oxford, 113–159.
- Bimbenet, J.J., Dumoulin, E. (1998).** Mechanical, physical and chemical phenomena during food drying: consequences on properties of dried products. *Drying'98, Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS 98)*, Halkidiki, Greece, 771–718.
- Boudier, J.F. et Luquet, F.M. (1989).** *Utilisation des lactosérums en Alimentation Humaine et Animale*. N° 21, LABCODRA, FNSIA, Douai. 1-113.
- Bylund, G. (1995).** Whey Processing. *Handbook of milk and dairy products*, First edition, Tetra Pak Processing Systems AB: Lund, Sweden, 331-346.
- Bylund, G.S. (2003).** *Dairy processing handbook*. Tetra Pak Processing Systems AB, Lund.
- Capiaumant, J., Legrand, C., Dausset, B., Parmentelet, I., Liden, G., Belleville, F. et Nabet, P. (1994).** Whey and 3-lactoglobulin: 2 milk by products which can replace fetal calf serum in mousse hybridoma cell culture. *Lait*. 74: 127-137.
- Champagne, C.P., Goulet, J. et Lachance, R.A. (1990).** Production of Bakers Yeast in Cheese Whey Ultrafiltrate . *Appl. Environ. Microbiol.* 56(2) :425 -430.
- Chenanfa, S. et Aoudia, A. (2017).** Valorisation du lactosérum issu de fabrication du fromage à pâte molle type camembert par la formulation d'une boisson lactée à base de jus de figue de barbarie « *Opuntia ficus indica* ».
- Corbo, M.R., Bevilacqua, A., Petruzzi, L., Casanova, F.P. et Sinigaglia, M. (2014).** Functional beverages: the emerging side of functional foods.
- Dahache, N. et Messaoudi, T. (2019).** La valorisation du lactosérum par incorporation dans des produits laitiers.
- De La Fuente, M.A., Hemar, Y., Tamehana, M., Munro, P.A. et Singh, H. (2002).** Process Induced changes in whey proteins during the manufacture of whey protein Concentrates. *International dairy journal* 12, 361-369.

Références bibliographiques

De Wit, J.N. (2001). From milk to whey. *Lecturer's handbook on whey and whey products*, First edition; European Whey Products Association: Brussels, Belgium, 8-15.

Debry et Gerard (2001). Lait, Nutrition et santé. Jean-Pierre Poulin « *Représentation sociales du lait* ». Ed : Tec et Doc. Paris. Lavoisier. 498-38.ISBN: 2-7430-0431-2.

Degrémont (1989). *Mémento technique de l'eau*, 9eme Edition, Tome 1 et 2, Editions Lavoisier, Paris.

Dimou, C., Koutelidakis, E.A., Nasopoulou, C. et Karantonis, H. (2017). Current trends and emerging technologies in biopigment production processes: Industrial food and health applications. *Inte J Horticult, Agricult and Food Science*, 1(2), 33-46.

Djebairia, A. et Hasnaoui, Z. (2016). Valorisation du lactosérum : Incorporation dans un gâteau sec.

Djemat, F. (2017). Valorisation de lactosérum doux par son incorporation dans la fabrication de l'ben.

Domingues, L., Lima, N. et Teixeira, J.A. (2001). Alcohol production from cheese whey permeate using genetically modified flocculent yeast cells. *Biotechnology and Bioengineering*, 72(5): 507- 514.

El-Sayed, M.M. et Chase, H.A. (2011). Trends in whey protein fractionation. *Biotechnol Lett*, 33:111-150

Emond, C. (2014). *Développement de particules de lactosérum aux propriétés contrôlées par injection de vapeur*. Université Laval.

Essadaoui, M. (2012). Institut Marocain de l'Information Scientifique et Technique (IMIST).*BIT-IAA*. N° 24, 19-22.

Fang, H.P. et Yu, H.P. (2000). Effect of HRT on mesophilic acidogenesis of dairy wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 126(12), 1145-1148.

FAO. (1995). *Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine*. Alimentation et nutrition n° 28. ISBN 92-5-20534-6. <http://www.fao.org/docrep/t4280f/t4280f00.htm>. Date de consultation 20/10/2020.

Références bibliographiques

Fox, P.F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P.L.H. et O'Mahony, J.A. (2015). Chemistry and biochemistry of cheese. *Dairy chemistry and biochemistry* (499-546). Springer, Cham.

FranceAgriMer. (2013). LE MARCHÉ MONDIAL DU LACTOSÉRUM. *Les synthèses de FranceAgriMer*. Vol.12 n°2 p.2. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.franceagrimer.fr/content/download/26218/document/SYN-LAI-2-Lactos%C3%A9rum.pdf>. (Consulté le 20/10/2020).

García-Garibay, M., Jiménez-Guzmán, J. et Hernández-Sánchez, H. (2008). Whey proteins: bioengineering and health. Gutiérrez-López G, Barbosa-Cánovas G, Welte-Chanes J, Parada-Arias E (dir.). *Food engineering: integrated approaches*. Springer, New York, 415–430.

Geneviève, M., ing., M.Sc.A. (2011). Analyse du cycle de vie des impacts environnementaux découlant de l'implantation de mesures d'atténuation d'îlots de chaleur urbains [en ligne]. Rapport de recherche. Québec : Département de Génie chimique, école Polytechnique de Montréal, 118p. Disponible sur : <http://www.santecom.qc.ca/Bibliothequevirtuelle/INSPQ/9782981269409.pdf>. (Consulté le 30/11/2020).

Gillies, M.T. (1974). *Whey Processing and Utilization*. Noyes Data Corporation (ed), Park Ridge, NJ, USA, 3-20.

Guo, M. (Dir.) (2019). *Whey Protein Production, Chemistry, Functionality, and Applications*. John Wiley & Sons.

Harper, W-J. (1992). Lactose and lactose derivatives : *Whey and lactose processing*. Zadow J.G.(ed), London : Elsevier Appl. Sci. 317-360.

health implications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(6), 1192-1206.

Hobman, P.G. (1992). Ultrafiltration and manufacture of whey protein concentrates: *Whey and lactose processing*. Zadow JG (ed). Elsevier, London, 195–230.

Hwang, S.H., et Hansen, C.L. (1998). Characterization of and bioproduction of short-chain organics from mixed dairy-processing wastewater. *American Society of Agricultural Engineers*, 41(3), 795-802.

Références bibliographiques

Hynd, J. (1980). Drying of whey, *J. Soc. Dairy Technol.* 33. 52–54.

IDF. (1997). *Whey*. Proceedings of the second International Whey Conference. (I. D. Federation, dir.) (1^e ed.). Chicago, États Unis: International Dairy Federation, Brussels, Belgique.

International Organization for Standardization (2006). *Environmental Management: Life Cycle Assessment; Principles and Framework* (N° 2006). ISO.

Interreg Sudoe AGROSMARTcoop (2017). ACTUALITES ET ACTIVITES : FILTRATION DU LACTOSERUM. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.agrosmartcoop.eu/fr/2017/05/29/1-8-filtration-du-lactoserum-typologie-3/> (Consulté le 23/10/2020).

Jauregi, P. et Welderufael, F.T. (2010). Produits protéinés à valeur ajoutée issus du lactosérum. *Nutrafoods*, 9 (4), 13-23.

Jiménez-González, C., Kim, S et Overcash, M.R. (2000). Methodology for developing gate-to-gate life cycle inventory information. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(3), 153- 159.

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. et Rosenbaum, R. (2003). « IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology ». *Journal of LCA*, 8 (6). 324-330.

Kisaalita, W.S., Pinder, K.L., et Lo, K.V. (1987). Acidogenic fermentation of lactose. *Biotechnology and Bioengineering*, 30(1), 88-95.

Kopsahelis, N., Dimou, C., Papadaki, A., Xenopoulos, E., Kyraleou, M., Kallithraka, S. et Koutinas, A.A. (2018). Refining of wine lees and cheese whey for the production of microbial oil, polyphenol-rich extracts and value-added co-products. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(1), 257-268.

Kosikowski, F.V.(1979). Whey Utilization and Whey Products. *Journal of Dairy Science* 62(7): 1149-1160.

Kosseva, M.R., Panesar, P.S., Kaur, G. et Kennedy, J.F. (2009). Use of immobilised biocatalysts in the processing of cheese whey. *International Journal of Biological Macromolecules*, 45(5), 437-447.

Références bibliographiques

- Laplanche, J. (2004).** Système d'épuration du lactosérum d'alpage par culture fixée sur lit de compost. *Revue suisse Agric.*, 36(5), 220-224.
- Laplanche, J., Ducognon, V., et Trevisan D. (2006).** Traitement du lactosérum par filtration sur compostensemencé de vers, epuration of lactoserum in a compost filter with worms, syndicats des alpagistes, fruits communs et vendeur direct de Savoie, *maison de l'agriculture* 73/90 SAUT BALDOPH.
- Lapointe-Vignola, C. (2002).** Science et technologie du lait: transformation du lait. (Presses inter Polytechnique, Ed.) (2^e ed.). Montréal, Qc: *Fondation de technologie laitière du Québec*.
- Linden, G. et Lorient, D. (1994).** *Biochimie agro industrielle*, valorisation alimentaire de la Production agricole. Masson Paris Milan Barcelone.
- Lupin, D. (1998).** Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine. FAO, *Alimentation et nutrition*. 25-38.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., et Brock, T.D. (2006).** *Brock biology of microorganisms* (11^e éd.). Upper Saddle River, NJ : Person Prentice Hall.
- Madureira, A., Pereira, C., Gomes, A., Pintado, M., Malcata, X. (2007).** *Bovine whey proteins*. Overview on their main biological properties. *Food Res Int.*40(10):1197-211.
- Marshall, D.K.N. (2004).** Therapeutic applications of whey protein. *Alternative medicine review*, 9(2), 136-156.
- Marwaha, S-S., Kenned, J-F.(1988).** Whey pollution problem and potential utilization. *International Journal of Food Science and Technology*. Vol (23): 323 – 336p.
- Mata-Alvarez, J. (2003).** Fundamentals of the anaerobic digestion process. *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*, 1-20.
- Mawson, A.J. (1994).** Bioconversions for whey utilization and waste abatement. *Bioresource Technology*, 47(3) : 195-203.
- Medinbio (2015).** Lactosérum [illustration]. Disponible sur : www.medinbio.colactoserum2m/.html. (Consulté le 23/12/2020).
- Mereo, M. (1971).** Les utilisations industrielles du sérum de fromagerie. *Agro-alim*, 817-823.

Références bibliographiques

Modler, H.W. (2000). *Milk Processing*. Nakai S, Modler HW (dir.) Food Proteins: processing applications, John Wiley and Sons, Inc, New York.

Mollea, C., Marmo, L. et Bosco, F. (2013). Valorisation of Cheese Whey, a By-Product from the Dairy Industry, *Tech*. ISBN: 978-953-51-0911-2. [En ligne]: 10.5772/53159.

Morr, C.V. et Ha, E.Y.W. (1993). Whey protein concentrates and isolate: processing and Functional properties .*Critical reviews in food science and nutrition*, 33 (6), 431-476.

Moulin, G. et Galzy, P.(1984). Whey, a potential substrate for biotechnology. Intercept, Andover, Royaume-Uni.

Nagar, S. et Nagal, S. (2013). Whey: Composition, role in human health and its utilization in preparation of value added products. *International Journal of Food and Fermentation Technology*, 3(2), 93-100.

Nguyen, D.Q. (2014). *Étude comparative expérimentale des opérations d'atomisation et d'autovaporisation: application à la gomme arabique et au soja* (Doctoral dissertation).

Oborn, R. et Piggott, K.L. (1968). A review of methods available for whey utilization in Australia. *Aust. 1. Dairy Technol.*, 23, 13-16.

Panesar, P.S. et Kennedy, J.F.(2012). Biotechnological approaches for the value addition of whey. *Critical Reviews in Biotechnology*, 32(4): 327-348.

Panesar, P.S., Kumari, S. et Panesar, R. (2013). Biotechnological approaches for the production of prebiotics and their potential applications. *Critical reviews in biotechnology*, 33(4), 345-364.

Papademas, P. et Kotsaki, P. (2019). Technological Utilization of Whey towards Sustainable Exploitation. *J Adv Dairy Res*, 7, 231.

Pearce, R-J. (1983). Thermal separation of b-lactoglobulin and a-lactalbumin in bovine cheddar cheese whey. *J. Dairy Technol.* 38: 144-149.

Perle, M., Kimchie, S. et Shelef, G. (1995). Some biochemical aspects of the anaerobic degradation of dairy wastewater. *Water Research*, 29(6), 1549-1554.

Petruccioli, M., Raviv, M., Di Silvestro, R. et Dinelli, G. (2011). Agriculture and Agro-Industrial Wastes, Byproducts, and Wastewaters: Origin, Characteristics, and Potential in Bio-Based, *Compounds Production*.

Références bibliographiques

- Pintado, M.E., Macedo, A. et Malcata, F. (2001).** Technology, chemistry and microbiologie of whey cheeses. *Food Science and technology International*, 7(2), 105-116.
- Rabhi, K. et Belhadi, S. (2017).** Formulation d'un aliment de bétail à base de sous-produits agro-industriels par voie biotechnologique.
- Ramchandran, L. et Vasiljevic, T. (2013).** Whey processing. Tamime AY (ed). Membrane processing: *dairy and beverage applications*. Blackwell, Oxford, 193–207.
- RECORD (2011).** *Etat de la pratique des Analyses de Cycle de Vie (ACV) ou bilans environnementaux globaux dans les activités de gestion des déchets*, 64 p, n°09-10, 18/1A.
- Rispe, A. (2013).** Analyse Cycle de Vie, un outil d'évaluation au service de la gestion de déchets. *Rapport de stage*. BIO Intelligence Service.
- Rodem, P.E-T. (2010, March).** Dairy separation range for sound performance. Tetra Centri AirTight. *Tetrapack*, 1–8. Retrieved from www.tetrapak.com.
- Roger, L. (1979).** Contributions à la recherche d'une meilleure utilisation en alimentation humaine des composants glucidiques et protéiques du lactosérum grâce à l'emploi des techniques à membranes. *Thèse de Doctorat de 3^e cycle*, Rennes (ENSAR). France.
- Setouti, W.S. et Beggar, A. (2017).** Essai d'Incorporation de lactosérum en poudre dans la fabrication du fromage fondu.
- Sharma, R. (2018).** Whey proteins in functional foods. Deeth HC, Bansal N, editors. *Whey proteins From milk to medicine*. 1^e ed. Academic Press. 637-63.
- Sia, A., Merouani, A. et Derouiche, K. (2020).** Fractionnement et modélisation cinétique de production des protéases exo-cellulaire de *penicillium condidum* cultivé sur milieu a base de lactosérum industriel.
- Siso, M.I.G. (1996).** The biotechnological utilization of cheese whey: *A review*. *Bioresource Technology*, 57(1): 1-11.
- Smithers, G.W. (2008).** Whey and whey protein From « gutter-to-gold». *International Dairy Journal*, 18(7), 695-704.
- Smithers, G.W. (2015).** Whey-ing up the options—Yesterday, today and tomorrow. *International Dairy Journal*, 48, 2-14.

Références bibliographiques

- Sottiez, P. (1990).** Produits dérivés des fabrications fromagères, « lait et produits laitiers vache, brebis, chèvre : transformation et technologie ». Ed. LUQUET F.M. Tome 2, *Technique et Documentation*, 2ème éd. Lavoisier, Paris. 357-390.
- Spreer, E. (1998).** *Milk and Dairy product technology*. (A. Mixa, dir.) (1^e ed.). New York, États Unis: Marcel Dekker, INC.
- Tetra pack. (2003).** *Dairy processing handbook*. (L. Grafiska, dir.) (2^e ed.). Lund, Sweden: Tetra Pak Processing Systems AB. Retrieved from www.tetrapak.com
- Trivino, A., Godbout, S., Pelletier, F., Heitz, M et De Halleux, D. (2016).** *Environmental study of valorization of cheese dairy residues*.
- Ugalde, U.O. et Castrillo, J.I. (2002).** Single Cell Proteins from Fungi and Yeasts. Applied Mycology and Biotechnology. *Agriculture And Food Production*, Elsevier Science B.V. (dir.) Vol 2. 123- 149.
- Uniacke-Lowe, T., Huppertz, T., Fox, P.F. (2010).** *Equine milk proteins: Chemistry, structure and nutritional significance*. Int Dly J.20:609-29.
- Vasey, C.D.N. (2006).** The WHEY Prescription: The Healing Miracle In Milk. *Heaking Arts Press*. Rochester, Vermont : JON E. Graham. 45 pages.
- Violleau, V. (1999).** Valorisation du lactosérum par électrodialyse. *Thèse de doctorat*. Montpellier.
- Vuillemard, J-C. (2015).** Chapitre 7, Les ingrédients laitiers. Québec: Université Laval.
- Walzem, R.L., Dillard, C.J., German, J.B. (2002).** Whey components: millennia of evolution create functionalities for mammalian nutrition: What we know and what we may be overlooking. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 42: 353-75.
- Westergaard, V. (2010).** *Milk Powder Technology: Evaporation and Spray Drying*. (G. Niro, dir.). Copenhagen, Danemark: GEA Process Engineering. Retrieved from <https://books.google.pl/books?id=AwdEPwAACAAJ>.
- Woo, A. (2002).** La grande diversité du lactosérum. *Agriculture et agroalimentaire*, Canada, p3-13.

Références bibliographiques

Yadav J.S.S., Yan S., Pilli S., Kumar L., Tyagi R.D. et Surampalli R.Y. (2015). Cheese whey: A potential resource to transform into bioprotein, functional/nutritional proteins and bioactive peptides. *Biotechnology Advances*, 33(6), 756-774.

Zadow, J.G. (2003). Whey and whey powders: production and uses. Caballero B, Finglas P, Toldra F, editors. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*. 2^e ed. Academic Press.

Zemmouchi, R. K.S.A. (2016). Valorisation du lactosérum: Incorporation dans des pâtes alimentaires.

Résumé

L'industrie laitière doit faire face à un problème qui s'est accentué au fil des années. Il s'agit de la pollution générée par le lactosérum. Ce résidu issu de la production de fromage, peut avoir un effet néfaste sur l'environnement s'il n'est pas pris en charge convenablement. Il était autrefois jeté dans la nature ou utilisé uniquement en alimentation animale. Aujourd'hui, et grâce aux différents procédés de valorisation existants, son exploitation dans plusieurs domaines s'est considérablement élargie.

L'objectif de ce travail est de revoir les différentes voies de valorisation du lactosérum existantes, d'évaluer et de comparer les impacts environnementaux de deux scénarios de gestion du lactosérum à l'aide d'une analyse de cycle de vie (ACV). Les deux scénarios considérés sont : la production de poudre de lactosérum (PL) et la production de biogaz. Les analyses en provenance d'une étude d'un groupe de chercheurs de la société canadienne de génie agroalimentaire, de la bio-ingénierie et de l'environnement (SCGABE), ont permis de déterminer les impacts environnementaux de chaque processus. Les résultats obtenus pourraient permettre d'orienter les industriels dans leur choix de processus de gestion du lactosérum, à condition que cette étude environnementale soit accompagnée d'une étude économique dans un contexte d'éco-efficience.

Mots clés : Lactosérum, valorisation, analyse de cycle de vie, impact environnemental, poudre de lactosérum, biogaz.

Abstract

The dairy industry is facing a problem that has grown over the years. This is the pollution generated by whey. This residue from cheese production can have a negative effect on the environment if it is not properly taken care of. It used to be thrown away in the wild or used only as animal feed. Today, and thanks to the various existing recovery processes, its use in several areas has been considerably expanded.

The objective of this work is to review the different existing whey valorization routes, to evaluate and compare the environmental impacts of two whey management scenarios using a life cycle analysis (LCA). The two scenarios considered are: production of whey powder and biogas production. Analyses from a study by a group of researchers from the Canadian Society for Agri-Food, Bioengineering and Environmental Engineering (CSABE), determined the environmental impacts of each process. The results obtained could help guide industrialists in their choice of whey management processes, provided that this environmental study is accompanied by an economic study in a context of eco-efficiency.

Key words: Whey, valorization, life cycle analysis, environmental impact, whey powder, biogas.

ملخص

تواجه صناعة الألبان مشكلة قد ازدادت مع مرور السنين. إنه التلوث الناتج عن مصّل اللبّن. يمكن أن يؤثر على البيئة بشكل سلبي إذا لم يتم التعامل معه بشكل صحيح. في السابق، كان يرمى مباشرة في البيئة أو يستخدم فقط كعلف للحيوانات. اليوم توسع استخدامه في العديد من المجالات بشكل كبير بفضل وجود مختلف عمليات استرداد مصّل اللبّن.

الهدف من هذا العمل هو مراجعة و تقييم الطرق المختلفة لاستعادة مصّل اللبّن ومقارنة الآثار البيئية بين نوعين من عمليات استرداد مصّل اللبّن و ذلك باستخدام تحليل دورة الحياة. النوعان اللذان تم مناقشاهما هما: إنتاج مسحوق مصّل اللبّن وإنتاج الغاز الحيوي. التحاليل الآتية تنتمي إلى دراسة أجرتها مجموعة من الباحثين من الجمعية الكندية لهندسة الأغذية الزراعية، الهندسة الحيوية والبيئة، تم فيها تحديد الآثار البيئية لكل عملية.

هذه النتائج يمكن أن تساعد الصناعيين في اختيارهم لنوعية العملية التي سيستخدمونها لاسترداد مصّل اللبّن، بشرط أن تكون هذه الدراسة البيئية مصحوبة بدراسة اقتصادية في سياق الكفاءة البيئية.

الكلمات المفتاحية: مصّل اللبّن ، الاسترداد ، تحليل دورة الحياة ، الآثار البيئية ، مسحوق مصّل اللبّن ، الغاز الحيوي.