

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم

Abdelhamid Ibn Badis University - Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم هندسة الطرائق

Department of Process Engineering



Department of Process Engineering

قسم هندسة

The Date

الطرائق
التاريخ :

Ref :...../U.M/F.S.T/2023

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2023

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie Chimique

Thème

Recyclage des eaux de rejet d'osmose inverse dans un nouveau pilote de filtration membranaire mis en place pour augmenter le taux de récupération des eaux traitées dans l'industrie laitière de Sidi Saâda

Présenté par

1- Bekada Mohamed Ali Nadjem Eddine

2- Lazreg Mohamed Oussama

Soutenu le 26/06/ 2023 devant le jury composé de :

Président :	M. GHELAMALLAH	Pr.	Université de Mostaganem
Examineur :	N. HADDOU	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur :	H. BOUZID	Pr.	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2022/2023

Dédicaces

Je dédie ce travail avant tout à ma mère, qui est la raison même de mon existence. Sa présence, son amour inconditionnel et son soutien indéfectible, elle est le pilier qui m'a permis d'accomplir ce parcours académique. Je lui suis infiniment reconnaissant pour tout ce qu'elle a fait et continue de faire pour moi. Ce travail est une humble expression de ma gratitude et de mon amour éternel envers elle.

Par la suite, je n'oublie pas mon père, que Dieu ait son âme. Je dédie ce travail à sa mémoire, car il a été un modèle de persévérance, de sagesse et de générosité. Son soutien indéfectible, ses encouragements constants et son amour inconditionnel qui ont été des sources d'inspiration pour moi tout au long de ma vie. Je suis profondément reconnaissant envers lui et je souhaite honorer sa mémoire en réalisant ce travail avec dévouement et passion. ALLAH yarhmah.

Je dédie également ce travail à mon grand-père (**BABA**), que Dieu ait son âme. Il a occupé une place spéciale dans ma vie, remplissant le rôle paternel avec amour, bienveillance et sagesse. Ses conseils éclairés, son soutien inconditionnel et son amour sans bornes qui ont été des piliers essentiels dans mon parcours. Je suis profondément reconnaissant envers lui pour toutes les valeurs qu'il m'a transmis et pour avoir été un exemple de détermination et de persévérance. ALLAH yarhmah.

Enfin, je dédie ce travail à ma tante G. BEKADA et à toute ma famille.

M. Bekada

Dédicace

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste travail de fin d'étude à mes chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite et m'ont éclairé le chemin par leurs conseils et prières. Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes très chères sœurs, qui m'ont encouragé, je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

Je dédie également ce travail à la mémoire de ma grande mère, ALLAH yarhmha.

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

O. Lazreg

Remerciement

Nous exprimons notre sincère gratitude à notre enseignant et promoteur, Professeur **H. BOUZID**, pour sa gentillesse, son soutien inestimable et ses conseils précieux tout au long de notre projet de mémoire.

Nous tenons ensuite à exprimer notre gratitude envers tous les membres du jury qui vont évaluer ce travail et nous faire bénéficier de leurs connaissances ainsi que de leurs commentaires constructifs :

Le Professeur **M. GHELAMALLAH**, qui a eu l'honneur de présider le jury de cette modeste recherche.

Mme **N. HADDOU**, maître de conférences, qui a spontanément accepté d'examiner ce travail, témoignant ainsi de l'intérêt qu'elle porte à notre travail.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à l'ensemble du personnel de l'industrie laitière de Sidi Saâda, en particulier au responsable du service maintenance, **M. MAAMAR Boualem**, pour nous avoir guidés et encouragés tout au long de notre stage. Son soutien précieux a grandement contribué à la réussite de notre projet.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers le responsable du laboratoire, **M. Mokhtar DJOUAD**, pour nous avoir accueilli au sein de son équipe au laboratoire de l'industrie laitière de Sidi Saâda. Sa collaboration et ses précieux conseils ont été d'une grande aide dans nos travaux de recherche.

Nous tenons aussi à adresser nos chaleureux remerciements à l'ingénieur de contrôle de laboratoire de l'industrie, **M. Brahim BENTAHARI**, pour son assistance et son soutien tout au long de notre stage.

Nous tenons également à exprimer nos remerciements à notre futur médecin, I. Bekada, pour son précieux soutien dans la réalisation des schémas en 3D.

Nous tenons à exprimer notre gratitude infinie à nos parents pour leur soutien constant et leur amour inconditionnel tout au long de notre parcours académique. Leur encouragement, leurs sacrifices et leur confiance ont été des sources d'inspiration et de motivation. Leur présence et leur soutien ont été essentiels pour surmonter les défis et atteindre nos objectifs. Nous leur sommes profondément reconnaissants pour leur inestimable contribution à notre réussite.

RESUME

Le présent mémoire porte sur le recyclage des eaux de rejet d'osmose inverse dans l'industrie laitière de Sidi Saâda. Dans cette industrie, l'utilisation d'eau traitée est essentielle pour la production des produits laitiers. Toutefois, en raison de la diminution de la source principale d'eau, à savoir l'eau saumâtre de forage, il est devenu nécessaire d'explorer des solutions alternatives.

Dans cette étude, nous avons choisi d'adopter la technologie de membranes de la société Toray, en particulier le modèle BW TM710D avec un taux de rétention de 99,8%. À l'aide du logiciel de simulation Toray DS RO, nous avons déterminé que l'utilisation de 2 modules, chacun composé de 5 membranes (soit un total de 10 membranes), serait nécessaire. La pression de fonctionnement requise est d'environ 21 bar, et le débit d'alimentation est de 2,5 m³/h.

Grâce à cette configuration, nous avons estimé un taux de récupération de 50%. Cela signifie que nous pourrions récupérer 50% d'eau précédemment rejetée par l'osmose inverse, ce qui s'ajoute au taux de récupération initial de 59%. Ainsi, le taux de récupération global atteindra 79%, ce qui représente une amélioration significative.

Cette approche de recyclage des eaux de rejet d'osmose inverse permettra à l'industrie laitière de Sidi Saâda de maximiser l'utilisation des ressources en eau, de réduire les coûts liés à l'approvisionnement en eau.

Mots clés : membrane ; osmose inverse ; recyclage ; eau de rejet d'osmose inverse ; eau saumâtre ; dessalement ; taux de récupération ; pression de fonctionnement ; industrie laitière

ABSTRACT

The present thesis focuses on the recycling of reverse osmosis reject water in the dairy industry of Sidi Saâda. In this industry, the use of treated water is essential for the production of dairy products. However, due to the decline in the main water source, namely groundwater, it has become necessary to explore alternative solutions.

In this study, we have chosen to adopt the membrane technology from Toray, specifically the BW TM710D model with a retention rate of 99.8%. Using the Toray DS RO simulation software, we determined that the use of 2 modules, each consisting of 5 membranes (totaling 10 membranes), would be required. The required operating pressure is approximately 21 bar, and the feed flow rate is 2.5 m³/h.

With this configuration, we estimated a recovery rate of 50%. This means that we will be able to recover 50% of the previously rejected water, in addition to the initial recovery rate of 59%. Thus, the overall recovery rate will reach 79%, representing a significant improvement.

This approach of recycling reverse osmosis reject water will allow the dairy industry of Sidi Saâda to maximize the use of water resources and reduce costs associated with water supply.

Keywords : membrane ; reverse osmosis ; recycling ; reverse osmosis brine water ; brackish water ; desalination ; recovery rate ; operating pressure ; dairy industry

ملخص :

تركز هذه الأطروحة على إعادة تدوير مياه الصرف الناتجة عن التناضح العكسي في صناعة الألبان في مصنع الألبان سيدي سعادة. في هذه الصناعة، يعد استخدام المياه المعالجة ضرورياً. و، بسبب انخفاض الامداد الرئيسي للمياه، أي مياه السطحية، أصبح من الضروري استكشاف حلول بديلة.

في هذه الدراسة، اخترنا اعتماد تكنولوجيا غشاء توراي، تحديداً نموذج بو تم 710 د مع معدل الاحتفاظ من 99.8%. باعتماد برنامج محاكاة توراي دس رو، قررنا أن استخدام وحدتين، كل واحدة تتكون من 5 أغشية (ما مجموعه 10 أغشية)، سيكون مناسباً. يبلغ ضغط التشغيل المطلوب حوالي 21 بار، ومعدل تدفق الإمداد 2.5 م³ / ساعة.

بفضل هذا التكوين، قدرنا معدل استرداد بنسبة 50%. هذا يعني أننا سنكون قادرين على استعادة 50% من المياه التي تم طرحها سابقاً، بالإضافة إلى معدل الاسترداد الأولي البالغ 59%. وبالتالي، فإن معدل الاسترداد الكلي سيصل إلى 79%، وهو ما يمثل تحسناً كبيراً.

سيسمح هذا النهج لإعادة تدوير مياه الصرف الناتجة عن التناضح العكسي لصناعة الألبان في سيدي سعادة بزيادة استخدام الموارد المائية إلى أقصى حد، وخفض التكاليف المتعلقة بإمدادات المياه والحفاظ على البيئة عن طريق تقليل تصريف المياه غير المعالجة.

الكلمات المفتاحية : غشاء التناضح العكسي؛ إعادة تدوير مياه الصرف الناتجة عن التناضح العكسي؛ المياه السطحية؛ تحلية المياه؛ معدل الاسترداد؛ ضغط التشغيل؛ مصنع الألبان.

Liste des figures

Figure 1 : Représentation schématique d'une membrane permselective	3
Figure 2 : Shéma récapitulatif des procédés baromembranaires en fonction de la taille des espèces retenus.	5
Figure 3 : Domaines d'application des différentes techniques à membranes selon le diamètre des pores et le seuil de coupure	6
Figure 4 : Schéma de principe d'osmose.	7
Figure 5 : Schéma de principe d'osmose inverse.	7
Figure 6 : Présentation du fonctionnement de la filtration frontale	8
Figure 7 : Principe de fonctionnement de la filtration tangentielle	9
Figure 8 : (a) Membrane symétrique poreuse (b) Membrane symétrique dense.	10
Figure 9 : Membrane asymétrique.	11
Figure 10 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) d'une membrane composite.	11
Figure 11 : L'écriture topologique de cellulose , diacétate de cellulose et triacétate de cellulose	12
Figure 12 : Structure chimique des membranes de type polyamide.....	13
Figure 13 : Résistance au Chlore de différentes membranes, mesurée par la chute dans le temps du taux de rejet en fonction de la concentration en Chlore de la solution d'alimentation	14
Figure 14 : Membrane asymétrique en céramique	15
Figure 15 : Membrane à support de carbone.....	16
Figure 16 : Module tubulaire monocanal	18
Figure 17 : Module à fibre creuse	20
Figure 18 : Module plan, schéma de circulation des fluides	21
Figure 19 :Schéma de module spiralé d'osmose inverse.	21
Figure 20 :Organigramme du complexe laitier de Sidi Saâda.	25
Figure 21 : Procédé de prétraitement des eaux saumâtres.....	30
Figure 22 : Modules d'osmose inverse pour le traitement final des eaux saumâtres.	32
Figure 23 : Diagramme de fabrication du lait reconstitué.....	37
Figure 24 : Diagramme de fabrication du fromage laibni.	39
Figure 25 : Diagramme de fabrication du camembert.....	42
Figure 26 : Membrane Toray TM710D.....	48

Liste des figures

Figure 27: Paramètre de l'alimentation.....	49
Figure 28 : Paramètres d'alimentation et taux de récupération pour le procédé de recyclage.	50
Figure 29 : Flux de circulation des eaux saumâtres d'après logiciel Toray DS RO.	51
Figure 30 : Le choix de nombres de modules pour le procédé de recyclage.....	52
Figure 31 : Les paramètres de fonctionnement proposé par Toray DS RO pour le traitement des eaux.....	52
Figure 32 : les nouveaux paramètres après l'ajout des deux membranes	53
Figure 33 : Représentation schématique en 3D du nouveau pilote (2ème pilote) d'osmose inverse.....	55
Figure 34 : Représentation schématique en 3D du nouveau procédé globale de traitement des eaux saumâtres prétraitées dans l'industrie laitière de Sidi Saâda.....	55

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemple de matériaux constitutif de membranes et résistance à la température et au pH .	17
Tableau 2 : les principales dates de création et de mise en service du complexe laitier de Sidi Saâda.	23
Tableau 3 : Production de l'unité par jour.	26
Tableau 4 : Normes OMS et Algériennes des paramètres physico-chimique pour l'eau Potable OMS 2006 et JORA (2014).	27
Tableau 5 : Analyses de l'eau d'alimentation d'osmose inverse.	44
Tableau 6 : Analyses de l'eau de perméat d'osmose inverse.	45
Tableau 7: Analyses de l'eau de rejet d'osmose inverse.	46

Liste des abréviations

T	Température.
°C	Degré Celsius
°F	Degré français
EDTA	Acide Ethylène Disodique Tétra acétique
NET	Noir d'ériochrome T
Cl	Chlore
pH	Potentiel d'hydrogène
UV	Ultraviolet
OI	Osmose Inverse.
µS	Microsiemens.
NTU	Unité néphélogométrique
MF	Microfiltration.
MES	Matière en suspension.
MG	Matière grasse
SDI	Indice de dissolution de sel.
Jp	Flux du perméat
TR	Taux de rétention des sels.
PTM	pression transmembranaire
OMS	Organisation mondiale de la santé
°D	Degré Dornic

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les procédés à membranes	3
I.1 Présentation des procédés à membranes.....	3
I.2 Domaine d'utilisation	3
I.2.1 Microfiltration-----	3
I.2.2 Ultrafiltration-----	4
I.2.3 Nanofiltration -----	4
I.2.4 Osmose inverse -----	4
I.2.4.1 Principe de l'osmose inverse	7
I.2.4.1.1 <i>Phénomène de l'osmose</i>	7
I.2.4.1.2 <i>Phénomène de l'osmose inverse</i>	7
I.2.4.2 Pression osmotique.....	8
I.3 Mode de fonctionnement.....	8
I.3.1 Filtration frontale-----	8
I.3.2 Filtration tangentielle-----	9
I.4 Classification des membranes	9
I.4.1 Mécanisme de séparation-----	9
I.4.1.1 Membranes poreuses	9
I.4.1.2 Membranes denses.....	10
I.4.2 Morphologie-----	10
I.4.2.1 Membranes symétriques.....	10
I.4.2.2 Membranes asymétriques	11
I.4.2.3 Membranes composites	11
I.4.3 Nature chimique -----	12
I.4.3.1 Membranes organiques.....	12
I.4.3.1.1 <i>Membranes acétate de cellulose</i>	12
I.4.3.1.2 <i>Membranes polyamide</i>	13
I.4.3.1.3 <i>Membrane polysulfone</i>	14
I.4.3.2 Membranes minérales.....	15
I.4.3.2.1 <i>Membranes céramiques</i>	15
I.4.3.2.2 <i>Membranes à carbone</i>	16

I.4.4	Géométrie de préparation-----	17
I.4.4.1	Module membranaire.....	17
I.4.4.1.1	Module tubulaire.....	17
I.4.4.1.2	Module Fibre creuse.....	19
I.4.4.1.3	Module plan.....	20
I.4.4.1.4	Module spiralé.....	21
Chapitre II :	Présentation du complexe laitier de Sidi Saâda.....	23
II.1	Situation géographique.....	23
II.2	Historique.....	23
II.3	Identification.....	23
II.4	Installation.....	24
II.5	Personnel.....	24
II.6	Production.....	25
II.7	Traitement des eaux saumâtres.....	26
II.7.1	Prétraitement-----	28
II.7.1.1	Désinfection.....	28
II.7.1.2	Filtration.....	28
II.7.1.3	L'injection d'anti-scalant.....	28
II.7.1.4	Microfiltration.....	29
II.7.2	Traitement par osmose inverse-----	31
II.7.2.1	Type de modules utilisés par l'unité laitière de Sidi Saâda.....	31
II.7.2.2	Le principe de fonctionnement des modules.....	31
II.7.2.3	Les recommandations et les formules pour les calculs de l'exploitation.....	32
II.7.2.3.1	Taux de rétention de la conductivité (salinité).....	32
II.7.2.3.2	Flux de perméat.....	33
II.7.2.3.3	Taux de récupération.....	33
II.7.2.3.4	Passage de sel.....	33
II.7.3	Différents passages de l'eau traitée pour la production-----	34
II.8	Production du lait et ses dérivés.....	34
II.8.1	Procédé de production du lait reconstitué-----	34
II.8.1.1	Réception de la matière première.....	34
II.8.1.2	Filtration du lait cru.....	35
II.8.1.3	Refroidissement et stockage.....	35

II.8.1.4	Eau de reconstitution	35
II.8.1.5	Reconstitution de lait	35
II.8.1.6	Mélange	35
II.8.1.7	Filtration du mélange.....	35
II.8.1.8	Homogénéisation.....	36
II.8.1.9	Dégazage	36
II.8.1.10	Pasteurisation.....	36
II.8.1.11	Refroidissement.....	36
II.8.1.12	Stockage tampon	36
II.8.1.13	Conditionnement	36
II.9	Procédé de fabrication de fromage Laibni.....	38
II.9.1	Préparation de L’ben (lait acidifié) et beurre	38
II.9.2	Mélange.....	38
II.9.3	Pasteurisation.....	38
II.9.4	Homogénéisation.....	38
II.9.5	Agitation.....	38
II.9.6	Conditionnement	38
II.10	Procédé de fabrication de camembert.....	39
II.10.1	Standardisation.....	39
II.10.2	Pasteurisation.....	39
II.10.3	Maturation	40
II.10.4	Coagulation	40
II.10.5	Tranchage	40
II.10.6	Moulage-Egouttage	40
II.10.7	Salage	40
II.10.8	Ressuyage	41
II.10.9	Affinage	41
II.10.10	Séchage et conditionnement	41
II.10.11	Stockage	41
Chapitre III : Procédé de recyclage des eaux de rejet d’osmose inverse.....		43
III.1	Les analyses physico-chimiques des eaux avant et après osmose inverse	43

III.1.1	Résultats d'analyses -----	44
III.1.1.1	Eau d'alimentation d'osmose inverse.....	44
III.1.1.2	Eau de perméat d'osmose inverse	45
III.1.1.3	Eau de rejet d'osmose inverse	46
III.1.2	Interprétation des résultats d'analyses physico-chimiques -----	46
III.1.2.1	Eau d'alimentation d'osmose inverse.....	46
III.1.2.2	Eau de perméat d'osmose inverse	47
III.1.2.3	Eau de rejet d'osmose inverse	47
III.2	Choix de la membrane.....	48
III.2.1	Caractéristiques de la membrane -----	48
III.2.2	Fonctionnement dans l'industrie laitière de Sidi Saâda -----	49
III.2.3	Nombres des membranes utilisées -----	50
III.3	Procédé final.....	53
III.3.1	Nouveau taux de récupération global-----	53
III.3.2	Salinité du perméat du nouveau pilote d'osmose inverse-----	54
III.3.3	Schéma final du procédé-----	54
	Conclusion générale	56
	Références bibliographiques	57

Introduction générale

« L'eau n'est pas nécessaire à la vie, l'eau est la vie » Antoine de Saint-Exupéry. La croissance démographique rapide et l'expansion des activités industrielles ont engendré une demande croissante en eau potable, mettant ainsi une pression considérable sur les ressources en eau douce disponibles. Malheureusement, ces ressources sont limitées et dans de nombreux endroits, elles ne peuvent pas répondre aux besoins croissants en eau. Cette situation présente un défi majeur pour assurer un approvisionnement suffisant en eau de qualité pour les populations et les secteurs industriels.

Face à cette réalité, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres est devenu une solution essentielle pour compenser le manque d'eau douce. Le procédé de dessalement, notamment par filtration membranaire, permet de convertir l'eau salée en eau douce utilisable. Cela offre une opportunité de fournir de l'eau potable sûre et fiable, même dans les régions où les ressources en eau douce sont limitées.

L'industrie laitière de Sidi Saâda, située à Relizane, représente un exemple concret de l'utilisation de la filtration membranaire pour répondre aux besoins en eau traitée dans l'industrie alimentaire. Cette usine traite des eaux saumâtres pour la préparation de produits laitiers tels que le camembert et le lait. Grâce à des procédés de filtration membranaire, l'usine est en mesure de fournir une eau traitée de qualité pour répondre aux normes sanitaires et de garantir la production de produits laitiers sûrs et de haute qualité.

Cependant, il est important de souligner que le rejet des eaux saumâtres issues du procédé de dessalement peut encore contenir des contaminants et des sels dissous. Il est donc essentiel de développer des stratégies de traitement et de recyclage de ces eaux rejetées par osmose inverse afin de préserver les ressources hydriques. Le recyclage de ces eaux rejetées par osmose inverse offre une opportunité de maximiser l'utilisation de l'eau, de réduire le gaspillage et de promouvoir une gestion durable des ressources en eau.

Donc, ce mémoire est structuré en trois chapitres clés qui couvrent différents aspects liés à la filtration membranaire et au recyclage de l'eau dans le contexte de l'industrie laitière de Sidi Saâda.

Le premier chapitre constitue une étude approfondie basée sur des références bibliographiques solides, visant à explorer les principes fondamentaux de la filtration membranaire. Nous examinerons les différents types de membranes utilisées, les mécanismes de séparation, la nature chimique, et les types de modules disponibles. Cette étude

bibliographique permet de poser les bases théoriques nécessaires pour comprendre le fonctionnement de la filtration membranaire.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de l'industrie laitière de Sidi Saâda en tant qu'étude de cas. Dans la première partie de ce chapitre nous présenterons cette industrie ainsi que les procédés de fabrication de quelques produits finis. La deuxième partie abordera la mise en évidence du procédé de traitement des eaux dans l'industrie.

Le troisième chapitre constitue la proposition de recyclage de l'eau de rejet d'osmose inverse pour l'industrie laitière de Sidi Saâda. Ce modèle permettra de récupérer une partie des eaux rejetées par osmose inverse et de les traiter dans de nouveaux modules d'osmose inverse mis en place pour utilisation dans les procédés de production de la laiterie. Cette solution présenterait des avantages significatifs en termes de coûts pour l'entreprise.

Chapitre I
Généralités sur les procédés à membranes

I.1 Présentation des procédés à membranes

Les membranes sont des barrières sélectives et poreuses qui permettent la séparation de différentes substances en fonction de leur taille, de leur charge et de leurs propriétés chimiques et physiques. En se concentrant sur les procédés de filtration en milieu liquide, on peut diviser ces procédés en différents niveaux de filtration tels que la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse, où les membranes utilisées ont des diamètres de pores de plus en plus petits. Ces niveaux de filtration sont conçus pour obtenir des résultats de purification de plus en plus fins, en séparant les molécules en fonction de leur taille et de leurs propriétés physico-chimiques.

Il est possible de classifier les membranes disponibles sur le marché en fonction de plusieurs critères, notamment leur domaine d'utilisation, leur structure, leur mode de fabrication et leur nature chimique.

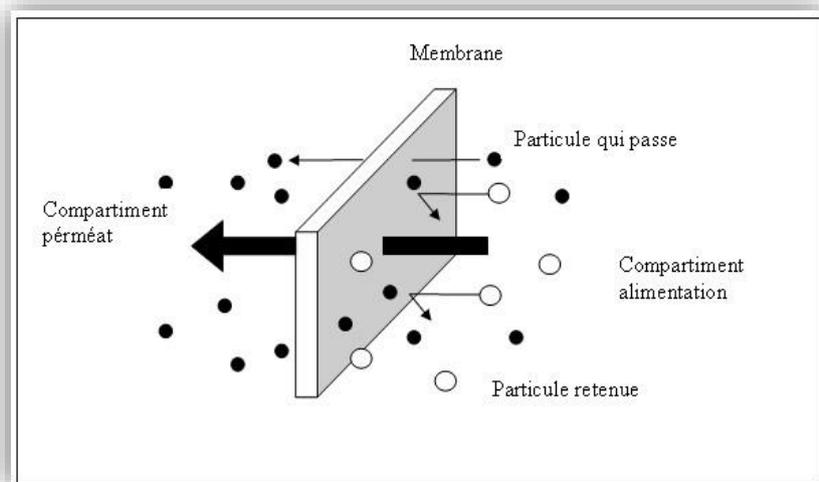


Figure 1 : Représentation schématique d'une membrane perméable [1].

I.2 Domaine d'utilisation

En fonction de leur sélectivité, on peut catégoriser les membranes de la manière suivante :

I.2.1 Microfiltration

Est une méthode de filtration membranaire qui utilise des membranes macroporeuses dont les pores ont une taille comprise entre 0,1 et 10 μm pour une séparation solide-liquide [2].

Les membranes utilisées dans la microfiltration sont sélectives en fonction de la taille des espèces en solution. Les particules en suspension, les bactéries et les colloïdes sont les principales espèces retenues par la microfiltration.

Cette technique de séparation fonctionne avec des pressions transmembranaires relativement faibles, la pression varie entre 0.1 à 2 bar. Elle est largement utilisée dans divers domaines industriels tels que la clarification des eaux en éliminant les colloïdes et les matières fines en suspension, l'élimination des bactéries et les oxydes métalliques notamment les oxydes ferriques [2].

I.2.2 Ultrafiltration

Le procédé implique l'utilisation de membranes qui ont des pores d'une taille allant de 2 à 100 nm. L'intervalle de pression dans ce dernier est de 1 à 5 bar. Ce type de procédé, permet aux petites molécules ainsi qu'à certains sels monovalents de passer à travers les membranes, tandis que les molécules de masse molaire élevée (macromolécule), tels que les polymères et les protéines, sont retenus par ces membranes. En d'autres termes, cette technique de séparation permet de séparer les différentes espèces présentes dans la solution en fonction de leur taille et de leur masse moléculaire grâce à l'utilisation de membranes spécifiques ayant une capacité de rétention sélective [3].

I.2.3 Nanofiltration

Est une technique de séparation membranaire qui permet la rétention de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre, sa taille de pores elle est entre 10 à 20 Å. Elle est particulièrement utile pour retenir des sels ionisés multivalents tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , PO_4^{3-} et SO_4^{2-} , des composés organiques ayant une masse molaire faible comme le glucose et le fructose [4]. En utilisant des membranes sélectives, cette technique permet de séparer les espèces en solution en fonction de leur taille et de leur charge [5].

I.2.4 Osmose inverse

Le procédé d'osmose inverse se distingue des autres procédés membranaires en ce qu'il utilise une membrane dense (absence de pores) plutôt que des pores pour effectuer la filtration. Sa méthode consiste à faire traverser le solvant à travers une membrane sous une pression très élevée (5 à 83 bar).

Les membranes utilisées présentent également une capacité élevée à éliminer les ions monovalents tels que Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- et HCO_3^- , tout en étant capables de séparer certaines molécules organiques de très faible masse molaire. L'osmose inverse trouve de nombreuses applications, citons par exemple :

- Le dessalement de l'eau de mer.
- Le dessalement des eaux saumâtres.

Lorsqu'on exerce une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose diminue. En appliquant une pression suffisamment élevée, le flux d'eau peut être annulé complètement, ce qui correspond à la pression osmotique. Si la pression dépasse la valeur de la pression osmotique, un flux d'eau se produit dans le sens inverse du flux osmotique, ce qui est connu comme le phénomène d'osmose inverse [6].

La figure suivante propose un schéma synthétisant les caractéristiques des divers procédés membranaires, ainsi qu'une classification de ces procédés en fonction de la taille décroissante des pores et des plus petits solutés capturés par les membranes de chaque procédé :

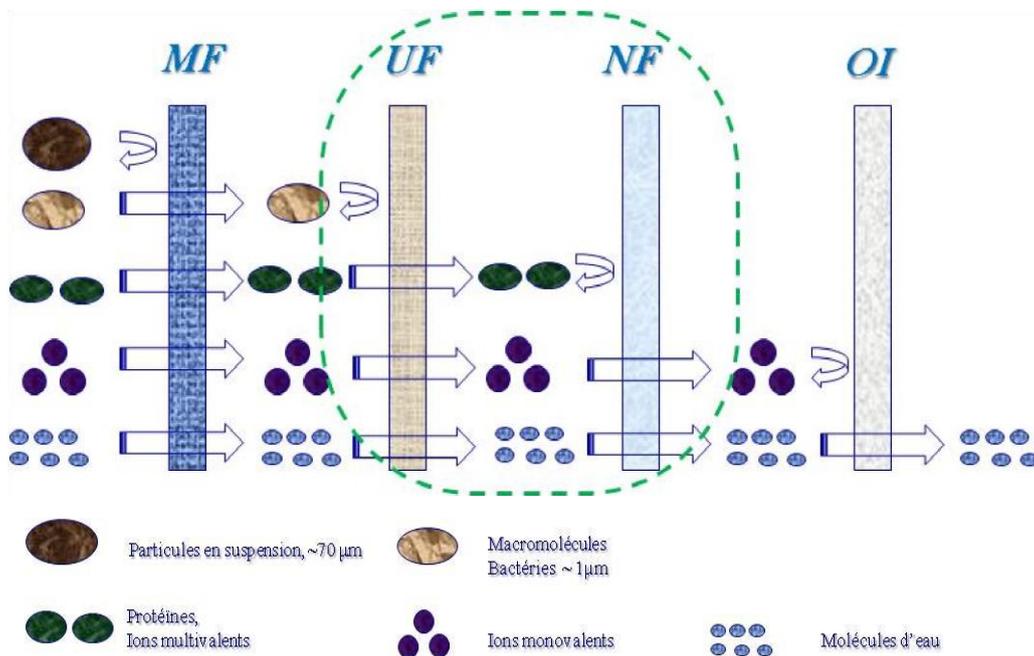


Figure 2 : Schéma récapitulatif des procédés baromembranaires en fonction de la taille des espèces retenus.

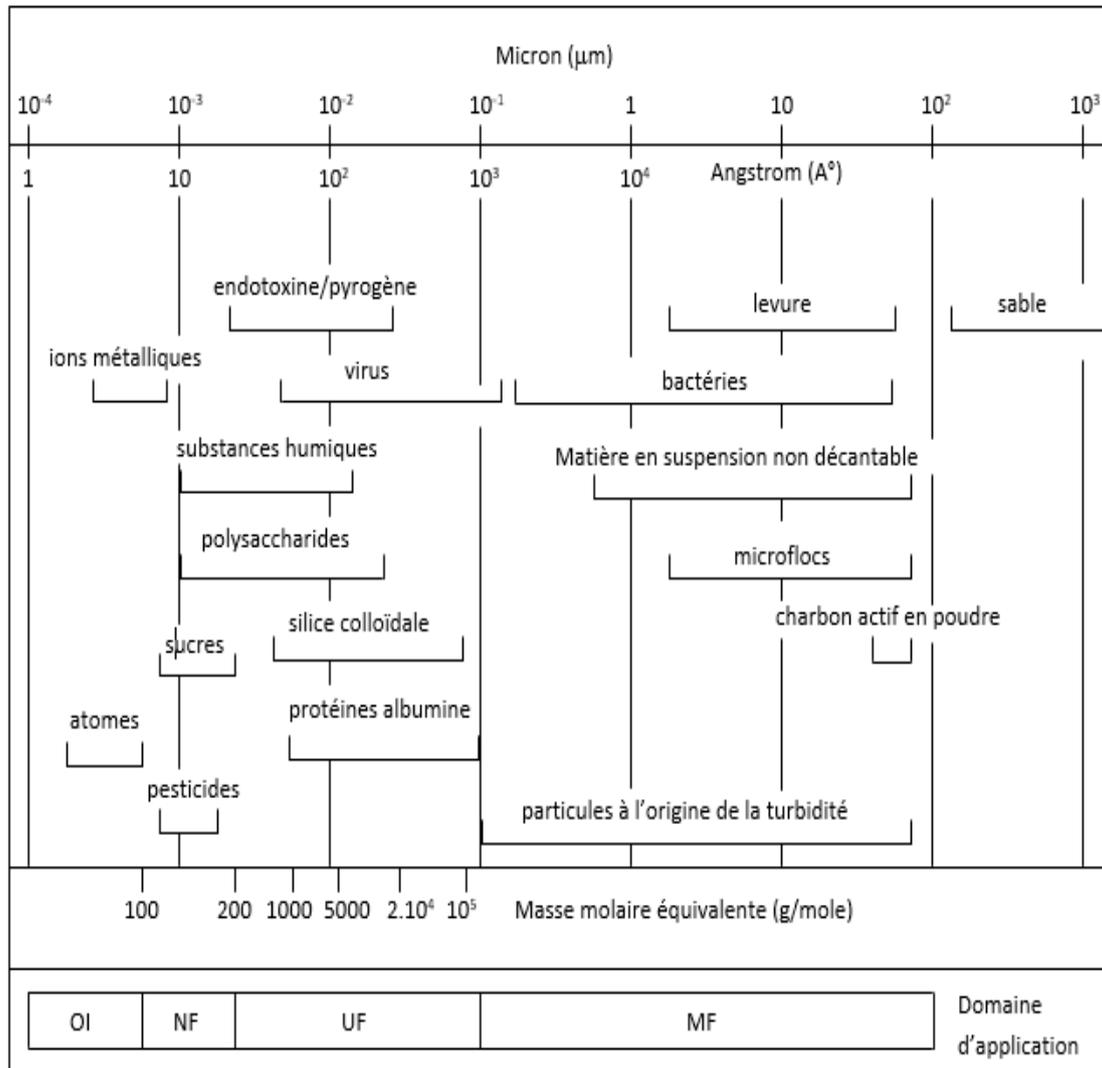


Figure 3 : Domaines d'application des différentes techniques à membranes selon le diamètre des pores et le seuil de coupure [7].

I.2.4.1 Principe de l'osmose inverse

I.2.4.1.1 Phénomène de l'osmose

L'osmose est le procédé par lequel un solvant, généralement de l'eau, se déplace à travers une membrane semi-perméable du milieu le moins concentré en sels dissous vers celui qui est le plus concentré, jusqu'à ce qu'un équilibre osmotique soit atteint entre les deux solutions.

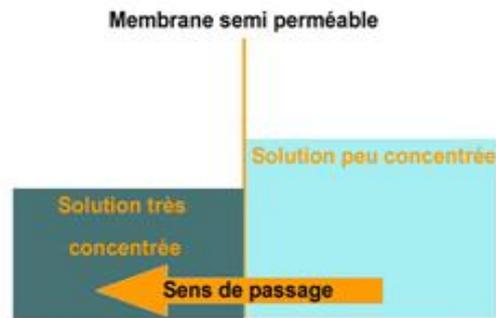


Figure 4 : Schéma de principe d'osmose.

I.2.4.1.2 Phénomène de l'osmose inverse

En appliquant une pression hydrostatique supérieure à la pression osmotique de la solution hautement concentrée en sels dissous, on provoque mécaniquement la diffusion du solvant (généralement de l'eau) à travers une membrane semi-perméable, tandis que les sels sont retenus dans le compartiment contenant la solution la plus concentrée. Ce procédé se déroule en sens inverse du phénomène naturel, d'où son nom d'osmose inverse.

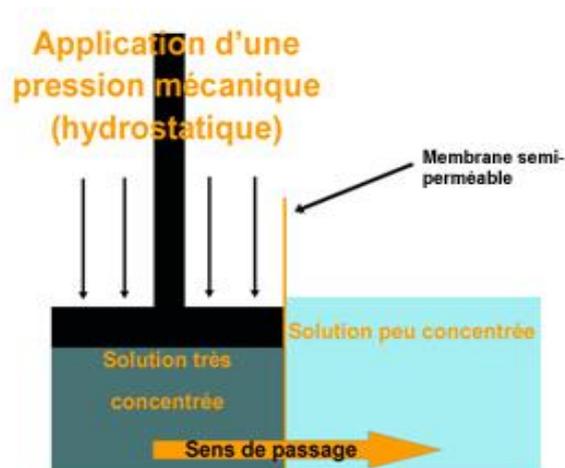


Figure 5 : Schéma de principe d'osmose inverse.

I.2.4.2 Pression osmotique

La pression osmotique est définie comme la pression minimale nécessaire pour empêcher le passage d'un solvant d'une solution moins concentrée vers une solution plus concentrée à travers une membrane semi-perméable. Pour les solutions suffisamment diluées, on peut calculer la pression osmotique, notée π , en utilisant la loi de Van't Hoff :

$$\pi = C.R.T$$

C : Concentration de la solution en sels, en mol/m³

R : Constante des gaz parfaits R = 8,314 J.mol⁻¹.K⁻¹

T : Température absolue de la solution en Kelvin.

π : Pression osmotique exprimée en Pascals.

I.3 Mode de fonctionnement

Les installations de filtration membranaire peuvent opérer selon deux modalités distinctes, dépendamment de l'orientation de l'écoulement du fluide par rapport à la membrane :

I.3.1 Filtration frontale

Elle est la plus simple à mettre en œuvre et la plus économique en énergie et en coût. Son principe est de filtrer la solution perpendiculairement à la surface de membrane sur laquelle s'accumulent rapidement. Cette technique elle est la moins adaptée à certains procédés industriels qui utilisent des solutions contenant des solutés colmatant, elle est généralement utilisée dans les laboratoires.

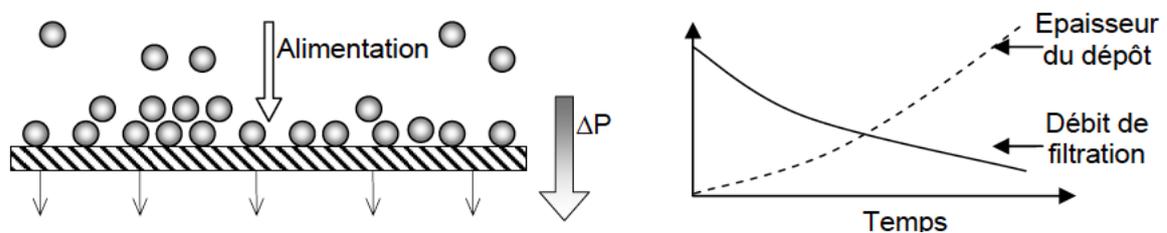


Figure 6 : Présentation du fonctionnement de la filtration frontale [8].

I.3.2 Filtration tangentielle

En filtration tangentielle, le fluide circule parallèlement à la surface de la membrane. Ce mode de fonctionnement permet de réduire l'accumulation de la matière à la surface de la membrane mais entraîne une consommation énergétique plus importante qu'en filtration frontale, car il nécessite une pompe pour assurer la circulation à haute vitesse du fluide à la surface de la membrane, ce dernier on peut le noter avec le prix d'investissement comme un point faible pour la filtration au mode tangentielle.

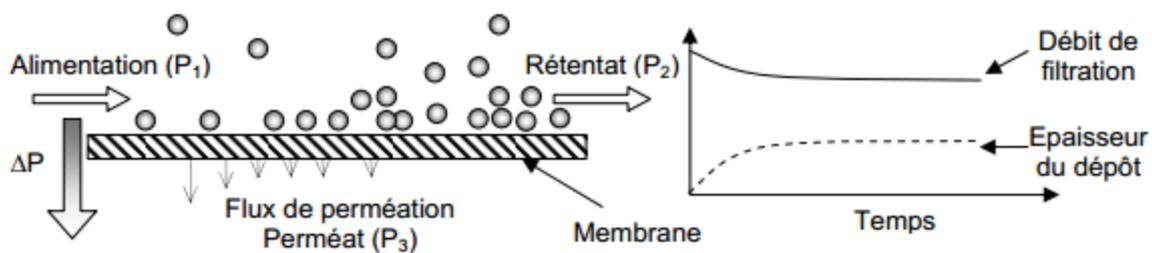


Figure 7: Principe de fonctionnement de la filtration tangentielle [8].

I.4 Classification des membranes

Les membranes peuvent être classées d'après plusieurs critères :

I.4.1 Mécanisme de séparation

La classification la plus couramment utilisée pour décrire le mécanisme de séparation des membranes est la suivante :

I.4.1.1 Membranes poreuses

Les membranes poreuses sont caractérisées par l'importance des effets de tamisage et de friction dans leur mécanisme de séparation. Ce type de membrane est similaire en structure à un filtre conventionnel, mais se distingue par la taille de ses pores, qui varie de 10 Å à 10 μm [9].

Les particules dont la taille est supérieure à celle des pores sont toutes retenues, celles dont la taille se situe entre les plus grands et les plus petits pores sont partiellement retenus, tandis que les particules de taille inférieure passent entièrement à travers la membrane. La séparation des solutés par les membranes poreuses est donc principalement une fonction de la taille moléculaire et de la distribution des tailles de pores. En général, seules les molécules de

tailles très différentes peuvent être séparées par des membranes poreuses, par exemple dans les procédés de microfiltration ou d'ultrafiltration.

I.4.1.2 Membranes denses

La membrane dense est composée d'un film compact, à travers lequel le perméat est acheminé par solubilisation-diffusion, en réponse à une force de pression. Généralement le procédé le plus connu qui a une membrane dense c'est l'osmose inverse.

Dans une membrane dense, les pores sont réduits aux espaces entre les chaînes de polymères, et leur taille est comparable à celle des molécules organiques simples ou des ions hydratés [9].

I.4.2 Morphologie

Du point de vue structure, on peut distinguer les membranes symétriques, les membranes asymétriques et les membranes composites.

I.4.2.1 Membranes symétriques

Les membranes symétriques sont fabriquées à partir d'un seul matériau avec une composition sensiblement uniforme dans toute leur épaisseur. Elles peuvent être soit poreuses (à micro-, méso- ou macro- pores) soit denses (sans pores) et constituent toutes la couche active sur toute leur épaisseur. Les membranes de microfiltration, telles que celles produites par irradiation de particules chargées ou par étirement, sont des exemples de ces membranes [10]. Les figures (a) et (b) illustrent respectivement des coupes d'une membrane poreuse symétrique et d'une membrane dense.

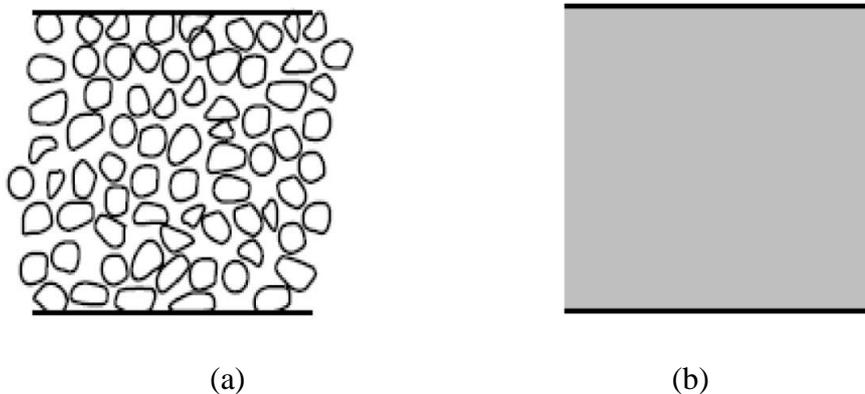


Figure 8: (a) Membrane symétrique poreuse (b) Membrane symétrique dense.

I.4.2.2 Membranes asymétriques

Également appelées anisotropes, ont été découvertes en 1960 par Loeb et Sourirajan qui sont composées de deux couches superposées de la même nature chimique : une sous-couche poreuse ou support de 100 à 200 micromètres d'épaisseur et une fine couche de peau ou la couche active de 0,1 à 1,5 micromètre d'épaisseur [11].

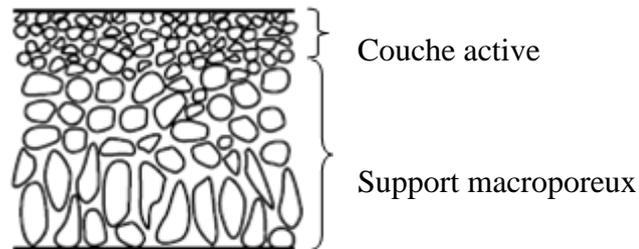


Figure 9 : Membrane asymétrique.

I.4.2.3 Membranes composites

En règle générale, les membranes composites sont constituées de plusieurs couches, dont une couche active qui détermine la sélectivité de la membrane envers le fluide à traiter, et une couche support macroporeuse qui assure une résistance mécanique adéquate. Des couches intermédiaires sont également incorporées entre ces deux couches principales, afin de faciliter le dépôt de la couche active et de maintenir sa stabilité face aux forces motrices telles que les gradients de pression, de concentration ou de température.

De plus, elles peuvent avoir une sélectivité accrue grâce à la nature spécifique de leur matériau semi-perméable [12].

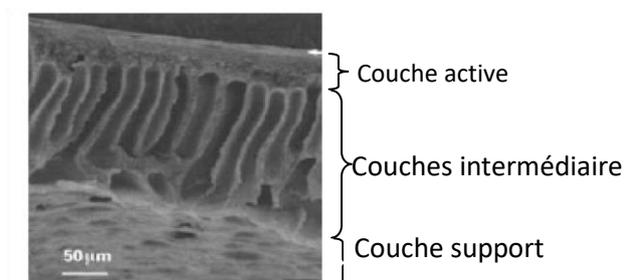


Figure 10: Image de microscopie électronique à balayage (MEB) d'une membrane composite.

I.4.3 Nature chimique

Sont généralement divisé en deux natures, organiques et minérales.

I.4.3.1 Membranes organiques

Les membranes organiques sont constituées de polymères naturels ou synthétiques, tels que l'acétate de cellulose, le polyamide et le polysulfone. Ces derniers représentent plus de 80% du marché des membranes dans le monde, car ils résistent mieux à l'oxydation, au pH ou à la température.

I.4.3.1.1 Membranes acétate de cellulose

Acétates de cellulose sont les premiers polymères à avoir été utilisés pour réaliser des membranes pour des applications en osmose inverse et en ultrafiltration. Elles présentent une bonne résistance au colmatage en raison de leur caractère hydrophile. Cependant, elles sont chimiquement et thermiquement sensibles (pH de fonctionnement compris entre 4 et 6, pour des températures n'excédant pas 30°C). Le matériau principal utilisé est la cellulose, qui est modifiée par la substitution de plusieurs groupes hydroxyle par des groupes acétate. Cette opération permet d'obtenir du diacétate ou du triacétate de cellulose.

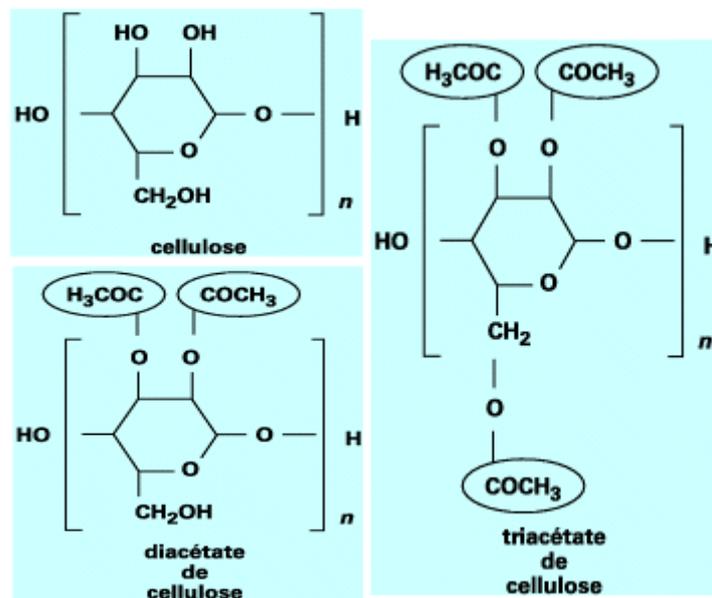


Figure 11: L'écriture topologique de cellulose, diacétate de cellulose et triacétate de cellulose.

Ce polymère est le plus ancien, mais il continue d'être utilisé en raison de ses nombreux avantages, bien qu'il présente également certains inconvénients.

Les avantages

- Les membranes en acétate de cellulose offrent à la fois une grande perméabilité et une sélectivité élevée.
- La mise en œuvre est relativement facile et le matériau de base (cellulose) est courant sur le marché.
- De plus, l'adsorption des protéines est faible, ce qui réduit la formation de colmatage.

Les inconvénients

Cependant, il convient de noter que:

- l'acétate de cellulose est sensible à la température et la plupart des fabricants recommandent de ne pas dépasser 30°C.
- De même, il est sensible au pH et nécessite un environnement compris entre 4 et 6 pour une durée de vie acceptable.
- Sensibilité au Chlore.
- Sensibilité au compactage.

I.4.3.1.2 Membranes polyamide

Afin de pallier aux désavantages de l'utilisation de l'acétate de cellulose, des membranes constituées de polymères de type polyamide/polyimide ont été conçues. La chaîne de ces polymères est caractérisée par la présence d'une liaison amide (CONH-), comme cela est illustré dans la figure . Plusieurs variantes de ces polymères sont disponibles.

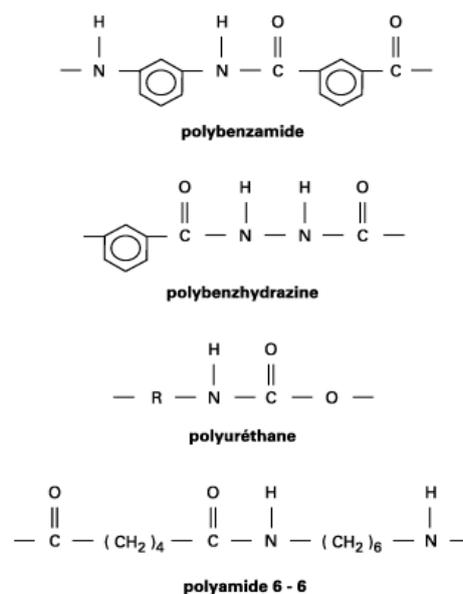


Figure 12 : Structure chimique des membranes de type polyamide [13].

Les avantages

- Bonne stabilité chimique, thermique et mécanique.
- Forte élimination du sel [14].

Les inconvénients

- Faibles perméabilités.
- Les membranes en polyamide sont sensibles au Chlore (figure13).

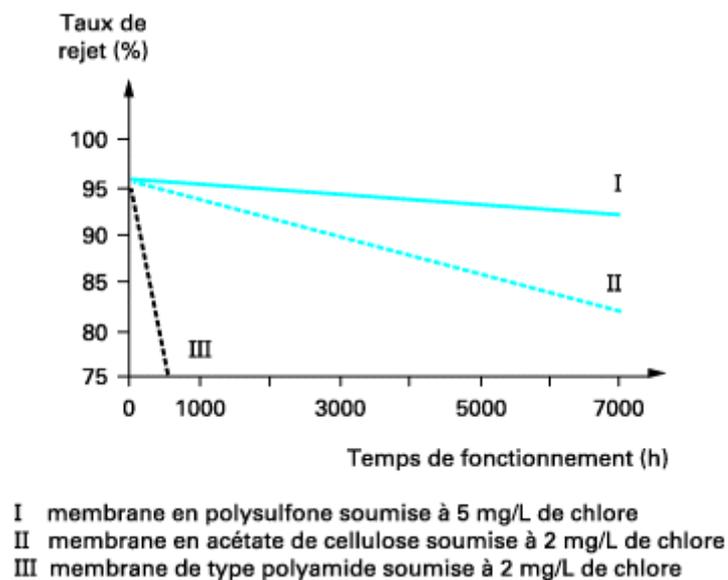


Figure 13 : Résistance au Chlore de différentes membranes, mesurée par la chute dans le temps du taux de rejet en fonction de la concentration en Chlore de la solution d'alimentation [15].

I.4.3.1.3 Membrane polysulfone

Les premières membranes à base de polysulfone sont apparues au milieu des années 1970. Elles sont caractérisées par un groupement $-SO_2-$ relativement stable relié à deux noyaux benzéniques.

Les avantages

- Bonne résistance au Chlore.
- Bonne tenue en pH.
- Bonne stabilité thermique.

Les inconvénients

- Problème d'adsorption en particulier de protéines.
- Sensibilité au compactage.

I.4.3.2 Membranes minérales

Ces membranes sont composées de matériaux minéraux. Les membranes céramiques sont les plus couramment utilisées. En outre, on peut également trouver des membranes en carbone poreux, en métaux et en verre.

I.4.3.2.1 Membranes céramiques

Les matériaux céramiques deviennent de plus en plus courants dans la réalisation de membranes minérales. Les matériaux les plus souvent rencontrés sont les oxydes métalliques (Oxyde d'aluminium (Al_2O_3), de titane (TiO_2), de zirconium (ZrO_2)) ainsi que les Aluminosilicates.

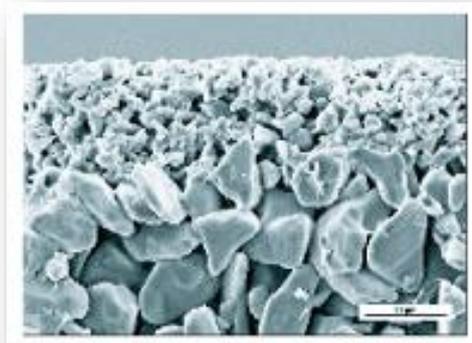


Figure 14 : Membrane asymétrique en céramique [15].

En général, l'utilisation de ceux-ci comporte à la fois des avantages et des inconvénients qu'il est important de mettre en évidence :

Les avantages

Les membranes céramiques ont des avantages remarquables, notamment une résistance thermique élevée pouvant aller jusqu'à 300°C , une excellente résistance chimique, ainsi qu'un pH stable dans une plage allant de 1 à 14 (à l'exception des membranes TiO_2 et zéolithes qui sont plus sensibles) [5].

Les inconvénients

Les membranes céramiques se trouvent avec des coûts très élevés. Ils ne se trouvent que sous forme de membranes tubulaires ou plane sur le marché. Dans le cas de membranes tubulaires, il s'agit généralement de membrane à canaux multiples, et leur coût est significatif. De plus, elle ne résiste pas bien aux fortes pressions transmembranaires.

1.4.3.2.2 Membranes à carbone

Ce sont des membranes composées uniquement de carbone ou ayant comme support le carbone. On divise généralement les membranes à base de carbone en deux catégories : les membranes supportées et les membranes non supportées. Les membranes à base de carbone sont utilisées dans la production d'azote, de grande pureté et à faible coût, à partir de l'air.



Figure 15 : Membrane à support de carbone [15].

Tableau 1 : Exemple de matériaux constitutif de membranes et résistance à la température et au pH [14].

Type	Matériaux	Température maximale admissible (°C)	Gamme de pH admissible
Organique	Acétate de cellulose	40	4 à 6
	Polysulfone	90	2 à 12
	Polyimide	45	4 à 11
	Polyamide	60	2 à 12
Minérale	Céramique	300	1 à 14
	Carbone	180	0 à 14
	Alumine	400	2 à 12

I.4.4 Géométrie de préparation

Les membranes de filtration sont proposées sous deux formes distinctes : soit seules, soit agencées en modules. Les membranes simples, incluant les formes planes, tubulaires et à fibres creuses, sont plutôt inhabituelles dans les installations industrielles et demeurent principalement réservées aux analyses en laboratoire. Dans la plupart des cas, les membranes sont assemblées en modules, se présentant sous diverses configurations telles que les modèles plans, spiralés, à fibres creuses ou tubulaires. Cette dernière forme, spécifiquement, offre des avantages tels que la réduction de l'encombrement et l'augmentation de la surface membranaire [6].

I.4.4.1 Module membranaire

Comme nous avons vu, les membranes doivent être montées dans des dispositifs de support nommés modules. À l'heure actuelle, il existe quatre variétés de modules proposées sur le marché ce sont : des modules plans, spiralés, à fibres creuses ou tubulaires.

I.4.4.1.1 Module tubulaire

Le module tubulaire est composé de plusieurs tubes métalliques ou plastiques disposés en série ou en parallèle. Le diamètre du tube est compris entre 7 et 25 mm et le plus souvent 12,5 mm [11]. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes, tandis que le perméat est collecté à l'extérieur de ces derniers. Les tubes agissent comme des canaux d'écoulement tangentiel, et c'est le seul type de module qui peut être nettoyé mécaniquement à l'aide d'un système de

balles de mousse, qui raclent les parois des tubes. L'écoulement à l'intérieur des tubes est turbulent.

En raison de la taille des canaux tangentiels, cette configuration engendre une dépense d'énergie plus importante que les autres configurations. Ces modules sont généralement construits avec des membranes minérales (céramiques), bien que des membranes polymères puissent également être utilisées.

L'alimentation est faite à un bout du module et le fluide circule à l'intérieur du ou des tubes, le rétentat ressort à l'autre bout. Le perméat traverse la membrane, circule au travers du corps du tube ou du monolithe pour ressortir à l'extérieur du tube [15].

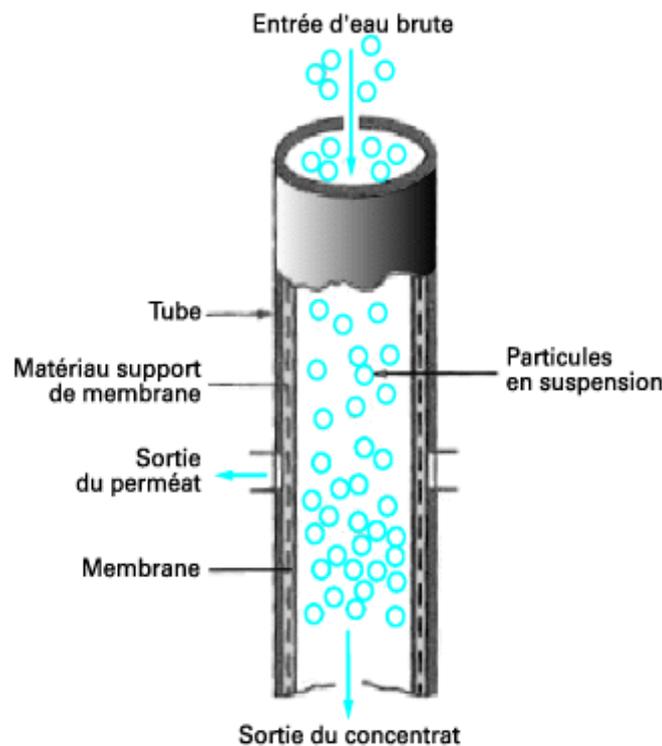


Figure 16: Module tubulaire monocanal [16].

Les avantages

Les modules tubulaires présentent plusieurs avantages :

- Prétraitement simplifié : grâce à leur diamètre relativement important, ils peuvent accepter des fluides chargés en particules. En règle générale, les modules tubulaires

peuvent tolérer des particules dont la dimension est inférieure ou égale à 1/10ème du diamètre du tube. Il est donc possible de traiter une solution contenant des particules de 1250 μm sur des tubes de 12,5 mm de diamètre [11].

- Facilité de nettoyage : il est possible de nettoyer les modules soit par circulation à débits élevés de solutions chimiques et /ou enzymatique appropriées, soit en utilisant des systèmes mécaniques (vibration ou ultrasons).
- Technologie simple : dans certains cas, l'utilisateur peut remplacer une membrane lui-même sans difficulté.

Les inconvénients

- La compacité est très faible, de l'ordre de 10 à 300 m^2/m^3 , ce qui en fait la plus faible de tous les types de modules [11].
- Consommation d'énergie très élevée.
- Fragilité des membranes céramique [15].

1.4.4.1.2 Module Fibre creuse

Les modules à fibres creuses peuvent contenir des dizaines de milliers de fibres creuses cylindriques obtenues par filage [11]. Les fibres de ces modules sont disposées en série dans un carter tubulaire, où elles sont fixées à leurs extrémités. L'alimentation est introduite à l'une des extrémités tandis que la sortie du rétentat se fait de l'autre côté. Le perméat peut être collecté soit à l'intérieur soit à l'extérieur des fibres.

On peut distinguer deux configurations pour les membranes à fibres creuses :

La configuration interne-externe (schéma a) : où la couche active est située à l'intérieur des fibres. Dans ce cas, l'alimentation se fait à l'intérieur des fibres et le perméat est collecté à l'extérieur des fibres, de la même manière que pour les modules tubulaires.

configuration externe-interne (schéma b et c) : où la couche active est située à l'extérieur des fibres. Dans cette configuration, la solution à traiter circule à l'extérieur des fibres et le perméat est recueilli à l'intérieur. Cette configuration diffère de la configuration interne-externe où le flux est inversé.

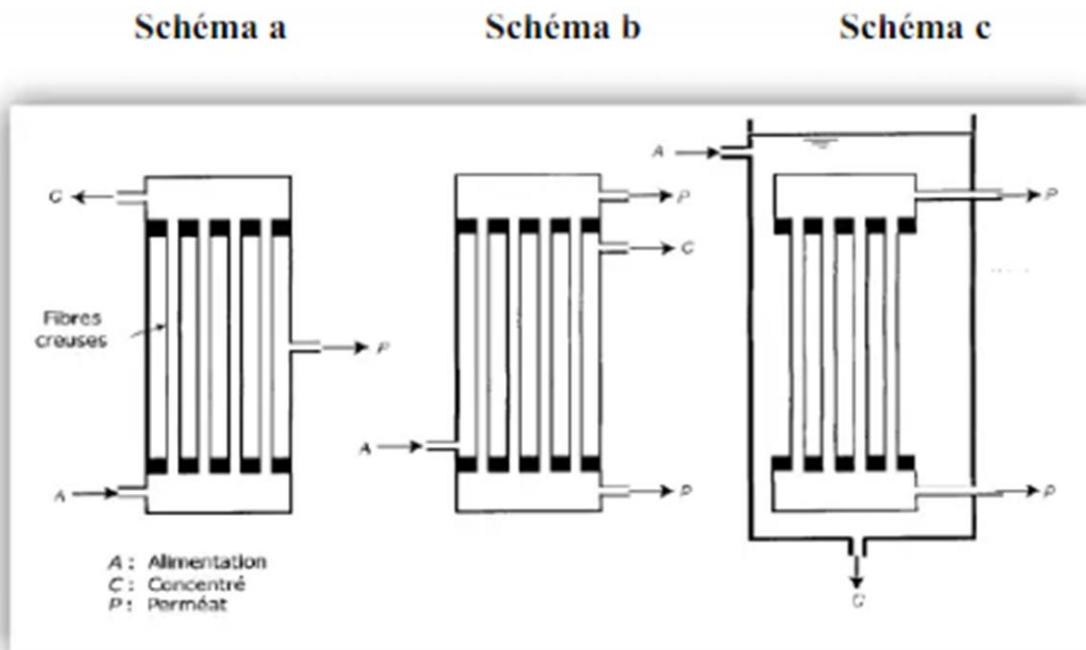


Figure 17: Module à fibre creuse [17].

Les avantages

- Les modules de fibres creuses se distinguent par une forte compacité (jusqu'à 15 000 m^2/m^3), car leur densité de surface d'échange par unité de volume de membrane est la plus élevée parmi tous les systèmes existants.
- Faible consommation énergétique.

Les inconvénients

- Sensibilité au colmatage à cause du faible diamètre des fibres, pour résoudre ce problème on est besoin de faire un prétraitement (augmentation des coûts d'investissements).

I.4.4.1.3 Module plan

Le module plan est le plus ancien et le plus simple des modules de filtration. Il se présente généralement sous la forme de plaques unitaires ou de cartouches. Ce dernier a été abandonné pour les pressions élevées à cause des problèmes en résistance mécanique qu'il pose.

Le module plan a généralement une capacité de filtration assez limitée en comparaison avec sa taille. Cela est dû au fait que sa surface de filtration est relativement petite par rapport à son volume. Par conséquent, pour obtenir une performance de filtration plus élevée, il est

souvent nécessaire d'utiliser plusieurs modules en parallèle ou de combiner plusieurs étages de filtration.

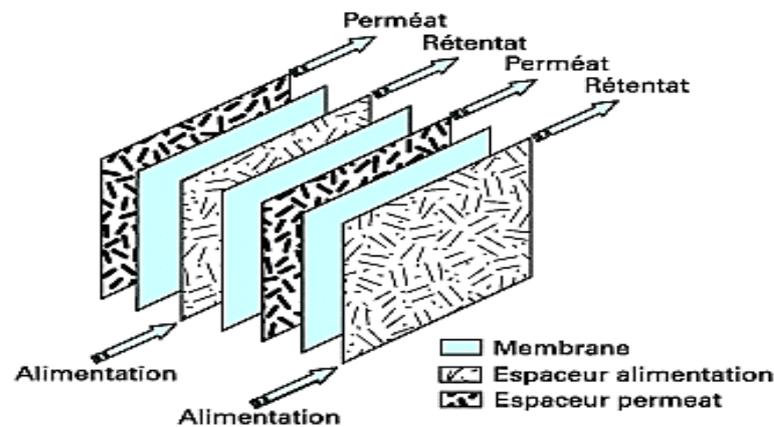


Figure 18: Module plan, schéma de circulation des fluides [15].

1.4.4.1.4 Module spiralé

Ces modules se composent de plusieurs ensembles élémentaires comprenant un espaceur d'alimentation, une membrane et un espaceur de perméat. Ces ensembles sont enroulés autour d'un tube central perforé qui assure la collecte du perméat. Les membranes utilisées doivent être souples pour permettre cet enroulement, c'est pourquoi les modules spiralés sont constitués de membranes organiques. Cependant, ils peuvent fonctionner à des pressions transmembranaires élevées. En raison de leur efficacité et de leur popularité, les modules spiralés représentent la majeure partie du parc mondial de membranes.

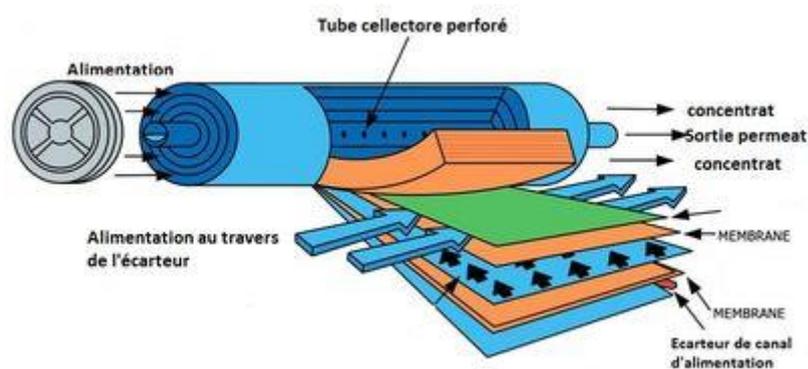


Figure 19 :Schéma de module spiralé d'osmose inverse.

Les avantages

- Les coûts d'investissement faibles.
- Prétraitement simple par rapport aux fibres creuses.

Les inconvénients

- Problème de colmatage à cause de la faible distance entre membrane.
- Difficulté de nettoyage.

Chapitre II

Présentation du complexe laitier de Sidi Saâda

II.1 Situation géographique

L'industrie Laitière de Sidi Saâda se trouve dans la commune de Sidi Saâda dans la wilaya de Relizane.

Elle a été créée en 1993 par l'entreprise française Alpha Laval.

Elle avait pour activité la production et la commercialisation de lait et produits laitiers traités pour une conservation de long durée (lait, camembert, laibni, yaourt...) ainsi que des boissons comme jus et boisson énergétique.

II.2 Historique

Tableau 2: les principales dates de création et de mise en service du complexe laitier de Sidi Saâda.

1987	Lancement de projet Maitre de l'ouvrage : l'office régionale de lait Constructeur : ALFA LAVAL France
1993	Mise en exploitation
1997	Passage sous la tutelle du GIPLAT après dissolution des offices régionaux (Octobre)
2001	Changement de statuts en filiale de groupe Giplait (Avril)
2007	Cession de la totalité des actions de l'EPE laiterie fromagerie Sidi Saâda à la SARL PRODUITS LAITIERS TREFLE

II.3 Identification

- Forme juridique : SPA laiterie Sidi Saâda.
- Capital Social : 1 114 800 000.00 DA.
- Président de conseil d'administration : Mr Tlemsani Mahmoud.

- Directeur générale : Abed Benameur.

II.4 Installation

L'entreprise laiterie Sidi Saadâ s'installe sur une surface de 98000 m² dont 23000 m² en bâtiments composés de :

- Un atelier abritant les ateliers de process et de réception de lait de ferme.
- Un atelier de fabrication de pâtes molles.
- Deux bâtiments abritant les magazines de matières premières et de matières consommables.
- Des locaux techniques abritant les équipements d'énergie et des utilités transformateurs, groupes électrogènes de secours onduleurs chaudières, compresseur et équipement de froid.
- Des locaux Sociaux (restaurants...).
- Un bloc administratif.
- Un laboratoire d'autocontrôle.
- Une station d'épuration des eaux usées.
- Une cité de trente logements.
- Un parc d'équipement de production comprenant notamment :
 - Les différents équipements de fabrication (refroidisseurs, réchauffeurs, pasteurisateurs, stérilisateurs, séparateurs, homogénéisateurs...).
 - Les équipements de production des énergies : électricités, vapeur,...
 - Les équipements de conditionnement en pots pour les yaourts, pâtes fraîches et bouteilles pour les laits de longue conservation.
 - Les équipements de stockage (Tanks).
 - Les équipements de transports et de manutention.

II.5 Personnel

La laiterie comporte un effectif d'environ 237 personnes. Le régime de travail pour les structures de productions est de 5 à 8 heures de matin pour l'équipe de fabrication de lait reconstitué, une autre équipe débute le matin de 8 h à 16 h comme l'équipe de laboratoire et un autre groupe de 8 h jusqu'à 1 h 30 min qui s'occupe de conditionnement et de maintenance et l'équipe de service de traitement de l'eau.

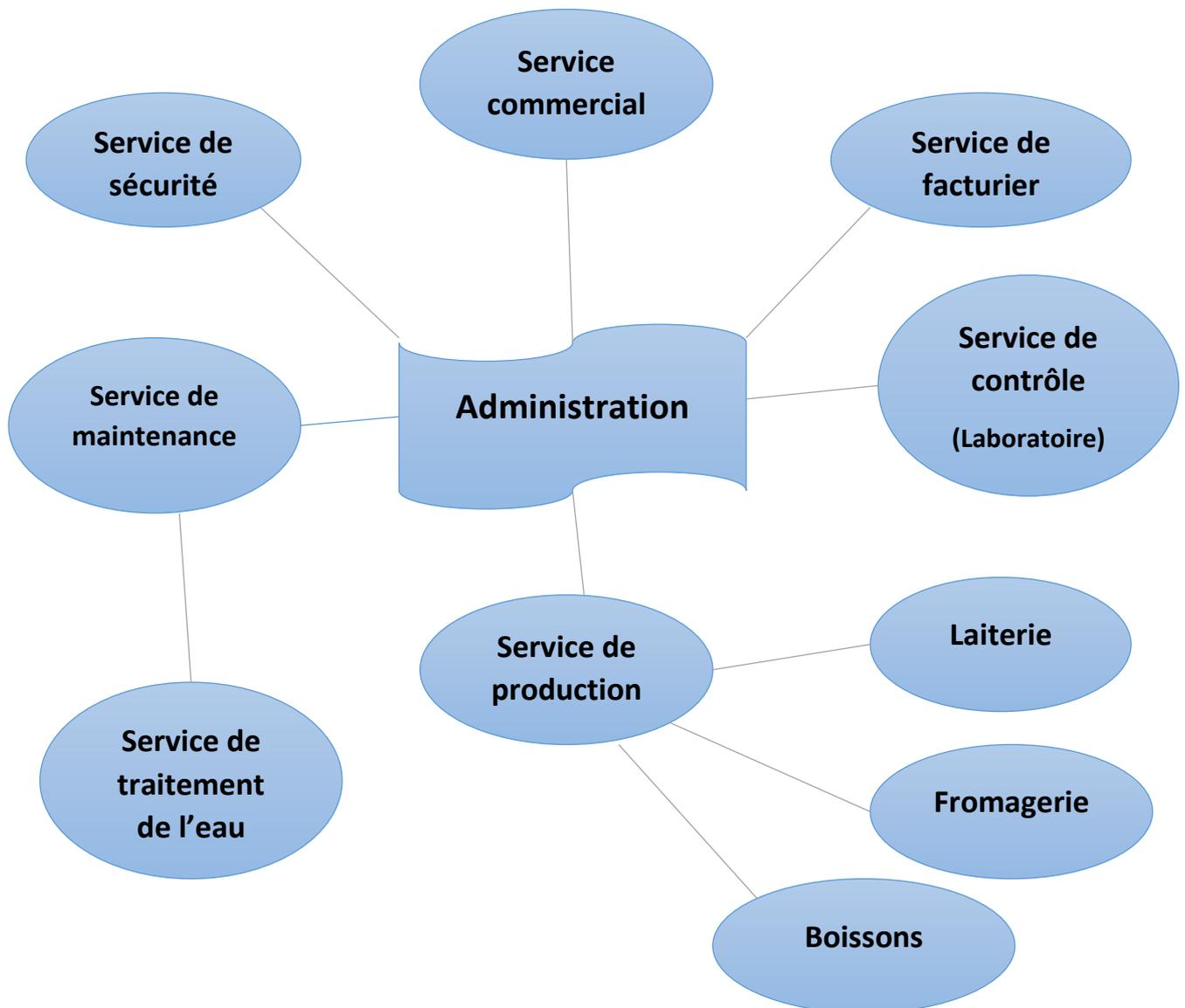


Figure 20: Organigramme du complexe laitier de Sidi Saâda.

II.6 Production

- L'unité reçoit environ 60000 L de lait cru par jour.
- La capacité de production de l'unité se répartit par jour comme suit :

Tableau 3 : Production de l'unité par jour.

Produits	Quantités produites par jour
Camembert	50000 L
Lait en sachet	21989 L
Lait pasteurisé	21300 L
Laibni	9882 plaques

II.7 Traitement des eaux saumâtres

Eau saumâtre est dite eau salée non potable, et sa salinité est inférieure à celle de l'eau de mer. Généralement, la teneur en sel de l'eau saumâtre est comprise entre 1 et 10 g/L. Les principaux sels dissous sont : CaCO_3 , CaSO_4 , MgCO_3 et NaCl .

Auparavant, l'industrie laitière de Sidi Saâda utilisait l'eau d'un forage à Yellel avec une concentration moyenne de 1600 mg/L. Cependant, ce forage est maintenant épuisé et l'usine doit maintenant utiliser l'eau saumâtre d'un nouveau forage avec une salinité d'environ 1900 mg/L.

L'eau est un élément nécessaire dans l'industrie, elle alimente des différents secteurs et unités au complexe laitier, pour cela elle doit subir un traitement en plusieurs étapes.

Tableau 4: Normes OMS et Algériennes des paramètres physico-chimiques pour l'eau Potable (OMS (2006) et JORA (2014)).

Substances	Unité	Normes OMS	Normes Algériennes
Couleur	mg/L platine	Pas de valeur guide	15
Odeur à 25°C	Taux dilution	Acceptable	4
Saveur à 25°C	Taux dilution	Acceptable	4
Turbidité	NTU	5	5
Température	°C	25	25
Calcium	mg/L	/	200
Magnésium	mg/L	/	150
Chlorures	mg/L	250	500
Ions hydrogène	pH	6,5 - 9,5	6,5 - 9
Dureté	mg/L de CaCO ₃	200	500
Conductivité à 20°C	µS/cm	pas de norme	2800
Ammonium	mg/L	Pas de contraintes	0,5
Potassium	mg/L	250	12
Oxygène dissous	O ₂ %	Pas de valeur guide	Pas de valeur guide
Fluorure	mg/L	1,5	1,5
Fer	mg/L	Pas de valeur guide	0,3
Nitrates	mg/L	50	50
Sulfatess	mg/L	500	400
Sodium	mg/L	Pas de valeur guide	200
Phosphore	mg/L	pas de norme	5
Résidu sec	mg/L	/	1500

II.7.1 Prétraitement

L'eau brute provenant du forage doit être prétraitée avant d'être envoyée vers les modules d'osmose inverse pour le traitement final.

A partir du forage, elle est pompée à débit de 30 à 35 L/min, et est stockée dans un tank de 120 m³. A l'entrée de ce dernier, du Chlore lui est injecté, ensuite cette eau subira une filtration sur sable à l'aide de filtre à sable pour éliminer les matières en suspension (MES) afin d'être stockée dans un tank plus grand de 900 m³. D'habitude le Chlore injecté doit être éliminé par deux filtres à charbon actif granulé, par l'action de deux pompes placées en parallèle. Les filtres ont des volumes de 5 m³ et 8 m³ respectivement. Cependant, pendant notre période de stage, un seul filtre de 8 m³ était utilisé.

A la sortie, l'eau prétraitée est envoyée vers les modules d'osmose inverse pour le traitement final. L'eau destinée à la production de lait et ses dérivés est stockée dans un back de 600 m³. Tandis que celle utilisée pour la production des jus et autres boissons est stockée dans un back de 60 m³.

II.7.1.1 Désinfection

L'eau brute est désinfectée par le Chlore à l'aide d'une pompe doseuse, afin de détruire les microorganismes et par conséquent éviter le colmatage des membranes et surtout pour garantir une bonne qualité d'eau qui servira à la fabrication du lait et ses dérivés.

II.7.1.2 Filtration

La filtration est un procédé physique dans lequel on fait percoler un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux qui laisse passer le liquide et retient les particules solides. L'eau de forage est stockée dans des bâches et prétraitée par filtration sur sable en passant par 5 lits de sable de différents diamètres de pores pour éliminer toutes les impuretés, en particulier les matières en suspension.

L'eau subira une deuxième filtration, par deux filtres à charbon actif qui sont placés en parallèle, le but de cette filtration est l'élimination du Chlore résiduel dans cette eau pour ne pas endommager les membranes d'osmose inverse qui sont sensibles au Chlore.

II.7.1.3 L'injection d'anti-scalant

Pour but de la protection des membranes d'osmose inverse, l'anti-scalant est injecté au moyen d'une pompe doseuse est utilisé pour complexer les ions Ca²⁺, afin d'éviter leur

précipitation, sur la membrane, sous forme de Sulfates de Calcium (CaSO_4) et les carbonates de Calcium (CaCO_3).

II.7.1.4 Microfiltration

La microfiltration permet une extraction des oxydes métalliques notamment les oxydes ferriques, les colloïdes, les bactéries, les matières fines en suspension ...). Elle est sous forme de filtre à cartouche ayant un seuil de coupure de $0,1 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$.

L'indice de dissolution de sel ou l'indice de colmatage (Fouling index (SDI)) est calculé par la relation suivante (Équation II.1) :

$$\text{SDI} = \frac{100}{15} \left(1 - \frac{t_i}{t_f} \right) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

t_i : Temps initial nécessaire au remplissage d'un volume de 500 mL d'eau microfiltrée.

t_f : Temps final nécessaire au remplissage d'un volume de 500 mL d'eau microfiltrée après 15 minutes du début de l'opération de mesure de l'indice de colmatage.

Si le $\text{SDI} \leq 3$, l'eau peut être envoyée aux modules d'osmose inverse.

Si le $\text{SDI} > 3$, la ligne d'osmose inverse ne peut pas démarrer car il y a un encrassement ou colmatage des microfiltres à cartouches, ce qui influe négativement sur la qualité des eaux microfiltrées, ce qui empêche, dans ce cas, l'alimentation des modules d'osmose inverse, et alors un lavage ou renouvellement des microfiltres à cartouches sera nécessaire.

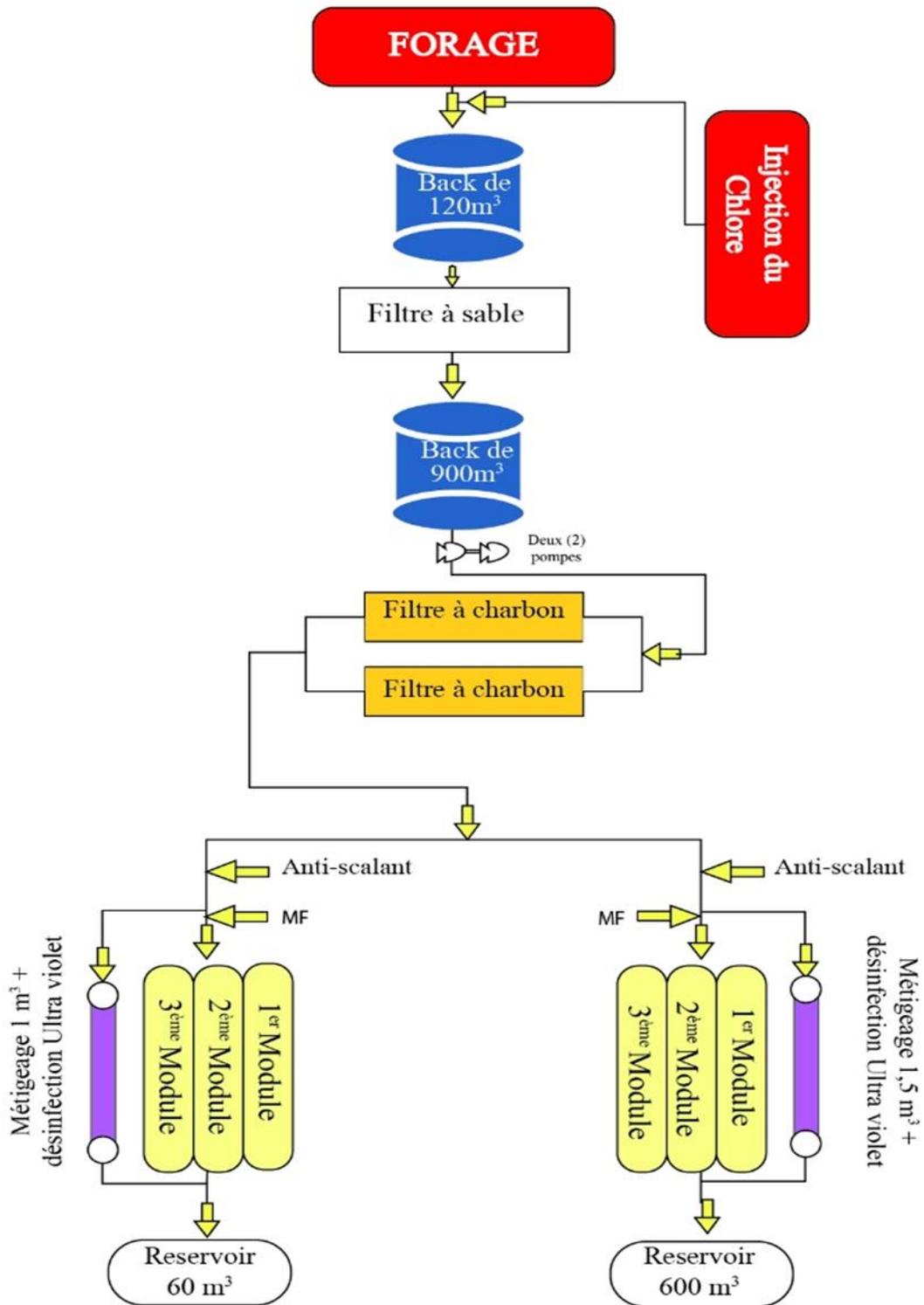


Figure 21 : Processus de prétraitement des eaux saumâtres.

II.7.2 Traitement par osmose inverse

L'osmose inverse est une technique de séparation liquide qui consiste à éliminer un solvant (souvent de l'eau) d'une solution en le faisant passer à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de pression [18]. Les membranes utilisées dans ce procédé ont la capacité de séparer les molécules en fonction de leur taille ou de leur poids moléculaire. En effet, les molécules dont le poids est supérieur ou égal à un seuil de coupure spécifique à la membrane seront retenues, tandis que celles de poids inférieur pourront passer à travers la membrane.

II.7.2.1 Type de modules utilisés par l'unité laitière de Sidi Saâda

L'industrie laitière de Sidi Saâda utilise 3 modules disposés en parallèle caractérisés par :

- Une durée de vie de 3 à 4 ans.
- Type OSMOPAC HH20000 Filmtec (USA).
- Le débit d'alimentation des modules est de 12 m³/h.
- Leur débit de perméat est de 7 m³/h à 20°C.

Ces 3 modules utilisent 15 membranes (chaque module contient 5 membranes) composites spiralées en polyamides aromatiques modèle Filmtec (USA) (Polyamide thin-film composite) type Ø8" BWLE-440 (High Surface Area (11,21m²) Low-Energy Brackish Water RO Element) en mode filtration tangentielle.

Le module spiralé utilisé est un cylindre ayant un poids de 2000 kg.

Dimensions en mm : **L × I × H = 5000 × 1000 × 2200**

Ces 3 modules fonctionnent, actuellement, sous une pression de 10 bar à 20°C, avec un taux de récupération (taux de conversion) de 59 % et un taux de rétention minimum des sels de 97 % à partir d'une eau saumâtre brute de salinité environ 2500 mg/L à 20°C) et un indice de colmatage maximum des micro-filtres de 3 [17].

II.7.2.2 Le principe de fonctionnement des modules

Le fonctionnement du module spiralé est déjà mentionné dans le chapitre I (Figure N°19).

Les 3 modules sont en parallèles, dont celui situé en haut est alimenté par les rétentats des 2 autres modules en bas (Figure N°22).

On note que pour 13 m³ d'eau microfiltrée ou prétraitée avec une dureté totale (Ca²⁺ + Mg²⁺) ou titre hydrotimétrique TH = 85 °F seulement 12 m³ d'eau microfiltrée alimente les modules d'osmose inverse pour obtenir une dureté totale nulle (TH = 0 °F) et 1 m³ d'eau microfiltrée (TH = 85 °F) qui reste subira une désinfection par les rayons Ultra-violet, puis passera directement et s'additionne à l'eau produite par l'osmose inverse (perméat). C'est le mitigeage. On obtient finalement une eau traitée à TH = 10 °F de dureté totale qui servira à la préparation du lait reconstitué à base de poudre.

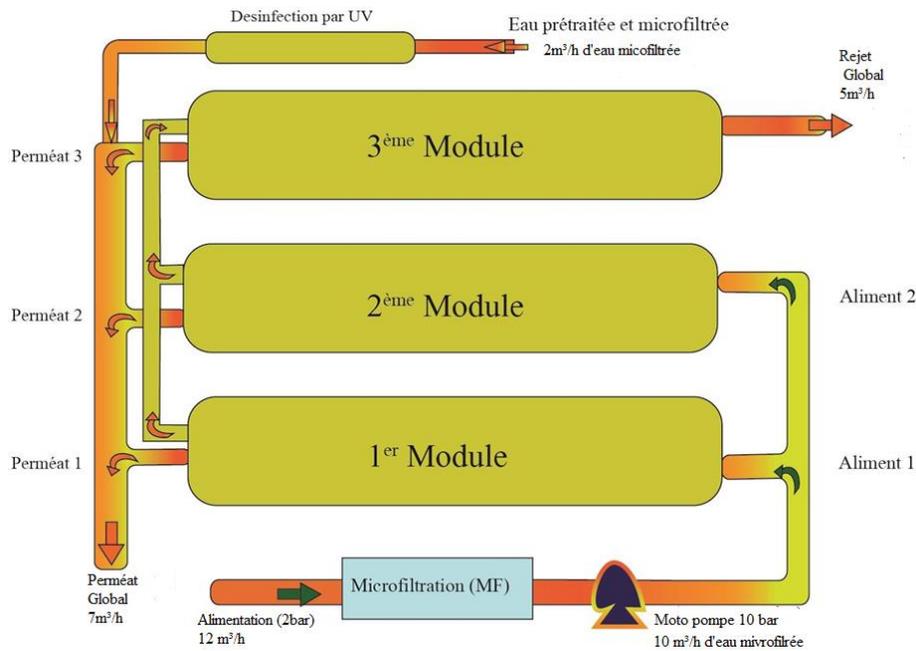


Figure 22: Modules d'osmose inverse pour le traitement final des eaux saumâtres.

II.7.2.3 Les recommandations et les formules pour les calculs de l'exploitation

II.7.2.3.1 Taux de rétention de la conductivité (salinité)

Le taux de rétention (TR) des sels par la membrane d'osmose inverse est le rapport entre la conductivité ou salinité d'eau d'alimentation du module, moins la conductivité ou salinité d'eau produite (perméat), divisé par la conductivité d'eau d'alimentation du module (Equation II.2) :

$$TR(\%) = \frac{\chi_{\text{alimentation}} - \chi_{\text{perméat}}}{\chi_{\text{alimentation}}} \times 100 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

TR : Taux de rétention des sels (%).

$\chi_{\text{alimentation}}$: Conductivité d'eau d'alimentation du module ($\mu\text{S/cm}$).

$\chi_{\text{perméat}}$: Conductivité d'eau produite ou traitée (perméat) ($\mu\text{S/cm}$).

II.7.2.3.2 Flux de perméat

Le flux de perméat est le rapport du débit d'eau traitée par osmose inverse (perméat) et la surface membranaire (Equation II.3) :

$$J_p = \frac{Q_p}{S_m} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

J_p : Flux de perméat ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$).

Q_p : Débit d'eau de perméat (m^3/h).

S_m Surface membranaire (m^2).

II.7.2.3.3 Taux de récupération

Le taux de récupération (taux de conversion) est le rapport entre le débit d'eau traitée (perméat) et le débit d'eau d'alimentation du module. L'augmentation du taux de récupération entraîne une concentration accrue en sel dans les rétentats et augmente le risque de précipitation à l'intérieur de la membrane. Cela entraîne une diminution de l'efficacité du système.

$$\text{TC}(\%) = \frac{Q_p}{Q_A} \times 100 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

TC : taux de conversion ou récupération (%).

Q_A : Débit d'eau d'alimentation (m^3/h).

Q_p : Débit d'eau de perméat (m^3/h).

II.7.2.3.4 Passage de sel

Le passage de sel à travers le module d'osmose inverse ou autrement dit le sel qui n'est pas retenu par la membrane d'osmose inverse dont il est calculé par la relation suivante [19].

$$PS(\%) = 100 - TR(\%) \quad (II.5)$$

Avec :

PS = Passage de sel (%).

II.7.3 Différents passages de l'eau traitée pour la production

L'eau traitée est fraîche pour la préparation du lait reconstitué à base de poudre et elle subit des autres passages selon l'utilisation :

1. Passage à travers des adoucisseurs à base de résines échangeuses cationiques pour éliminer la dureté totale (Ca^{2+} et Mg^{2+}). L'eau adoucie servira à l'alimentation des chaudières.
2. Passage à travers le dégazeur pour éliminer les gaz sous pression à température de 105 °C.
3. Alimentation de la chaudière pour la production de vapeur qui servira à la pasteurisation et la stérilisation du lait à l'aide des échanges thermiques et des foyers (bruleurs) qui constituent des flammes qui créent la vapeur.
4. Production d'eau froide à l'aide des compresseurs, refroidisseurs, des plaques et l'utilisation de l'eau glycolée à température de -7 °C et -3 °C pour la conservation et la marche de production. Cette eau doit subir plusieurs analyses physico-chimiques par jour et des analyses microbiologiques par mois pour la sécurité hygiénique.

II.8 Production du lait et ses dérivés

II.8.1 Procédé de production du lait reconstitué

II.8.1.1 Réception de la matière première

À cette étape, l'unité industrielle reçoit du lait cru de ses fournisseurs dans des citernes isotherme, parfois dans des bidons en inox. Le lait se fait analyser avec des analyses physico-chimiques. On mesure le pH, La densité, la matière grasse, la température, le point de congélation, la quantité de protéines et le lactose. Le lait est accepté sauf s'il était sous les normes suivantes :

- Ne soit pas acide (pH : 6,6-6,8).
- Ne soit pas écrémé (MG > 32 g).

- Ne soit pas mouillé (la densité est supérieure à 1,028).

II.8.1.2 Filtration du lait cru

Le lait passe par des filtres en tissu (cellulose, toiles métalliques) où il subit une opération physique destinée à éliminer les impuretés qui se trouvent accidentellement dans le lait (paille, poils, particules solides).

II.8.1.3 Refroidissement et stockage

La réfrigération intervient pour abaisser la température entre 4 et 6 °C. Le lait refroidi dans la même température est stocké dans un tank isotherme en vue d'une utilisation ultérieure (la fabrication du camembert).

II.8.1.4 Eau de reconstitution

L'eau de reconstitution doit être potable et répondre aux standards fixés par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS).

II.8.1.5 Reconstitution de lait

Elle a lieu dans un triblender où seront mélangées les poudres de lait (6 sachets qui contiennent 25 kg de lait écrémé à 0 % de matière grasse avec 10 sachets de poudre de lait entier à 26 % de matière grasse) avec de l'eau traitée de 4200 L ayant une température de 45 °C pour conférer de meilleures mouillabilité et dissolubilité aux poudres de lait.

II.8.1.6 Mélange

Le lait de vache et le lait reconstitué sont mélangés pour obtenir un produit avec un taux de matière grasse de 15 g/L. Le mélange est agité et recyclé dans le tank de reconstitution pour augmenter la dispersion et la dissolution des poudres de lait et éviter la formation d'agglomérats.

II.8.1.7 Filtration du mélange

Le lait subit une filtration pour éliminer toute impureté physique, telle que les insectes et la poudre insoluble.

II.8.1.8 Homogénéisation

L'homogénéisation est une opération mécanique qui a pour but de disperser les globules gras dans le lait en réduisant leur diamètre et détruisant les micelles de caséines. Cette opération se fait à une température de 60 à 70 °C et sous une pression élevée de 155 bar.

II.8.1.9 Dégazage

Le dégazage permet d'éliminer les substances volatiles telles que les composés cétoniques dans le lait reconstitué qui peuvent donner une odeur et un goût désagréable, ainsi que l'oxygène susceptible d'oxyder la matière grasse.

II.8.1.10 Pasteurisation

La pasteurisation est un procédé de traitement thermique destiné à détruire certains micro-organismes présents dans le produit, et elle est utilisée dans les aliments où seules les bactéries pathogènes doivent être détruites. L'opération consiste à faire passer le lait dans un échangeur à plaques à 85 °C pendant 20 secondes.

II.8.1.11 Refroidissement

Après pasteurisation, le lait reconstitué est refroidi à une température comprise entre 6 et 8 °C pour éviter son acidification.

II.8.1.12 Stockage tampon

Le lait reconstitué est stocké dans deux tanks de 10 000 L après pasteurisation et refroidissement.

II.8.1.13 Conditionnement

Le lait est conditionné dans des sachets en polyéthylène stérilisés par l'eau chaude.

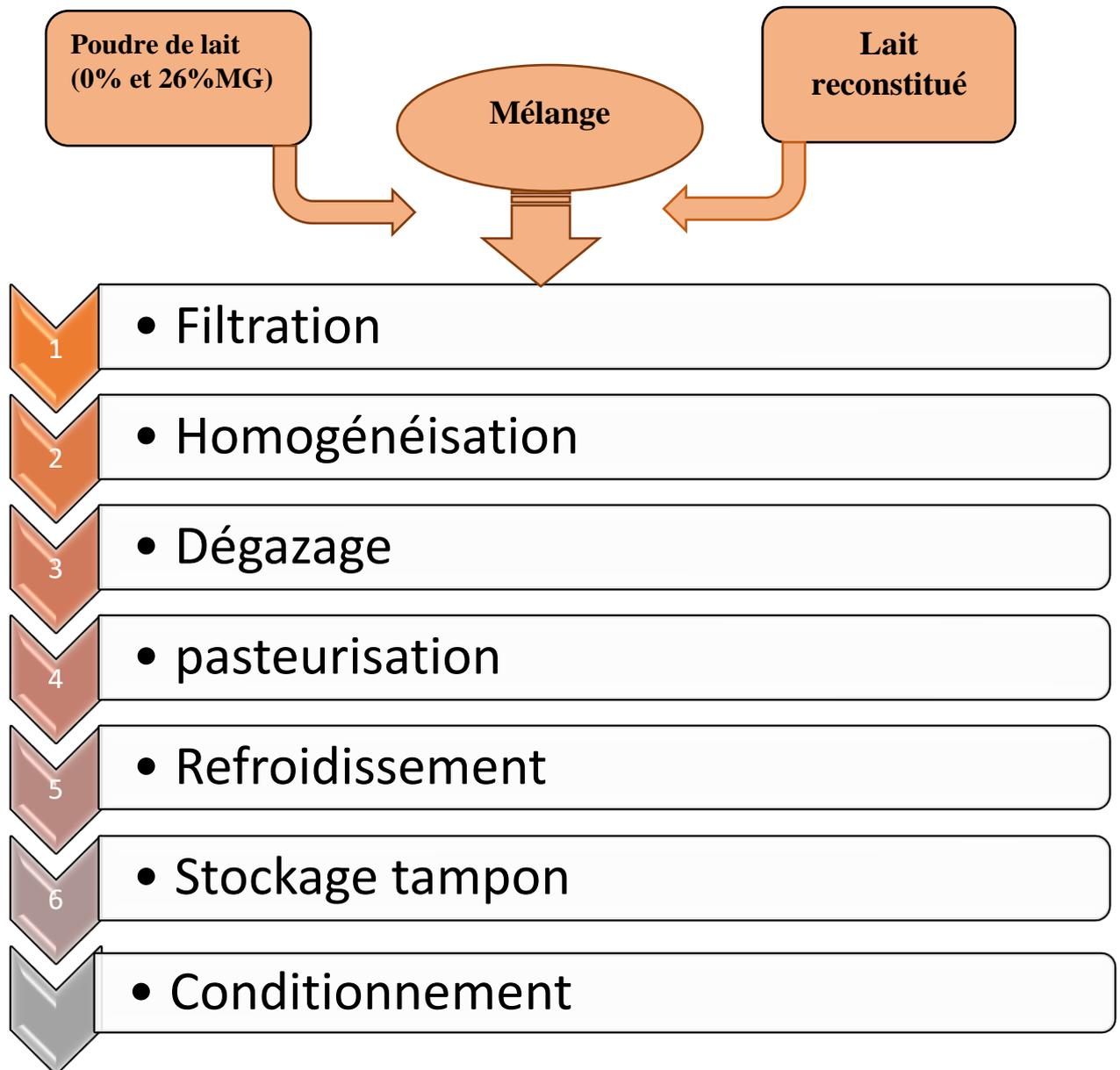


Figure 23: Diagramme de fabrication du lait reconstitué.

II.9 Procédé de fabrication de fromage Laibni

La fabrication de ce fromage implique le mélange des éléments énumérés ci-dessous :

- L'ben
- Beurre
- Sel
- Conservateur
- Un gélifiant

II.9.1 Préparation de L'ben (lait acidifié) et beurre

L'opération commence par la réception d'une quantité de lait cru, qui est soumis à une analyse selon les besoins. Ensuite, le lait est laissé à coaguler naturellement, uniquement grâce à des micro-organismes à température ambiante pendant quelques jours. Ce lait caillé acide appelé << Raib >>, est ensuite battu mécaniquement avec l'ajout d'eau pendant 30 à 45 minutes pour produire de beurre et de l'ben.

II.9.2 Mélange

Consiste à mélanger les éléments précités.

II.9.3 Pasteurisation

Le mélange est pasteurisé à une température de 88 °C pendant 15 sec.

II.9.4 Homogénéisation

Cette opération se fait à une température de 65 °C avec une pression de 180 bar.

II.9.5 Agitation

Se fait dans une cuve avec agitateur.

II.9.6 Conditionnement

Le fromage est transféré à l'appareil d'emballage pour être mis dans des pots de 60 et de 200 g.

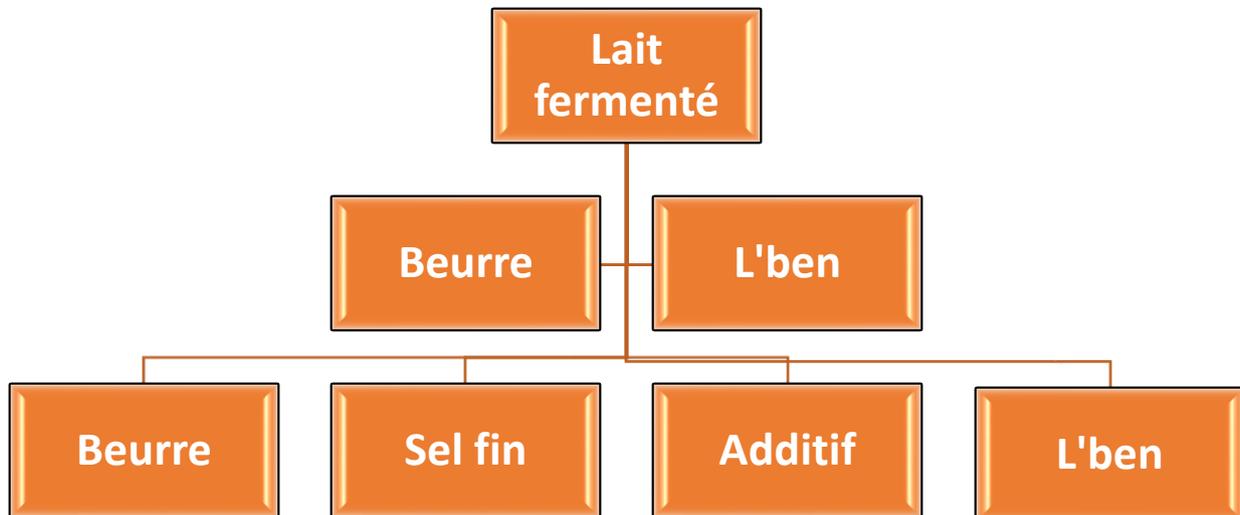


Figure 24: Diagramme de fabrication du fromage laibni.

II.10 Procédé de fabrication de camembert

II.10.1 Standardisation

Consiste à ajuster sa composition afin qu'elle corresponde à celle nécessaire à l'élaboration du fromage souhaité. Cette opération implique notamment un ajustement de la teneur en matière grasse pour atteindre une concentration d'environ 28 g/L de lait, ainsi qu'une éventuelle modification du taux de protéines afin qu'il soit supérieur à 31 g/kg de fromage.

II.10.2 Pasteurisation

Cette opération a pour objectif d'optimiser la qualité microbiologique du lait en éliminant les micro-organismes pathogènes et en réduisant la charge microbienne globale. Le traitement thermique appliqué suit un protocole standardisé à une température de 78 °C pendant une durée de 20 secondes (ALFA LAVAL).

II.10.3 Maturation

Le lait est stocké dans des tanks au niveau du service atelier fromagerie, puis il subit un réchauffage entre 37-38 °C avec addition d'ingrédients suivants : Levains mésophiles 40 % , Levains thermophiles 60 % , Chlorure de Calcium 0,08 g/L et Penicillium super actif.

II.10.4 Coagulation

La coagulation du lait pour la fabrication de fromage utilise de la présure d'origine animale sous forme de poudre jaunâtre. Elle a lieu dans des bassines où le lait est chauffé à une température de 35 à 36 °C avec une acidité de 21 à 22 °D. Une fois la présure ajoutée, il est nécessaire d'attendre que la floculation se produise pour déterminer le temps de coagulation.

- Temps de prise : marque le début de la coagulation qui se situe entre 8-10 min après l'emprésurage.
- Temps de coagulation : est trois fois le temps de prise.

II.10.5 Tranchage

Une fois que le coagulum est formé, il est découpé en cubes de 2 à 2,5 cm à l'aide d'une tranche de caillé. Les cubes de caillé sont ensuite laissés à reposer dans le sérum pendant environ 22 minutes, tout en étant brassés de temps en temps pour accélérer l'exsudation du sérum. Ce brassage permet également d'empêcher les grains de caillé d'adhérer les uns aux autres et de former des amas qui emprisonnent le liquide.

II.10.6 Moulage-Egouttage

Après l'évacuation du lactosérum par soutirage, le caillé est placé dans des moules de petit format pour subir un procédé de moulage. Pour favoriser l'égouttage du caillé, deux retournements sont effectués : le premier après 1 h 30 min avec une acidité de 40 °D, et le deuxième après 3 h avec une acidité de 60 °D. L'égouttage se déroule pendant toute une nuit dans une salle dont la température décroît progressivement de 18 à 16 °C.

II.10.7 Salage

Le jour suivant, les fromages sont retirés de leurs moules et disposés sur des étagères pour être salés en les plongeant dans une saumure pendant une durée de 30 à 40 minutes. La saumure utilisée a les caractéristiques suivantes :

- pH : 4,8.

- Concentration en sel : 1,8 % de NaCl / 100 g de fromage.
- Température : 11-12 °C.

II.10.8 Ressuyage

Cette étape représente une étape supplémentaire d'égouttage, où les fromages, une fois salés, sont placés dans une pièce de ressuyage pendant environ 6 heures dans des conditions ambiantes spécifiques :

- Température : 14 à 15 °C.
- Humidité relative : 85 à 87 %.

II.10.9 Affinage

Les fromages sont soumis à un procédé d'affinage de 9 jours dans une chambre spécialement conçue, où la température varie entre 11 et 13 °C et l'humidité relative est maintenue à 95 %. Après cela, les fromages sont pulvérisés avec une suspension de *Penicillium candidum* et retournés tous les trois jours pour favoriser la croissance de ce dernier. À partir du 5^{ème} jour d'affinage, le *Penicillium* commence à se propager sur la surface des fromages.

II.10.10 Séchage et conditionnement

Après l'affinage, le fromage est transféré dans un compartiment de séchage où la température est maintenue à 10 °C avec une humidité relative de 85 %. Une fois cette étape terminée, le fromage est prêt pour être conditionné dans des papiers cellulés et des boîtes en carton.

II.10.11 Stockage

Une fois prêt, le produit est stocké dans une salle à une température de 8 °C et une humidité relative de 85 %, avant d'être commercialisé.

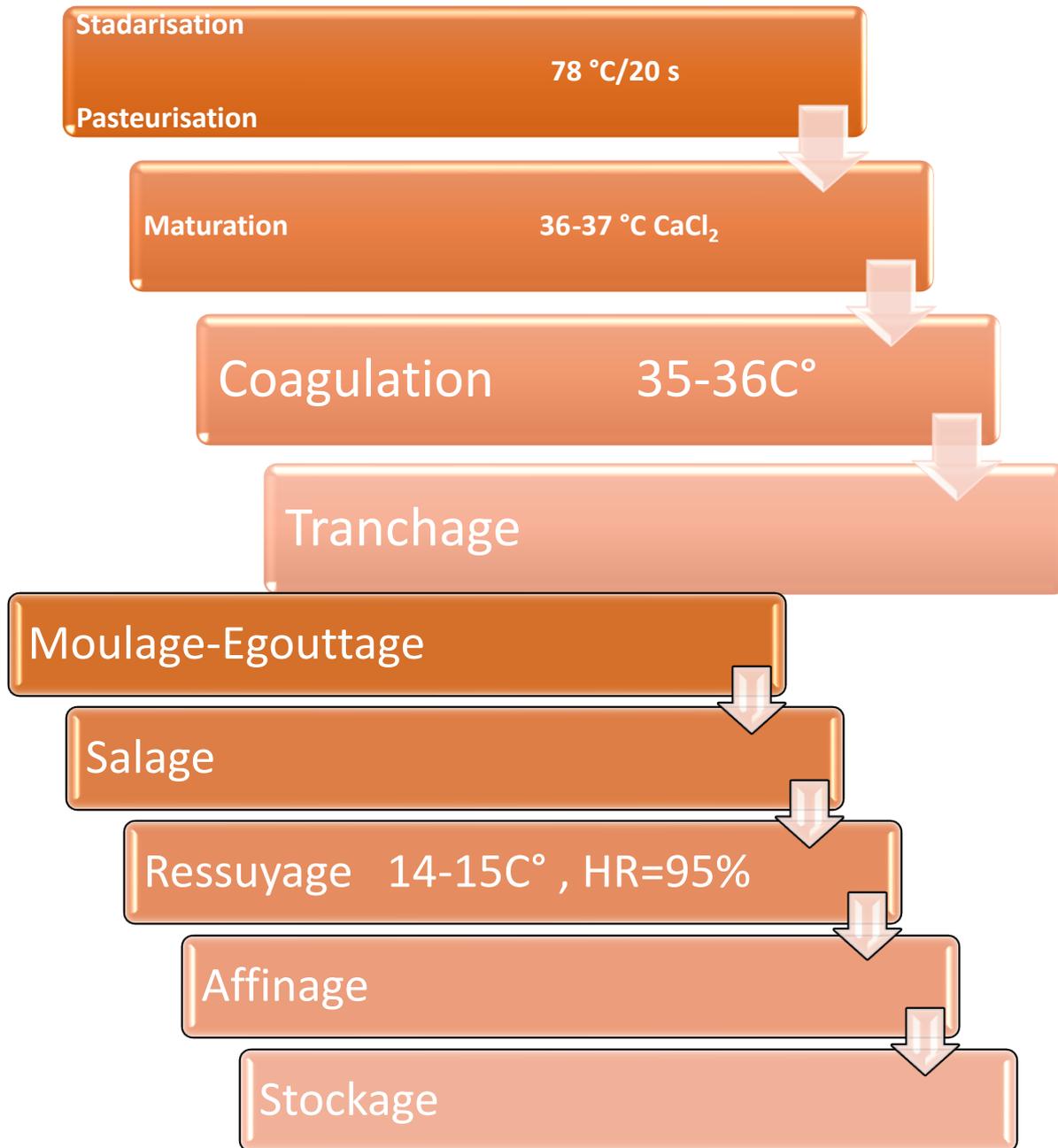


Figure 25 : Diagramme de fabrication du camembert.

Chapitre III

Procédé de recyclage des eaux de rejet d'osmose inverse

III.1 Les analyses physico-chimiques des eaux avant et après osmose inverse

L'industrie laitière de Sidi Saâda est située dans une région où l'eau potable est une ressource rare. Pour satisfaire ces besoins en eau, l'usine achète de l'eau saumâtre qu'elle traite par osmose inverse pour produire de l'eau potable. Cependant, ce procédé génère également un volume important d'eaux usées concentrées en sels (saumure).

Face à ces défis, nous avons fait nos analyses physico-chimiques. Le prélèvement de l'échantillon utilisé pour les analyses physico-chimiques a été effectué le 13 mars 2023 afin d'évaluer les propriétés de l'eau saumâtre utilisée dans le traitement de l'eau au sein de l'industrie laitière de Sidi Saâda. Ces analyses ont joué un rôle crucial dans la conception du modèle de recyclage de l'eau de rejet d'osmose inverse (rétentat) proposé dans cette étude, en identifiant les composants et les concentrations des différents polluants présents dans l'eau, ainsi que les propriétés physico-chimiques nécessaires pour son traitement. Les résultats obtenus seront détaillés dans les tableaux 5, 6 et 7, en précisant leur impact sur notre proposition de modèle de recyclage de l'eau de rejet d'osmose inverse pour l'unité de traitement d'eau de Sidi Saâda.

Il est important de noter que le débit de perméat a été mesuré à $7 \text{ m}^3/\text{h}$, tandis que le débit de rejet a été mesuré à $5 \text{ m}^3/\text{h}$. L'alimentation totale correspond donc à la somme de ces deux débits, soit $12 \text{ m}^3/\text{h}$. De plus, la pression transmembranaire lors des analyses était de 10 bar.

Afin de garantir la fiabilité des résultats, chaque partie du système d'osmose inverse, à savoir l'alimentation, le perméat et le rejet, a fait l'objet de 3 analyses d'essai. Une fois les trois analyses effectuées pour chaque partie, nous avons calculé la moyenne des valeurs obtenues. Cette moyenne représente une mesure plus représentative des propriétés physico-chimiques de l'eau dans chaque partie du système d'osmose inverse.

III.1.1 Résultats d'analyses

III.1.1.1 Eau d'alimentation d'osmose inverse

Tableau 5 : Analyses de l'eau d'alimentation d'osmose inverse.

N° d'analyse	pH	TH (°F)	TA (°F)	TAC (°F)	Cl ⁻ (mg/L)	NaCl (mg/L)	Conductivité (μS/cm)	Salinité (mg/L)
Eau d'alimentaion1	7,74	86,00	0,00	24,50	809,40	1333,80	3190,00	2392,50
Eau d'alimentaion2	7,72	82,40	0,00	24,35	830,70	1368,90	3250,00	2437,50
Eau d'alimentaion3	7,69	83,20	0,00	24,75	826,44	1361,88	3250,00	2437,50
Moyenne	7,72	83,87	0,00	24,53	822,18	1354,86	3230,00	2422,50
Normes algériennes	6,50-9,00	10,00-50,00	0,00	/	<500,00	<500,00	<2800,00	/
Normes OMS	6,5-9,5	10,00-50,00	0,00	/	<250,00	<250,00	<2800,00	/

III.1.1.2 Eau de perméat d'osmose inverse

Tableau 6 : Analyses de l'eau de perméat d'osmose inverse.

N° d'analyse	pH	TH (°F)	TA (°F)	TAC (°F)	Cl ⁻ (mg/L)	NaCl (mg/L)	Conductivité (μS/cm)	Salinité (mg/L)
Eau de perméat 1	5,75	0,00	0,00	0,75	31,95	52,65	113,00	84,75
Eau de perméat 2	5,74	0,00	0,00	0,75	31,95	52,65	114,00	85,50
Eau de perméat 3	5,76	0,00	0,00	0,75	30,18	49,73	108,00	81,00
Moyenne	5,75	0,00	0,00	0,75	31,36	51,68	111,67	83,75
Normes algériennes	6,50-9,00	10,00-50,00	0,00	/	<500,00	<500,00	<2800,00	/
Normes OMS	6,50-9,50	10,00-50,00	0,00	/	<250,00	<250,00	<2800 ,00	/

III.1.1.3 Eau de rejet d'osmose inverse

Tableau 7: Analyses de l'eau de rejet d'osmose inverse.

N° d'analyse	pH	TH (°F)	TA (°F)	TAC (°F)	Cl ⁻ (mg/L)	NaCl (mg/L)	Conductivité (µS/cm)	Salinité (mg/L)
Eau de rejet 1	7,68	288,00	0,00	72,00	2470,80	4095,00	9130,00	6847,50
Eau de rejet 2	7,82	348,50	0,00	78,75	2712,20	4469,40	9560,00	7170,00
Eau de rejet 3	7,93	270,00	0,00	78,50	2059,00	3393,00	8900,00	6675,00
Moyenne	7,81	302,17	0,00	76,42	2414,00	3985,80	9196,67	6897,50
Normes algériennes	6,50- 9,00	10-50	0,00	/	<500,00	<500,00	<2800,00	/
Normes OMS	6,50- 9,50	10,00- 50,00	0,00	/	<250,00	<250,00	<2800,00	/

III.1.2 Interprétation des résultats d'analyses physico-chimiques

III.1.2.1 Eau d'alimentation d'osmose inverse

Les résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau d'alimentation pour le procédé d'osmose inverse révèlent des valeurs qui dépassent les normes Algériennes et les normes de l'OMS. La conductivité moyenne de l'eau est mesurée à 3230 µS/cm, ce qui est supérieur aux limites établies. De même, la salinité moyenne de l'eau est élevée, atteignant 2422,50 mg/L, dépassant ainsi les seuils recommandés. La concentration moyenne en Chlorures de Sodium (NaCl) est également significative, avec une valeur de 1354,86 mg/L.

Ces résultats indiquent clairement que l'eau d'alimentation nécessite un traitement supplémentaire pour éliminer les sels. Le procédé d'osmose inverse utilisé par l'industrie laitière de Sidi Saâda est donc justifié et essentiel pour obtenir une eau traitée de qualité suffisante pour la production du lait, camembert, fromage fondu (Laibni) et de boissons.

III.1.2.2 Eau de perméat d'osmose inverse

Les résultats d'analyses physico-chimiques du perméat d'osmose inverse démontrent son efficacité dans l'élimination des sels. La valeur de la conductivité du perméat enregistrée est de 111,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui est nettement inférieur aux limites exigées par les normes Algériennes et de l'OMS. De même, la salinité du perméat est faible, avec une valeur de 83,75 mg/L, respectant ainsi les seuils recommandés. La concentration en Chlorures de Sodium (NaCl) est également réduite, jusqu'à une valeur de 51,68 mg/L, confirmant l'efficacité du procédé d'osmose inverse dans l'élimination des sels.

III.1.2.3 Eau de rejet d'osmose inverse

Les résultats d'analyses physico-chimiques des eaux rejetées par le procédé d'osmose inverse à l'industrie laitière de Sidi Saâda révèlent une concentration plus élevée des sels par rapport à l'eau d'alimentation. En effet, la conductivité des eaux de rejet est mesurée à 9196,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui dépasse largement les normes établies par les organismes de réglementation, tant au niveau des normes Algériennes que de l'OMS. De même, la salinité des eaux de rejet est considérablement élevée, où nous avons enregistré une valeur de 6897,50 mg/L, ce qui dépasse également les seuils recommandés. La concentration en Chlorures de Sodium (NaCl) dans les eaux de rejet est significative, atteignant 3985,80 mg/L, dépassant ainsi les limites établies par les normes réglementaires.

Les analyses physico-chimiques des eaux de rejet d'osmose inverse montrent une concentration élevée en sels, entre 1 et 10 g/L. Cette salinité est comprise entre les fourchettes de concentration montrant qu'il s'agit toujours d'une eau saumâtre, c'est-à-dire une eau à concentration modérée en sels.

La présence d'eau saumâtre offre une opportunité intéressante de recyclage de cette eau. Comparativement à l'eau de mer, dont la salinité est beaucoup plus élevée, le traitement et le recyclage des eaux saumâtres nécessitent généralement une consommation d'énergie moindre. Cela peut aider à réduire les coûts de traitement de l'eau et à faciliter sa réutilisation dans divers procédés dans l'industrie laitière.

La présence élevée de Chlorures de Sodium (NaCl) dans les eaux rejetées par le procédé d'osmose inverse est significative, étant donné que le NaCl est une petite molécule constituant les sels. Par conséquent, si la membrane d'osmose inverse est capable d'éliminer efficacement le NaCl, elle est également capable d'éliminer d'autres sels et contaminants présents dans l'eau.

III.2 Choix de la membrane

La membrane d'osmose inverse choisie pour ce projet est fabriquée par la compagnie Toray (USA) du modèle TM710D.



Figure 26: Membrane Toray TM710D.

La membrane est conçue pour être utilisée dans le traitement de l'eau, telles que la purification de l'eau potable, le dessalement des eaux saumâtres pour différentes applications industriels. Cette membrane est synthétisée à partir de polyamide aromatique. Ce polymère est spécialement conçu pour sa capacité à rejeter les ions et les contaminants présents dans l'eau lors du procédé de filtration par osmose inverse.

III.2.1 Caractéristiques de la membrane

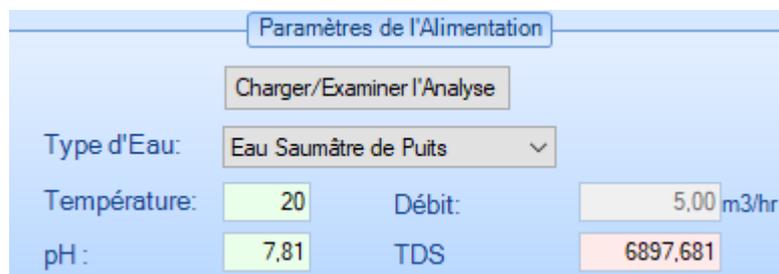
- Pression de service maximale : 600 psi (41 bar).
- Température maximale de l'eau d'alimentation : 113 °F (45 °C).
- Maximum d'entrée SDI de l'eau : 5.
- Concentration en Chlore de l'eau d'alimentation : Pas Détectable.
- L'intervalle de pH de l'eau d'alimentation, fonctionnement continu : 2-11.
- L'intervalle de pH de solution de nettoyage chimique : 1-12.
- Une surface de 8,1 m².
- Taux de rétention de 99,8%.

III.2.2 Fonctionnement dans l'industrie laitière de Sidi Saâda

Pour évaluer et étudier le bon fonctionnement du procédé de recyclage des eaux de rejet, nous avons utilisé le logiciel de simulation de Toray DS RO. Ce logiciel nous a permis de modéliser et de simuler le système de recyclage, en prenant en compte les différentes variables et paramètres clés du procédé.

Grâce à cette simulation, nous avons pu analyser en détail les performances du système de recyclage, ainsi que le fonctionnement de la membrane TM710D, les flux d'eau, les taux de rétention, les niveaux de salinité et d'autres indicateurs pertinents tels que les débits, pH et température. Le logiciel a également permis d'optimiser les paramètres de fonctionnement, tels que la pression d'alimentation, le débit de perméat et d'autres variables, afin d'obtenir les meilleures performances possibles du système.

Tout d'abord, nous avons saisi les données de nos analyses de l'eau dans le logiciel (on précise les unités). Nous avons pu créer un profil chimique complet de l'eau, en spécifiant les valeurs des différents paramètres. Cela inclut des informations telles que la concentration des ions, la conductivité électrique, le pH et d'autres propriétés physico-chimiques pertinentes.



Paramètres de l'Alimentation			
Charger/Examiner l'Analyse			
Type d'Eau:	Eau Saumâtre de Puits		
Température:	20	Débit:	5.00 m3/hr
pH :	7.81	TDS	6897.681

Figure 27: Paramètres de l'alimentation.

Dans la deuxième étape de notre simulation, nous avons introduit les paramètres de débit d'alimentation et le taux de récupération (taux de conversion) requis par la direction de l'usine.

Le débit d'alimentation est de 5 m³/h, qui est celui rejeté par le 1^{er} pilote d'osmose inverse, représente la quantité d'eau brute qui alimente le 2^{ème} pilote d'osmose inverse l'objet de notre simulation.

Quant au taux de récupération, il est fixé à 50 % selon la demande de l'industrie laitière. Cela signifie que sur l'ensemble de l'eau brute introduite dans le système, seule la moitié sera

transformée en eau traitée (perméat), tandis que l'autre moitié sera rejetée en tant qu'eau concentrée (rétenant ou saumure).

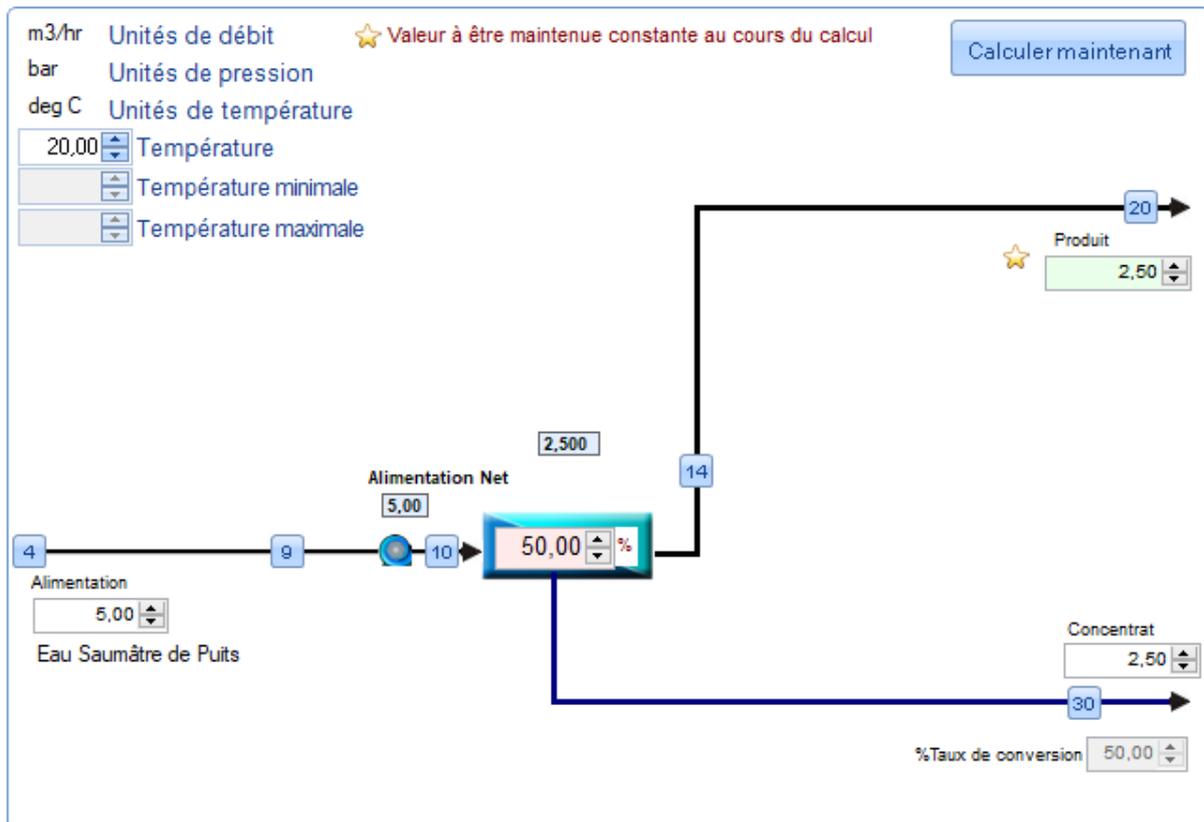


Figure 28: Paramètres d'alimentation et taux de récupération pour le procédé de recyclage.

III.2.3 Nombres des membranes utilisées

Pour trouver le nombre des membranes nécessaires on utilise l'équation (II.3) :

$$J_p = \frac{Q_p}{S_m} \quad (II.3)$$

D'après le logiciel Toray DS RO, on trouve que le flux de circulation de l'eau pour les eaux saumâtres est entre 25-32 L/m² h.

On prend la moyenne 29 L/m² h.

Directives de Conception			Perméat OI	Perméat RO (pH élevé)	Eau Saumâtre de Puits
Paramètre	Etat	Dimens			
Feed SDI @ 15 min.	Gamme	%/min	< 1	< 1	1 - 2
	Limite	%/min	< 1	< 1	< 3
Flux Système Moyen Typique	Gamme	l/m ² /hr	30,0 - 39,0	30,0 - 39,0	25,0 - 32,0

Figure 29 : Flux de circulation des eaux saumâtres d'après logiciel Toray DS RO.

Le débit de perméat est de 2,5 m³/h, on le convertit au L/h.

Donc la surface membranaire devient :

$$29 = \frac{2500}{S_m}$$

$$\Rightarrow S_m = \frac{2500}{29}$$

$$S_m = 86,20 \text{ m}^2$$

On sait que la surface d'une membrane de TM710D est de 8,1 m².

On calcule le nombre des membranes comme suit :

$$\text{Nombres des membranes} = \frac{86,2}{8,1}$$

$$\text{Nombres des membranes} = 10,64$$

Nombres des membranes \approx 10 membranes

Et pour finir nos données dans le logiciel Toray on met 2 modules avec 5 membranes dans chaque module, le totale sera 10 membranes.

Passe: 1 Etages Totaux: 1 Étape actuel: 1 Total des éléments de L: 10
 Tubes par Etages: 2 Éléments dans le Tub: 5 Tous les éléments identiques
 Âge de l'éléme: 3,00 Même âge ? Tous les mêmes étapes
 Débit Admissible: 0,848 Âge définit l'encrassement Augmentation Passage: 10,00

TM710D, BWRO				
37,48	34,56	31,28	27,63	23,70

30,93 Overall Pass Flux False
 4" High performance BWRO element, 31 mil spacer
 TM710D, BWRO Type d'élément: Element Selection Criteria

Figure 30 : Choix de nombres de modules pour le procédé de recyclage.

Après avoir fourni les paramètres nécessaires dans le logiciel Toray, nous avons pu déterminer la pression requise pour le fonctionnement du procédé de recyclage de l'eau de rejet d'osmose inverse à l'industrie laitière de Sidi Saâda. Cette pression est un facteur clé pour assurer l'efficacité et la performance optimale du système de filtration membranaire.

Paramètre	Etage 1	Etage 2
Perte DP Interbanc-bar	0,00	
Boost Inter-étages -bar	0,00	
Pression Alimentation Etage...	21,42	
DP Etage-bar	0,55	
Débit de tête-m3/hr	2,50	
Flux de tête-l/m2/hr	37,48	
Flux Etage-l/m2/hr	30,93	
Concentrate demier Elém-m...	1,25	
Demier Concentrat:Produit	6,53	
Produit Etage-m3/hr	2,50	
TDS Etage-mg/l	59,72	
Pression Perméat-bar	0,00	
Demier Beta	1,178	

Figure 31 : Les paramètres de fonctionnement proposés par Toray DS RO pour le traitement des eaux.

Selon les résultats affichés dans la Figure 31, le logiciel Toray a proposé une pression de fonctionnement de 21,42 bar pour le procédé de recyclage de l'eau de rejet d'osmose inverse.

Cette valeur est cohérente avec la salinité relativement élevée de l'eau saumâtre utilisée dans le traitement. En effet, une pression plus élevée est souvent nécessaire pour surmonter la concentration élevée des sels dissous présents dans l'eau saumâtre.

Remarque

Une remarque importante à souligner est que si nous augmentons le nombre de membranes utilisées dans le procédé de recyclage de l'eau de rejet d'osmose inverse, la pression de fonctionnement nécessaire peut diminuer. Dans le cas spécifique de notre étude, l'ajout de 2 membranes supplémentaires (2 modules avec 6 membranes au lieu de 5) réduit la pression de fonctionnement à 19,17 bar, par rapport à la valeur initiale de 21,42 bar.

Paramètre	Etage 1	Etage 2
Perte DP Interbanc-bar	0,00	
Boost Inter-étages -bar	0,00	
Pression Alimentation Etage...	19,17	
DP Etage-bar	0,65	
Débit de tête-m ³ /hr	2,50	
Flux de tête-l/m ² /hr	32,56	
Flux Etage-l/m ² /hr	25,77	
Concentrate demier Elém-m...	1,25	
Demier Concentrat:Produit	8,39	
Produit Etage-m ³ /hr	2,50	
TDS Etage-mg/l	67,39	
Pression Perméat-bar	0,00	
Demier Beta	1,137	

Figure 32 : les nouveaux paramètres après l'ajout des deux membranes.

III.3 Procédé final

III.3.1 Nouveau taux de récupération global

Notre objectif est de récupérer la moitié de l'eau de rejet, autrement dit avoir un taux de récupération de 50 % de rejet dans le nouveau pilote d'osmose inverse.

Dans l'industrie laitière de Sidi Saâda, le taux de récupération était fixé à 70 % lorsque les membranes étaient neuves, mais après plusieurs années d'utilisation, ce taux a été chuté et a atteint environ 59 %, donc la quantité d'eau de rejet d'osmose inverse est de 41 %, et notre

but est de récupérer la moitié d'eau de rejet (20,5 %). Avec l'insertion des deux pilotes d'osmose inverse en série, le taux de récupération global sera de 79,5 %.

III.3.2 Salinité du perméat du nouveau pilote d'osmose inverse

Afin de déterminer la quantité de sels présents dans le perméat, il est nécessaire de procéder au calcul en utilisant l'équation de taux de rétention.

$$TR = \frac{\text{salinité}_A - \text{salinité}_P}{\text{salinité}_A} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{salinité}_P = \text{salinité}_A \times (1 - \text{retention})$$

$$\text{salinité}_P = 6897,5 \times (1 - 0,998)$$

$$\text{salinité}_P = 13,80 \text{ mg/L}$$

Après le calcul de la salinité à partir du taux de récupération nous avons obtenu une valeur de salinité de 13,80 mg/L, ce qui montre que c'est une eau d'excellente qualité, qui peut être utilisée dans la production du lait reconstitué.

Puisque le perméat issu de 2^{ème} pilote d'osmose inverse est faible en salinité, on peut le mélanger avec le perméat du 1^{er} pilote d'osmose inverse.

III.3.3 Schéma final du procédé

Pour conclure, nous avons proposé dans le 2^{ème} pilote, une configuration de deux modules en parallèle, chaque module contenant cinq membranes. Cette approche en parallèle vise à réduire la charge exercée sur chaque membrane individuelle.

Voici une représentation en 3D du schéma final de la membrane de recyclage qui fournira une visualisation précise et informative du système de traitement de l'eau, renforçant ainsi la compréhension du lecteur et ajoutant une dimension visuelle importante à la présentation des résultats de l'étude.



Figure 33 : Représentation schématique en 3D du nouveau pilote (2^{ème} pilote) d'osmose inverse.

Pour que l'idée soit claire, voici une autre figure qui relie les 2 pilotes, le pilote de l'usine (1^{er} pilote), ainsi que le nouveau pilote (2^{ème} pilote) proposée pour le recyclage des eaux de rejet du 1^{er} pilote d'osmose inverse.

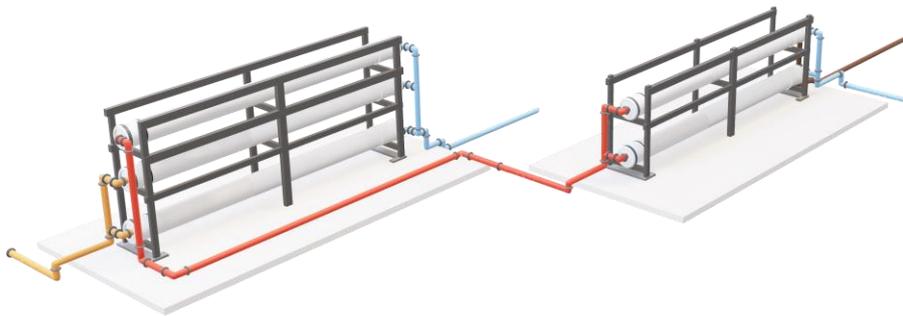


Figure 34 : Représentation schématique en 3D du nouveau procédé globale de traitement des eaux saumâtres prétraitées dans l'industrie laitière de Sidi Saâda.

Conclusion générale

L'eau est un élément nécessaire dans l'industrie laitière de Sidi Saâda, où elle alimente des différents secteurs et unités au sein du complexe laitier.

Malheureusement, nous faisons face à une diminution de la source d'eau de forage, qui est non seulement préoccupante mais également coûteuse. Dans ce contexte, nous nous sommes penchés sur la possibilité d'augmenter le taux de récupération de l'eau traitée afin de maximiser son utilisation et de minimiser le gaspillage. En augmentant le taux de récupération, nous pourrions réduire notre dépendance à l'égard de la source d'eau de forage et optimiser l'utilisation des ressources disponibles. Cette approche nous permettrait non seulement de faire face aux contraintes actuelles, mais également de préserver durablement cette ressource essentielle.

Les résultats d'analyses physico-chimiques des eaux de rejet d'osmose inverse ont confirmé que l'eau n'était pas saturée en sels. Ces résultats nous ont apporté la certitude que l'eau de rejet d'osmose inverse pouvait être recyclée de manière efficace et sûre.

Afin d'augmenter le taux de récupération, nous avons envisagé de mettre en place un système de recyclage des eaux de rejet d'osmose inverse. Cette approche consiste à collecter, traiter et réutiliser les eaux rejetées par le procédé d'osmose inverse.

Après avoir analysé les données, nous avons constaté que notre 1^{er} pilote de filtration membranaire présente un taux de récupération de 59 %, ce qui signifie que 41 % de l'eau est rejetée. Dans le but d'optimiser notre procédé et d'augmenter le taux de récupération global, nous avons décidé de mettre en place un 2^{ème} pilote de filtration membranaire en série avec le 1^{er} pilote pour traiter les eaux de rejet de ce dernier.

Ce 2^{ème} pilote, basé également sur la filtration par osmose inverse, est conçu pour recycler les eaux de rejet du 1^{er} pilote avec un taux de récupération de 50 %. Cela signifie que nous pourrions récupérer 50 % de l'eau rejetée et la réintroduire dans le système de traitement, réduisant ainsi les pertes en eau et augmentant notre efficacité globale.

En combinant les 2 pilotes, nous obtenons un taux de récupération global de 79,5 %. Cela signifie que sur l'ensemble de la quantité d'eau traitée, nous serons en mesure de récupérer et de réutiliser 79,5 %, contribuant ainsi à une utilisation plus durable des ressources en eau et à une réduction des coûts liés à l'approvisionnement en eau supplémentaire.

Références bibliographiques

- [1]: Mallevalle J., Odendaal P.E., Wiesner M.R. The emergence of membranes in water and waste water treatment, In: Water Treatment Membrane Process, Chapter 1, Ed. McGraw-Hill, USA, 1996, p.10.
- [2]: Gesan G., Daufin G., Microfiltration tangentielle de lactosérums doux prétraités : mécanisme de colmatage et conduite opératoire, Cahier scientifique IAA, 112 (1995) 633-640.
- [3]: Dutournié P., Limousy L., Blel W., Déon S., et Fievet P., Understanding of Ion Transport in a Na–Mordenite Membrane: Use of Numerical Modeling to Estimate Surface–Solute Interactions in the Pore, Ind. Eng. Chem. Res., 53 (19) (2014) 8221-8227.
- [4]: Menjeaud C., Treatment and regeneration of wastewater produced by industrial laundry with inorganic membranes, Key Eng. Materials, 1991, 61.
- [5]: Zhuang Y.X., Hansen O., Correlation of Effective Dispersive and Polar Surface Energies in Heterogeneous Self-Assembled Monolayer Coatings, Langmuir, 25 (10) (2009) 5437.
- [6]: Baker R.W., Membrane Technology and Applications, 2nd ed. John Wiley and Sons, USA, 2004.
- [7]: Bouchard C., Kouadio P., Ellis O., Rahni M., Lebrun R.E., Les procédés à membranes et leurs applications en production d'eau potable, Vecteur Environnement, 33 (4) (2000) 28–38.
- [8]: Benjamin E., Approche théorique et expérimentale de la filtration tangentielle de colloïdes : flux critique et colmatage, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2003.
- [9]: Arzate A., Procèdes de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire, Document technique, Québec, Canada, 2008.
- [10]: Jacques B., Etude de l'évolution des propriétés de surface d'un matériau minéral à porosité contrôlée lors de sa mise en œuvre dans des tests d'ultra/nanofiltration , Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, France, 2015.
- [11]: Maurel A., Dessalement de l'eau de mer et l'eau saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, Ed. Tec. et Doc-Lavoisier, Paris, France, 2001.
- [12]: Kumar M., Sillanpää M., Mishra I.M., Composite membranes for water treatment : A review. J. Ind.Eng. Chem., 80 (2019) 18-36.

[13]: Wilf M., Intensive course: RO, NF and membrane filtration technology for potable water applications, EDS, University of L'Aquila, Italy, 2005.

[14]: Montiel A.M., Lignes directrices pour l'évaluation de l'innocuité des modules de filtration et de l'efficacité des procédés membranaires, Fiche technique, Paris, France, 2005.

[15]: Remigy J., Filtration membranaire (OI, NF, UF) - Présentation des membranes et modules, Technologie de l'eau, Ed. Techniques de l'Ingénieur, W4090 (2007) 1-21.

[16]: Dégrémont, Mémento technique de l'eau, 10^{ème} Ed. Tec. et Doc., Paris, France, 2004.

[17]: Berlnd J., Catherine J., Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, Document technique, France, 2002.

[18]: Daufin G., René F., Aimar P., Les séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire, Collection Sciences et Techniques Agro-alimentaires, Ed. Tec. et Doc-Lavoisier, Paris, France, 1998.

[19]: DuPont de Nemours E.I. and Co., Permasep B-9 Permeator - Technical Information Manual: Section 1, DuPont de Nemours, Wilmington, USA., 05 Janvier 1983, pp. 4-9.

Glossaire

Adsorption : phénomène de fixation en surface par interactions de nature chimique entre les solutés et la membrane menant à la formation d'un colmatage.

Coagulation : déstabilisation de petites particules solides ou bien neutralisation des charges négatives des colloïdes qui flottent puis se soulent pour former un gel emprisonnant des éléments solubles.

Concentrat : en électrodialyse, fraction enrichie en solutés ionique.

Perméabilité : libre circulation du liquide à l'intérieur d'une membrane.

Perméat : fraction traitée du mélange sortant en aval d'une membrane.

Porosité : vides occupés par la phase liquide dans un milieu poreux.

Rétentat : fraction rejetée du mélange sortant en amont d'une membrane.

Annexe

Les analyses physico-chimiques des eaux utilisées dans l'industrie laitière de Sidi Saâda

Catégories des eaux analysées

Les analyses physico-chimiques sont réalisées sur 3 catégories d'eau :

- L'eau brute (alimentation d'osmose inverse)
- L'eau traitée (perméat)
- L'eau de rejet (rétentat)

Les paramètres à rechercher

- TH (Titre hydrotimétrique)
- TA (Titre Alcalimétrique)
- TAC (Titre Alcalimétrique Complet)
- pH
- Chlorures
- Chlorures de Sodium
- Conductivité
- Salinité

Prélèvement et préparation des échantillons

Pour que les résultats d'une analyse soient pertinents, il est crucial que l'échantillon prélevé dans le système à vérifier soit représentatif. Par conséquent, il est essentiel de purger les conduites d'échantillonnage avant le prélèvement et de définir précisément les points et les méthodes d'échantillonnage utilisées.

Détermination du TH

Le titre hydrotimétrique (TH) est une mesure de la teneur en Calcium et en magnésium dans l'eau, connue sous le nom de dureté totale. La dureté totale est déterminée en additionnant les concentrations de ces deux minéraux, elle joue aussi un rôle important dans l'encrassement des appareils.

Son principe est basé sur le titrage par complexométrie du Ca et Mg avec une solution aqueuse de sel disodique d'acide éthylène-diamine tétra acétique (EDTA) ; solution de tampon

ammoniacal pH=10, l'indicateur coloré noir ériochrome-T donne une couleur rouge foncé ou violette en présence des ions de Calcium et de magnésium.

Lors du titrage, l'EDTA réagit d'abord avec les ions (Ca) et (Mg) libre en solution puis au point d'équivalence avec les ions Ca et Mg combinés. Ce dernier est libéré, et provoque un changement de couleur du violet au bleu.

Pour manipuler, on a besoin d'une solution tampon pH=10 ; EDTA 0,02 N et un indicateur coloré (noir ériochrome-T).

Matériels nécessaires

- Erlenmeyer de 250 mL
- Burette graduée
- Agitateur magnétique
- Pipette de 10 mL

Produits utilisés

- Sel disodique d'acide éthylène-diamine tétra acétique (EDTA)
- Noir ériochrome-T
- Solution tampon pH = 10

Mode opératoire

Dans un Erlenmeyer de 250 mL ont introduit 100 mL d'eau à analyser puis on ajoute 10 mL de solution tampon d'ammoniac à pH égal à 10 et deux gouttes de l'indicateur coloré noir d'ericrome (N.E.T).

Si la coloration de la solution devient bleue donc la valeur de pH = 0.

Si la coloration de la solution devient violette donc on fait un dosage de la solution par l'EDTA jusqu'à l'obtention de la couleur bleue puis on note la valeur du volume obtenu au virage du mélange. Le volume de l'EDTA versé représente la valeur du TH recherchée.



Dosage du TH.

Résultats

- Soit V le volume nécessaire à la titration, Donc $TH = V \text{ } ^\circ F$.
- La dureté totale est exprimée en degré français ($^\circ F$).

Détermination de TA (Titre Alcalimétrique)

Le titre alcalimétrique (TA) est une mesure de la concentration d'hydroxydes et de carbonates dans l'eau.

Son principe est basé sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par acide minéral dilué en présence d'un indicateur coloré.

Appareillage

- Becher 200 mL
- Burette graduée

Produits utilisés

- Acide chloridrique à 0,1 N
- Phénolphtaléine

Mode opératoire

Prenez un bécher de 200 mL et versez-y 100 mL d'eau à analyser. Ajoutez deux gouttes de phénolphthaléine, ce qui devrait entraîner une coloration rose. Si aucune coloration n'apparaît, cela signifie que le titre alcalimétrique (TA) est nul. Cela se produit généralement pour les eaux naturelles ayant un pH inférieur à 8,3.



Dosage du TA.

Résultats

Si on n'a pas de coloration $TA = 0$.

Si non V exprime le titre alcalimétrique en degré français ($^{\circ}F$).

Ou $V/5$ exprime le titre alcalimétrique en meq g/L.

Détermination de TAC

Le titre alcalimétrique complet (TAC) mesure la teneur en alcalis libres, carbonates et hydrogénocarbonates dans l'eau.

Pour faciliter cette mesure, un indicateur coloré est généralement utilisé. Cet indicateur change de couleur à proximité du point d'équivalence, permettant ainsi de visualiser le moment où la réaction de neutralisation est complète.

En utilisant un acide minéral dilué, la quantité d'acide ajoutée peut être mesurée avec précision, ce qui permet de déterminer le TAC de l'eau en fonction de la quantité d'acide utilisée.

Matériels nécessaires

- Erlenmeyer de 250 mL
- Une burette de 50 mL
- Une pipette volumétrique de 50 mL

Produit utilisé

- Acide chloridrique à 0,1 N
- Méthylorange

Mode opératoire

Utiliser l'échantillon traité précédemment ou le prélèvement primitif s'il n'y a pas eu de coloration. Ajouter deux gouttes de méthylorange de nouveau avec le même acide, vous titrer jusqu'au virage du jaune au jaune orangé ($\text{pH} = 4,3$). S'assurer qu'une goutte d'acide en excès provoque le passage du jaune orangé au rouge orangé ($\text{pH} = 4$) ; soit V' le volume d'acide à 0,02 N versé depuis le début du dosage. Retrancher de ce volume 0,5 mL, quantité d'acide.



Dosage du TAC.

Expression des résultats

- V' que divise 5 exprime le titre alcalimétrique complet en meq g/L
- $V' \times 5$ exprime le titre alcalimétrique complet en degré français ($^{\circ}\text{F}$).

Détermination des chlorures :

Les chlorures se réfèrent à la présence de Chlore sous forme d'ions Cl^- ou NaCl dans une solution. Pour quantifier les chlorures, on utilise une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) en milieu neutre. Le titrage s'effectue en présence d'un indicateur coloré, le bichromate de potassium. La fin de la réaction est déterminée par l'apparition de la teinte rouge distinctive due à la formation de chromate d'argent.

Matériels utilisés

- Erlenmeyer de 250 mL
- Burette graduée
- Agitateur magnétique
- Pipette de 10 mL

Produits utilisés

- Nitrate d'Argent à 0,1 N
- Dichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) à 10 %.

Mode opératoire

Dans un Erlenmeyer de 250 mL on introduit 100 mL d'eau à analyser et on prend 2 à 3 gouttes d'acide Nitrique, puis on ajoute quelques gouttes de Dichromate de Potassium à 10 %. On titre avec la solution de Nitrate d'Argent à 0,1 N jusqu'au virage du jaune au rouge brique.



Dosage des Chlorures.

Pour une prise d'essai de 100 mL :

$$Cl^- = V'' \times 35,5$$

Avec V'' le volume nécessaire au titrage.

Les chlorures sont exprimés en mg de Cl par litre d'eau (mg/L).

Et pour le Chlorure de Sodium on multiplie les teneurs obtenues des Chlorures par la masse molaire de sodium (NaCl) afin d'obtenir la teneur du NaCl en mg/L dans les eaux analysées

$$\text{Alors : NaCl (mg/L) = Cl}^- \text{ (mg/L) } \times 58,5$$

Détermination du pH

Le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution en évaluant la concentration d'ions d'hydrogène (H^+) présents. Une solution avec un pH inférieur à 7 est considérée acide, tandis qu'une solution avec un pH supérieur à 7 est considérée basique ou alcaline. Un pH de 7 indique une solution neutre, où la concentration d'ions H^+ est équilibrée. Le pH est un indicateur important pour déterminer le degré d'acidité ou d'alcalinité d'une solution.

Il est déterminé par un pH-mètre. Après immersion de l'électrode dans l'échantillon, on permet à la valeur de pH de se stabiliser pendant quelques instants, puis on procède à la prise de la mesure du pH.

Détermination de la conductivité

La conductivité est principalement influencée par la présence d'ions dissous dans une solution. Lorsque des substances dissoutes, telles que des sels ou des acides, sont présentes dans l'eau, elles se dissocient en ions qui peuvent transporter des charges électriques. Plus la concentration d'ions est élevée, plus la conductivité électrique de la solution est élevée.

Elle est largement utilisée pour évaluer la pureté de l'eau, la salinité, la concentration des substances dissoutes et la qualité de l'eau dans diverses applications telles que l'industrie et le contrôle de la qualité de l'eau potable.

La conductivité est mesurée à l'aide d'un conductimètre. Elle est exprimée en ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Détermination de la salinité

En multipliant la valeur de la conductivité par 0,75, nous pouvons obtenir une estimation approximative de la salinité de l'eau en milligrammes par litre (mg/L).

$$\text{Salinité (mg/L)} = \text{conductivité } (\mu\text{S}/\text{cm}) \times 0,75$$