



Année Universitaire : 2014-2015

**Filière ingénieurs**  
**Industries Agricoles et Alimentaires**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**  
**pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat**

**Evaluation de l'efficacité et optimisation du rendement du système de l'osmose inverse du groupe LESAFFRE-Maroc**

**Présenté par :**

**EL-JABIRY Hanan**

**Encadré par :**

**Mr.A. OULMEKKI**

**FST- FES**

**Mr. Mostafa EL-FALEH**

**LESAFFRE-Maroc**

**Présenté le 30 Juin 2015 devant le jury composé de :**

**Mme. N. BENCHEMSI**

**Mr. A. OULMEKKI**

**Mr. E. EL GHADRAOUI**

**Stage effectué à : LESAFFRE-MAROC**

## Dédicace

*A mes très chers parents tant adorés,*

*Aucun mot ne saurait exprimer ma gratitude envers vous pour tout ce que j'ai pu réaliser de bien dans ma vie. Votre soutien, votre sacrifice et votre bienveillance à mon égard m'ont toujours donné la force pour persévérer. Que le bon Dieu tout puissant puisse vous procurer santé et sérénité.*

*A Mes chères sœurs adorées  
A mon respectueux frère Mohamed*

*Parce qu'il y a des gens qui s'installent dans notre vie pour compléter l'équilibre de la famille, comment vous remercier d'exister, vous êtes dans mon cœur à jamais...*

*A toute la famille,  
A mes chers amis et amies,*

*Le destin a croisé nos chemins, vous êtes une famille que j'ai choisie, vous êtes les souvenirs qu'on a partagés, vous êtes la raison qui me fait sourire... Merci d'être là.*

*Hanan EL-JABIRY*

## Remerciements

Il m'est agréable d'exprimer mes sentiments de reconnaissance envers Mr. le Doyen de la FST Fès et notre responsable de formation Mr.A. LAZRAQ pour la qualité des études dispensées au sein de la Faculté de Sciences et Techniques de Fès.

J'exprime également ma profonde gratitude à tous les collaborateurs du groupe LESAFFRE-MAROC pour leur soutien moral et technique, et pour leur générosité et leur disponibilité permanente.

Je tiens à exprimer mes sentiments de remerciement à Mr.A.OULMEKKI, Mon encadrant de la FST pour les conseils qu'il m'a prodigué, son judicieux encadrement et son assistance pour la rédaction de ce rapport.

Je voudrais adresser toute ma reconnaissance à Mr.Mostafa EL-FALEH Responsable du froid pour son accueil, son encadrement, sa compréhension, ses conseils et remarques pertinents.

Aux Professeurs N. BENCHEMSI, E. EL GHADRAOUI, je voudrais vous dire ma profonde reconnaissance pour avoir accepté en qualité de membres du jury, porter un jugement sur ce travail.

Que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail, trouvent l'expression de mes sincères remerciements.



# Sommaire

Dédicace

Remerciements

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Présentation de l'Entreprise .....</b>	<b>2</b>
I. Historique du groupe.....	3
I.1. Lesaffre-Maroc .....	3
I.2. Produits et marques de référence .....	3
<b>Chapitre II : La levure Saccharomyces Cerevisiae et Sa Chaîne de Production .....</b>	<b>5</b>
I. La levure Saccharomyces Cerevisiae.....	6
I.1. Principales caractéristiques.....	6
I.2. Métabolisme .....	6
I.3. Mode de reproduction .....	7
II- Procédé de production de la levure .....	8
II.1. Echelle laboratoire .....	8
II.2. Echelle industriel .....	8
<b>Chapitre III : Traitement de L'eau .....</b>	<b>11</b>
I. L'eau.....	12
I.1. Propriétés .....	12
I.2. Etat naturel.....	12
II.Problèmes liés à l'utilisation d'eau brute.....	12
II.1. Entartrage.....	12
II.2. Moussage et primage.....	13
<b>Chapitre IV : Procédés membranaires.....</b>	<b>15</b>
I. Classification des procédés membranaires .....	16
II. Modes de fonctionnement .....	17
II.1. Filtration frontale .....	17
II.2. Filtration tangentielle.....	17
III. Différents types des membranes.....	18
IV. Différents types de filtration membranaire.....	19
V. Techniques d'osmose inverse.....	21
V.1. Principes de l'osmose inverse .....	21
V.2. Différents types d'osmoseurs .....	23
V.3. Limites du procédé.....	24
V.4. Paramètres de fonctionnement.....	25

---

V.5. Installation d'osmose inverse .....	27
<b>Chapitre V : Analyse du fonctionnement de la filière eau.....</b>	<b>30</b>
I. Analyse du fonctionnement de la filière eau .....	31
Diagramme ISHIKAWA.....	31
I.1. Paramètres physico-chimiques de l'eau .....	32
II. Analyse du fonctionnement de la filière eau .....	33
II.1. Analyse physico-chimique.....	33
II.2. Efficacité de l'osmoseur par paramètres .....	38
III. suivi des paramètres des performances hydrauliques.....	39
<b>Chapitre VI : Optimisation du rendement de l'osmoseur inverse.....</b>	<b>43</b>
I- Description de la procédure de nettoyage appliqué sur l'unité de l'osmoseur inverse.....	44
II- Bilan de production et rendement après le nettoyage chimique.....	46
<b>Chapitre VII : Estimation du Coût du m<sup>3</sup> d'eau osmosée .....</b>	<b>47</b>
I. Objectif.....	48
Conclusion d'étude.....	50
II.Répartition du coût d'eau osmosée.....	51
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>52</b>
<b>Références bibliographiques</b>	
<b>Annexes</b>	

## Liste des figures

Figure 1. Organigramme de l'entreprise LESAFFRE-MAROC.....	4
Figure 2. Schéma d'une cellule de levure de boulangerie.....	6
Figure 3. Les Modes de reproduction d'une levure .....	7
Figure 4. La chaine de production de la levure .....	10
Figure 5. : Présentation du fonctionnement de la filtration frontale.....	17
Figure 6. : Principe du fonctionnement de la filtration tangentielle .....	17
Figure 7. Echelle de taille d'espèces en solution et types d'opérations de filtration associée	19
Figure 8. Principe de la microfiltration.....	20
Figure 9. Principe de l'ultrafiltration .....	20
Figure 10. Principe d'osmose.....	21
Figure 11. Principe du phénomène d'osmose .....	22
Figure 12. Principe du phénomène d'osmose inverse .....	22
Figure 13. Principe d'un procédé de séparation membranaire .....	23
Figure 14. : Module à fibres creuses .....	24
Figure 15. Structure interne d'un osmoseur spiral .....	24
Figure 16. Principaux éléments d'une installation de traitement par osmose inverse .....	27
Figure 17. Schéma de la station de déminéralisation.....	29
Figure 18. Diagramme ISHIKAWA de la station de traitement d'eau.....	31
Figure 19. Evolution de la concentration de THT au cours de traitement .....	33
Figure 20. Evolution de la concentration de TAC au cours de traitement .....	34
Figure 21. Evolution de la concentration en chlorure au cours de traitement.....	35
Figure 22. Evolution de la concentration en chlore libre au cours de traitement .....	35
Figure 23. Variation du pH au cours de traitement.....	36
Figure 24. Graphe de la variation de la Conductivité.....	37
Figure 25. la variation du SDI en fonction de temps de prélèvement .....	38
Figure 26. la variation du % de rejet des sels pour les membranes d'osmose inverse .....	39
Figure 27. la variation du % passage en sels pour les membranes d'osmose inverse.....	40
Figure 28. Variation de taux de conversion de l'osmoseur en fonction du temps.....	41
Figure 29. Diagramme de nettoyage chimique .....	44
Figure 30. Circuit de nettoyage de l'osmoseur inverse .....	45
Figure 32. Les principaux paramètres entrant dans le calcul du coût d'eau osmosée .....	48
Figure 33. Répartition du coût d'eau osmosée .....	51

## Liste des tableaux

Tableau 1. Principaux ions dans l'eau.....	14
Tableau 2. Procédés membranaires en fonction d'énergie mise en jeu.....	16
Tableau 3. Différents types des membranes organiques .....	18
Tableau 4. Effet de différents paramètres sur la concentration et le débit perméat .....	26
Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques des eaux.....	33
Tableau 6. Efficacité par paramètre.....	39
Tableau 7. Analyse des problèmes possibles d'un système d'OI.....	42
Tableau 8. Les avantages des produits utilisés dans le nettoyage .....	46
Tableau 9. Résultat avant et après le nettoyage chimique. ....	46
Tableau 10. Calcul du coût du circuit de pompage.....	49
Tableau 11. Calcul du coût des produits chimiques.....	49
Tableau 12. Calcul du coût d'amortissement .....	50
Tableau 13. Calcul de l'eau osmosée .....	50

## Liste des abréviations

<i>Abréviation</i>	<i>Explication</i>
TDS	Total de solides dissous
OI	Osmose inverse
S	Surface
e	Epaisseur
$C_p$	Concentration de perméat
$\Delta P$	pression différentielle appliquée à la membrane
$\Delta \pi$	différence de pression osmotique
$\Delta C$	différence de concentration en solutés
$Q_c$	Débit de concentrât
$Q_p$	Débit de perméat
$Q_a$	Débit d'alimentation
$C_r$	Concentration de rejet
$C_p$	Concentration de perméat
$C_a$	Concentration alimentation
$K_p$	coefficient d'échange de la membrane vis à vis de l'eau
$K_C$	coefficient de perméabilité
$K_T$	coefficient de température
$K_S$	coefficient de perméabilité de la membrane aux solutés,
RADEEF	Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité Fès
SPH	Sphérule hydratée
SPI	Sphérule instantanée
THT	Titre Hydrotimétrique Total
TAC	Titre Alcalimétrique Complet
Cl <sup>-</sup>	Chlorure
SDI	Silt Density Index
FC	Facteur de concentration



# Introduction générale

Les usages de l'eau sont extrêmement variés dans l'industrie, tels que le refroidissement par des échangeurs thermiques, la production de la vapeur par la chaudière..., ce qui entraîne des contraintes de qualité très diverses de l'eau afin d'éviter plusieurs problèmes soit au niveau du matériels soit au niveau du produit.

La station de traitement des eaux constitue une unité stratégique pour la société LESAFFRE Maroc, compte tenu de son importance pour le refroidissement des cuves de fermentation de la levure et la production de vapeur nécessaire pour son séchage ainsi la stérilisation des cuves. D'où l'importance d'assurer une alimentation continue en eau traitée (adoucie et osmosée).

L'opération de production d'eau osmosée se fait à l'aide d'un osmoseur selon le principe de l'osmose inverse qui débarrasse l'eau de la majeure partie de ses solutés tels que le calcium et le magnésium qui sont responsables du dépôt de calcaires au niveau de la chaudière et des échangeurs thermiques.

Le présent mémoire est composé de six chapitres :

Le premier chapitre est réservé à la présentation de la Société LESAFFRE-Maroc, le second est une étude bibliographique sur la levure et ses différentes étapes de production, le troisième et le quatrième sont consacrés pour les technologies de traitement des eaux, en faisant l'étude d'une unité d'osmose inverse ainsi qu'une description des différentes filières de prétraitements.

Le cinquième chapitre est consacré au travail expérimental qui consiste en un suivi de la qualité de l'eau potable au cours du procédé de traitement de l'eau. D'une part, d'établir le niveau d'efficacité du traitement et d'autre part, l'établissement du bilan hydraulique de l'osmoseur.

Dans le but de résoudre le problème de diminution de rendement. Le sixième chapitre, fera l'objet d'une optimisation du rendement au niveau de l'osmoseur inverse.

Le dernier chapitre est présenté une étude économique de la station de traitement des eaux.

# *Chapitre I*

## *Présentation de l'Entreprise*

## I. Historique du groupe

L'histoire raconte qu'en **1853** deux frères Louis Lesaffre-Roussel et Louis Bonduelle-Dalle créent une distillerie d'alcool de grains et de genièvre à Marquette-lez-Lille. Un premier moulin est acquis en **1863** à Marcq-en-Baroeul. Mais l'industrie de la levure démarre réellement en Autriche en **1867** avec le procédé **Mautner**. Ce procédé empirique consistait à préparer un moût de grains, de telle sorte que le dégagement gazeux entraînait la levure à la surface où elle était recueillie. Lorsqu'en **1871**, le baron autrichien Max de Springer, propriétaire à Maisons-Alfort près de Paris d'une très belle distillerie, rapporte de chez Mautner [1], à Vienne, l'idée d'extraire la levure des moûts de fermentation des grains et de la vendre aux boulangers. Lesaffre & Bonduelle décident à leur tour en **1873** de développer la fabrication de levure fraîche à Marcq-en-Baroeul, à la place de l'ancien moulin. Mais contre toute attente en **1901**, les familles Lesaffre et Bonduelle décident de poursuivre séparément leurs activités. L'entreprise est partagée en 3 branches :

Lesaffre & Cie (alcool et levure)

Lesaffre Frères (sucrierie et distillerie).

Bonduelle est aujourd'hui un acteur reconnu sur le marché du légume.

Mais en **1910**, l'usine de Marcq-en-Baroeul subit un grand incendie qui la détruit totalement, elle est reconstruite. **1923** avec la crise de l'alcool de grains, l'Etat français décide brutalement d'augmenter les prix, rendant sa production économiquement impossible. Une nouvelle matière première pour la levure sera trouvée, **la mélasse**, moyennant quelques aménagements techniques. De **1939-1945** lors de la seconde guerre mondiale, Lesaffre met au point des produits à base de levure destinés à atténuer la pénurie alimentaire : production de la première levure sèche active. L'envolée vers l'international aura lieu entre 1963 et 2000 dont une implantation au Maroc.

### I.1. Lesaffre-Maroc

En **1993**, la société SODERS (créée en 1975) a été majoritairement détenue par le groupe français LESAFFRE, renommée « LESAFFRE-MAROC ». Elle représente la première entreprise privatisée du Maroc bénéficiant de l'expertise du leader mondial dans la fabrication de la levure de panification.

Son siège est situé au quartier industriel SIDI BRAHIM Fès. Elle produit environ 30.000 tonnes de levures par an avec un effectif de 200 personnes et un capital de 30.800.000 DH, elle est subdivisée en un site de production à Fès et un BANKING CENTER à Casablanca.

Ce dernier site constitue une vitrine des produits formations et des démonstrations applicables à leur métier

### I.2. Produits et marques de référence

LESAFFRE-MAROC est spécialisée dans la fabrication de levure fraîche "levure pressée" conditionnée en pain de 500g et dans la production de levure sèche conditionnée en sachet de 50g, 125g et 500g. Ce dernier type se subdivise en deux produits:

La **SPI**: levure sèche instantanée.

La **SPH**: levure sèche à réhydrater.

Il fabrique et commercialise la levure fraîche sous la marque **Jaouda, Rafiaa et Nevada** pour la sèche.

Les améliorants de panification sont quant à eux commercialisés sous les marques **bleu** et **Magimix**. Tout ceci est produit, conditionné, contrôlé et distribué par une organisation d'entreprise bien ficelée.

### I.3. Organigramme de l'entreprise

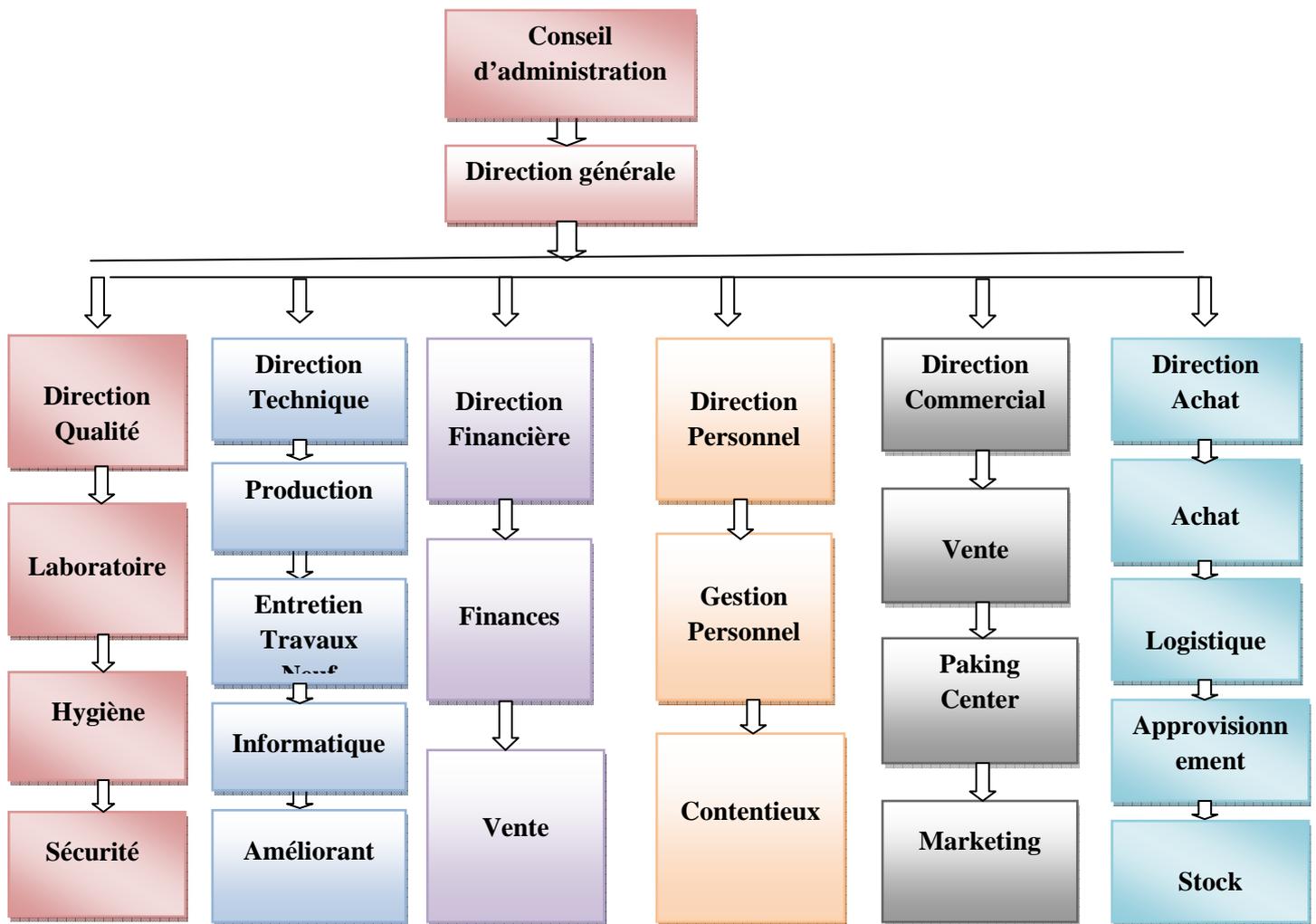


Figure 1. Organigramme de l'entreprise LESAFFRE-MAROC

## *Chapitre II*

# *La levure Saccharomyces Cerevisiae et Sa Chaîne de Production*

## I. La levure *Saccharomyces Cerevisiae*

### I.1. Principales caractéristiques

La levure de boulangerie est un champignon unicellulaire, de la classe des Ascomycètes (présence de sacs renfermant des spores), du genre *Saccharomyces* (le nom réfère à son affinité pour le sucre) et de l'espèce *Cerevisiae* (le nom évoquant celui de cervoise, jadis donné à la bière) [2] ; le nom *Saccharomyces Cerevisiae* a été donné à la levure de bière en 1838 par Meyer [1]. Au microscope optique, elle a une forme ovoïde, de 4 à 10  $\mu\text{m}$  de diamètre. Un gramme de levure pressée contient 8 à 10 milliards de cellules. Sur une coupe observée en microscopie électronique, on distingue comme le montre la figure ci-dessous les différentes parties de la levure :

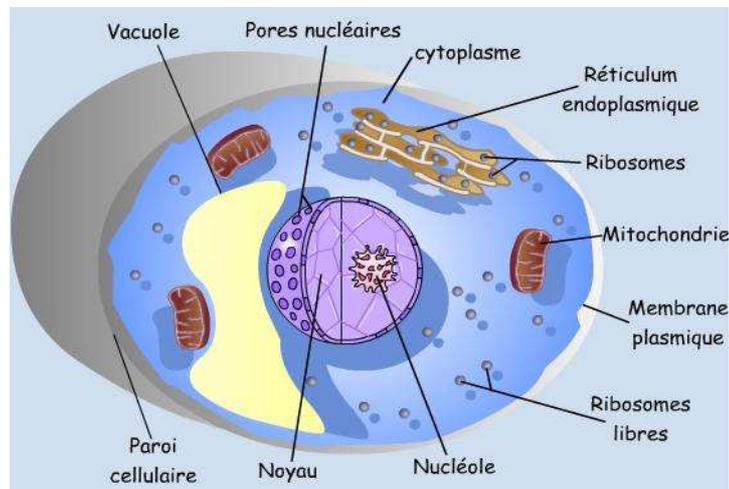


Figure 2. Schéma d'une cellule de levure de boulangerie

Elle est la plus utilisée en industries et en boulangerie mais il en existe pour des applications boulangères précises.

### I.2. Métabolisme

La levure de boulangerie appartient à un groupe relativement mineur de levures : les levures aérobies facultatives et fermentaires, capables d'utiliser le glucose en présence ou en absence d'oxygène et de fermenter le glucose même en présence d'air. La levure utilise l'énergie du glucose. Lors de l'oxydation du glucose, deux cas de figures peuvent apparaître selon que l'on est en présence ou en absence d'oxygène. Les quantités d'énergie libérées sont alors différentes.

En **anaérobiose**, le sucre est fermenté. L'oxydation du glucose est incomplète :



Cette voie métabolique, appelée glycolyse, fait intervenir au moins de 12 enzymes, qui constituent de 30 à 65 % des protéines cytosoliques selon les cas. On estime que 95 %

du glucose est transformé en  $\text{CO}_2$  plus alcool et que 5 % aboutit à des produits de fermentations secondaires : glycérol, acides organiques, aldéhydes, esters, alcools supérieurs, etc.

L'ensemble de ces réactions est la base de la fermentation panaière : le gaz carbonique provoque la levée de la pâte tandis que les métabolites secondaires contribuent à la création du goût et de l'arôme du pain.

En **aérobiose**, l'oxydation du glucose est complète :

**Glucose +  $\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$  + eau + énergie** (688 kcal soit 2 880 KJ/mole)

Comme en anaérobie, le glucose suit la voie de la glycolyse jusqu'au pyruvate; mais, en présence d'oxygène, celui-ci ne sera pas transformé en éthanol mais en acétyl-CoA qui permettra l'entrée dans le cycle de Krebs. En raison de son meilleur rendement énergétique, la voie respiratoire est utilisée préférentiellement par la levure. Cependant, si la concentration en sucre du milieu augmente ( $> 100 \text{ mg/L}$ ), il y a inhibition de la respiratoire par la fermentation et production d'alcool malgré la disponibilité d'oxygène. C'est *l'effet Crabtree*, appelé aussi effet glucose ou répression catabolique ou, dans certains documents anciens ; <contre-effet Pasteur> : le glucose réprime l'expression de gènes codant pour des enzymes impliquées dans son propre métabolisme ou dans celui d'autres sources de carbone. Dans la levure, ce sont principalement les enzymes du cycle de Krebs qui sont soumises à la répression catabolique.

Ce phénomène de répression catabolique revêt une grande importance dans la production industrielle de levure et justifie le procédé d'alimentation continue, appelé procédé <fedbatch>.

### I.3. Mode de reproduction

Elle a 2 modes : par bourgeonnement et une reproduction sexuée lorsqu'il y a carence en nutriments et en présence d'acétate.

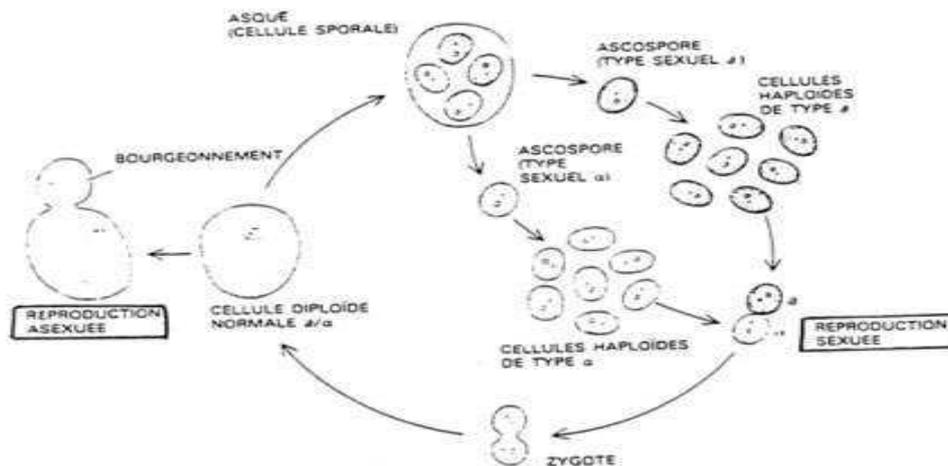


Figure 3. Les Modes de reproduction d'une levure

Chez *Saccharomyces Cerevisiae* et d'après la figure précédente, de nombreuses recombinaisons géniques ont lieu lors de la méiose d'où une grande diversité génétique des haploïdes (haploïdes de types  $\alpha$  et  $a$ ) et la possibilité d'établir des programmes de croisements entre haploïdes issus de souches ayant des propriétés différentes. Bien que les protocoles utilisés

dans les laboratoires universitaires ne puissent être transposés aux souches industrielles, en raison de la faible fréquence d'obtention de spores viables et de l'impossibilité d'utiliser des tests simples pour la sélection, c'est ainsi pourtant que nombre de souches de levure de boulangerie utilisées actuellement en industries ont été construites. [3]

Ces différentes souches s'adaptent donc à différentes chaînes de production dont celle de LESAFFRE-MAROC.

## II- Procédé de production de la levure

### II.1. Echelle laboratoire

A partir d'une souche soigneusement sélectionnée on obtient une cellule de "*Saccharomyces cerevisiae*" qui est inoculée dans un ballon de culture appelé Van Lear à une température inférieure à 5°C contenant un milieu nutritif pour favoriser la première multiplication et donc l'obtention de plusieurs cellules, après 24h les levures obtenues sont inoculées dans une autre verrerie nommée Carlsberg à une température de 28°C et on laisse 24h avec une agitation pour l'aération de la levure.

On obtient donc une quantité de levure suffisante pour passer à l'échelle semi industriel qui se déroule dans une cuve de 800 litres en ajoutant cette fois la mélasse et d'autres ingrédients tels que l'Urée qui contient de l'azote et le phosphate que la levure nécessite ainsi qu'une quantité d'air (O<sub>2</sub>).

### II.2. Echelle industriel

#### \* Pré-fermentation

Cette opération se poursuit dans un pré-fermenteur bien nettoyé par la soude à une température de 90 °C et rincé à l'eau. Avant le refoulement du volume de 800L, le milieu doit être préparé par les éléments suivants : la cuve est remplie par le volume d'eau nécessaire, on ajoute le sulfate de magnésium, les vitamines, l'eau de javel pour la stérilisation et l'acide sulfurique pour ajuster le pH.

La mélasse, sulfate d'ammonium et le mono ammonium phosphate sont ajoutés graduellement au cours de la pré-fermentation selon les besoins de la levure. L'air aussi est apporté graduellement avec le temps suivant la concentration de la levure dans le milieu.

#### \* fermentation de la levure mère

Après la pré-fermentation on passe à la fermentation de la levure mère qui se fait dans des grandes cuves. Dans cette étape l'alimentation en mélasse et les autres ingrédients sont continue après un temps de 17h, on aura une grande population de levure sous forme liquide qu'on appelle le moût.

On ajoute aussi une anti-mousse pour éviter les mousses qui se produisent lors de la fermentation.

### \* Séparation de la levure mère

Dès que la fermentation de la levure mère touche sa fin, on arrête la nutrition, le moût levuré est envoyé vers un séparateur centrifuge afin de séparer la phase solide (crème) de la phase liquide (moût délevuré). La crème obtenue sera stockée dans des cuves munies d'un système de refroidissement pour assurer une température de 4°C.

### \* Fermentation de la levure commerciale

La crème déjà séparée constitue le pied d'ensemencement pour la fermentation commerciale. Cette étape de fermentation se déroule dans des fermenteurs de capacité plus grande, elle permet d'obtenir le produit fini, son principe est le même que celui de la fermentation de la levure mère, Après 17 h de fermentation, le contenu est refoulé vers la station de séparation.

### \* Séparation de la levure commerciale

Cette station comporte deux lignes de séparation en parallèle, et au niveau de chaque ligne se trouvent deux séparateurs montés en série, le premier sépare le moût délevuré de la crème et le deuxième séparateur fini le travail en mélangeant la crème avec l'eau pour éliminer le maximum de moût délevuré et éclaircir sa couleur. La crème commerciale ainsi obtenue est stockée dans des cuves de garde à une température de 4°C.

### \* Conditionnement

#### - **Levure fraîche**

Le conditionnement débute par la filtration de la crème sur des filtres rotatifs sous vide. Cette phase essentielle permet de passer d'une crème de levure à 22% de matière sèche à un gâteau de levure à 32% de matière sèche, donnant après boudinage la levure bien fiable que le boulanger recherche.

Le boudin de levure pressée est découpé en pain de 500g, qu'on enveloppe individuellement dans un papier paraffiné. Après mise en carton, la levure est conservée en chambre froide afin d'être réfrigérée à cœur avant son expédition.

#### - **Levure sèche**

Pour la levure sèche, le gâteau provenant de la filtration sous vide est mélangé avec une quantité d'émulsifiant qui sert à conserver le produit plus longtemps et donne aussi la couleur blanche caractéristique de la levure.

Le gâteau obtenu est transformé en vermicelle à l'aide d'une grille de porosité connue, ensuite elle est transférée au sécheur par une conduite vibratoire afin d'éliminer le maximum d'eau restant dans la cellule sans l'endommager, tout en augmentant le taux de matière sèche.

On distingue deux types de levure sèche :

#### ➤ **La levure sèche active ou SPH :**

Sous forme de petits grains sphériques, sa durée de séchage est d'environ quatre heures pour une qualité de 400kg à 500kg, et s'effectue à 45°C.

➤ La levure sèche instantanée ou SPI :

Sous forme des bâtonnets, elle a une durée de séchage réduite, durant 20 min environ pour une quantité de 1000 Kg. Elle est caractérisée par une force fermentaire supérieure à celle de la SPH.

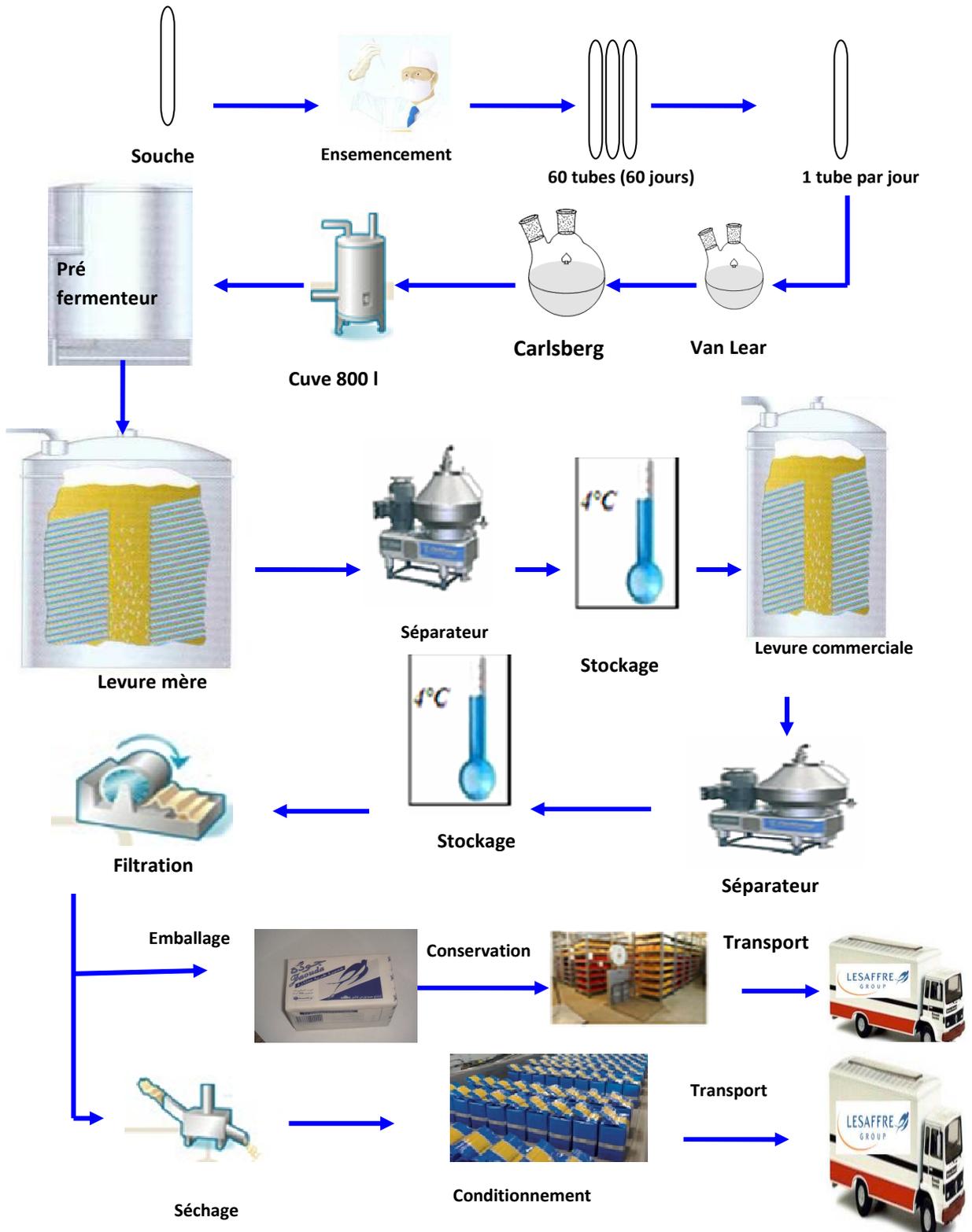


Figure 4. La chaîne de production de la levure



***Chapitre III***  
***Traitement de L'eau***

## I. L'eau

### I.1. Propriétés

L'eau pure est un liquide inodore et sans goût sous une pression atmosphérique normale (760 mm de mercure) le point de congélation de l'eau est de 0°C et son point d'ébullition est de 100°C.

L'eau est un des agents ionisant les plus connus comme la plus part des substances sont solubles dans l'eau, on l'appel fréquemment le solvant universel.

L'eau s'allie avec certains sels pour former des hydrates et réagit avec les oxydes des métaux pour former des acides. Elle est utilisée comme Catalyseur dans de nombreuses réactions chimiques importantes.

### I.2. Etat naturel

L'eau est le seul composé qui peut se trouver dans les trois états de la matière (solide, liquide et gazeux), aux températures ordinaires. A l'état solide glace on le trouve également sous forme de neige. Elle se présente à l'état liquide dans les nuages, gouttes lettes d'eaux. Elle recouvre les trois quart de la surface de la terre sous la forme de marrais, On le trouve à l'état de gaz ou vapeur d'eau dans les brouillards et les nuages et l'humidité de l'atmosphère.

## II. Problèmes liés à l'utilisation d'eau brute

### II.1. Entartrage

L'entartrage des chaudières est causé par les impuretés de l'eau ayant précipitées directement sur les surfaces de transfert de chaleur ou par les matières en suspension se déposants sur le métal et devenant dures et adhérentes. L'évaporation dans les chaudières augmente la concentration en impuretés. Celles-ci interfèrent avec les transferts de chaleur et peuvent entraîner des points chauds menant à des surchauffes locales. Moins la chaleur est conduite, plus les surchauffes peuvent être dangereuses.

L'entartrage est principalement dû à la présence des sels de calcium et de magnésium (carbonates ou sulfates), qui sont moins solubles chaud que froid, ou dû à la présence de concentration élevée en silice en relation avec l'alcalinité de l'eau de chaudière.

- Le dépôt carbonate est généralement granulaire et, parfois, de nature poreuse. Les cristaux de carbonate de calcium sont nombreux mais sont emmêlés avec des particules d'autres matériaux finement divisés de sorte que le tartre soit dense et uniforme. L'envoi de ce tartre dans une solution acide peut facilement identifier un dépôt de carbonate par une effervescence des bulles de dioxyde.
- Un dépôt sulfate est plus dur et plus dense qu'un dépôt de carbonate parce que les cristaux sont plus petits et plus unis. Un dépôt de sulfate est fragile, ne se pulvérise pas facilement et ne provoque pas d'effervescence quand il est en présence d'acide.

- Un fort dépôt en silice est très dur, ressemblant à la porcelaine. Le cristal de silice est extrêmement petit, formant un tartre très dense et imperméable. Ce tartre est extrêmement fragile et très difficile à pulvériser. Il n'est pas soluble dans l'acide chlorhydrique et est généralement très coloré.

- Les dépôts de fer, dus à la corrosion ou à une contamination au fer dans l'eau, sont de couleur foncée. Les dépôts de fer dans les chaudières sont plus souvent magnétiques.

Ils sont solubles dans les acides forts donnant une solution marron foncée.

S'il n'est pas traité, l'entartrage entraîne une baisse progressive du rendement de la chaudière, en agissant comme un isolant. Eventuellement, la composition du tartre causera une surchauffe et une rupture.

Les dépôts dans la chaudière peuvent aussi entraîner des bouchages ou une obstruction partielle due à l'attaque corrosive. En général, les dépôts peuvent affecter l'efficacité opérationnelle, produire des dommages, des interruptions non-programmées de la chaudière, et une augmentation des dépenses dues au nettoyage. [4]

## II.2. Moussage et primage

Le primage de l'eau de chaudière est la contamination de la vapeur par des solides présents dans l'eau. Les bulles ou la mousse sont créés à la surface de l'eau des chaudières et sortent avec la vapeur. Ceci est appelé le moussage et est causé par de forte concentration en solides dans l'eau des chaudières. Cependant, On croit généralement que les substances spécifiques telles que les semences alcalines, les huiles, les corps gras, les graisses, certains types de matière organique et les solides suspendus sont particulièrement favorables à la formation de moussage. En théorie, les solides en suspension se rassemblent sur un film à la surface entourant la bulle de vapeur et la rendent plus dure. Ainsi, la bulle de vapeur résiste à la cassure et s'accumule en mousse. Plus les particules sont fines, meilleur est leur accumulation en bulle.

Certains mécanismes d'entraînement de gouttes d'eau de chaudière dans la vapeur ont toujours lieu. Quand le transfert est trop excessif, les solides portés par la vapeur entraînent la formation de dépôts. Ces accumulations ont une composition similaire de celle des solides dissous dans l'eau de chaudière. Le primage est couramment causé par de hauts niveaux de transfert de l'eau. Ces conditions mènent souvent à une rupture des tuyaux des surchauffeurs. Le primage est relatif à la viscosité de l'eau et à sa tendance à mousser. Ces propriétés sont commandés par l'alcalinité, la présence de certaines substances organiques et par la salinité ou le TDS. [5]

Tableau 1. Principaux ions dans l'eau

les cations		les anions	
calcium	$\text{Ca}^{2+}$	Carbonate	$\text{CO}_3^{2-}$
magnésium	$\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonate	$\text{HCO}_3^-$
sodium	$\text{Na}^+$	Chlorure	$\text{Cl}^-$
potassium	$\text{K}^+$	Sulfate	$\text{SO}_4^{2-}$
Fer	$\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$	Nitrate	$\text{NO}_3^-$
manganèse	$\text{Mn}^{2+}$	Silice	$\text{SiO}_2$
Zinc	$\text{Zn}^{2+}$	Phosphate	$\text{PO}_4^{3-}$
cuivre	$\text{Cu}^{2+}$	Hydroxyle	$\text{OH}^-$



***Chapitre IV***  
***Procédés membranaires***

Avant d'entamer les différents types de procédés membranaires et leurs modes de fonctionnement il est nécessaire de définir les termes suivants :

- **La filtration sur membrane** : est une technique qui utilise une membrane poreuse ou un filtre, pour séparer des particules dans un liquide. Les particules sont séparées selon leur taille et leur forme sous l'effet de la pression à travers des membranes munies de pores de différentes tailles.

Bien qu'il existe différentes méthodes de filtration sur membrane (osmose inverse, nano filtration, ultrafiltration et microfiltration).

De manière à accroître la taille des pores, toutes ont pour but de purifier, fractionner ou concentrer des espèces dissoutes ou en suspension dans un solvant au travers d'une membrane.

- **Les membranes** : Une membrane est une barrière physique permettant sous l'effet d'une force l'arrêt ou le passage de substances entre les deux milieux qu'elle sépare.

- **Solvo-transfert** : C'est une opération consiste, en revanche à faire traverser des membranes semi perméables par un fluide par convection forcée. [6]

## 1. Classification des procédés membranaires

On peut classer les procédés membranaires selon deux types de classifications :

- A partir des composés qui passent à travers la membrane (soluté ou solvant).
- A partir du type de membrane et de la forme d'énergie mise en jeu pour assurer le transfert du solvant et/ou du soluté.

Tableau 2. Procédés membranaires en fonction d'énergie mise en jeu

Source d'énergie	Mécanisme	Technique
- Gradient de concentration	- Diffusion	- Osmose inverse et nano filtration
- Gradient de pression	- Convection	- Micro, nano et ultrafiltration
- Gradient de potentiel	- Migration	- Electrodialyse

## II. Modes de fonctionnement

Les membranes peuvent être utilisées en filtration selon deux fonctionnements principaux. La filtration frontale (Dead end) ou la filtration tangentielle (cross flow). Ces deux modes sont très importants et correspondent à deux technologies et deux approches complètement différentes de la filtration.

### II.1. Filtration frontale

La filtration frontale est la plus simple à mettre en œuvre et la moins onéreuse, dont le principe est de filtrer la solution perpendiculairement à la surface de la membrane. Toute la matière retenue s'accumule sur la membrane. Ce type de procédé n'atteint jamais un état stationnaire. La filtration frontale est une technique qui nécessite un faible investissement, et des coûts énergétiques de fonctionnement qui sont faibles. Par contre, ce type de fonctionnement permet essentiellement de filtrer des suspensions qui sont considérées comme faiblement colmatantes dans un secteur d'activité donné.

Cette technique est utilisée en traitement de l'eau pour sa potabilisation, mais aussi dans le secteur médical pour enlever toute trace de virus ou de bactérie. [5]

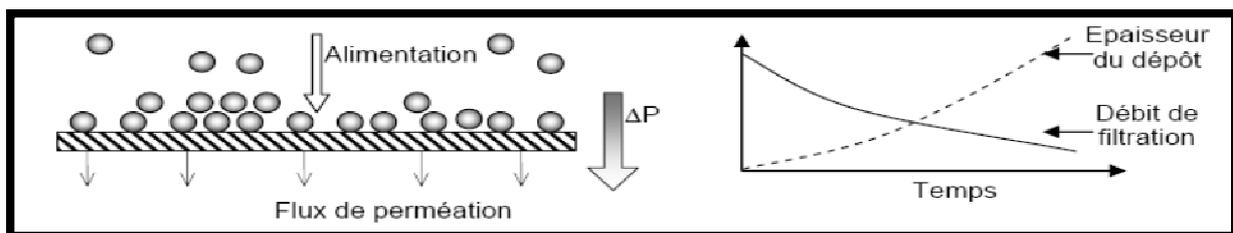


Figure 5. : Présentation du fonctionnement de la filtration frontale

### II.2. Filtration tangentielle

La filtration tangentielle consiste à faire circuler le liquide à filtrer parallèlement à une membrane poreuse, sous l'action d'un gradient de pression, le liquide passe au travers de la membrane et se clarifie. Le flux tangentiel crée des turbulences, des contraintes de cisaillement qui limitent l'accumulation de particules à la surface de la membrane.

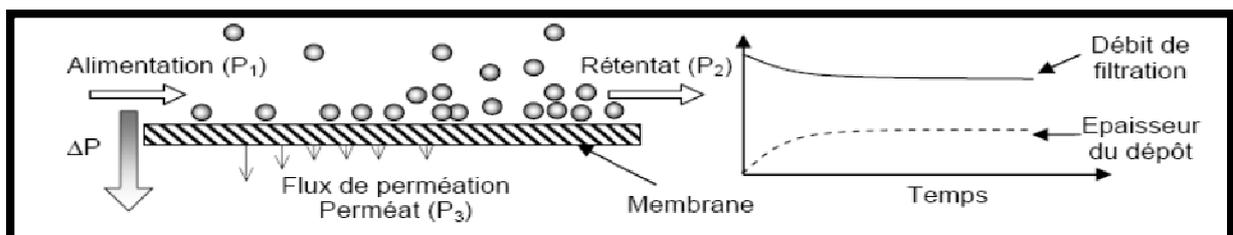


Figure 6. : Principe du fonctionnement de la filtration tangentielle

### III. Différents types des membranes

Les membranes sont classées Selon la nature de leurs matériaux constitutifs on parle également de :

- Membranes Organiques.
- Membranes Inorganiques (minérales).
- Membranes composites.
- Membranes échangeuses d'ions.

Les matériaux doivent avoir une résistance chimique, thermique et mécanique en accord avec le procédé et le fluide utilisé.

#### a- Membranes organiques

Elles sont fabriquées, pour la plupart d'entre elles, à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, poly sulfones, polyamides, etc.). Les qualités de ces matériaux leur confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications. Environ 90 % des membranes d'ultrafiltration et de microfiltration sont constitués de membranes organiques. [7]

Tableau 3. Différents types des membranes organiques

	Avantages	Inconvénients
Acétate de cellulose	Perméabilité élevée Sélectivité élevée Mise en œuvre assez aisée Adsorption des protéines faible => colmatage moindre	Sensible à la température Sensible au pH Sensible au chlore Sensible au compactage Sensible aux microorganismes
Type polyamide	Bonne stabilité chimique, thermique et mécanique.	Grande sensibilité au chlore Faible perméabilité Phénomènes d'adsorption
Type polysulfone	Bonne stabilité thermique et au pH Résistance au chlore 5 mg/l fonctionnement normal 50 mg/l stockage 200 mg/l traitement de choc	Sensible au compactage Adsorptions
Matériaux acryliques	Bonne stabilité thermique et chimique Stockage à sec possible	Faible résistance mécanique Pores de diamètres assez élevés
Matériaux fluorés	Bonne stabilité thermique et chimique	Faible perméabilité Microfiltration uniquement
Membranes composites	Bonnes caractéristiques : perméabilité et sélectivité Stabilité de pH 2 à 11 Bonne tenue en température	

**b- Membranes minérales**

Les membranes minérales sont composées de corps entièrement minéraux (matières céramiques, métal fritté, verre...).

Les principales membranes inorganiques commercialisées sont réalisées aujourd'hui avec des supports composés d'éléments tubulaires ou multicanaux, généralement préparés par extrusion.

**c- Membranes composites**

Apparues au début des années 1990, elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques (superposition de polymères organiques différents), organo-minérales ou minérales (association de carbone ou d'alumine comme support et de métaux tels la zircone, l'alumine et le titane).

**d- Membranes échangeuses d'ions**

Introduites en 1950, elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro-déionisation font appel à cette technologie. Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux.

**IV. Différents types de filtration membranaire**

Il existe quatre procédés membranaires à gradient de pression : la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) et l'osmose inverse (OI). Ces procédés se distinguent par la taille et le type des espèces qu'ils peuvent séparer.

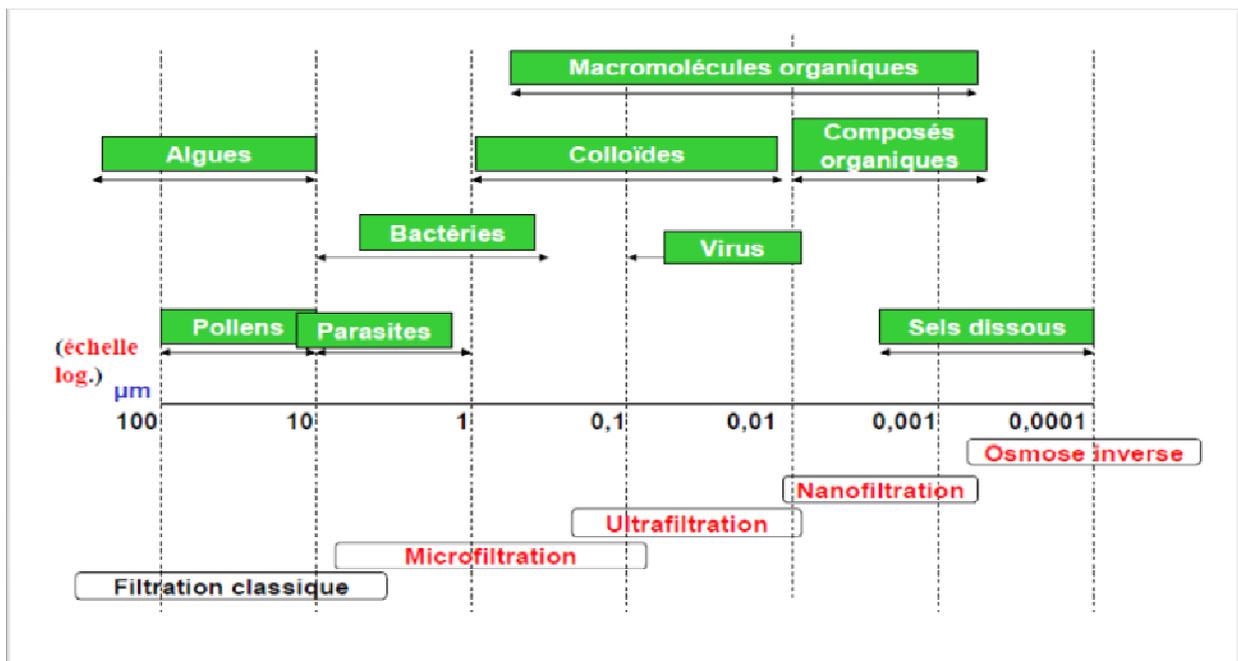


Figure 7. Echelle de taille d'espèces en solution et types d'opérations de filtration associées

### a- Microfiltration

La microfiltration est un procédé de conservation des aliments par lequel les bactéries et germes indésirables sont extraits de l'aliment liquide. Cet aliment peut ultérieurement se conserver au froid pour une période limitée.

Ce procédé de séparation solide-liquide met en œuvre des membranes dont les diamètres de pores sont compris entre 0,1 et 10  $\mu\text{m}$ . Il permet donc la rétention des particules en suspension et les bactéries.

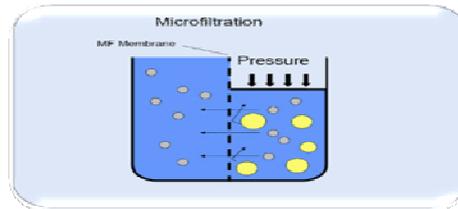


Figure 8. Principe de la microfiltration

### b- Ultrafiltration

L'Ultrafiltration utilise des membranes microporeuses dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm. De telles membranes laissent passer les petites molécules et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, protéines, colloïdes).

Les applications sont multiples. Parmi celles qui nous intéressent, on retrouve la séparation des métaux lourds après complexation ou précipitation, mais cela nécessite donc un ajout de produits chimiques.

L'Ultrafiltration (UF) est une sorte de filtration sur membrane où le liquide traverse une membrane semi-perméable grâce à une différence de pression (pression transmembranaire ou TMP). Les particules en solution ou en suspension de haut poids moléculaire sont retenues tandis que l'eau et les molécules de faible poids moléculaire passent à travers la membrane.

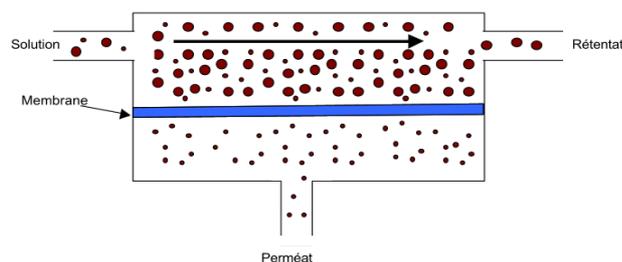


Figure 9. Principe de l'ultrafiltration

### c- Nanofiltration

Cette technique se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Elle permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre (soit 10  $\text{\AA}$ ) d'où son nom.

Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200 - 250 g/mol ne sont pas retenus par ce type de membrane.

Les sels ionisés multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates...) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 250 g/mol sont, par contre, fortement retenus.

La nanofiltration est effectuée sur une membrane semi-perméable et est principalement utilisée pour enlever les ions tels que les métaux lourds. Cette technique peut être perçue comme une filtration membranaire de type osmose inverse et de piètre qualité. En effet, la nano filtration utilise des membranes moins fines, la pression d'alimentation d'un système de nano filtration est généralement faible comparée à celle d'une osmose inverse.

Elle a été surtout utilisée dans l'adoucissement de l'eau (enlèvement des ions bivalents, en l'occurrence le calcium et le magnésium responsables de la dureté). Actuellement, c'est un procédé de choix pour le traitement des eaux de surface (eaux de lacs et rivières) et des eaux saumâtres (eaux de qualité intermédiaire entre l'eau de surface et l'eau de mer du point de vue de la salinité).

#### d- Osmose

L'osmose est un phénomène de diffusion de la matière mis en évidence lorsque des molécules de solvant traversent une membrane semi-perméable séparant deux solutions dont les concentrations en soluté sont différentes ; le transfert de solvant se fait alors de la solution la moins concentrée (milieu hypotonique) vers la solution la plus concentrée (milieu hypertonique) jusqu'à l'équilibre (milieux isotoniques). [7]

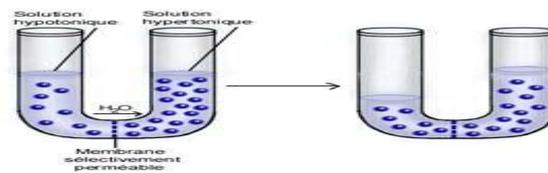


Figure 10. Principe d'osmose

## V. Techniques d'osmose inverse

### V.1. Principes de l'osmose inverse

Pour expliquer le principe de l'osmose inverse, il est important de passer par l'explication du phénomène inverse : l'osmose.

L'osmose est un phénomène naturel qui se traduit par le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions

de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigée de la solution diluée en sel vers la solution concentrée de telle façon à obtenir deux milieux de concentration uniforme.

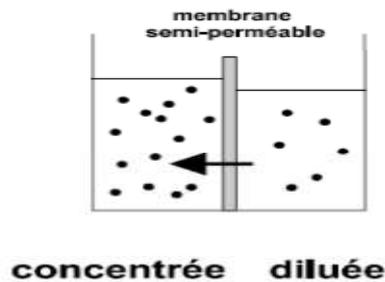


Figure 11. Principe du phénomène d'osmose

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler et il n'y aura plus de transfert de part et d'autre de la membrane semi-perméable cette pression est nommée la pression osmotique  $\pi$ .

Donc l'osmose inverse consiste à appliquer une pression  $P$  plus élevée que la pression osmotique  $\pi$  sur le milieu le plus concentré. Ainsi on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique.

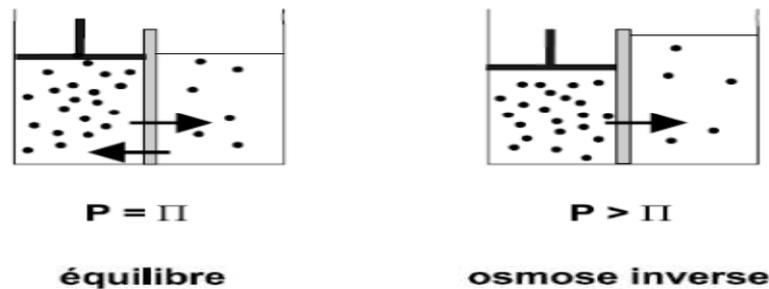


Figure 12. Principe du phénomène d'osmose inverse

### ✚ La pression osmotique

Comme définie précédemment la pression osmotique  $\pi$  est la pression qu'on doit appliquer pour qu'il n'y ait pas de transfert aux deux côtés de membranes : c'est la pression d'équilibre. [8]

Cette pression est donnée par la relation suivante:  $\pi = i \cdot C \cdot R \cdot T$

Avec :

- $i$  est le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté
- $C$  la concentration molaire du soluté ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ )
- $T$  la température (K)
- $R$  la constante des gaz parfaits ( $8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

## V.2. Différents types d'osmoseurs

Il existe 4 grands types de modules sont commercialisés :

- ❖ Les modules tubulaires
- ❖ Modules plans
- ❖ Modules à fibres creuses
- ❖ Modules spiraux

Dans la plupart des cas, le module membranaire est constitué au final d'une entrée (alimentation) et deux sorties, la partie du fluide étant passé à travers la membrane (perméat) et la partie ayant été retenue (retentat).

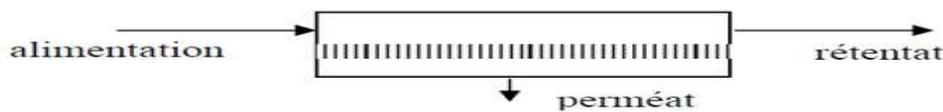


Figure 13. Principe d'un procédé de séparation membranaire

### a- Modules tubulaires

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle, L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiels. C'est le seul type de module qui peut être nettoyé mécaniquement avec un système de balles de mousse qui raclent les parois des tubes.

L'écoulement à l'intérieur des tubes est turbulent. A cause de la taille des canaux tangentiels, cette configuration entraîne a priori une dépense d'énergie plus importante que dans les autres configurations. [7]

### b- Modules plans

Les modules plans sont les plus anciens et les plus simples : les membranes sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides. [7]

### c- Modules à fibres creuses

Les fibres creuses sont assemblées en parallèle suivant deux configurations :

- Configuration Int-Ext (schéma a) : comme c'est le cas pour les modules tubulaires, l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres. Il y a un écoulement tangentiels canalisés à l'intérieur des fibres.
- Configuration Ext-Int (schéma b et c) : l'eau circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres. L'écoulement entre les fibres est libre.

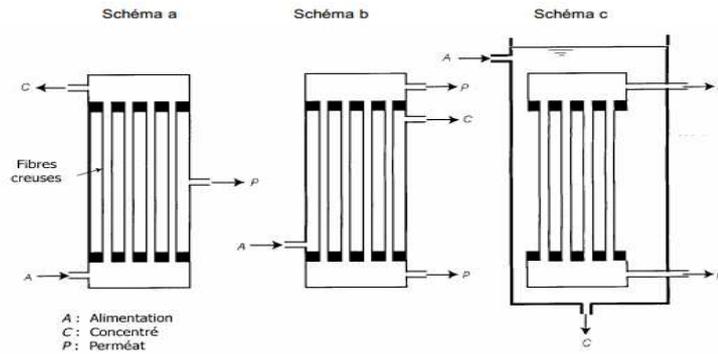


Figure 14. : Module à fibres creuses

**d- Modules spiraux**

Au sein des modules spiraux, une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le filtrat. On obtient ainsi un cylindre multicouche où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux. [7]

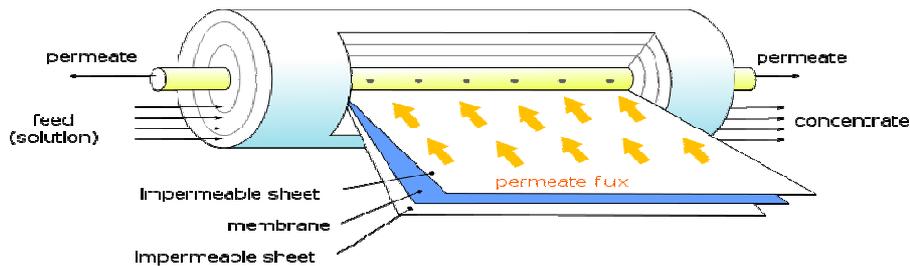


Figure 15. Structure interne d'un osmoseur spiral

**V.3. Limites du procédé**

**❖ Colmatage des membranes**

Le colmatage peut être défini comme le dépôt de particules, de colloïdes, de macromolécules, de sels retenus à la surface ou dans la membrane, qui provoque la décroissance continue et progressive du flux en quelques secondes ou en quelques mois.

Le type de séparation et le type de membrane déterminent l'étendue du colmatage. La cause peut être un précipité organique ou minéral, ou encore le dépôt de particules solides. Pour certaines solutions, le colmatage dépendra de paramètres physiques ou chimiques comme la concentration, la température, le pH, la force ionique des solvants et des composés, et le choix du matériau membranaire.

Ce serait un non-sens de vouloir supprimer complètement le colmatage puisqu'il est inhérent à la conception des procédés à membranes, mais il est possible de le prévoir et de le réduire. Les modèles les plus simples donnant une description raisonnable du phénomène sont de type semi-empirique.

Il existe plusieurs types de colmatages :

- Le colmatage "rapide" est un phénomène d'adsorption. Il peut intervenir en un temps très court : un moyen de détection simple est de mouiller la membrane avec le liquide d'alimentation sans appliquer de pression. Si une décroissance marquée du flux est observée en sortie, cela indique une forte probabilité de colmatage "rapide" causé par des composés présents dans l'alimentation et rapidement adsorbés dans les pores de la membrane testée.
- Le colmatage "cumulatif" est la lente dégradation du flux transmembranaire pendant une série d'expériences. Il peut réduire le flux du perméat de moitié à plus ou moins longue échéance. C'est souvent le résultat de la décomposition progressive de composés au contact de la membrane et d'un réarrangement en une couche stable difficile à supprimer.
- le colmatage "destructif" est, comme son nom l'indique, totalement irréversible. Une substance présente dans l'alimentation, parfois même à très faible concentration, ayant une affinité pour le matériau de membrane, est habituellement coupable. Certains composés peuvent lentement s'adsorber dans la membrane et dans les plus mauvais cas changer irréversiblement la structure de la membrane.

Comme la modélisation du colmatage est quasi impossible, une mesure de la tendance au colmatage par des tests préventifs simples adaptés à chaque procédé ou à chaque membrane est plus appropriée. Beaucoup de ces tests sont décrits au cas par cas par les fabricants de membranes.

#### V.4. Paramètres de fonctionnement

Les principaux paramètres de fonctionnement d'une unité d'osmose inverse sont : La pression osmotique, débits de l'eau osmosée et d'eau concentrée, le taux de conversion, le taux de rejet, le passage en sel et la salinité du perméat. [6]

##### **Loi de Fick**

Elle précise les paramètres influençant la production d'une membrane d'osmose :

$$Q_p = K_p \cdot \left( \frac{S}{e} \right) \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) \cdot K_T \cdot K_c$$

### Loi de Henry

Cette loi précise les paramètres influençant la rétention des sels par une membrane d'osmose :

$$Q_c = K_s \cdot \left( \frac{S}{e} \right) \cdot \Delta C \cdot K_T \cdot K_c$$

À l'aide de ces deux dernières équations, on déduit que la concentration en sels dans l'eau produite est :

$$C_p = \frac{Q_c}{Q_p} = \frac{K_s \cdot \Delta C}{K_p (\Delta P - \Delta \Pi)}$$

On notera que, le coefficient  $K_T$  s'éliminant, la concentration en sels  $C_p$  est indépendante de la température de l'eau en théorie. Nous pouvons donc dresser le tableau récapitulatif suivant :

Tableau 4. Effet de différents paramètres sur la concentration et le débit perméat

	Effet sur le débit de perméat	Effet sur $C_p$
Augmentation de pression	Augmente	Diminue
Augmentation de la température	Diminue	Reste constant
Augmentation de la salinité	Augmente	Augmente

#### a- Taux de conversion

Le taux de conversion d'un module (ensemble de membrane) est le rapport des débits d'eau produite et celui de l'eau d'alimentation :

$$Y = \frac{Q_p}{Q_a}$$

Son corollaire est le facteur de concentration FC qui compare le débit d'alimentation  $Q_a$  du module à celui de du rejet  $Q_r$ .

$$FC = \frac{C_a}{C_r} = \frac{1}{1 - Y}$$

**b- Taux de rejet**

Etant le pourcentage de sels rejetés par le module par rapport à la concentration de l'eau à déminéraliser, est donné par la relation :

$$\% \text{ Rejet en Sels} = \left( 1 - \frac{C_p}{C_a} \right) * 100$$

Soit :

$$\% \text{ Rejet en Sels} = \left( 1 - \frac{\text{Salinité perméat}}{\text{Salinité alimentation}} \right) * 100$$

**c- Passage en sel**

Il exprime le pourcentage de sel passant à travers la membrane dans l'eau produit (osmosée) par rapport à la teneur (concentration) d'eau brute à déminéraliser. Il est lié au taux de rejet par la relation :

$$\% \text{ Passage en sels} = \frac{\text{salinité perméat}}{\text{salinité alimentation}} * 100$$

**V.5. Installation d'osmose inverse**

La Figure présente un schéma succinct des principaux éléments constituant le traitement par osmose inverse

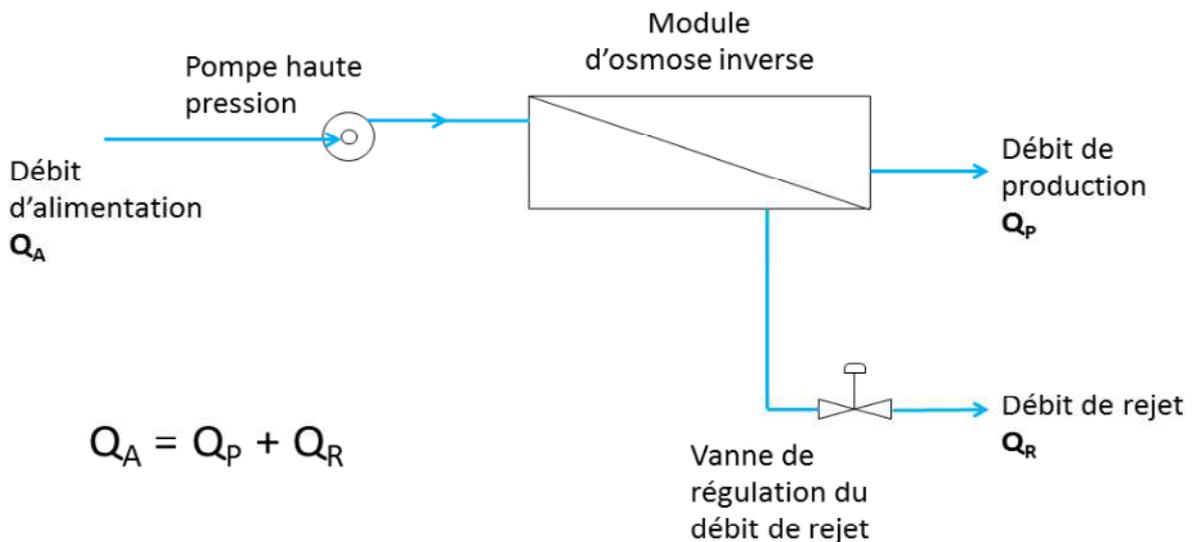


Figure 16. Principaux éléments d'une installation de traitement par osmose inverse

Une installation typique des membranes d'osmose inverse se compose de trois sous-systèmes distincts : le prétraitement, le procédé à membrane, et le post-traitement. Essentiellement, toutes les sources d'eau à laquelle l'osmose inverse est appliquée doivent se soumettre à certains niveaux de prétraitement.

L'étape suivante consiste à décrire les différentes étapes du traitement dans l'usine.

### **Prétraitement**

En amont de tout procédé de déminéralisation, comme c'est le cas de LESAFFRE, il est souvent nécessaire d'installer une unité de prétraitement pour donner à l'eau de ville des caractéristiques (pH, température, turbidité et conditionnement chimique,...) qui soient compatibles avec la nature des membranes, afin d'éviter leur colmatage par les matières en suspension et/ou par des dépôts de sels tels que  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{SrSO}_4$ , etc. Ainsi, le type de prétraitement dépend de la nature, des caractéristiques physico-chimiques de l'eau concernée et des conditions de fonctionnement choisies (taux de conversion, pression, etc.).

#### **Filtration sur cartouches 50µm**

L'eau de ville passe par un filtre de porosité de 50 µm pour éliminer les matières en suspension.

#### **Filtre à charbon actif**

Cette filtration se fait par deux filtres à charbon actif qui sont situés en aval de filtre de 50 µm afin d'éliminer :

- Les matières organiques
- les matières en suspension qui ont été échappés à la filtration
- $\text{Cl}_2$  (élément néfaste pour les résines échangeurs d'ions)

#### **Pré filtration sur cartouches 10 µm et 1 µm**

Pour clarifier l'eau.

#### **Le prétraitement pour éviter les précipitations de sels**

Ajustement du pH on ajoute de l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) pour empêcher l'entartrage par  $\text{CaCO}_3$  (pas d'ion carbonate dans l'eau).

Pour éliminer tout risque de précipitation de sels sur les membranes, un traitement est nécessaire afin d'éliminer ou de séquestrer soit l'anion, soit le cation du composé risquant de précipiter.

Par l'intermédiaire d'une pompe doseuse asservie à un compteur d'impulsions, l'utilisation d'un dosage de séquestrant sera injecté afin d'éviter la précipitation de calcium sur les membranes.

Le séquestrant agit sur les ions susceptibles de former des complexes insolubles en augmentant la limite de solubilité du complexe.

### Osmose inverse

L'eau arrive au cœur du système, la membrane d'osmose inverse. Filtrant à hauteur de 1 nanomètre (0,001 micron), elle ne laisse passer que l'eau pure et élimine 98% des matières indésirables.

### Post-traitement

#### Adoucisseur

Il alimente l'adoucisseur pour vérifier l'élimination complète des  $Mg^{2+}$  et  $Ca^{2+}$  qui sont responsable du tartre dans l'installation, l'eau est stockée dans un bac alimentaire de la chaudière responsable de la production de vapeur utilisée dans le procédé de fabrication de la levure.

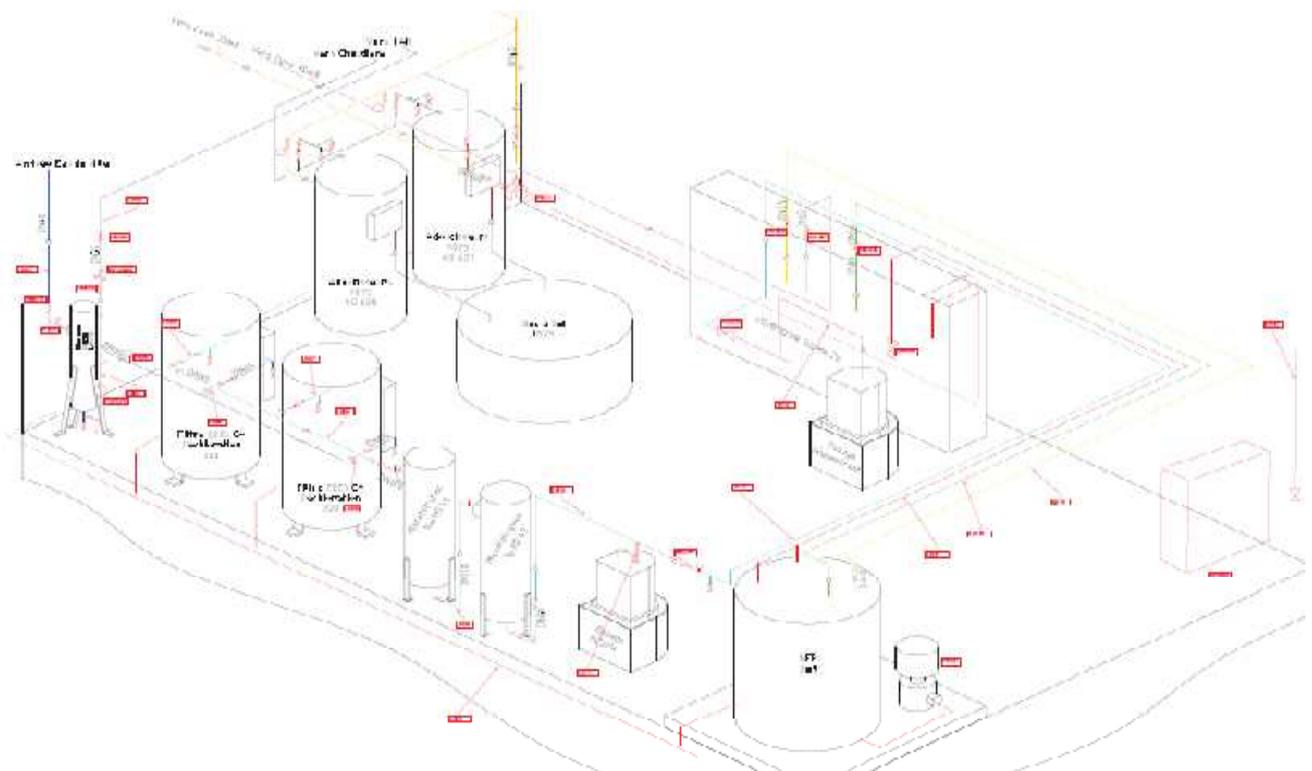


Figure 17. Schéma de la station de déminéralisation

***Chapitre V***  
***Analyse du fonctionnement***  
***de la filière eau***

## I. Analyse du fonctionnement de la filière eau

Afin d'effectuer une analyse de l'état actuel du procédé de traitement des eaux, on a eu recours à la méthode de gestion de la qualité :

- Ishikawa pour répertorier les différents problèmes causant le nombre total d'effet.

### Diagramme ISHIKAWA

Le diagramme d'ISHIKAWA nommé aussi diagramme « causes/effets », cet outil graphique consiste à recenser les causes aboutissant à un effet, les causes sont réparties dans cinq catégories :

- **Main d'œuvre** : personnel, qualification, formation, expérience...
- **Matériel** : équipement, machine, vitesse, pression...
- **Matière** : matière première, composant, matériaux, pièce...
- **Méthode** : spécification, instruction, procédure...
- **Milieu** : Espace, lumière, bruit, vibration, chaleur, poussière, humidité.

### Diagramme ISHIKAWA de la station de traitement d'eau

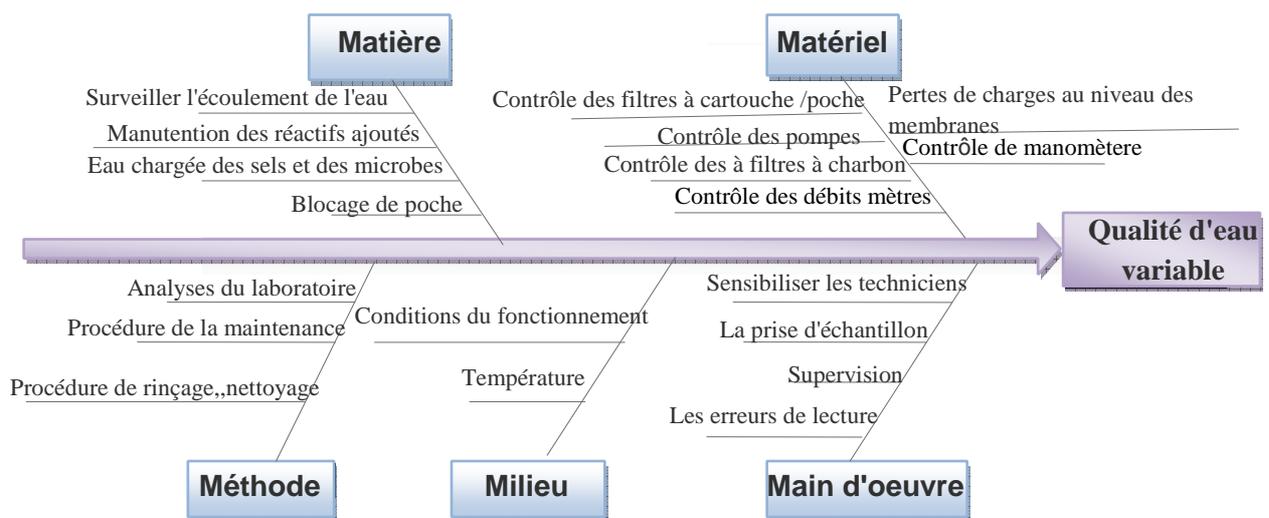


Figure 18. Diagramme ISHIKAWA de la station de traitement d'eau

Afin de respecter les exigences de qualité ciblées par le groupe Lesaffre et pour le contrôle du fonctionnement de la station, des analyses physico-chimiques sont effectuées chaque jour. Ensuite, et dans le but d'établir le niveau d'efficacité du traitement adopté au sein de l'unité d'osmose inverse, nous allons étudier l'évolution des différents paramètres d'une phase à l'autre. Les prélèvements d'échantillons se font en quatre points de la station :

- A l'entrée de la station pour l'analyse des eaux brutes.
- A la sortie de charbon actif.
- A l'entrée et à la sortie de l'osmoseur.
- Rejet de l'osmoseur.

## I.1. Paramètres physico-chimiques de l'eau

- **Le pH :** Le pH est une indication de sa tendance à être acide ou alcaline et il est en fonction de l'activité des ions d'hydrogène  $H^+$  présents dans cette eau.

La mesure effectuée au laboratoire relève de l'électrométrie qui exige un pH-mètre utilisant deux électrodes : une électrode hydrogène et une électrode de référence.

La différence du potentiel existant entre les deux électrodes plongées dans la même eau est en fonction linéaire du pH de celle-ci.

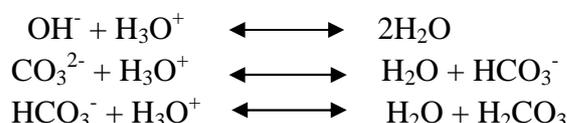
- **La conductivité :** Mesurer la conductivité électrique de l'eau, c'est-à-dire sa capacité à transporter le courant électrique. Sa mesure permet d'évaluer la quantité totale de solides dissous dans l'eau. Elle correspond à la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de  $1\text{cm}^2$  de surface et séparées l'une de l'autre de  $1\text{cm}$ , l'unité en micro siemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

- **Le titre alcalimétrique complet (TAC)**

### Définition

Il correspond à la teneur de l'eau en alcalins libres, carbonates, bicarbonates et hydroxydes. Il est mesuré selon une méthode qui consiste à la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué en présence d'un indicateur coloré.

### Réactions mise en œuvre

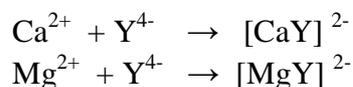


- **Le titre hydrotimétrique total (THT)**

### Définition

Le titre hydrotimétrique total correspond à la totalité des sels de calcium et de magnésium.

### Réactions mise en œuvre



- **Dosage des chlorures  $\text{Cl}^-$**

### Définition

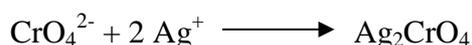
Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ , la fin de la réaction est indiquée par l'apparition du teint rouge caractéristique du chromate d'argent ( $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ).

**Réactions mise en œuvre**

L'argent présent dans la solution de nitrates d'argent forme avec le chlorure un précipité blanc selon l'équation :



Lorsque tous les chlorures présent dans la solution sont épuisés, l'argent se combine avec le chromate de potassium pour formé un précipité de couleur rouge brique selon l'équation :



**II. Analyse du fonctionnement de la filière eau**

**II.1. Analyse physico-chimique**

Pour une meilleure lisibilité des résultats d'analyses physico-chimiques, les tableaux rapportant ces résultats (Annexe I) sont traduits en graphiques qui combinent, selon l'utilité, les différents paramètres pour leur analyse et interprétation.

Les valeurs de garantie (Cahier des charges) à la sortie de l'osmoseur inverse sont représentées dans le tableau qui suit :

Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Eau	THT (°f)	TAC (°f)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	pH	Conductivité (µS/cm)
E. potable	10 à 40	< 50	< 250	6,5 à 8,5	400 à 2000
E.osmosée	< 1	< 5	< 50	6 à 8	< 20

**a- Evolution de la concentration de THT au cours de traitement**

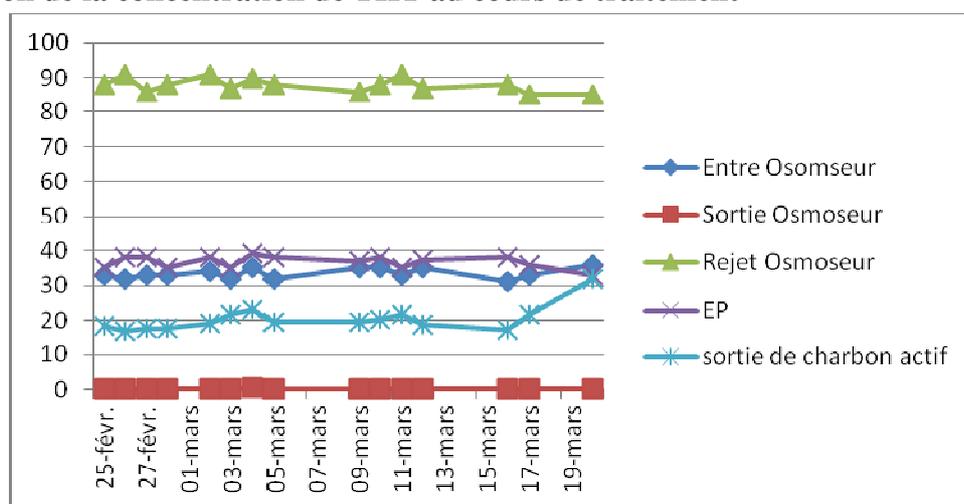


Figure 19. Evolution de la concentration de THT au cours de traitement

D'après le graphe, on remarque que :

L'eau osmosée et l'eau potable ont une moyenne de THT dans l'intervalle des eaux très douces.

L'eau des rejets de l'osmoseur est trop chargée, c'est pour cela que la courbe de THT est au dessus des autres courbes.

L'élévation des résultats dans certains points, est expliquée par le fait d'encrassement des filtres placés avant osmoseur qui crée une dépression au niveau de la pompe d'alimentation de l'osmoseur.

Une grande quantité de THT est éliminée au niveau de l'osmoseur inverse ce qui réduit la durée de vie de la membrane.

**b- Evolution de la concentration de TAC au cours de traitement**

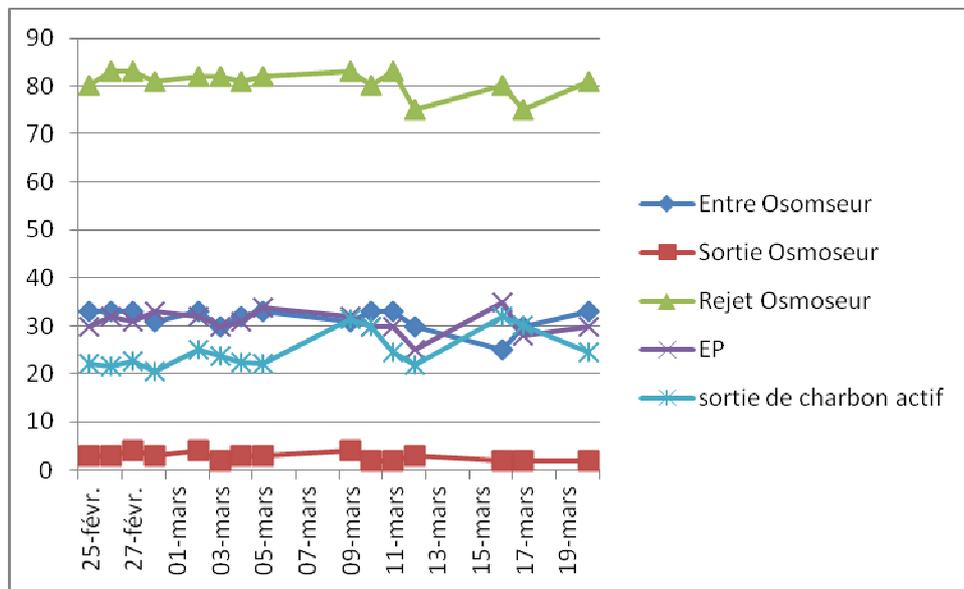


Figure 20. Evolution de la concentration de TAC au cours de traitement

D'après le graphe, On constate qu'il y a une grande différence entre l'eau avant et après osmoseur, l'eau avant osmoseur a une moyenne de TAC=29.12°f alors que l'eau osmosée a une moyenne de TAC=2.8°f. Cet écart est du à la capacité de l'osmoseur d'éliminer la majorité des carbonates  $CO_3^{2-}$ , bicarbonates  $HCO_3^-$  et hydroxydes  $OH^-$ .

**c- Evolution de la concentration en chlorure au cours du traitement**

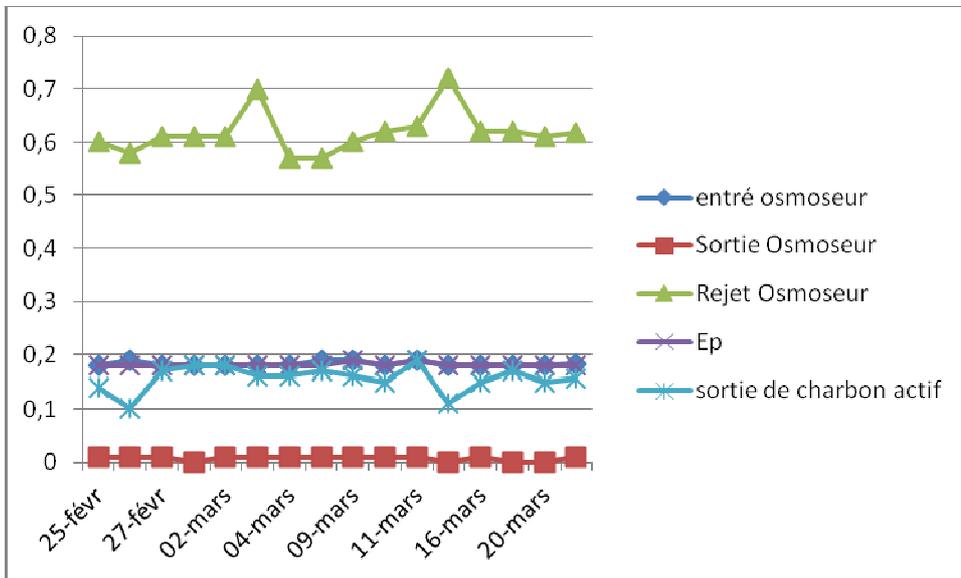


Figure 21. Evolution de la concentration en chlorure au cours de traitement

D'après le graphe, on remarque que :

La concentration en chlorure ne dépasse pas 0,181 g/l pour l'eau potable ce qui est identique aux spécifications des normes.

La concentration en chlorure est trop faible à la sortie de l'osmoseur inverse.

**d- Evolution de la teneur en chlore libre Cl<sub>2</sub> au cours du traitement**

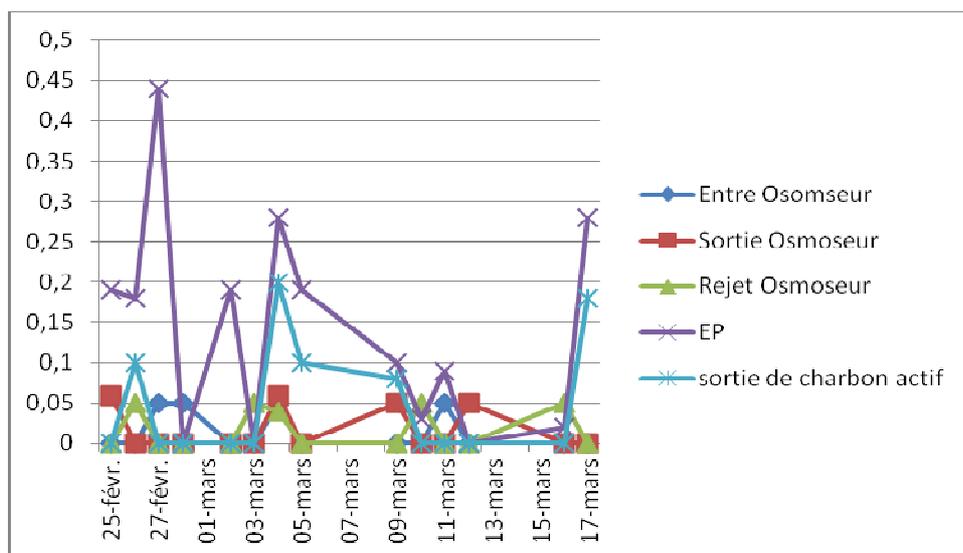


Figure 22. Evolution de la concentration en chlore libre au cours de traitement

D'après le graphe on remarque :

Le passage à travers les filtres à charbon actif engendre une diminution de la teneur en  $Cl_2$ . Ceci peut être expliqué par le pouvoir de déchloration au cours de laquelle le chlore réagit avec la surface du carbone  $Cl_2 \rightarrow Cl^-$ .

**e- Variation du pH au cours des différentes filières de traitement**

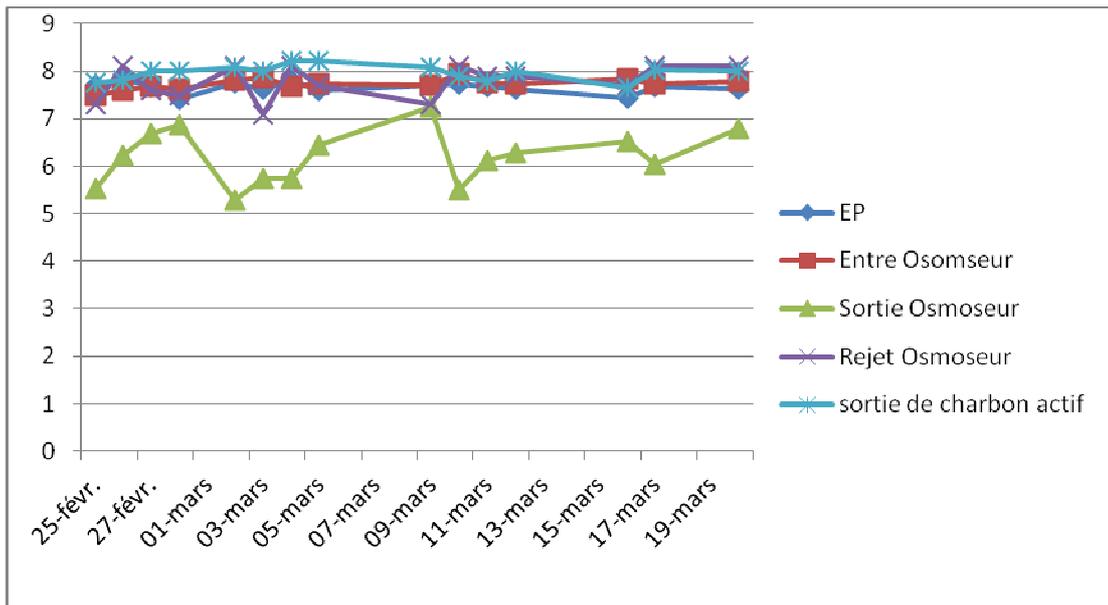


Figure 23. Variation du pH au cours de traitement

La figure montre que le pH de l'eau potable qui alimente la station est alcalin sa valeur est presque constante elle varie entre 7.4 et 7.8.

En comparant le pH de l'eau à la sortie de filtre à charbon avec le pH de l'eau à l'entrée de l'osmoseur on remarque une diminution brusque qui atteint le pH neutre à la sortie des filtres à cartouches où a leur niveau (entrée) s'effectue l'injection de l'acide sulfurique. Le rôle de ce dernier est de modérer le coefficient du pH à 6 à l'entrée des membranes d'osmose inverse.

D'autre part, l'injection du séquestrant à l'entrée de l'osmoseur a pour but d'éviter la précipitation des sels à base de sulfate et de carbonate sur les membranes.

Ainsi l'ajout de l'acide a pour but de transformer les ions  $HCO_3^-$  disponibles dans l'eau brute en  $CO_2$  qui passe facilement à travers ces membranes.

Après passage de l'eau prétraitée dans les trains d'osmose inverse, on constate un pH acide des eaux osmosées qui varie entre  $5 < pH < 7$ .

### f- Variation de la conductivité au cours des différentes filières de traitement

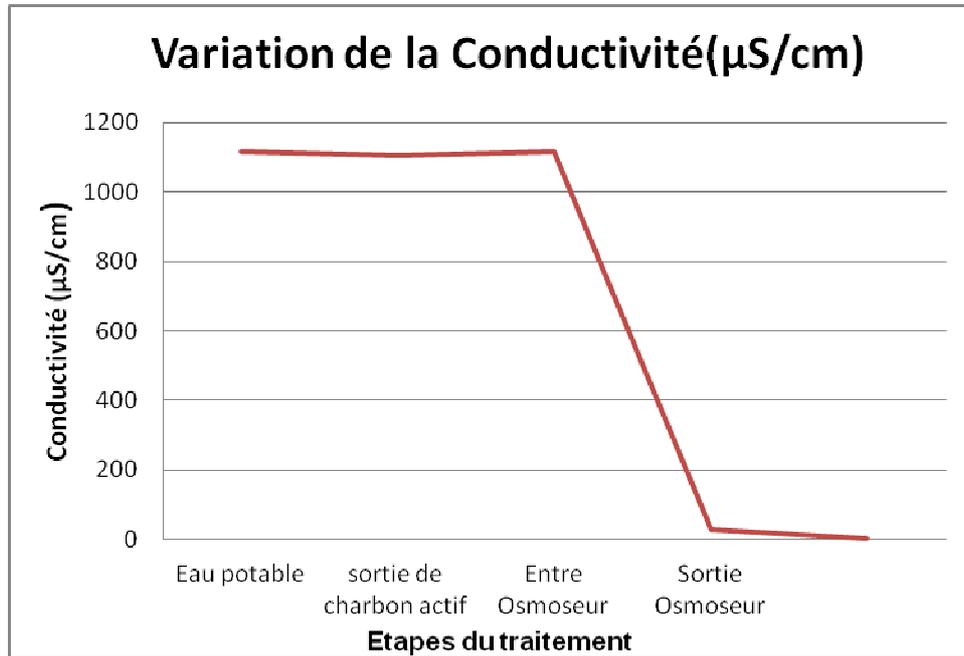


Figure 24. Graphe de la variation de la Conductivité

Au cours de la déminéralisation d'eau, la conductivité diminue en fonction du temps.

Pour les premières étapes du traitement qui contient la filtration sur charbon actif et l'entrée d'osmose inverse, la conductivité est très élevée. Ensuite, elle subit une chute de la valeur 1116,42  $\mu\text{S/cm}$  jusqu'à 29,62  $\mu\text{S/cm}$ .

Après passage par l'osmoseur, la salinité de perméat a une légère augmentation. La qualité de l'eau osmosée produite reflète une moyenne efficacité du système d'osmose inverse pendant cette période de traitement

### g- Variation du pouvoir encrassant de l'eau SDI

Parmi les principaux objectifs du prétraitement c'est de réduire autant que possible le pouvoir encrassant de l'eau potable et ramener le SDI (Silt Density Index) à une valeur inférieure à 3 lors de l'arrivée de l'eau prétraité aux membranes d'osmose inverse, cette valeur est requise pour l'osmose inverse et se lie à la garantie de bon fonctionnement des membranes d'osmose inverse. (Annexe I)

Le graphique suivant représente la variation du SDI de l'eau potable en fonction du temps mesuré à la sortie des filtres à cartouches.

L'indice est calculé de la manière suivante.

$$SDI = \frac{100}{15} * \left( 1 - \frac{T_0}{T_{15}} \right)$$

Avec :  $T_0$  : temps initial pour filtrer un échantillon de 500ml.

$T_{15}$  : temps pour filtrer un échantillon de 500ml après le temps 15 sec.

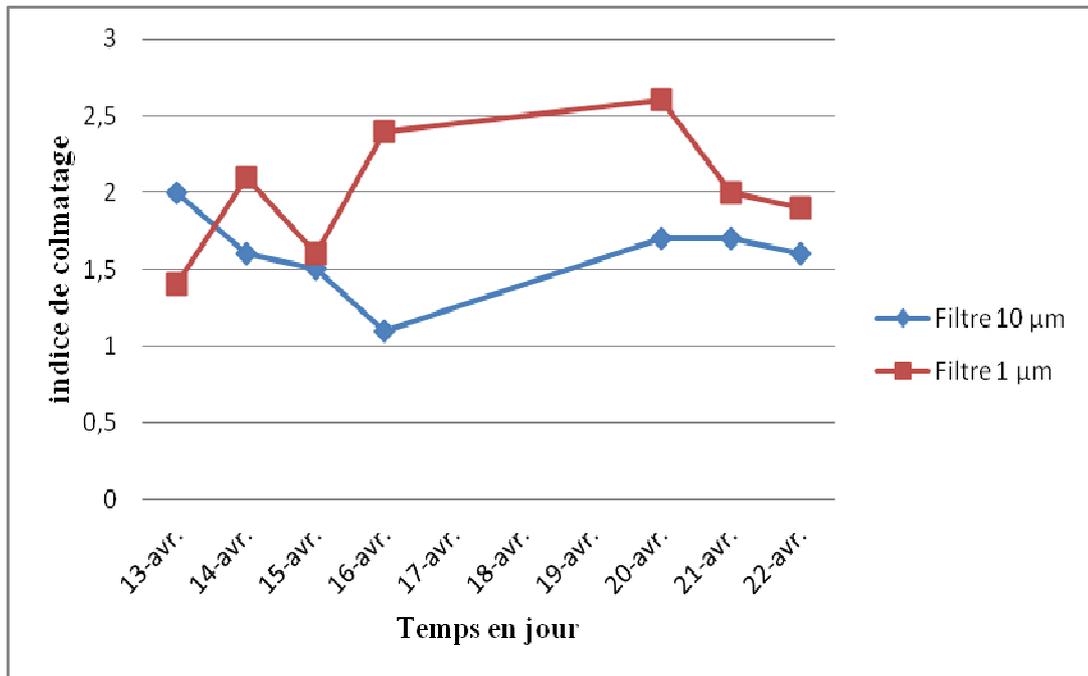


Figure 25. Présentation graphique de la variation du SDI en fonction de temps de prélèvement

L'intérêt pratique de cela est de pouvoir prédire la cinétique d'encrassement dans des installations.

On note que la valeur de l'indice de colmatage ne dépasse pas la norme de 3 durant cette période.

Ce résultat est dû à un bon fonctionnement au niveau du prétraitement.

## II.2. Efficacité de l'osmoseur par paramètres

$$Efficacité = 100 - \left( \frac{\text{moyenne eau osmosée}}{\text{moyenne eau potable}} * 100 \right)$$

Les moyennes d'eau potable et d'eau osmosée pour chaque paramètre est représenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6. Efficacité par paramètre

	THT	TAC	Cl <sup>-</sup>	Conductivité
Eau potable	36,70	30,87	0,18	1115,92
Eau osmosée	0,21	2,80	0,01	29,62
<b>Efficacité %</b>	<b>99 %</b>	<b>91 %</b>	<b>94 %</b>	<b>97,35 %</b>

D'après les calculs effectués, on constate que l'osmoseur élimine 99% des cations Mg<sup>2+</sup> et Ca<sup>2+</sup> (THT), 91 % des carbonates (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et les hydroxydes (OH<sup>-</sup>), 94% des ions chlorures (Cl<sup>-</sup>), de l'eau d'alimentation et par conséquent une efficacité de 97% au niveau de la conductivité.

Cela signifie le bon fonctionnement de l'osmoseur à avoir une eau qui tend vers le maximum de pureté.

### III. suivi des paramètres des performances hydrauliques

Ces paramètres permettent d'illustrer les performances de la station de traitement d'eau après une certaine durée de fonctionnement.

Trois critères reflètent le comportement des modules et révèlent la productivité des membranes. Ils sont contrôlés durant le fonctionnement des chaînes d'osmose inverse (annexe II).

On note :

- **Rejet des sels**

Le diagramme suivant montre l'évolution du taux de rejet des sels pour les modules spiralés de l'osmoseur inverse.

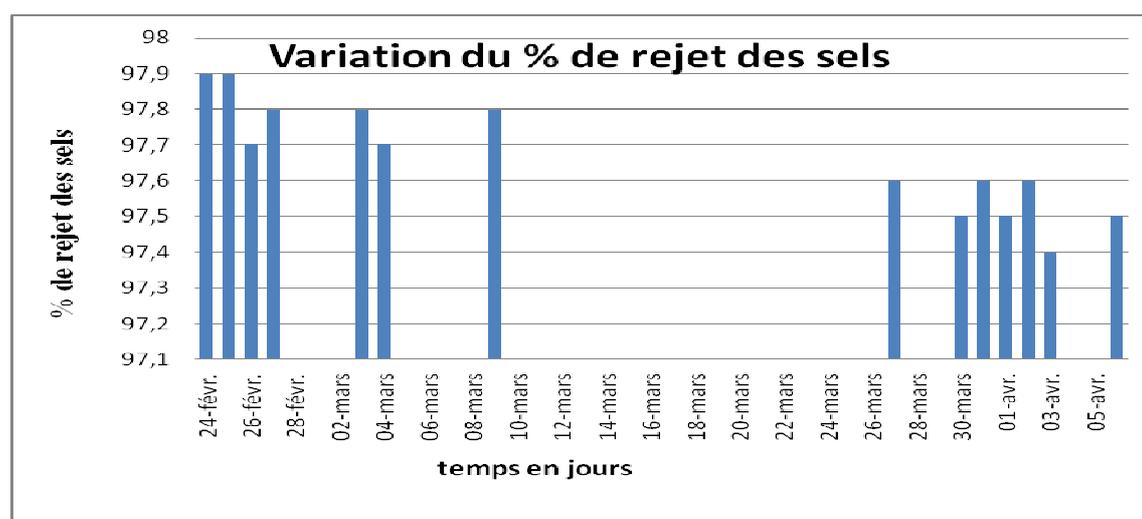


Figure 26. Diagramme représentant la variation du % de rejet des sels pour les membranes d'osmose inverse en fonction du temps

Les taux de rétention sont quasiment constants au cours de la filtration, quelle que soit la période de prélèvement. Ce taux de rétention varie entre 97,4 % et 97,9 %.

#### • Le passage en sels

Le passage en sel à travers une membrane est indépendant de la pression d'alimentation. Par contre il dépend directement de la salinité de l'eau au contact de la membrane et donc de la composition de l'eau brute à traiter. Le passage de sels se caractérise par le rapport entre la concentration côté production et la concentration côté alimentation :

Le graphique ci-dessous représente la variation du taux du passage des sels en fonction du temps.

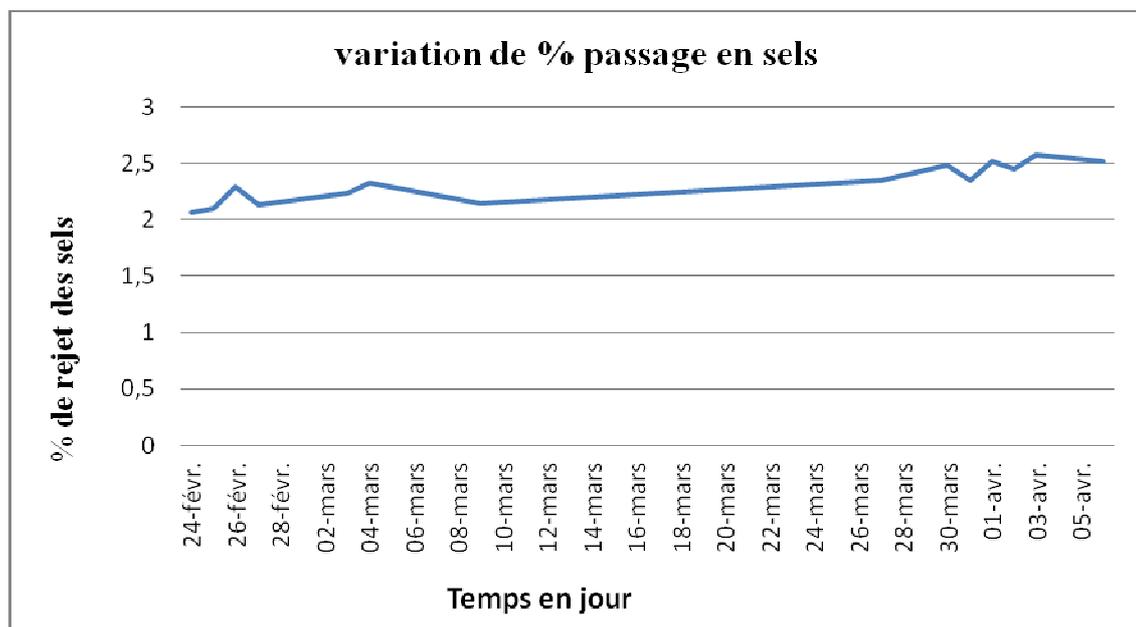


Figure 27. la variation du % passage en sels pour les membranes d'osmose inverse en fonction du temps

On remarque une quasi-constance durant le fonctionnement et une augmentation linéaire durant le mois de mars et d'avril due au problème d'encrassement des membranes qui a été détecté au sein de la station par une diminution de débit.

#### • Taux de conversion

Le rendement des membranes est suivi par la mesure et l'enregistrement en continu de différents paramètres : la pression, le débit de filtration et la température.

$$Y = \frac{Q_p}{Q_a} = \frac{10,34}{16,07} * 100 = 64,35\%$$

- **Facteur de concentration**

Le facteur de concentration FC découle de la conversion, en supposant que toutes les espèces à éliminer sont retenues sur les membranes (on peut alors exprimer le flux de matière solide ou dissoute par l'équation  $(QA \cdot CA = QR \cdot CR)$ , et il exprime le facteur de multiplication auquel est soumise la concentration de ces espèces dans le rejet :

$$FC = \frac{CR}{CA} = \frac{QA}{QR} = \frac{100}{100 - Y}$$

On a :  $Y = 64,35 \%$   
 On aura :  $FC = 2,8$

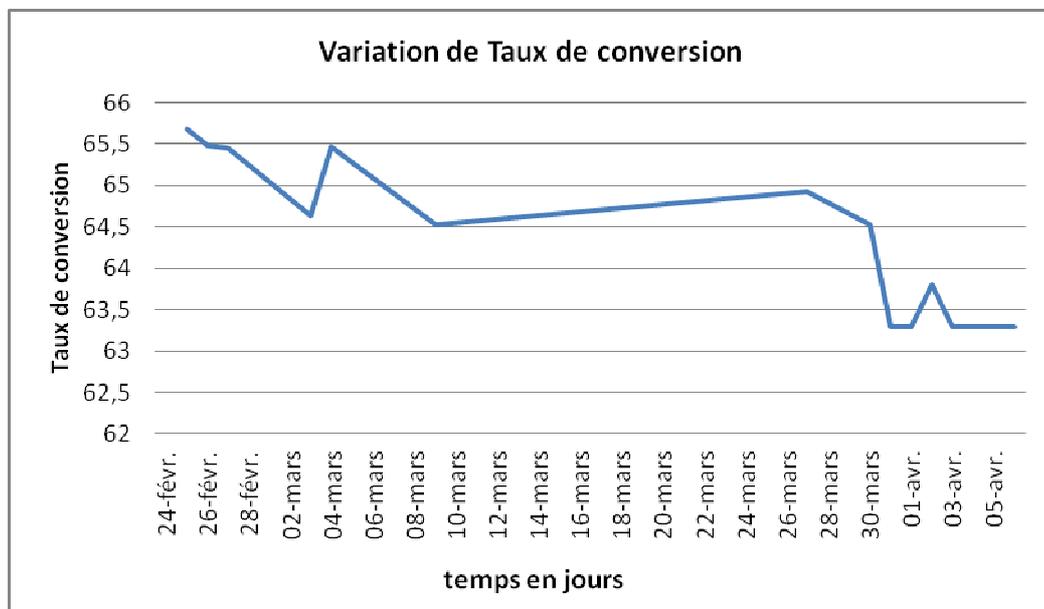


Figure 28. Variation de taux de conversion de l'osmoseur en fonction du temps

D'après le graphe on remarque une diminution de rendement d'osmose inverse de 10,65% avec une moyenne de 64,35%. Sachant que l'osmoseur travail avec un taux de conversion  $Y = 75 \%$ .

La décroissance du rendement de l'osmoseur observée s'explique par l'encrassement des membranes. Ces encrassements induisent une réduction du débit produit et de la qualité du perméat et une légère augmentation de la salinité de l'eau produite.

La nature des crasses dépend de la qualité de l'eau d'alimentation de l'unité d'osmose inverse, on peut distinguer différents types d'encrassement :

- **Encrassement organique** : dû à la formation d'une couche boueuse sur la surface des membranes telles que les bactéries et les matières organiques.

- **Encrassement inorganique** : dû à la formation d'hydroxydes métalliques tels que : Le fer, l'aluminium, le manganèse et la silice. Ecailles de sel de calcium, de sulfates, carbonate,...résultant dans le cas ou les limites maximales de solubilité sont dépassées.

Tableau 7. Analyse des problèmes possibles d'un système d'OI

Salinité du perméat	Débit perméat	Perte de charge	Cause possible
Augmentation rapide	Baisse rapide	Augmentation rapide	Précipitation d'oxydes métalliques
Légère augmentation	Baisse progressive	Augmentation progressive	Entartrage minéral
Légère augmentation	Baisse progressive	Augmentation progressive	Précipitation colloïdale
Faible Baisse	Forte baisse	Forte augmentation	Précipitation biologique
Faible Baisse	Baisse	normale ou augmentation	Précipitation organique
Augmentation	Augmentation	Augmentation	Endommagement au chlore
Augmentation	Augmentation	normale ou baisse	Endommagement abrasif

Cette diminution du rendement du procédé de l'osmoseur inverse due aux causes suivantes soit :

- ✓ **Entartrage minéral.**
- ✓ **Précipitation colloïdale, biologique et organique.**

Ce problème d'encrassement des membranes a conduit à la diminution du rendement de l'unité de l'osmose inverse. Afin de remédier à ce grave problème, Nous avons proposé de faire un nettoyage chimique spécifique des membranes spiralées d'osmose inverse pour objectif l'amélioration de la qualité d'eau destinée à alimenter les chaudières et l'optimisation du rendement de l'osmoseur.

En résumé :

Désignation	Valeurs	Unités
conductivité (design)	<20	μS/cm
Conductivité (actuelle)	Variations sensibles	μS/cm
Débit (design)	12	m <sup>3</sup> /h
Débit (actuel)	10,34	m <sup>3</sup> /h
Rendement (design)	75	%
Rendement (actuel)	64,35	%

*Chapitre VI*  
*Optimisation du rendement de*  
*l'osmoseur inverse*

## I- Description de la procédure de nettoyage appliqué sur l'unité de l'osmoseur inverse

La procédure est décrite suivant la figure ci-dessous :

### L'organigramme du procédure

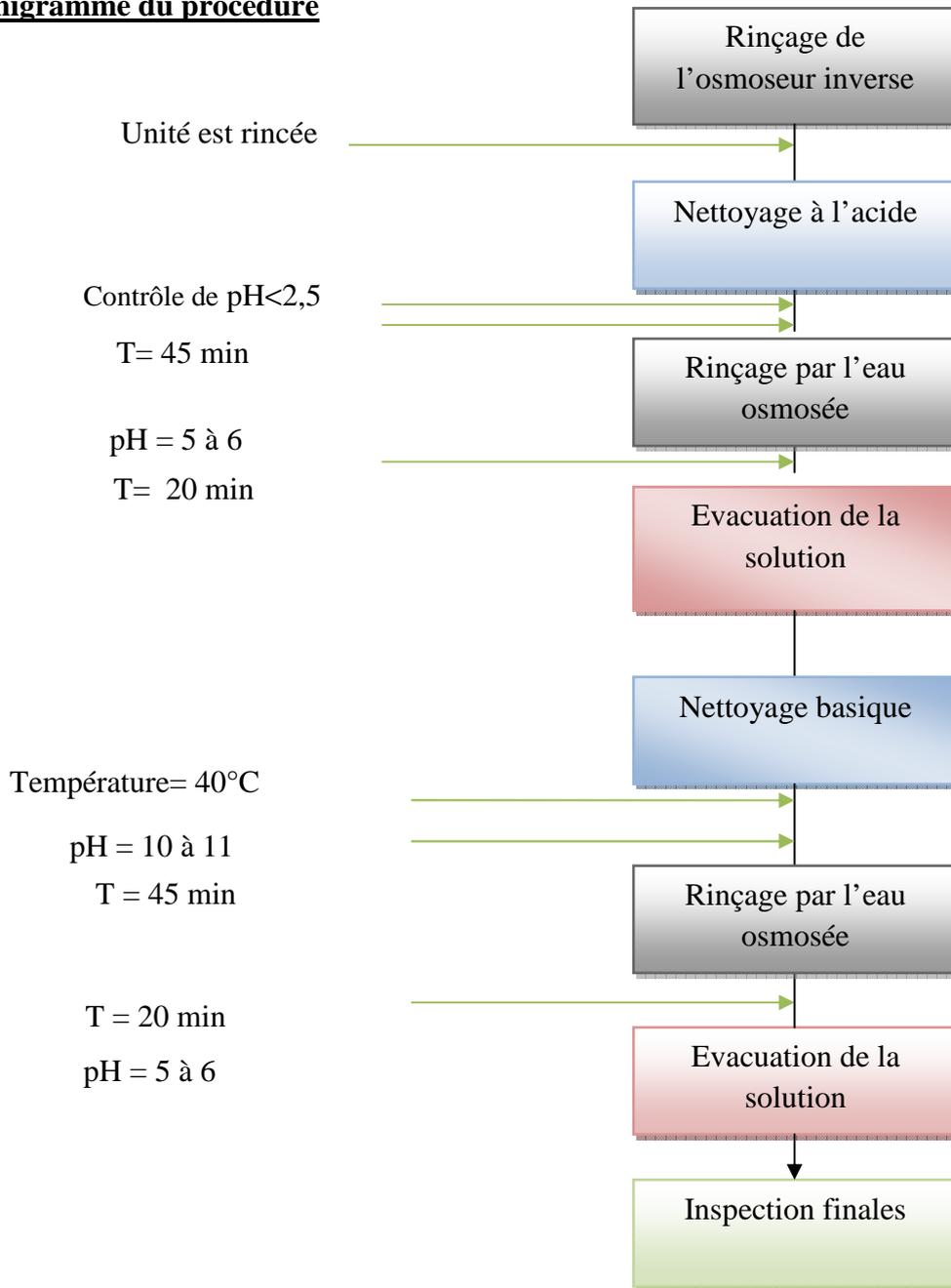


Figure 29. Diagramme de nettoyage chimique

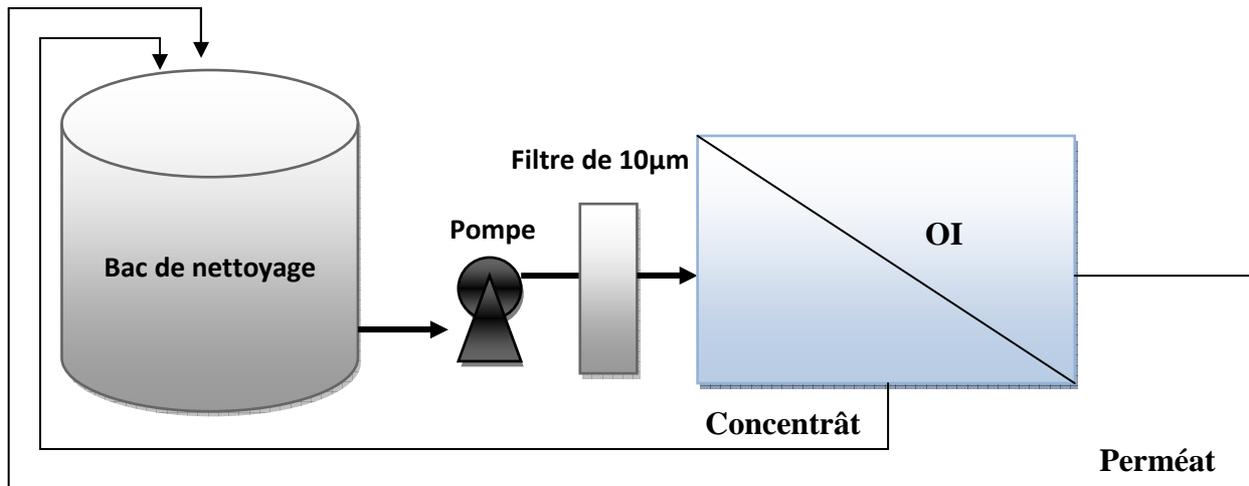


Figure 30. Circuit de nettoyage de l'osmoseur inverse

OsmocleanA	OsmocleanB
<ul style="list-style-type: none"> <li>- un nettoyant chimique à base d'acide organique servant à l'élimination des substances d'acide soluble comme les carbonates de calcium et les hydroxydes métalliques.</li> <li>- le pH de la solution après dilution avec de l'eau exempte de toute trace du chlore ou d'autres agents oxydants doit être maintenu au-dessous de 2,5 par l'intermédiaire d'injection d'une solution d'hydroxyde d'ammonium.</li> <li>- A la fin de l'opération de nettoyage, rincer par l'eau osmosée la membrane pendant quelques minutes (15 à 20 min) jusqu'à la disparition des traces de la solution de nettoyage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un détergent chimique efficace pour l'élimination des substances organiques et des barres micro biologiques déposées sur la surface des membranes.</li> <li>- Le pH de la solution après dilution avec de l'eau exempte de toute trace du chlore ou d'autres agents oxydants doit être ajusté entre 10 à 11 moyennant le dosage par l'acide chlorhydrique.</li> </ul>

Tableau 8. Les avantages des produits utilisés dans le nettoyage

Avantage d'Osmoclean-A	Avantage d'Osmoclean-B
<ul style="list-style-type: none"> <li>- compatible avec les membranes des marques les plus reconnues dans l'industrie ;</li> <li>- résultats satisfaisants pour l'enlèvement des matières colmatantes de nature minérale ;</li> <li>- contient un mélange spécial de solutions tampons et des autres composants qui servent à dissoudre les colmatants minéraux tels que les hydroxydes de métaux, le carbonate de calcium,... ;</li> <li>- fortement tamponné pour résister à tout changement de pH pendant l'opération de nettoyage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- compatible avec les membranes des marques les plus reconnues dans l'industrie ;</li> <li>- résultats satisfaisants pour l'enlèvement des matières colmatantes de nature organiques et colloïdales ;</li> <li>- contient un mélange spécial de solutions tampons et des autres composants qui servent à dissoudre les colmatants organiques et à disperser les particules colloïdales ;</li> <li>- fortement tamponné pour résister à tout changement de pH pendant l'opération de nettoyage.</li> </ul>

## II- Bilan de production et rendement après le nettoyage chimique

Après le nettoyage chimique de l'osmoseur inverse nous avons obtenus des résultats satisfaisants, les résultats sont présentés dans le tableau 8 et la figure 31 ci-dessous :

Tableau 9. Résultat avant et après le nettoyage chimique. (Annexe II)

	P amont (bar)	Débit de rejet (m3/h)	Débit de perméat (m3/h)	Débit d'alimentation (m3/h)	Rendement
<b>Avant nettoyage</b>	11	5,7	10,34	16,1	<b>64,35%</b>
<b>Après nettoyage</b>	11	4	12	16	<b>75%</b>

D'après le travail effectué et les résultats qu'on a obtenus, le rendement de la production est amélioré de 10.65 %.

***Chapitre VII***  
***Estimation du Coût du m<sup>3</sup> d'eau  
osmosée***

## I. Objectif

L'objectif de l'estimation des coûts est de produire, en fonction de la phase d'avancement du projet, des informations permettant d'établir le budget du projet. Les méthodes d'estimation du projet retenues dépendent de la phase d'avancement du projet. En conséquence, le choix d'une méthode d'estimation dépend du niveau d'information disponible.

Ce chapitre consiste à estimer le coût d'un m<sup>3</sup> d'eau osmosée.

Dans cette catégorie on va prendre en compte les charges de fonctionnement des équipements, y compris la consommation électrique, les produits chimiques, amortissement ...

Les principaux paramètres pris en considération sont regroupés le schéma ci-dessous :

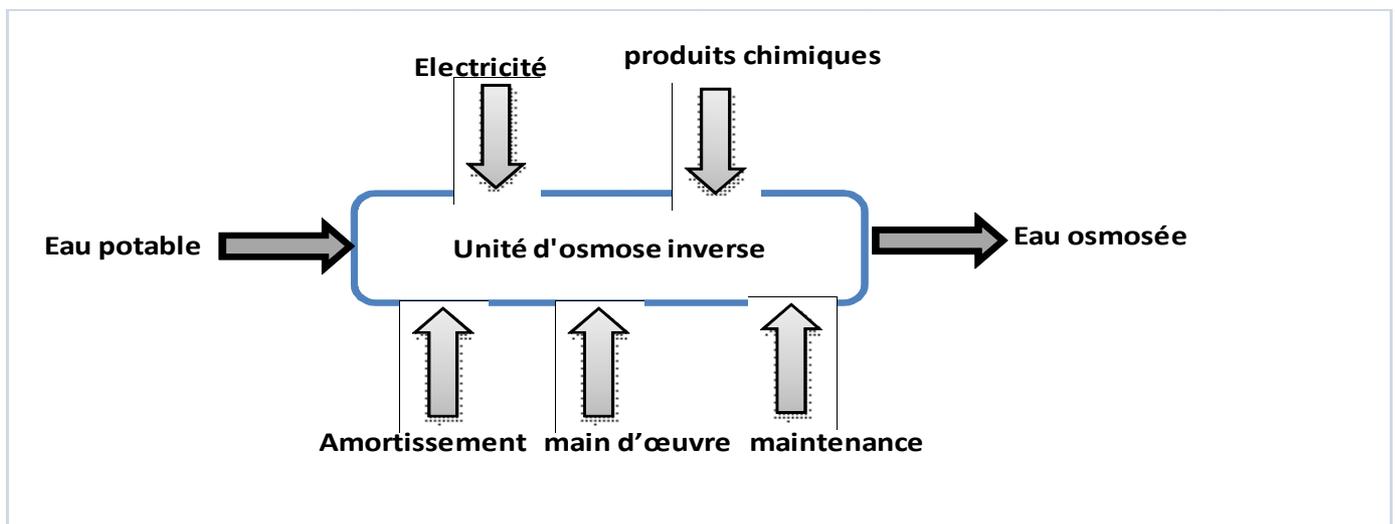


Figure 31. Les principaux paramètres entrant dans le calcul du coût d'eau osmosée

### **NB :**

- J'ai trouvé la difficulté de recueillir des informations financières (main d'œuvre et maintenance) à cause de la confidentialité.
- La base de calcul sera sur trois mois de fonctionnement, c'est-à-dire combien on a consommé par 3 mois.

### **Données de l'étude :**

Production d'eau osmosée = 11 m<sup>3</sup>/h      16 h/jour      15840 m<sup>3</sup>/3mois

**a- Coût du circuit de pompage**

$$E = PT$$

Avec : E : Energie  
P : puissance  
T : temps

On peut calculer l'énergie consommé par les pompes, et de reporter l'ensemble par la suite en trois mois de fonctionnement.

Les résultats sont fournis dans le tableau ci-dessous :

Tableau 10. Calcul du coût du circuit de pompage

Puissance des pompes en KW/j			
Equipement	Nombre	Puissance(KW)	Fonctionnement
Pompe osmoseur	1	7	16h/24
Pompe échangeuse d'ions	1	3	24h/24
Consommation totale (KW /j)		184	
Prix du KW 1Kw -----> <b>0,85 DH</b>			
Coût de la consommation électrique (DH/j)		156,4	
<b>Coût de la consommation électrique (DH/3 mois)</b>			<b>14076</b>

**b- Coût des produits chimiques**

La consommation en produit chimique utilisés lors d'une opération de traitement peut être formalisée de la manière suivante :

Tableau 11. Calcul du coût des produits chimiques

Produits chimiques			
	Prix de l'unité	Quantité consommé	Coût trimestriel (DH)
acide sulfurique 98%	16,6 DH/litre	27 kg	448,2
séquestrant Fumadose SG 33	43 DH	220 kg	9460
Osmoclean A	99 DH	7 kg	693
Osmoclean B	99 DH	7 kg	693
Nacl	5 DH	750 kg	3750
<b>Coût total attribué aux produits chimiques (DH/3mois)</b>			<b>15 044,2</b>

**c- Coût d'amortissement**

Tableau 12. Calcul du coût d'amortissement

	Amortissement		
	Nombre de cartouche changé	Prix unitaire	Coût trimestriel (DH)
Filtre 50 µm	1	237,61 DH	237,61
Filtre 10 µm	6	5431,96 DH	32591,76
Filtre 1 µm	5	5431,96 DH	27159,8
<b>Coût total attribué à la filtration sur cartouche (DH/3mois)</b>			<b>59989,17</b>

Le coût global du m<sup>3</sup> d'eau osmosée est alors :

$$C (\text{m}^3 \text{ d'eau osmosée}) = C (\text{électricité}) + C (\text{produits chimiques}) + C (\text{amortissement})$$

Les résultats sont fournis dans le tableau suivant :

Tableau 13. Calcul de l'eau osmosée

Coût global d'eau osmosée (DH/3 mois)	<b>89109,37</b>
Coût totale d'eau osmosée (DH/Jour)	990,10
Consommation moyenne d'eau osmosée (m <sup>3</sup> /jour)	176
<b>Coût du m<sup>3</sup> d'eau osmosée</b>	<b>5,62 DH/ m<sup>3</sup></b>

**Conclusion d'étude**

Les calculs précédents, nous ont permis d'évaluer le coût de revient d'un mètre cube d'eau osmosée à 5,62 DH/m<sup>3</sup>. Ce coût varie proportionnellement avec les prix des produits chimiques, d'électricité, et notamment celui des pièces de rechange...

## II. Répartition du coût d'eau osmosée

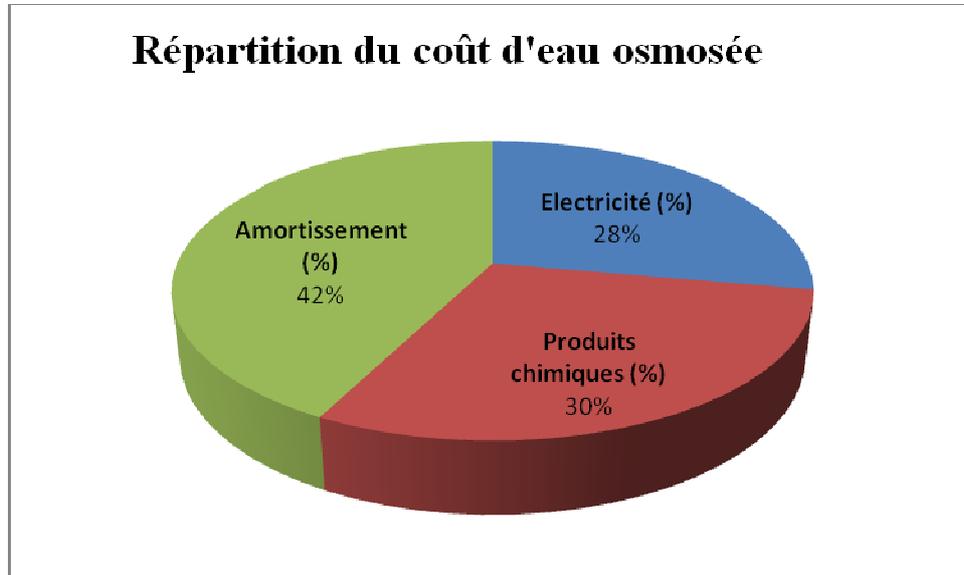


Figure 32. Répartition du coût d'eau osmosée

A partir de la figure ci-dessus, on constate que l'amortissement est beaucoup plus pesante que les produits chimiques et l'électricité. Ce qui nous laisse supposer que le coût de revient d'un m<sup>3</sup> d'eau osmosée dépend essentiellement de l'amortissement.

## Conclusion générale

La station de traitement des eaux constitue une unité stratégique pour la société LESAFFRE MAROC, compte tenu de son importance pour le refroidissement des cuves de fermentation de la levure et la production de vapeur nécessaire pour son séchage ainsi la stérilisation des cuves. D'où l'importance d'assurer une alimentation continue en eau traitée.

Depuis longtemps, la société LESAFFRE se base sur un traitement de l'eau par adoucissement qui ne permet pas d'avoir une eau à THT faible afin d'éviter le dépôt de calcaire au niveau de la chaudière et des échangeurs thermique. Par conséquent, LESAFFRE a eu recours, à la fin de l'année 2013, à la méthode de l'osmose inverse qui non seulement élimine les ions calcium et magnésium mais aussi élimine tous les ions trouvés dans l'eau.

Dans un premier temps, j'ai donné une idée générale sur les différents paramètres contrôlés au cours du procédé de traitement d'eau potable depuis l'entrée de filtre 50  $\mu\text{m}$  jusqu'à la sortie de l'eau des membranes d'osmose inverse. Ensuite, et dans le but d'établir le niveau d'efficacité du traitement adopté au sein de l'unité d'osmose inverse, j'ai étudié l'évolution des différents paramètres d'une phase à l'autre.

Afin d'assurer l'efficacité de l'osmoseur, mon travail est ensuite focalisé sur l'optimisation de rendement de cet osmoseur inverse. Ceci en étudiant l'effet de nettoyage chimique sur le rendement.

Les résultats obtenus ont montré que le rendement a été amélioré lors de ce nettoyage (75%) par rapport au rendement obtenu avant le nettoyage (64.35%).

Sur la base de l'ensemble des résultats obtenus de cette analyse, des recommandations a été établie pour maîtriser le système de filtration. En effet, je suggère d' :

- Installer un filtre à sable en amont de filtre 50  $\mu\text{m}$ .
- Valorisation de rejet.
- Nettoyage régulier de l'osmoseur inverse.

A la lumière des analyses faites, le bilan de ce stage s'avère extrêmement positif, car il nous a permis de perfectionner et de confronter nos connaissances théoriques, les relations interpersonnelles, une méthode de travail et de la discipline de soi. Il nous a permis d'améliorer nos connaissances relatives en traitement des eaux industrielles. Toutes ces connaissances viennent s'ajouter à celles acquises durant notre formation, lesquelles sont nécessaires pour l'équilibre et la stabilité d'un futur ingénieur

## Références bibliographiques

- [1] Annie LOÏEZ, *production de la levure de panification par biotechnologie*, les Essentiels, [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr), 10 mars 2003.
- [2] Richard REVY, *Les levures biologiques alimentaires et poudres levantes* ; les Essentiels, [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr), 10 mars 2005.
- [3] [www.microbiologie-medicale.fr/mycologie/treproductionchampignonsmicroscopiques](http://www.microbiologie-medicale.fr/mycologie/treproductionchampignonsmicroscopiques).
- [4] [www.lenntech.fr/achaudiere/traitement-eau-chaudiere](http://www.lenntech.fr/achaudiere/traitement-eau-chaudiere).
- [5] [www.lenntech.fr/chaudiere/moussage-primage](http://www.lenntech.fr/chaudiere/moussage-primage).
- [6] Techniques de l'ingénieur: articles relatifs à l'ultrafiltration et à l'osmose inverse.
- [7] Techniques de l'ingénieur - Techniques séparatives à membranes - Considérations théoriques, J 2790, A. Maurel & Osmose inverse et ultrafiltration - II Technologie et applications, J 2796, A. Maurel.

## Annexes

**Annexe I : Suivi des paramètres physicochimiques (filère eau)****Tableau 1 : THT (°f) des eaux en fonction des jours de prélèvements**

Date	Entre Osmoseur	Sortie Osmoseur	Rejet Osmoseur	Eau potable	sortie de charbon actif
25-févr	33	0,3	88	35	18,3
26-févr	32	0,2	91	38	17,1
27-févr	33	0,2	86	38	17,5
28-févr	33	0,2	88	35	17,7
02-mars	34	0,3	91	38	19
03-mars	32	0,2	87	35	21,8
04-mars	35	0,4	90	39	23
05-mars	32	0,3	88	38	19,4
09-mars	35	0,3	86	37	19,4
10-mars	35	0,2	88	38	20,1
11-mars	33	0,2	91	35	21,8
12-mars	35	0,1	87	37,5	18,8
16-mars	31	0,1	88	38	17,2
17-mars	33	0,1	85	36	21,5
20-mars	36	0,1	85	33	32
<b>moyenne</b>	<b>33,46</b>	<b>0,21</b>	<b>87,93</b>	<b>36,70</b>	<b>20,30</b>

**Tableau 2 : TAC en (°f) des eaux en fonctions des jours de prélèvements**

Date	Entre Osmoseur	Sortie Osmoseur	Rejet Osmoseur	Eau potable	sortie de charbon actif
25-févr	33	3	80	30	22
26-févr	33	3	83	32	21,6
27-févr	33	4	83	31	22,7
28-févr	31	3	81	33	20,4
02-mars	33	4	82	32	25
03-mars	30	2	82	30	23,6
04-mars	32	3	81	31	22,3
05-mars	33	3	82	34	22,1
09-mars	31	4	83	32	31,5
10-mars	33	2	80	30	30
11-mars	33	2	83	30	24,6
12-mars	30	3	75	25	21,8
16-mars	25	2	80	35	32,1
17-mars	30	2	75	28	30,3
20-mars	33	2	81	30	24,6
<b>moyenne</b>	<b>31,53</b>	<b>2,80</b>	<b>80,73</b>	<b>30,87</b>	<b>24,97</b>

**Tableau 3 : Evolution de la concentration en chlorure (g/l) des eaux en fonctions des jours de Prélèvements**

Date	Entré osmoseur	Sortie Osmoseur	Rejet Osmoseur	Eau potable	sortie de charbon actif
25-févr	0,18	0,01	0,6	0,18	0,14
26-févr	0,19	0,01	0,58	0,18	0,1
27-févr	0,18	0,01	0,61	0,18	0,17
28-févr	0,18	0	0,61	0,18	0,18
02-mars	0,18	0,01	0,61	0,18	0,18
03-mars	0,18	0,01	0,7	0,18	0,16
04-mars	0,18	0,01	0,57	0,18	0,16
05-mars	0,19	0,01	0,57	0,18	0,17
09-mars	0,19	0,01	0,6	0,19	0,16
10-mars	0,18	0,01	0,62	0,18	0,15
11-mars	0,19	0,01	0,63	0,19	0,19
12-mars	0,18	0	0,72	0,18	0,11
16-mars	0,18	0,01	0,62	0,18	0,15
17-mars	0,18	0	0,62	0,18	0,17
20-mars	0,18	0	0,61	0,18	0,15
<b>moyenne</b>	<b>0,18</b>	<b>0,01</b>	<b>0,61</b>	<b>0,18</b>	<b>0,15</b>

**Tableau 4: Cl<sub>2</sub> en (\*f) des eaux en fonctions des jours de prélèvements**

Date	Entre Osmoseur	Sortie Osmoseur	Rejet Osmoseur	Eau potable	sortie de charbon actif
25-févr	0	0,06	0	0,19	0
26-févr	0	0	0,05	0,18	0,1
27-févr	0,05	0	0	0,44	0
28-févr	0,05	0	0	0	0
02-mars	0	0	0	0,19	0
03-mars	0	0	0,05	0	0
04-mars	0,05	0,06	0,04	0,28	0,2
05-mars	0	0	0	0,19	0,1
09-mars	0	0,05	0	0,1	0,08
10-mars	0	0	0,05	0,03	0
11-mars	0,05	0	0	0,09	0
12-mars	0	0,05	0	0	0
16-mars	0	0	0,05	0,02	0
17-mars	0	0	0	0,28	0,18
<b>moyenne</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,14</b>	<b>0,04</b>

**Tableau 5 : pH des eaux en fonctions des jours de prélèvements**

Date	Eau potable	Entre Osmoseur	Sortie Osmoseur	Rejet Osmoseur	sortie de charbon actif
25-févr	7,71	7,48	5,52	7,3	7,77
26-févr	7,84	7,61	6,22	8,1	7,8
27-févr	7,68	7,68	6,68	7,6	7,99
28-févr	7,41	7,62	6,88	7,5	8,01
02-mars	7,77	7,81	5,29	8,1	8,09
03-mars	7,62	7,86	5,75	7,1	8,01
04-mars	7,81	7,67	5,73	8,1	8,21
05-mars	7,61	7,73	6,44	7,7	8,21
09-mars	7,71	7,71	7,26	7,3	8,09
10-mars	7,74	7,95	5,51	8,1	7,88
11-mars	7,69	7,75	6,13	7,9	7,78
12-mars	7,63	7,72	6,28	7,9	7,99
16-mars	7,43	7,84	6,51	7,7	7,65
17-mars	7,68	7,74	6,03	8,1	8,04
20-mars	7,62	7,79	6,79	8,1	8,01
<b>moyenne</b>	<b>7,663</b>	<b>7,731</b>	<b>6,201</b>	<b>7,773</b>	<b>7,969</b>

**Tableau 6 : La conductivité  $\mu\text{S}/\text{cm}$  des eaux en fonction des jours de prélèvement**

	N°	Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )												Moyenne
Eau potable	1	1125	1127	1111	1113	1096	1111	1098	1050	1118	1136	1148	1158	1115,92
sortie de CA	2	1099	1099	1097	1099	1096	1109	1120	1094	1118	1118	1119	1172	1111,67
Entre Osmoseur	3	1125	1130	1107	1103	1099	1100	1103	1103	1118	1118	1119	1172	1116,42
Sortie Osmoseur	4	31,3	29,7	30,4	28,5	30,5	28,6	29,8	30	28,2	29,7	28,2	30,5	29,62

**Tableau 7 : indice de colmatage des eaux en fonction des jours de prélèvement**

Date	Filtre 10 $\mu\text{m}$	Filtre 1 $\mu\text{m}$
13-avr	2	1,4
14-avr	1,6	2,1
15-avr	1,5	1,6
16-avr	1,1	2,4
20-avr	1,7	2,6
21-avr	1,7	2
22-avr	1,6	1,9

## **Annexe II : Les paramètres de surveillance de la performance de l'osmoseur inverse**

**Tableau 8 : % de rejet et % passage en sels**

Date	salinité de perméat	salinité de l'alimentation	% de rejet (rétention)	% passage en sels
24-févr.	23,3	1125	97,9	2,1
25-févr.	23,7	1130	97,9	2,1
26-févr.	25,4	1107	97,7	2,3
27-févr.	23,5	1103	97,8	2,13
03-mars	24,5	1099	97,8	2,23
04-mars	25,6	1100	97,7	2,32
09-mars	23,6	1103	97,8	2,14
27-mars	25,9	1103	97,6	2,35
30-mars	27,6	1112	97,5	2,48
31-mars	26,1	1112	97,6	2,35
01-avr	28,2	1118	97,5	2,52
02-avr	27,3	1116	97,6	2,45
03-avr	28,7	1118	97,4	2,57
06-avr	28,2	1119	97,5	2,52
Moyenne	25,83	1111,78	97,66	2,32

### Rendement = taux de conversion

- Avant nettoyage

**Tableau 9 : rendement de l'osmoseur inverse avant nettoyage**

Date	P amont (bar)	P avale (bar)	$\Delta P$ (bar)	Débit de rejet (m <sup>3</sup> /h)	Débit de perméat (m <sup>3</sup> /h)	Débit d'alimentation (m <sup>3</sup> /h)	Rendement %
24-févr	11	5	6	5,5	11	16,75	65,68
25-févr	11	5	6	5,8	11	16,8	65,48
26-févr	11	4,5	6,5	5,7	10,8	16,5	65,45
27-févr	11,5	4,9	6,6	5,8	10,6	16,4	64,63
03-mars	11	4,8	6,2	5,8	11	16,8	65,47
04-mars	11	4,5	6,5	5,5	10	15,5	64,52
09-mars	11	5	6	5,4	10	15,4	64,93

27-mars	11	5	6	5,5	10	15,5	64,52
30-mars	12	4,2	7,8	5,8	10	15,8	63,29
31-mars	11	4,9	6,1	5,8	10	15,8	63,29
01-avr	11	5	6	5,9	10,4	16,3	63,8
02-avr	11	5	6	5,8	10	15,8	63,29
03-avr	11,5	5	6,5	5,8	10	15,8	63,29
06-avr	11	5	6	5,8	10	15,8	63,29
Moyenne	11,14	4,84	6,3	5,71	10,34	16,07	64,35

**Tableau 10 : rendement de l'osmoseur inverse Après nettoyage**

Date	P amont (bar)	Débit de rejet (m <sup>3</sup> /h)	Débit de perméat (m <sup>3</sup> /h)	Débit d'alimentation (m <sup>3</sup> /h)	Rendement %
20- Mai	11	4	12	16	75
21- Mai	11	4	12	16	75
22- Mai	11	4,5	12	16,5	72,7
25- Mai	11	3,9	12	15,9	75,5
26- Mai	11	4	12	16	75
Moyenne	11	4,1	12	16,1	75

### **Annexe III :**

#### **Indice de colmatage**

L'indice de colmatage (SDI15 = Silt Density Index) : Il permet de déterminer le pouvoir colmatant d'une eau. L'eau est filtrée à travers un filtre (seuil de coupure de 0.45 µm) sous une pression constante de 2.1 bars. Lors de ce test, deux mesures sont effectuées en vue de calculer l'indice de colmatage : la mesure du temps nécessaire à filtrer 500 ml d'eau à T=0 min (**noté T<sub>0</sub>**) et la mesure du temps de filtration du même volume après 15 min de filtration continue sur le filtre (**noté T<sub>15</sub>**). L'indice est calculé de la manière suivante.

## Résumé

**Nom et prénom :** EL-JABIRY Hanan

**Année Universitaire :** 2014-2015

**Titre :** *Evaluation de l'efficacité et optimisation du rendement du système de l'osmose inverse du groupe LESAFFRE-Maroc*

Le présent document s'inscrit dans le cadre du projet de fin d'étude au sein de la Société LESAFFRE-Maroc, numéro un mondial de fabrication de levures de boulangerie et d'améliorants de panification. L'objectif du projet est double : optimiser le rendement de l'unité de traitement des eaux par osmose inverse en réduisant le potentiel de colmatage des membranes de l'osmoseur et d'autre part améliorer la qualité de l'eau d'alimentation de la chaudière et des tours de refroidissement.

La démarche adoptée dans ce travail consiste tout d'abord en une étude de fonctionnement de l'unité d'osmose inverse. Celle-ci a pour vocation de produire l'eau traitée pour le refroidissement des cuves de fermentation de la levure et de fournir la vapeur nécessaire pour son séchage ainsi que la stérilisation des cuves.

LESAFFRE-Maroc qui a un besoin absolu de maîtriser en continu la qualité de l'eau d'appoint trouve dans l'unité d'osmose inverse la sécurisation de l'alimentation en eau osmosée de ses circuits.

Dans une deuxième étape primordiale de notre étude, nous avons établi le niveau d'efficacité de l'osmoseur inverse de l'unité de traitement, afin de réaliser un bilan hydraulique de l'osmoseur.

Enfin nous avons proposé un nettoyage chimique adapté qui a permis d'optimiser le rendement du processus de l'osmose inverse, améliorant ainsi la qualité de l'eau traitée et de réduire l'encrassement de l'unité d'osmose inverse.

**Mots clés:** rendement, nettoyage, osmose inverse, encrassement, bilan hydraulique.

## Abstract

This document lies within the scope of the project of end of study within the Company LESAFFRE-Morocco, world number one of manufacturing of yeasts of bakery and of improving of bread-making.

The objective of the project is double: to optimize the output of the treatment unit of water by osmosis reverses by reducing the potential of filling of the membranes of the osmosor and in addition to improve water quality of power supply of the boiler and the turns of cooling.

The approach adopted in this work consists first of all of a study of operation of the opposite unit of osmosis.

This one has the role to produce the water treated for the cooling of the tanks of fermentation of yeast and to provide the vapor necessary for its drying as well as the sterilization of the tanks. LESAFFRE-Morocco which has an absolute need to control auxiliary water quality uninterrupted finds in the unit of osmosis reverses the security of the osmosée water supply of its circuits.

In a paramount second phase of our study, we established the level of effectiveness of the opposite osmosor of the treatment unit, in order to carry out a water resource of the osmosor.

Finally we proposed an adapted chemical cleaning which made it possible to optimize the output of the process of opposite osmosis, thus improving treated water quality and to reduce the clogging of the opposite unit of osmosis.

**Keywords :** output, cleaning, opposite osmosis, clogging, water resource.