

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA Faculté de

Technologie Département de Génie des

Procédés



MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en **Génie des Procédés** option :

Génie chimique

Thème

Étude du colmatage des membranes des osmoseurs de la ligne de traitement des eaux industrielles du complexe agro-alimentaire Cevital Béjaïa.

Présenté par :

- Amel REMILI
- Adam ABDELFETTAH

Soutenu le 10 septembre 2020

Devant le jury composé de :

Mr A.SOUALAH

Professeur

Président

Mr M.AZZOUG

Maître de conférences

Examineur

Mr R. KETRANE

Maître de conférences

Encadreur

Promotion septembre 2020

AVANT-PROPOS

Ce mémoire a été rédigé en pleine pandémie du COVID-19

Remerciements

*Avant tout, nous tenons à remercier **Dieu** tout puissant qui nous a accordé la santé et le courage pour mener ce travail jusqu'au bout.*

*Et ainsi, nous voulons remercier exceptionnellement notre promoteur Monsieur **R. KETRANE** qui a accepté de nous encadrer, nous accompagné durant tout le parcours de réalisation de ce mémoire et d'avoir consacré son temps pour nous.*

Nos remerciements vont également à tous les enseignants du département génie des procédés, particulièrement, aux enseignants de notre département Génie Chimique.

Nous remercions aussi les membres de jury pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Nous tenons aussi à remercier Mr Y. MAZOUZ, chef département Energie-Utilités du complexe agro-alimentaire CEVITAL de nous avoir permis d'exploiter ses données.

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, nous adressons toute notre affection à nos familles et nos amis.

DEDICACES

Je dédie ce travail

A mes chers parents

Qui sont pour moi la source de tendresse, le symbole de la bonté, et l'exemple du dévouement qui n'ont pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, *que Dieu les protège.*

A mon Cher frère Sofiane

Avec tous mes vœux de santé, de bonheur et de réussite.

A tous les membres de la famille REMILI et KEBOUCHI

Avec mon profond respect et mon affection.

A mes Chers amis Assia, Sonia, Adam, Dyhia, et Chérif

A qui je souhaite le bonheur et la réussite dans leur vie professionnelle.

A tous mes professeurs

Qui nous ont prodigués de précieux conseils pour réussir notre parcours et consolider notre formation. Je les remercie pour leurs encouragements et leur disponibilité.

Amel

DEDICACES

Je dédie ce travail

À mes chers parents

Qui sont à la fois des protecteurs, des amis, voire même des complices, ils sont à côté de moi pendant les moments gais et difficiles ; Que Dieu les protège !

À ma merveilleuse sœur et mon formidable frère

Qui m'apportent leur soutien, me donnent de judicieux conseils et m'encouragent moralement et financièrement ; je leur souhaite une parfaite réussite leur vie.

À mes Chers amis : Sarah, Youba, Ahlem, Amel, Lydia, Fayçal, Massinissa, Chérif et Dyhia

A qui je me réfère quand je me perds. Je leur souhaite le bonheur et la réussite dans votre vie quotidienne et professionnelle.

À tous mes professeurs

Que ce soit ceux du primaire, du CEM, du lycée ou de la fac, je tiens à les remercier de m'avoir prodigués de précieux conseils pour réussir notre parcours et consolider ma formation. Je les remercie pour leur enseignement et leur disponibilité.

Adam

Liste des Abréviations

Symboles latins

MES	Matières En Suspension
°C	Degré Celsius
°f	Degré français
TH	Titre Hydrotimétrique
TA	Titre Alcalimétrique
TAC	Titre Alcalimétrique Complet
MEI	Membranes échangeuses d'ions
MPI	Membranes perméables aux ions
NF	Nanofiltration
MF	Multifiltration
UF	Ultrafiltration
OI	Osmose Inverse
Å	Angström
MON	matière organique naturelle
COT	Carbone organique total
PA	Polyamide
PSu	Polysulfone
K _s	Produit de solubilité
EPS	Substances polymériques extracellulaires
SDI	Silt Density Index
MFI	Modified Density Index
ASTM	American Society for Testing and Materials

Liste des figures

Partie A : Rappels théoriques et références bibliographiques

Chapitre I Généralités sur l'eau

Figure 1. Illustration schématique de la molécule d'eau.

Figure 2. Illustration schématique du Cycle de l'eau.

Chapitre II Généralités sur les membranes

Figure 3. Structure interne d'une membrane spirale.

Figure 4. Membrane symétrique.

Figure 5. Membranes asymétriques ou anisotropes.

Figure 6. Représentation d'une membrane composite.

Figure 7. Modes de fonctionnement des systèmes membranaires.

Figure 8. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.

Figure 9. Représentation schématique de la structure d'une membrane OI composite comportant une fine couche active en surface.

Figure 10. Classement des différents procédés de filtration membranaires.

Chapitre III Colmatage des membranes

Figure 11. Schéma récapitulatif des principaux mécanismes du colmatage membranaire.

Figure 12. Différentes étapes de formation d'un biofilm.

Figure 13. Dispositif de mesure du SDI.

Figure 14. Exemple de courbe typique pour déterminer le MFI d'une eau.

Figure 15. Représentation schématique des procédés de filtration et de rétrolavages.

Figure 16. Efficacité comparée des rétrolavages et nettoyages chimiques.

Partie B : Méthodologie et mise en œuvre expérimentale

Figure 17. Situation géographique et plan de masse CEVITAL.

Figure 18. Principe d'un filtre à sable.

Figure 19. Filtre à cartouche.

Figure 20. Schéma du processus de traitement de l'eau par osmose inverse.

Figure 21. pH mètre.

Figure 22. Conductimètre.

Figure 23. Fluxogramme de l'analyse du titre hydrométrique (TH).

Figure 24. Fluxogramme de l'analyse du titre alcalimétrique (TA).

Figure 25. Fluxogramme de l'analyse du titre alcalimétrique complet (TAC).

Figure 26. Fluxogramme de l'analyse des chlorures (Cl^-).

Figure 27. Illustration d'un spectrophotomètre UV- Visible

Partie C Résultats et discussions

Figure 28. Représentation graphique des pH des eaux de forages et de l'ADE.

Figure 29. Représentation graphique des conductivités des eaux de forages et de l'ADE.

Figure 30. Représentation graphique des duretés totales des eaux de forages et de l'ADE.

Figure 31. Représentation graphique de dureté calcique des eaux de forages et de l'ADE.

Figure 32. Représentation graphique des titres alcalimétriques complets des eaux de forages et de l'ADE.

Figure 33. Représentation graphique des valeurs de chlorure des eaux de forages et de l'ADE.

Figure 34. Représentation graphique des valeurs de Silice des eaux de forages et de l'ADE.

Figure 35. Représentation graphique des valeurs du Cl_2 avant et après déchloration.

Liste des tableaux

Partie A : Rappels théoriques et références bibliographiques

Chapitre I Généralités sur l'eau

Tableau 1. Principaux éléments présents dans l'eau.

Tableau 2. Classification des éléments rencontrés dans l'eau.

Tableau 3. Normes algériennes du ministère des ressources en eau.

Chapitre II Généralités sur les membranes

Tableau 4. Avantages et inconvénients de l'osmose inverse.

Chapitre III Colmatage des membranes

Tableau 5. Classification des valeurs du SDI.

Tableau 6. Produits utilisés lors de nettoyages chimiques.

Partie B : Méthodologie et mise en œuvre expérimentale

Tableau 7. Expression de la minéralisation des eaux en fonction de la conductivité électrique.

Tableau 8. Classification de l'eau selon la valeur du TH.

Partie C : Résultats et Discussions

Tableau 9. Valeurs du pH des eaux de forage et de l'ADE.

Tableau 10. Valeurs de conductivité des eaux de forage et de l'ADE.

Tableau 11. Valeurs de dureté totale des eaux de forage et de l'ADE.

Tableau 12. Valeurs de dureté calcique des eaux de forage et de l'ADE.

Tableau 13. Valeurs de TAC des eaux de forage et de l'ADE.

Tableau 14. Valeurs de TA des eaux de forage et de l'ADE.

Tableau 15. Valeurs de chlorure des eaux de forage et de l'ADE.

Tableau 16. Valeurs de silice des eaux de forage et de l'ADE.

Sommaire

Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Introduction générale.....	1

Partie A : Rappels théoriques et références bibliographiques

Chapitre I Généralités sur l'eau

I.1. Définition de l'eau.....	3
I.2. Cycle de l'eau.....	3
I.3. Sources naturelles de l'eau.....	4
I.3.1. Eaux souterraines.....	4
I.3.2. Eaux de surface	5
I.3.3. Eaux de mers et océans	5
I.4. Composition de l'eau.....	5
I.4.1. Matières minérales.....	5
I.4.2. Impuretés.....	7
I.4.3. Gaz dissous dans l'eau.....	8
I.5. Propriétés de l'eau.....	8
I.5.1. Propriétés organoleptiques.....	8
I.5.2. Propriétés physicochimiques.....	9
I.5.2.1. Température.....	9
I.5.2.2. pH.....	9
I.5.2.3. Conductivité électrique.....	10
I.5.2.4. Dureté (Titre hydrotimétrique TH)	10
I.5.2.5. Titre alcalimétrique (TA) et titre alcalimétrique complet (TAC)	10
I.6. Normes de potabilité de l'eau.....	11

Chapitre II Généralités sur les membranes

II.1. Définition d'une membrane.....	13
II.2. Classification des membranes.....	14
II.2.1. Selon la structure.....	14
II.2.1.1. Membranes isotropes (symétriques).....	14
II.2.1.2. Membranes anisotropes (asymétriques).....	15
II.2.1.3. Membranes liquides.....	16

II.2.2. Selon la nature.....	16
II.2.2.1. Membranes organiques.....	16
II.2.2.2. Membranes inorganiques ou minérales.....	16
II.2.2.3. Membranes composites.....	16
II.2.2.4. Membranes échangeuses d'ions.....	17
II.3. Modes de fonctionnement des systèmes membranaires.....	17
II.3.1. Ecoulement frontal.....	17
II.3.1. Ecoulement tangentiel.....	18
II.4. Grandeurs caractéristiques des membranes poreuses.....	18
II.4.1. Pression transmembranaire.....	18
II.4.2. Densité de flux de perméation.....	19
II.4.3. Taux de rétention et seuil de coupure.....	19
II.5. Procédés de filtration membranaires.....	19
II.5.1. Microfiltration (MF).....	20
II.5.2. Ultrafiltration (UF)	20
II.5.3. Nanofiltration (NF).....	20
II.5.4. Osmose inverse (OI).....	21
II.5.4.1. Structure et description.....	22
II.5.4.2. Principales applications de l'osmose inverse.....	23

Chapitre III Phénomène d'entartrage et de colmatage

III.1. Entartrage.....	25
III.1.1. Définition.....	25
III.1.2. Phases de formation de carbonate de calcium.....	25
III.1.3. Influence de certains paramètres sur l'entartrage.....	25
III.1.3.1. Température.....	25
III.1.3.2. pH.....	26
III.1.3.3. Dureté de l'eau.....	26
III.1.3.4. Eléments présent dans l'eau.....	26
III.1.4. Technique d'élimination du tartre.....	27
III.2. Colmatage.....	27
III.2.1. Définition du colmatage.....	28
III.2.2. Types de colmatage.....	29

III.2.2.1. Colmatage par dépôt.....	29
III.2.2.2. Colmatage par entartrage.....	29
III.2.2.3. Adsorption.....	29
III.2.2.4. Biocolmatage.....	30
III.2.3. Indicateurs de colmatage.....	31
III.2.3.1. Standard Density Index (SDI).....	31
III.2.3.2. Modified Fouling Index (MFI).....	33
III.2.3.3. Modified Fouling Index-Ultrafiltration (MFI-UF).....	35
III.2.4. Limitation de l'accumulation.....	35
III.2.5. Nettoyage des membranes.....	36
III.2.5.1. Méthodes physiques de décolmatage.....	36
III.2.5.2. Méthodes de décolmatage chimiques et/ou enzymatiques.....	38
III.2.6. Effet des produits de nettoyage sur le matériau membranaire.....	41

Partie B : Méthodologie et mise en œuvre expérimentale

I. Présentation du complexe.....	42
I.1. Historique et situation géographique de Cevital.....	42
I.2. Principales activités de Cevital.....	44
II. Procédé de traitement de l'eau par l'osmose inverse.....	44
II.1. Description du processus de traitement par osmose inverse utilisé à CEVITAL.....	44
II.2. Étapes du procédé.....	45
II.2.1. Système d'alimentation en eau brute.....	45
II.2.2. Système de prétraitement.....	45
II.2.3. Système d'osmose inverse.....	48
II.2.4. Lavage sur place CIP (Cleaning In Place)	48
III. Analyses effectuées à Cevital pour assurer la qualité de l'eau	50
III.1. Analyses physico-chimiques.....	50
III.1.1. Potentiel hydrogène (pH).....	50
III.1.2. Conductivité.....	51
III.1.3. Dureté totale (TH total) et dureté calcique.....	52
III.1.4. Détermination du titre alcalimétrique (TA).....	54
III.1.5. Titre alcalimétrique complet (TAC).....	56

III.1.6. Chlorure (Cl ⁻).....	57
III.2. Analyses spectrophotométrique UV-Visible.....	58
III.2.1. Silice (SiO ₂).....	59
III.2.2. Teneur en Fer	60

Partie C : Résultats et Discussions

1. pH.....	61
2. Conductivité.....	62
3. Dureté totale et calcique.....	63
4. TA et TAC.....	65
5. Chlorure.....	66
6. Silice.....	67
7. Élimination du chlore.....	68
8. Influence de quelques ions et leur impact sur les séquestrant.....	68

Conclusion générale

Conclusion générale.....	70
--------------------------	----

Bibliographie

Introduction générale

Introduction générale

L'eau, ce bien précieux comme l'air, est source de vie. Elle est aussi nécessaire à toutes les activités de l'homme : il s'en sert pour les tâches ménagères, pour l'agriculture et aussi pour l'industrie.

L'eau est abondante dans l'univers, on l'estime présente sur terre depuis au moins **4,8 milliards d'années**, et ce, en se référant aux dépôts d'anciennes roches sédimentaires [1]. Elle recouvre **72 %** de la surface terrestre, avec une capacité volumique d'environ **1,4 milliard de Km³**. Ces eaux se répartissent en **97,17 %** d'eau salée dans les mers intérieures, les océans et aussi dans les nappes souterraines. Les **2,83 %** restants sont des eaux douces, elles se subdivisent majoritairement en glaces et neiges [2, 3].

L'histoire du développement industriel s'est construite en partenariat avec l'eau. Au fil du temps la demande en eau ne cesse d'augmenter, cependant les sources en eau douce sont limitées.

Dans ce contexte, les chercheurs ont dû faire appel à des techniques de séparation et de purification des sources hydriques pour satisfaire les besoins humains et industriels.

En Algérie, certaines industries, grandes consommatrices d'eau, connaissent un manque considérable en alimentation d'eau. Ce qui laisse celles-ci chercher des solutions qui satisferaient leurs besoins en eau sans toutefois ménager des dépenses colossales. Ainsi, l'installation d'une station de purification d'eau est plus que nécessaire pour que ces industries puissent s'approvisionner en eaux de forage ou de mer pour y combler leur manque d'eau.

Les procédés membranaires n'ont cessé de se développer dans le but de produire une eau de qualité pour la consommation humaine et pour l'industrie, et ce, avec une grande fiabilité.

L'industrie agro-alimentaire du groupe CEVITAL possède une station de purification par *osmose inverse* qui traite les eaux provenant de forages situés à Ibourassen dans la commune de Oued Ghir (Wilaya de Bejaia).

Cependant, la durée de vie de la majorité de ces membranes d'osmose inverse est très courte par rapport aux normes fixées par les constructeurs. En effet, le vieillissement des membranes est caractérisé par une dégradation de leurs performances. Dans la plupart des cas, les effets du vieillissement sont peu ou mal connus à l'échelle locale et des mesures globales (flux, pression transmembranaire, débit de perméat, taux de rétention...) ne permettent pas de les caractériser [4].

Le but de ce présent travail est donc, d'étudier le vieillissement de ces membranes et de détecter les principales causes de cette anomalie.

Le mémoire est subdivisé en trois parties :

La partie A, consacrée à la synthèse bibliographique, est subdivisée en trois chapitres :

- Le premier chapitre est dédié aux généralités des eaux où est abordées son origine, sa composition, ses propriétés, ainsi que ses normes de potabilités.
- Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les membranes (définition, classification...etc.) et se poursuit par leurs principes de mise en œuvre techniques membranaires et leurs applications.
- Le troisième chapitre s'attache à présenter les phénomènes d'entartrage et de colmatage.

La partie B va porter sur la présentation du complexe et sur les techniques expérimentales utilisées pour déterminer la composition de l'eau.

Dans la partie C seront présentés les résultats et discussions. Le mémoire s'achèvera par une conclusion générale.

Partie A : Rappels théoriques et références bibliographiques

Chapitre I

Généralités sur l'eau

Généralités sur l'eau

L'eau, en complément de son rôle primordial dans l'accomplissement de la vie, est un élément majeur de la santé publique en raison du grand nombre de ses services rendus notamment pour l'assainissement, l'hygiène, la santé physique et le bien-être moral [5].

I.1. Définition de l'eau

L'eau est une substance chimique constituée de deux atomes d'hydrogène, et d'un atome d'oxygène qui forment le bien connu « H_2O ». Dans de nombreux contextes le terme « eau » est employé au sens restreint d'eau à l'état liquide. La composition de l'eau fut découverte par le physicien anglais *CAVENDISH* en 1781 [6]. *CAVENDISH* a réussi à démontrer que l'eau était formée d'hydrogène et d'oxygène. A la même époque en France, *LAVOISIER* réussit de faire l'opération inverse : faire de l'eau à partir de ces deux éléments. L'atome central l'oxygène a une charge électrique négative qui attire vers lui les deux atomes d'hydrogène qui sont chargés positivement. Cette attirance entre les deux pôles est très forte, ce qui fait de l' H_2O une molécule très stable [7].

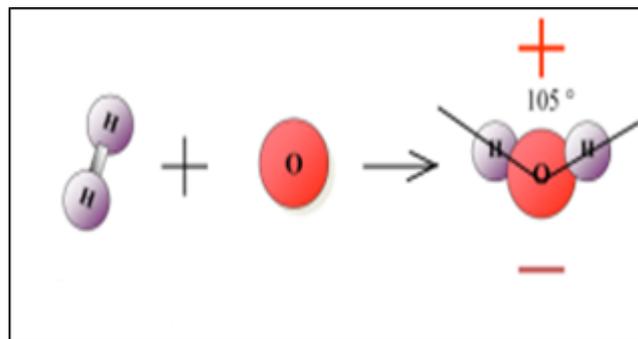


Figure 1. Illustration schématique de la molécule d'eau [7]

I.2. Cycle de l'eau

L'eau circule continuellement dans les enveloppes superficielles de la terre, au sein de plusieurs grands compartiments : les océans, la cryosphère (neige et glaces), la lithosphère (sols et sous-sol), l'atmosphère et la biosphère. Ces compartiments sont les éléments constituant du système climatique dont la masse d'eau totale est quasiment constante. Le rayonnement solaire, absorbé par la surface du globe, provoque l'évaporation des océans, lacs, rivières et sols, la transpiration des plantes et la sublimation de la glace et de la neige. Mais de multiples autres transports participent au cycle de l'eau (Figure 2) [3, 8].

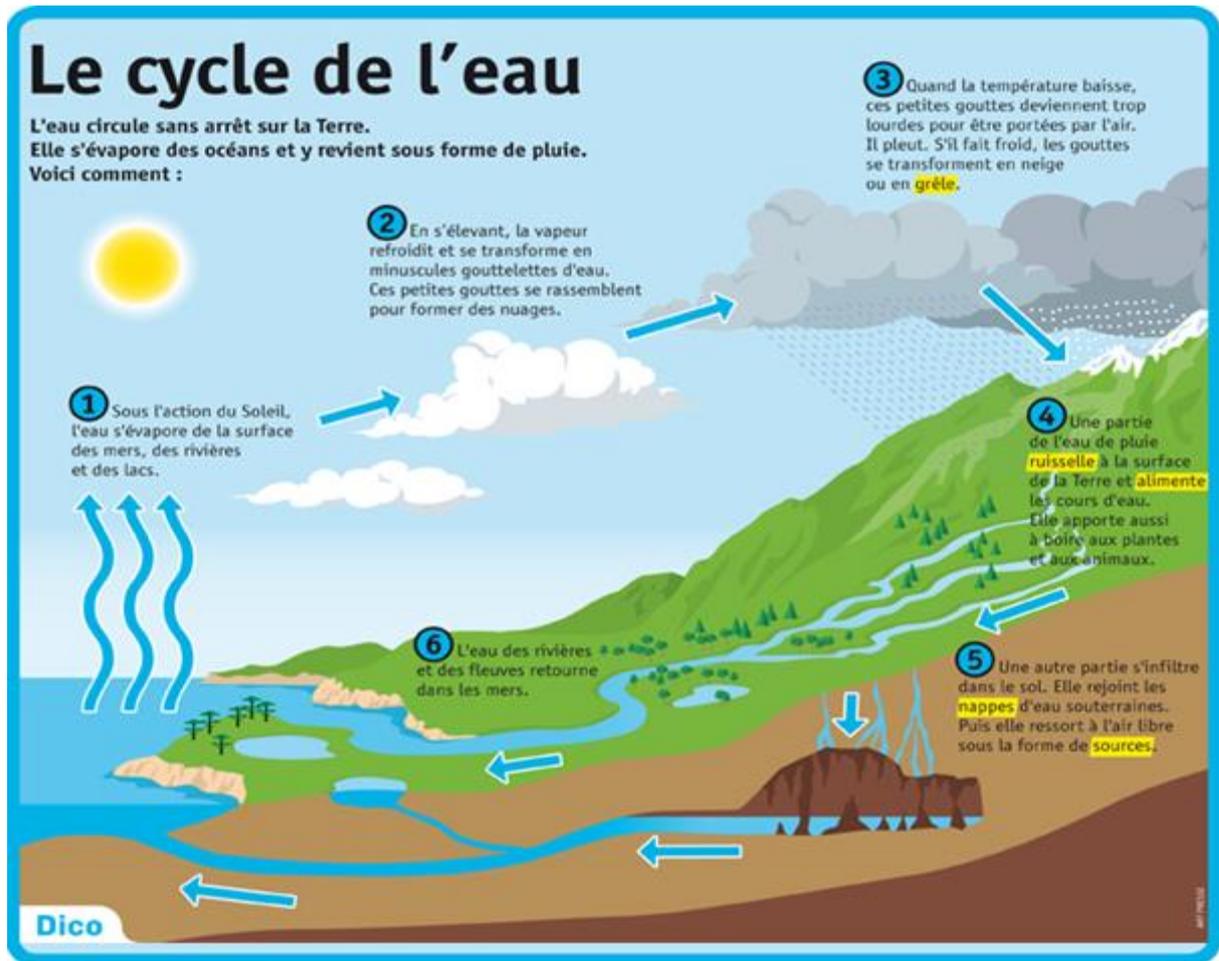


Figure 2. Illustration schématique du Cycle de l'eau [9].

I.3. Sources naturelles de l'eau [10, 11]

L'eau recouvre à peu près les trois quarts de la surface terrestre. Elle existe dans l'atmosphère et sous la terre. Elle est principalement dans les océans mais aussi on la retrouve dans les rivières, les lacs, la neige et les glaciers. Par ailleurs, nous retrouvons au-delà de 99 % de l'eau potable dans les glaciers, les champs de glace ou sous terre.

I.3.1. Eaux souterraines

Les eaux souterraines sont des eaux soit qui imprègnent la totalité de la couche géologique qui est considérée comme des terrains poreux (tels que les sables, les alluvions...etc.), soit qui s'établissent seulement dans des fissures ou fractures de roches compactes. La nature du terrain sous lequel se trouvent ces eaux, est un facteur déterminant de leurs compositions chimiques. Cependant, elles sont appelées aussi les eaux propres car elles répondent, en général, aux normes de potabilité. En effet, ces eaux sont moins sensibles aux pollutions accidentelles. Les eaux souterraines ont une bonne pureté bactériologique, une faible turbidité, une température et une composition chimique constante.

I.3.2. Eaux de surface

Les eaux de surface sont des eaux qui circulent ou bien qui sont stockées à la surface des continents. Elles ont pour origine, soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit les eaux de ruissellement. On peut les trouver stockées sous forme de réserves naturelles (lacs) ou artificielles (retenue de barrages). Elles sont caractérisées par une surface d'échange eau-atmosphère quasiment immobile avec une profondeur qui peut être importante. La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains rencontrés durant leurs parcours. Au cours de son cheminement, l'eau dissout les différents éléments constitutifs des terrains. En revanche, sa teneur en gaz dissous (oxygène, azote, gaz carbonique) dépend des échanges à l'interface eau-atmosphère et de l'activité métabolique des organismes aquatiques au sein de l'eau. Les eaux de surface sont rarement potables sans aucun traitement. Elles sont plus ou moins polluées par divers rejets d'origine urbaine, industrielle, agricole ou d'une pollution bactériologique d'origines humaine et animale.

I.3.3. Eaux de mers et océans

La mer est considérée comme un réservoir d'eau. Ses eaux sont fortement minéralisées et caractérisées par une grande salinité. Elles contiennent près de 3,5% de sels dont le plus important est le chlorure de sodium. Les eaux de mer sont une source d'eau brute qu'on utilise que lorsqu'il n'y a pas moyen de s'approvisionner en eau douce. Elles sont aussi dénommées : « eaux saumâtres ».

I.4. Composition de l'eau

I.4.1. Matières minérales

Ce sont essentiellement des composés ioniques (anions et cations) qui proviennent de la dissolution des roches dans l'eau qui circule à leur contact. Celles-ci sont présentées dans ce tableau ci-dessous :

Tableau 1. Les principaux éléments présents dans l'eau [10]

Cations	Anions
Calcium Ca^{2+}	Sulfates SO_4^{2-}
Magnésium Mg^{2+}	Nitrates NO_3^-
Sodium Na^+	Nitrites NO_2^-
Potassium K^+	Chlorures Cl^-
Ammonium NH_4^+	Bicarbonate HCO_3^-

➤ **Cations [12, 13]**

• **Calcium Ca^{2+}**

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature. C'est le composant majeur de la dureté de l'eau et généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur est liée directement à la nature géologique des terrains traversés.

• **Magnésium Mg^{2+}**

Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature. Il constitue environ 2,1 % dans l'écorce terrestre.

• **Sodium Na^+**

Le sodium est un élément constant dans l'eau. Il se trouve dans la majorité des eaux souterraines et de surface.

• **Potassium K^+**

Le potassium est beaucoup moins abondant que le sodium et rarement présent à de grandes teneurs dans l'eau.

• **Ammonium NH_4^+**

L'ion ammonium représente la forme ionisée de l'azote ammoniacal. Sa présence, dans les eaux profondes, résulte le plus souvent de la décomposition anaérobie de matières organiques azotées.

➤ **Anions [12, 13]**

• **Sulfates SO_4^{2-}**

Les eaux naturelles contiennent pratiquement des sulfates en proportion très variables. Leur présence résulte de la solubilité du sulfate de calcium des roches gypseuses et l'oxydation des sulfures répandus dans les roches.

• **Chlorures Cl^-**

Le chlorure est un sel mobile, non toxique, très répandu dans la nature sous forme de sels de sodium (NaCl), de potassium (KCl), et de calcium (CaCl_2). Dans les eaux naturelles, la présence de chlorures peut être attribuée à la nature des terrains traversés ou à la pénétration de l'eau de mer dans les régions côtières, et ce, de manière naturelle ou par intervention humaine par pompage excessif. Aussi, elle peut être due à la pollution provenant des rejets urbains et industriels. Chacune de ces sources de pollution peut contaminer localement les eaux souterraines ou les eaux superficielles.

- **Nitrates (NO_3^-)**

Les nitrates sont des ions minéraux nutritifs solubles dans l'eau. Ils sont directement assimilables par les plantes. Ils sont ajoutés au sol soit directement par les agriculteurs soit indirectement par le fumier ou par le purin. A cause de leur bonne solubilité dans l'eau, les nitrates sont facilement éliminés du sol, en particulier quand le sol est en jachère.

Ils sont généralement l'indice d'une pollution.

- **Nitrites (NO_2^-)**

Les nitrites constituent une étape importante dans la métabolisation des composés azotés. Ils s'insèrent dans le cycle de l'azote entre l'ammoniaque et le nitrate. Les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque, soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une bactérie dénitrifiante. Leur présence dans l'eau est généralement rare et en faible quantités.

- **Bicarbonates (HCO_3^-)**

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire) par des eaux chargées en gaz carbonique.

I.4.2. Impuretés [14]

Tout corps dans un milieu aquatique n'est pas un produit de contamination ou une impureté. Un élément de contamination est considéré comme agent de pollution dès l'instant où sa concentration atteint un niveau nuisible pour la vie aquatique ou la santé publique dans le cas où l'eau est destinée à être bue. Les éléments présents peuvent se présenter soit à l'état solide, liquide ou vapeur.

En ayant un caractère minéral ou organique parfois toxique et à des dimensions très variables, ces éléments rencontrés dans l'eau sont présentés dans le tableau suivant (**Tableau 2**) :

Tableau 2. Classification des éléments rencontrés dans l'eau [14]

État ou forme des éléments dans l'eau	Nature des éléments
Matières en suspension	Sables, argiles, boues diverses. Roches en débris, matières organiques, minérale et végétales. Débris divers insolubles.
Matières en émulsion	Matière organiques colloïdales. Huiles minérale, goudrons, suies, pétrole, argiles colloïdales.
Matière organique solubilisées	Tourbes, déchets végétaux, matières azotées. Produit de synthèse organique soluble, etc.
Sels minéraux	Carbonates, Bicarbonates, Sulfates, Chlorures Nitrates, magnésium, calcium, sodium, potassium, ammonium, etc.
Gaz	Oxygène, azote, gaz carbonique, ammoniac,
Organismes vivants d'origine végétale, animale, bactérienne et virale	Plancton, algues, champignons, vers, larves d'insectes, autres larves, bactéries, amibes, virus, etc.

I.4.3. Gaz dissous dans l'eau

Lorsque l'eau à son état naturelle est en contact avec l'air, les gaz de l'atmosphère (O_2 , N_2 , CO_2) peuvent se dissoudre en elle. Leurs proportions dans l'air, leurs solubilités, la température ainsi que la turbulence de l'eau ou la vitesse du vent influent sur ce transfert, et ce, à travers l'interface eau-air [11].

I.5. Propriétés de l'eau

De nombreux paramètres sont mesurés afin de s'assurer de la qualité de l'eau. Les paramètres organoleptiques et les paramètres physico-chimiques sont des facteurs qui doivent être contrôlés.

I.5.1. Propriétés organoleptiques [10, 11,14]

Il s'agit de la saveur, de la couleur, de l'odeur et de la transparence de l'eau. Ils n'ont pas de signification sanitaire, mais leur dégradation peut indiquer une pollution ou un mauvais fonctionnement des installations de traitement ou de distribution. Ils permettent au consommateur de porter un jugement succinct sur la qualité de l'eau.

I.5.1. 1. Couleur

Cette propriété optique est aussi importante elle résulte de l'absorption sélective de certaines radiations. Elle est due à des acides humiques, grosses molécules contenant des cycles aromatiques ou polymathiques avec des fonctions hydroxydes ou acides.

I.5.1. 2. Goût et odeur

La flaveur est le terme utilisé pour décrire la sensation ressentie dans la bouche lors de l'absorption de nourriture ou d'un liquide. Le goût peut être défini comme l'ensemble des sensations gustative, olfactive et sensibilité chimique commune perçue lorsque l'aliment ou la boisson est dans la bouche. L'odeur est un paramètre subjectif, et peut être définie comme l'ensemble des sensations perçue par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles.

I.5.1. 3. Turbidité

La turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux, par la présence de matières en suspension (MES) fines, comme les argiles, les limons, les grains de silice et les microorganismes. Une faible part de la turbidité peut être due également à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale.

I.5.2. Propriétés physicochimiques [10, 15]

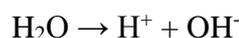
Ces paramètres sont des indicateurs de la qualité naturelle des eaux :

I.5.2.1. Température

La température de l'eau joue un rôle important dans la solubilité des sels et des gaz. Par ailleurs, la température accroît les vitesses des réactions chimiques et biochimiques d'un facteur 2 à 3 pour une augmentation de 10 degrés Celsius (°C). L'activité métabolique des organismes aquatiques est donc également accélérée lorsque la température de l'eau s'accroît.

I.5.2.2. pH

Le pH détermine la concentration d'ions hydrogène présent dans une solution. L'eau peut se diviser en ions selon la réaction suivante :



Une eau parfaitement pure est très peu dissociée. Les mesures de conductivité ont montré qu'à 20 °C, il y avait un sur dix millions (10^{-7}) d'ions H^+ dans l'eau pure. Le pH d'une solution est, donc, le cologarithme décimal de la concentration en ions H^+ de cette solution.

Pour une eau pure :

- Si la concentration H^+ est plus forte, le pH sera inférieur à 7 et la solution sera dite « acide ».
- Si la concentration H^+ est plus faible, le pH sera supérieur à 7 et la solution sera dite « alcaline » ou « basique ».

I.5.2.3. Conductivité électrique

La conductivité est une mesure de la capacité d'une eau à conduire un courant électrique. Plus la charge en ions dissous est importante, plus la conductivité augmente. Ce paramètre dépend également de la température. La conductivité d'une eau est généralement ramenée à 25°C et s'exprime en micro Siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

I.5.2.4. Titre hydrotimétrique (TH)

La dureté totale ou titre hydrotimétrique (TH) correspond aux sels de calcium et de magnésium dissous dans l'eau.

La dissolution résulte principalement de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations rocheuses calcaires et dolomitiques. Cette dissolution est accrue par la présence dans l'eau de gaz carbonique CO_2 , provenant de l'atmosphère et des couches superficielles du sol. La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux.

La dureté se mesure en degré français ($^\circ\text{f}$)¹ avec :

$$\text{TH } (^\circ\text{f}) = 10 \times \left[\frac{[\text{Ca}^{2+}]}{40.08} + \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{24.31} \right]$$

I.5.2.5. Titre alcalimétrique (TA) et titre alcalimétrique complet (TAC)

Ils expriment la teneur en bicarbonates (HCO_3^-), carbonates (CO_3^{2-}) et hydroxydes (OH^-) qui traduisent directement l'alcalinité d'une eau. Cette alcalinité se décompose en deux parties :

- ❖ **Le titre alcalimétrique simple (TA)** : c'est la teneur en ions hydroxyde et en ions carbonates.

$$\text{TA} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$$

- ❖ **Le titre alcalimétrique complet (TAC)** : définit les teneurs en ions hydroxyde, carbonates et bicarbonates.

$$\text{TAC} = [\text{OH}^-] + [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}]$$

¹ Degré français

Pour l'expression des titres, il est souvent fait appel à la notion de degré français ($^\circ\text{f}$) qui correspond à la cinquième partie du milliéquivalent par litre.

A l'origine: $1^\circ\text{f} = 10 \text{ mg/L de CaCO}_3$ or $10 \text{ mg/L CaCO}_3 = 0,2 \text{ meq/L}$

I.6. Normes de potabilité de l'eau [14,16]

L'OMS définit l'eau potable comme étant celle dont la consommation est sans danger pour la santé. Pour que l'eau soit qualifiée de potable, elle doit satisfaire à des normes relatives aux paramètres organoleptiques (couleur, turbidité, odeur, saveur), physicochimiques (température, pH, etc.), microbiologiques et à des substances indésirables et toxiques (nitrate, nitrite, arsenic, plomb, hydrocarbures, etc.). Ces normes sont classées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3. Normes algériennes du ministère des ressources en eau

Groupe de paramètres	Paramètres	Valeurs indicatives	Unités
Paramètres organoleptiques	Couleur	15	mg/l platine
	Turbidité	5	UTN
	Odeur	4	Taux dilution
	Saveur	4	Taux dilution
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Alcalinité	500	mg/l en CaCO ₃
	Calcium	200	mg/l en CaCO ₃
	Chlorure	500	mg/l
	Concentration en ions hydrogène	6,5 ≥ pH ≤ 9	Unité pH
	Conductivité	2800	µs/cm
	Dureté	200	mg/l en CaCO ₃
	Potassium	12	mg/l
	Résidu sec	1500	mg/l
	Sodium	200	mg/l
	Sulfate	400	mg/l
	Température	25	°C
Paramètres microbiologiques	Escherichia Coli	0	n/100ml
	Entérocoques	0	n/100ml
	Bactéries sulfitoréductrices y compris les spores	0	n/100ml
	Aluminium	0,2	mg/l
	Fer totale	0,3	mg/l

Paramètres chimiques	Manganèse	50	µg/l
	Nitrates	50	mg/l
	Nitrites	0,2	mg/l
	Phosphore	5	mg/l
	Argent	100	µg/l
	Cuivre	2	mg/l
	Mercure	6	µg/l
	Plomb	10	µg/l
	Zinc	5	mg/l
	Pesticides	0,5	µg/l
	Bromates	10	µg/l
	Chlore	5	mg/l
	Chlorure de vinyle	0,3	µg/l

Chapitre II

Généralités sur les membranes

Chapitre II : Généralités sur les membranes

La technologie membranaire est devenue une véritable nécessité lors de la dernière décennie dans l'industrie (agroalimentaire, peinture, dessalement...), elle tend à se développer actuellement dans le traitement des eaux. Le principe consiste à faire circuler une solution à travers une paroi mince (membrane semi-perméable), sous l'effet d'une force motrice (pression, concentration, champ électrique) en arrêtant certaines molécules et en laissant passer d'autres. La sélection peut s'effectuer soit par :

- la taille des pores ;
- Des critères d'affinité entre molécules ou ions et la membrane [17].

La séparation des mélanges dans un procédé membranaire est le résultat de la différence des vitesses de transport des différents composants à travers la membrane. La vitesse de transport d'un composant à travers une membrane est déterminée par les forces motrices telles que la concentration, la pression, la température, le gradient de potentiel électrique ainsi que la concentration et la mobilité du composant dans la matrice de la membrane [18].

L'accumulation de matière peut se faire à la surface d'une membrane. En effet, les particules peuvent bloquer ses pores, ce phénomène est appelé « colmatage ». Quand un système membranaire fonctionne à pression transmembranaire constante, la conséquence la plus problématique du colmatage est une diminution, parfois extrêmement accentuée, du flux du perméat [19].

II.1. Définition d'une membrane

Une membrane est une barrière de quelques centaines de nanomètres à quelques millimètres d'épaisseur, sélective, qui sous l'effet d'une force de transfert va permettre ou empêcher le passage de certains composants entre deux milieux qu'elle sépare (**Figure 3**).

La sélectivité ou la permselectivité correspond à l'ensemble des taux de perméabilité des différentes substances contenues dans une solution. La force de transfert recouvre le gradient de pression, de concentration, d'activité ou de potentiel électrique. De ce fait les membranes incluent une grande variété de matériaux et de structures qui forment autant de possibilités de configuration et de classification [20].

Une membrane peut être homogène ou hétérogène, symétrique ou asymétrique dans sa structure. Elle peut être solide ou liquide, constituée de matériau organique ou inorganique. Aussi, elle peut être neutre ou conductrice de charges positives ou négatives. Son épaisseur va de moins de 100 nm à plus d'1 mm. Sa résistance électrique peut varier de $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ à moins de $1 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ [18].

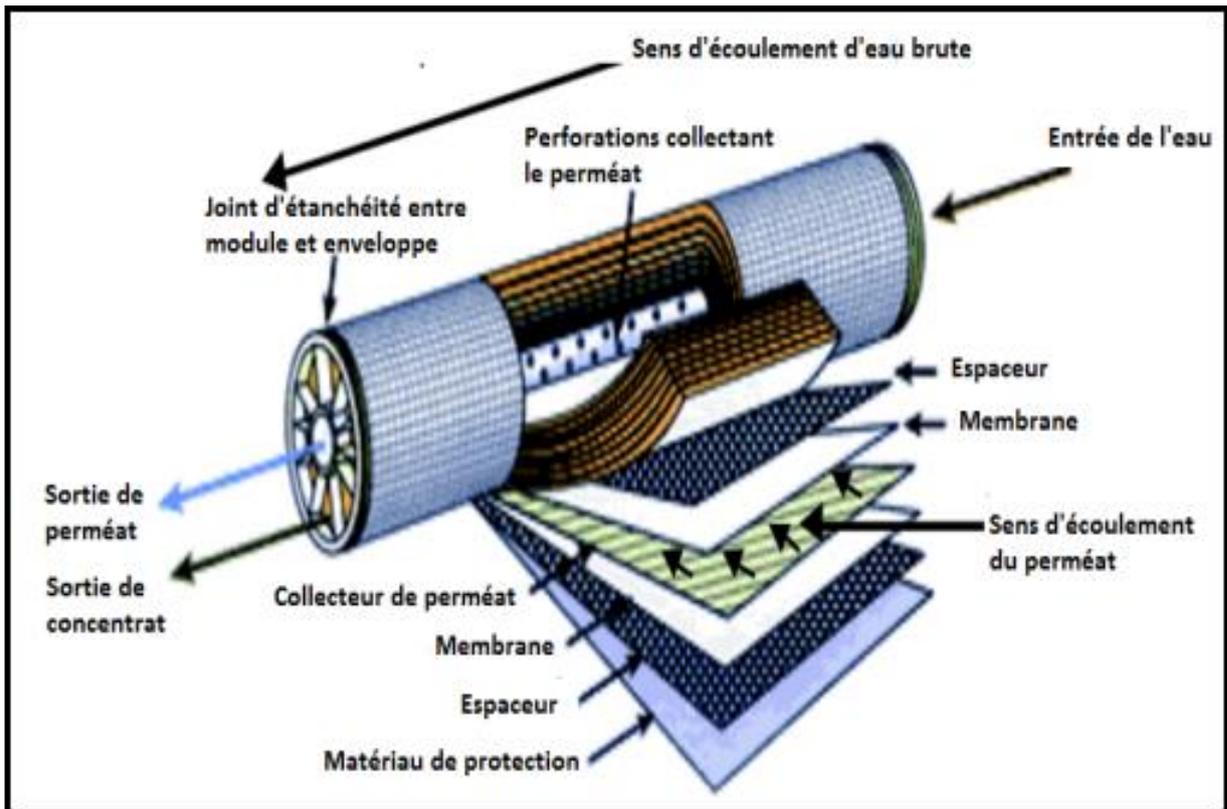


Figure 3. Structure interne d'une membrane spirale [21].

II.2. Classification des membranes

L'élément au cœur du procédé de filtration membranaire est la membrane. Il convient de choisir la membrane adaptée au procédé utilisé, ce qui n'est pas toujours une tâche aisée. Le type de membrane, la conception de l'installation et les paramètres de traitement doivent être adaptés et sélectionnés avec soin afin d'obtenir les performances et la rentabilité voulues sur l'ensemble du procédé. Les membranes peuvent être classées selon deux paramètres (la structure et la nature) [22].

II.2.1. Selon la structure [20, 23]

Cette classification ne tient compte que de la structure physique de la membrane. On distingue trois types (membranes isotropes ; membranes anisotropes ; membranes liquides).

II.2.1.1. Membranes isotropes (symétriques)

Appelées aussi membranes de première génération. Leurs propriétés structurales restent constantes tout le long de leur épaisseur. Elles ont besoin d'une haute pression de travail pour arriver à faire passer l'eau tout le long de la pellicule membranaire (Figure 4).

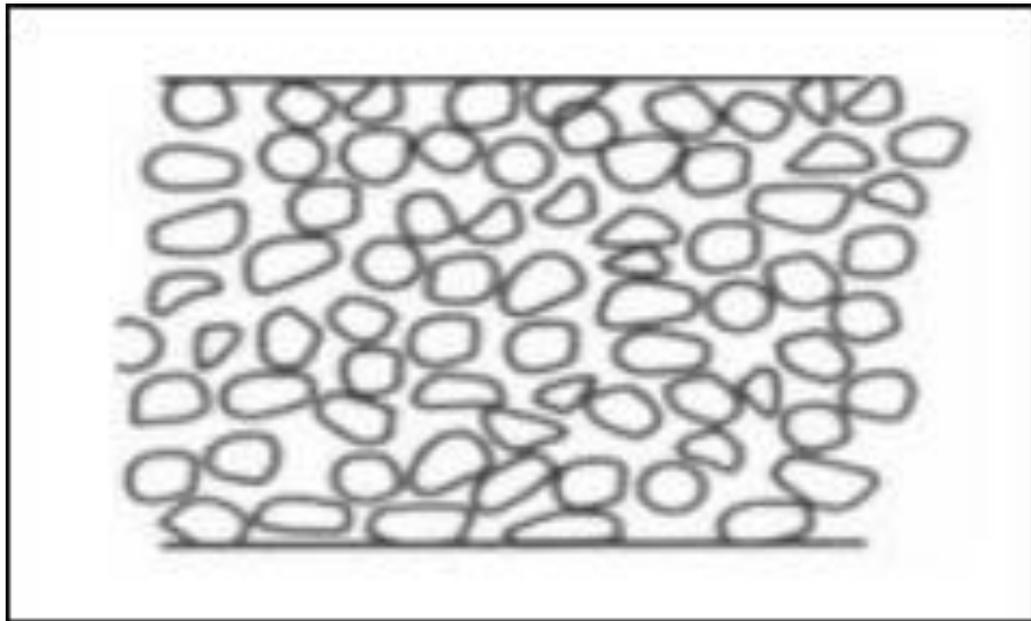


Figure 4. Membrane symétrique [4].

II.2.1.2. Membranes anisotropes (asymétriques)

Appelées aussi membranes de deuxième génération dont la structure varie de la surface de la membrane vers l'intérieur. Leur diamètre de pores augmente dans le sens de l'écoulement de l'eau; elles sont le plus couramment utilisées car les pressions requises sont plus faibles (Figure 5).

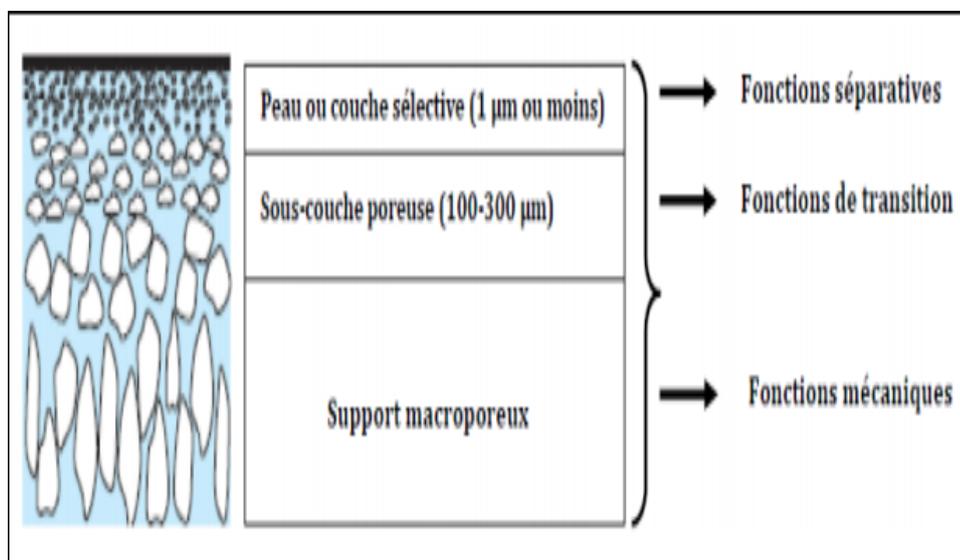


Figure 5. Membranes asymétriques ou anisotropes [4].

II.2.1.3. Membranes liquides

Appelées notamment membranes de troisième génération, elles sont constituées par une mince pellicule semi-perméable sur un support poreux.

II.2.2. Selon la nature [22, 24]

Cette classification ne tient compte que de la nature des matériaux constitutifs des membranes. On parle alors de : membranes organiques ; membranes minérales ou inorganiques ; membranes composites ; membranes échangeuses d'ions.

II.2.2.1. Membranes organiques

Elles sont fabriquées à partir de polymères organiques (acétate de cellulose) ou à partir de polymères de synthèse. Parmi les polymères les plus utilisés, on rencontre, entre autres, les polysulfones, les polyamides aromatiques, les polyimides, les polyethersulfones, les polycarbonates ainsi que des polymères fluorés possédant principalement une structure asymétrique. Le plus souvent, un premier polymère présentant une structure macroporeuse est utilisé comme support (polyester, ...) et un second polymère forme la couche active de la membrane.

II.2.2.2. Membranes inorganiques ou minérales

Ces techniques se sont diffusées plus tardivement que les membranes organiques. Elles sont composées de corps entièrement minéraux (matières céramiques, métal fritté, verre). Ces membranes présentent une structure, à la fois, composite et asymétrique. Ces membranes sont composées d'un support macroporeux à base d'alumine ou de carbone sur lequel sont déposées un nombre variable de couches d'oxydes minéraux (aluminium, ZrO_2 , TiO_2 ...). Le rôle de ces couches filtrantes de faible épaisseur est d'assurer la séparation des solutés grâce à un rayon de pore adapté, alors que le support assure la résistance mécanique. Ces membranes peuvent travailler dans des conditions plus sévères que les membranes organiques grâce à leur résistance mécanique, chimique et thermique (jusqu'à $P = 40 \text{ bars}$, $T = 120^\circ C$ et $pH = 1-14$).

II.2.2.3. Membranes composites

Les membranes composites apparues en 1990, sont créées à partir des deux types précédents. Il s'agit des membranes minérales sur lesquelles on dépose des polymères ou sur lesquelles on greffe d'autres composés tels que des silanes. Elles possèdent, donc, des propriétés qui sont un compromis entre les membranes organiques et inorganiques. Ces membranes sont caractérisées par une superposition des couches beaucoup plus fines que les membranes classiques (**Figure 6**).

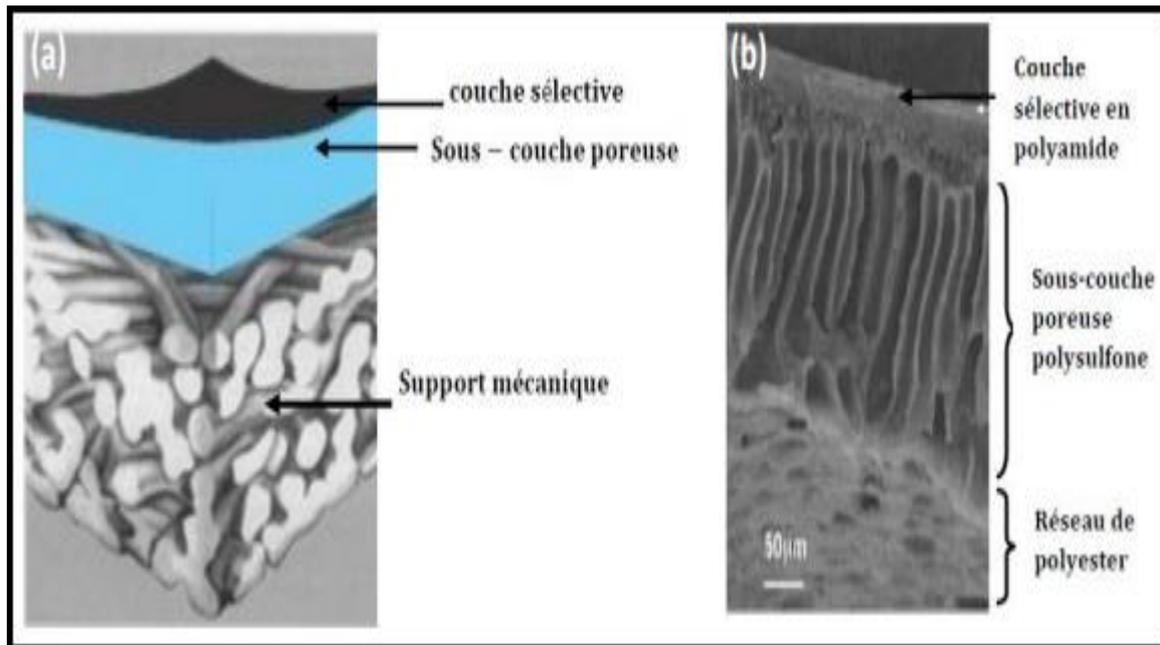


Figure 6. Représentation d'une membrane composite [4].

- (a) Représentation schématique d'une membrane composite ;
 (b) Exemple de membrane composite : sous couche en polysulfone, couche active en polyamide.

II.2.2.4. Membranes échangeuses d'ions

Les membranes échangeuses d'ions (MEI) ou membranes perméables aux ions (MPI) ou membranes ioniques utilisées en électrodialyse, sont des membranes organiques denses échangeuses d'ions et composées de matériaux analogues à ceux des résines échangeuses d'ions. Elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge.

Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro-désionisation 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.

II.3. Modes de fonctionnement des systèmes membranaires [25]

Les membranes peuvent être utilisées en filtration selon deux fonctionnements principaux : La filtration frontale (appelée aussi croisé (*Dead-end filtration*)) ou la filtration tangentielle (*Cross-flow filtration*) (**Figure II.3**). Ces deux modes correspondent à deux technologies et deux approches complètement différentes de la filtration.

II.3.1. Ecoulement frontal

Dans le cas d'une filtration en mode frontal, le fluide à filtrer circule perpendiculairement à la membrane. Les particules solides et les solutés sont retenus à la surface et leur dépôt entraîne une superposition de couches qui vont induire à une accumulation importante de matière à la surface de

la membrane au cours de son utilisation, ce qui provoque par la suite un colmatage par la formation d'un gâteau. Ce colmatage réduira progressivement la perméabilité et engendrera un besoin de nettoyage périodique.

II.3.1. Ecoulement tangentiel

Dans ce cas, la solution à filtration circule parallèlement à la membrane. Le fonctionnement du système de filtration s'effectue en continu et l'accumulation des espèces retenues à la surface de la membrane est moins importante qu'en filtration frontale. Cette configuration permet d'obtenir dans une certaine gamme de débits, des contraintes de cisaillement constantes à la surface de la membrane, et donc, de limiter le colmatage.

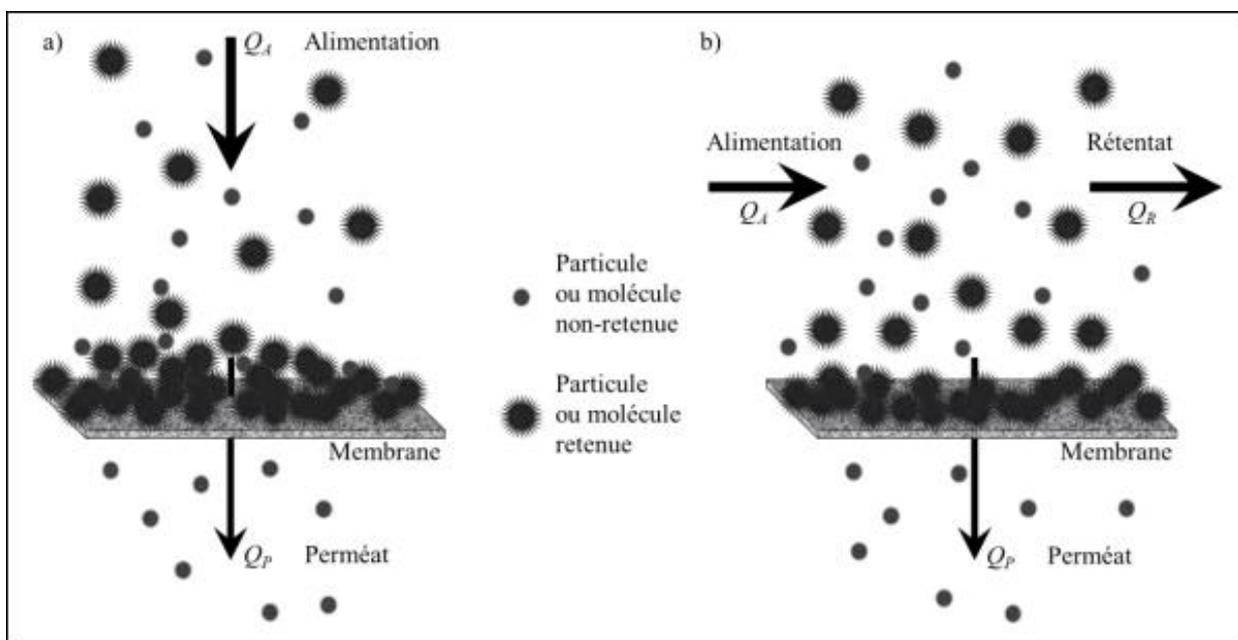


Figure 7. Modes de fonctionnement des systèmes membranaires
Filtration en mode frontal (a) ; Filtration en mode tangentiel (b) [25].

II.4. Grandeurs caractéristiques des membranes poreuses

II.4.1. Pression transmembranaire

Dans le cas où la force agissante utilisée dans le procédé de filtration membranaire est la pression, il convient de définir la pression transmembranaire (PTM) comme la force motrice à l'origine du transfert : c'est la différence de pression entre le compartiment retentât (alimentation) et le compartiment perméat (filtrat) [4]. La PTM s'exprime sous la forme :

$$PTM = [(P_e + P_s) / 2] - P_p$$

Avec :

(Pe) : pressions à l'entrée ;

(Ps) : pressions à la sortie ;

(Pp) : pression côté perméat [4].

II.4.2. Densité de flux de perméation [25]

Lors de la filtration d'un solvant pur, la densité de flux de perméation « J » varie en fonction de la PTM appliquée. Elle est exprimée selon la loi de Darcy de la manière suivante :

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{Qp}}{\mathbf{S}} = \frac{\mathbf{Lp}}{\boldsymbol{\mu}} * \mathbf{PTM}$$

Avec :

(Qp) : le débit de perméat ($\mathbf{m}^3 \cdot \mathbf{s}^{-1}$) ;

(S) : l'aire membranaire (\mathbf{m}^2) ;

(Lp) : le coefficient de perméation (\mathbf{m}) ;

(μ) : la viscosité dynamique du solvant (**Pa.s**).

II.4.3. Taux de rétention et seuil de coupure [25]

L'efficacité du procédé de filtration est caractérisée par sa sélectivité. La sélectivité d'une membrane face à une espèce est définie de façon générale par son taux de rétention R, qui est la fraction de soluté présente dans la solution retenue par la membrane.

$$\mathbf{R} = \mathbf{1} - \frac{\mathbf{Cp}}{\mathbf{C0}}$$

Avec :

(C0) : la concentration de l'espèce en solution avant perméation à travers la membrane ;

(Cp) : la concentration de l'espèce dans le perméat

II.5. Procédés de filtration membranaires

Un procédé de séparation est une technique ou une technologie permettant de transformer un mélange de substances en deux ou plusieurs composants distincts. Les buts de ce type de procédé peuvent être divers:

- Purification : les impuretés doivent être extraites du composé d'intérêt ;
- Concentration : élimination d'une partie du solvant ;
- Fractionnement : séparation d'un mélange complexe en plusieurs mélanges différents [26].

La technologie de la filtration sur membrane peut être appliquée pour la séparation fluide / fluide ou particules / fluide en vue de récupérer les espèces valorisables (eau, lactose, sels minéraux...).

Les membranes ont des structures poreuses ou denses permettant de laisser passer de manière sélective les composants d'une solution sous l'action d'une différence de pression entre l'amont et l'aval de la membrane. Deux fractions sont obtenues : le retentât, en amont de la membrane, qui contient les éléments retenus par la membrane, et le perméat, en aval, qui contient les éléments qui ont traversé la membrane. Les performances de filtration des procédés membranaires utilisant la pression comme force agissante sont évaluées par les notions de productivité (perméabilité) et d'efficacité (sélectivité) [24].

Il est d'usage de séparer les membranes en différentes catégories selon leurs capacités de rétention et de définir ainsi des domaines de filtration. Il en existe plusieurs procédés membranaires tels que ; la nanofiltration (NF), la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF) et l'osmose inverse (OI).

II.5.1. Microfiltration (MF)

Elle est définie comme un procédé de séparation solide/liquide. Le mécanisme est basé sur l'effet tamis (taille) et rend possible la rétention de particules en suspension ou de bactéries dont la taille se situe entre (0,1 et 10 μm). Il permet de retenir entre autres : les émulsions d'huile, les bactéries, les levures, les plus gros colloïdes, les gros pigments. La pression d'opération est relativement basse entre (0.5 et 3 bar) [22, 24].

II.5.2. Ultrafiltration (UF)

On peut la définir comme un procédé de séparation en phase liquide, par perméation à travers une membrane perméable sous l'effet d'un gradient de pression. La pression transmembranaire est de l'ordre de quelques bars (entre 1 et 5 bars). Elle repose sur l'utilisation de membranes dont les diamètres de pores de (1 et 100 nm) qui laissent passer partiellement tout soluté d'une taille inférieure au seuil de coupure de celles-ci (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, protéines, colloïdes) [22, 24].

II.5.3. Nanofiltration (NF)

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 Å). Les membranes de NF sont conçues pour assurer un enlèvement poussé des ions multivalents (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Mn^{+2} , Fe^{+2}). La NF permet aussi un enlèvement poussé de la matière organique naturelle (MON) et donc une forte réduction de la concentration en carbone organique total (COT). La couleur, en relation avec le Fe et

la MON, est très bien enlevée par ce procédé. Les pressions transmembranaires mises en œuvre sont entre (5 et 25 bars) [22, 23].

II.5.4. Osmose inverse (OI)

- Typiquement utilisée pour le dessalement de l'eau de mer ou la déminéralisation des eaux saumâtres, l'osmose inverse est la plus ancienne des techniques de séparation par membrane. Elle utilise des membranes denses pour retenir la majorité des solutés et ne laisse passer que le solvant (le soluté ne passe pas) pour équilibrer la concentration. La différence de concentration crée une pression, appelée « *Pression osmotique* ». Pour inverser le passage du solvant et augmenter la différence de concentration, il faut appliquer une pression supérieure à la pression osmotique. Les pressions appliquées sont comprises entre 30 et 80 bars (**Figure 8**) [19, 22].
- L'osmose est 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-perméable sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit alors par un flux d'eau dirigée de la solution diluée vers la solution concentrée. 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. Cette pression est nommée la pression osmotique P (en faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure). Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique: c'est le phénomène d'osmose inverse [27, 28].

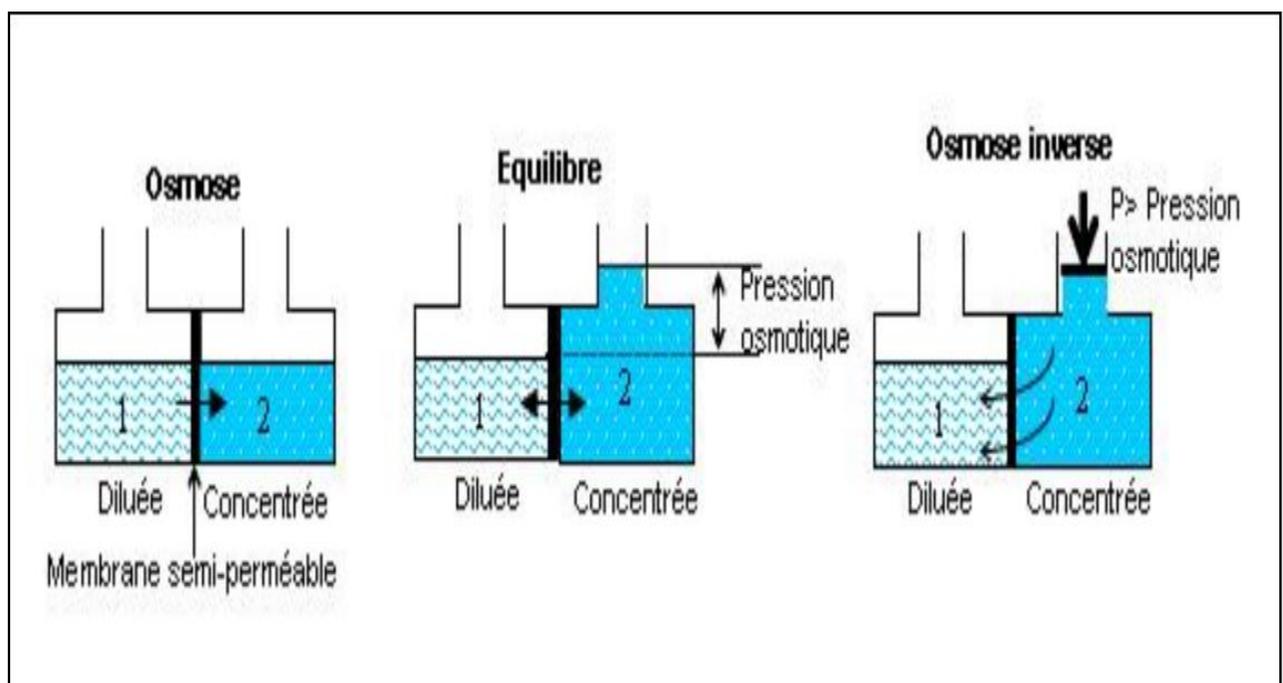


Figure 8.Principe de l'osmose et de l'osmose inverse [28].

La pression osmotique peut être calculée par la loi de Van't Hoff qui explique que la pression osmotique exercée par un soluté est égale à la pression que ce corps aurait exercé dans l'état gazeux parfait dans le même volume (V) et à la même température (T). Si le soluté est dissocié en « i » ions, la pression osmotique sera i fois supérieure.

La pression osmotique d'une solution est proportionnelle à la concentration en solutés :

$$\Pi = i . C . R . T$$

Avec :

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

Π est exprimée en pascals.

Cette relation est valable pour des solutions diluées [27, 28].

III.5.4.1. Structure et description

La séparation des solutés et le passage du solvant (l'eau dans la plupart des cas) dépendent du choix des matériaux, des techniques d'élaboration et de la structure de la membrane. L'osmose inverse n'a pu se développer que grâce à la mise au point de techniques permettant de préparer des films polymères d'épaisseur très faible, sans quoi, les surfaces membranaires mises en œuvre pour avoir un rendement suffisant auraient été gigantesques.

Les membranes utilisées sont donc asymétriques (plusieurs couches d'épaisseur différente) et composites (plusieurs matériaux différents) [4].

Les membranes d'osmose inverse sont composées de 3 couches de polymère, leur conférant des propriétés de sélectivité, de morphologie en surface et de tenue mécanique (figure 9).

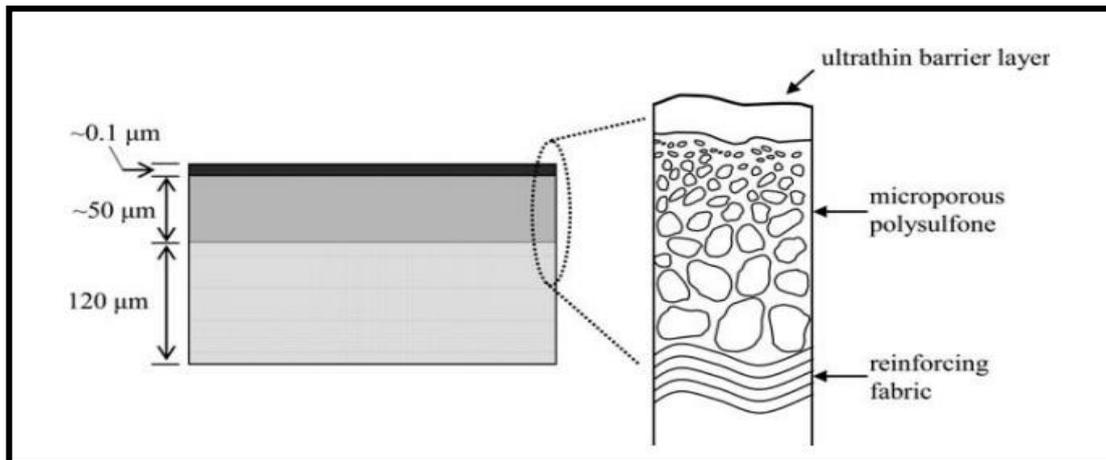


Figure 9. Représentation schématique de la structure d'une membrane OI composite comportant une fine couche active en surface [29].

II.5.4.2. Principales applications de l'osmose inverse [30]

Les applications de l'osmose inverse sont multiples. On distingue :

- traitement des eaux : dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, production de l'eau ultra pure (industries électronique, pharmaceutique ...).
 - extraction de protéines du lactosérum dans l'industrie laitière.
 - Elimination de pesticides et d'herbicides.
 - Concentration d'antibiotiques.
- ✓ Les techniques présentées ont les avantages et les inconvénients suivants (**Tableau 4**) :

Tableau 4. Avantages et inconvénients de l'osmose inverse [30].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ▪ opération à température ambiante ce qui évite la dégradation des molécules fragiles dans le domaine agro-alimentaire. ▪ pas d'intervention de réactifs chimiques comme des agents d'extraction qui sont des sources de pollution. ▪ consommation énergétique faible vis à vis de la distillation pour le dessalement de l'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ baisse de la perméabilité et modification de la sélectivité en cas de colmatage des membranes. ▪ sélectivité entre les espèces chimiques : "soluté" toujours inférieure à 100 %. ▪ durée de vie limitée des membranes : soit par perte de résistance mécanique soit par suite d'une mauvaise tenue aux réactifs utilisés pour le nettoyage.

Les principaux domaines de filtration en fonction de la taille moyenne de pores des membranes ainsi que la correspondance avec les molécules et particules retenues sont représentés dans la (figure 10).

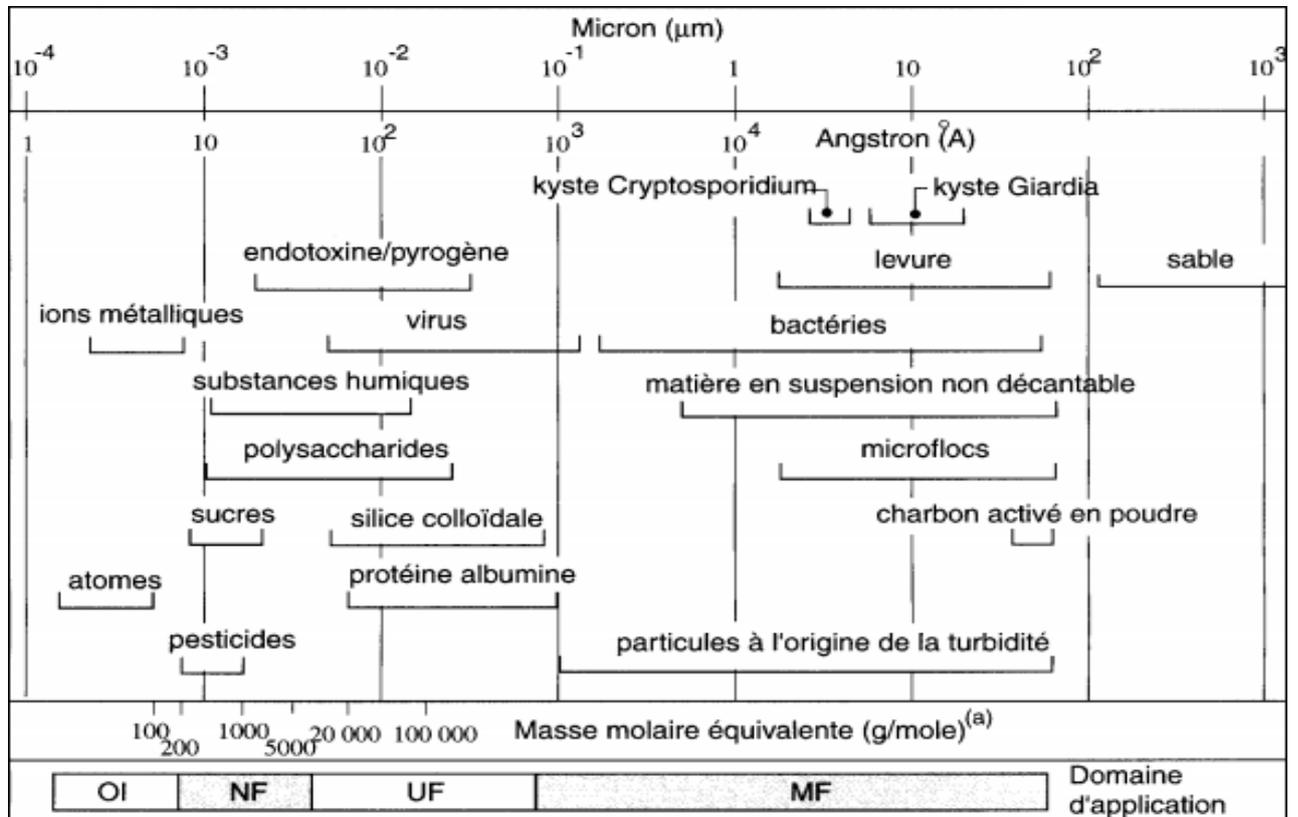


Figure 10. Classement des différents procédés de filtration membranaires [22].

Chapitre III

Phénomène d'entartrage et de colmatage

Phénomène d'entartrage et de colmatage

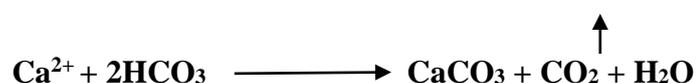
III.1. Entartrage

III.1.1. Définition

L'entartrage est la formation de dépôts sur les parois internes des conduites et ouvrages qui véhiculent les eaux. Ce dépôt est, en général, constitué de carbonate de calcium, de sulfate de calcium ou de silice. Il peut aussi contenir d'autres carbonates mixtes de calcium et de magnésium, des oxydes et hydroxydes tels que l'hydroxyde ferrique ou des argiles selon l'origine de l'eau [29,31].

III.1.2. Phases de formation de carbonate de calcium

L'eau naturelle peut devenir entartrante par déplacement de l'équilibre carbonique vers la formation de CaCO₃ selon la réaction suivante :



Si la valeur du produit de solubilité **K_s'** est dépassée et une fois la sursaturation atteinte, un processus de cristallisation peut s'amorcer [32].

- Le carbonate de calcium existe sous six différentes formes, classées ici par ordre de stabilité décroissante en solution : la calcite, l'aragonite, la vatérite, la monohydrocalcite, l'ikaite et le CaCO₃ amorphe.

III.1.3. Influence de certains paramètres sur l'entartrage

Plusieurs paramètres peuvent accélérer ou retarder le phénomène d'entartrage parmi eux : la température, le pH, et des éléments présents dans l'eau [14].

III.1.3.1. Température

Une eau agressive à froid peut devenir calcifiante si elle est portée à une température plus élevée. En effet, la solubilité apparente du carbonate de calcium en équilibre avec l'atmosphère diminue lorsque la température s'élève. À température ambiante, la présence de magnésium paraît être la cause principale de l'orientation du dépôt vers l'aragonite. Pour des températures élevées, (supérieure à 50°C), le carbonate de calcium se cristallise sous la forme aragonite [32].

III.1.3.2. pH

Les vitesses de germination et de croissance augmentent avec le pH de la solution. Comme première explication de ce phénomène, nous pouvons considérer que la part des ions hydroxydes formés qui réagit avec les ions HCO₃⁻ devient plus importante. Par conséquent, la concentration en CO₃²⁻ accentue quand le pH augmente.

L'analyse morphologique montre que le tartre précipite sous la variété à plus de 90% pour la solution $\text{pH}_{\text{solu}} = 6,04$. Plus le pH_{solu} augmente, plus la fraction de calcite devient importante et majoritaire à $\text{pH}_{\text{solu}} = 7,27$ [33].

III.1.3.3. Dureté de l'eau

La vitesse de croissance de dépôt de carbonate de calcium est une fonction de la sursaturation en calcium et en carbonate, par conséquent, de la concentration en ions calcium et hydrogénocarbonates de l'eau. Le pourcentage de la surface recouverte par le tartre est très important et le temps d'entartrage est instantané pour une eau très calcifiante. Dans le cas contraire, la déposition est beaucoup plus lente et la surface recouverte est moins importante. La morphologie du tartre déposé dépend aussi de la teneur en ions carbonates et calcium. [33].

III.1.3.4. Éléments présents dans l'eau [34]

Il est maintenant admis que les ions étrangers, les impuretés et les molécules organiques, qui font partie de la composition de l'eau, soient susceptibles de jouer un rôle important aussi bien sur la germination que sur la croissance du carbonate de calcium de la manière suivante :

- **Ca²⁺** : ROQUES a étudié l'effet des ions calcium sur la déposition du tartre en présence de différents cations étrangers. Une forte concentration en calcium favorise la précipitation sous forme de calcite avec une quantité de dépôt plus importante et pour de faibles concentrations les deux formes, calcite et vaterite, ont été observées.
- **Mg²⁺** : Étant donné son abondance dans les eaux naturelles, l'influence de l'ion magnésium sur la précipitation du tartre est la plus étudiée. Les résultats montrent que la présence de ces ions retarde la vitesse de la germination-croissance et inhibe spécifiquement la formation de la calcite. L'ion Mg²⁺ favorise la précipitation sous forme d'aragonite et retarde la précipitation en allongeant le palier de germination.

Si l'ion magnésium conduit aux résultats les plus spectaculaires, il n'est pas le seul ion à agir à la fois sur le temps de germination et sur la variété de **CaCO₃** cristallisée.

- **Cl⁻ et SO₄²⁻** : les sulfates influencent la cinétique de précipitation et orientent la cristallisation vers la forme calcite en diminuant la vitesse d'entartrage et augmentent légèrement le temps de germination tandis que les chlorures augmentent très légèrement son pouvoir entartrant.
- **Cu²⁺, Zn²⁺, Fe²⁺** : la présence dans l'eau d'ions de cuivre ou de zinc freine le dépôt de tartre qui reste en suspension dans l'eau. En revanche, l'ion Fe²⁺ est connu pour être un élément favorisant. Les quantités nécessaires sont très faibles, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de microgrammes par litre.

III.1.4. Technique d'élimination du tartre

Pour lutter contre ce phénomène (traitement antitartre), plusieurs procédés sont envisagés. On distingue les procédés physiques et les procédés chimiques. Dans les procédés physiques, on distingue trois catégories : traitement électromagnétique, magnétique et adoucissement électrochimique. Quant aux procédés chimiques, ils agissent soit sur les causes, c'est-à-dire les traitements externes (la déminéralisation par résine échangeuse d'ions et la décarbonatation à la chaux), soit sur les conséquences de formation des cristaux (traitements internes), par ajout d'inhibiteurs d'entartrage (les phosphonates, les polycarboxylates,...). Mais, étant donné que l'utilisation de ces produits présente certains inconvénients pour l'environnement, d'autres inhibiteurs respectueux de l'environnement ont été cherchés (les inhibiteurs verts)[34].

III.2. Colmatage

L'utilisation des procédés de filtration membranaires s'accompagne d'un problème majeur, un phénomène récurrent, lié à l'accumulation de matières au voisinage de la membrane, limitant les performances des procédés membranaires appelé « *colmatage* ». Il s'accompagne d'une diminution, parfois extrêmement accentuée, du flux de perméation dans le temps. D'autres conséquences du colmatage que ce soit directes ou indirectes existent tels que la diminution de la vie active des membranes, des lavages plus fréquents, et donc, des consommations de produits chimiques plus importantes et des dépenses supplémentaires d'énergie afin compenser la baisse de perméabilité des membranes. L'accumulation de matière peut se faire à la surface d'une membrane. Les particules peuvent bloquer ses pores dans le cas d'une membrane ayant des pores suffisamment grands par rapport aux substances présentes dans l'eau à traiter, il peut y avoir une adsorption et/ou dépôt de substances colmatantes sur la paroi interne des pores. Dans les modèles de colmatage proposés par plusieurs auteurs, les chercheurs considèrent qu'il y a d'abord un blocage/obstruction des pores, suivi par la croissance d'un gâteau à la surface de la membrane.

En effet, diverses espèces peuvent contribuer au colmatage, comme des macromolécules organiques, des substances organiques et inorganiques dissoutes, des particules colloïdales, des particules en suspension ou des micro-organismes. La partie du colmatage qui peut être enlevée par lavage est appelée « colmatage réversible ». Le colmatage qui correspond à la perte définitive d'une partie de la perméabilité est généralement appelé « colmatage irréversible ». [23, 35].

III.2.1. Définition du colmatage

Le colmatage est défini par le processus ayant par conséquent la perte de performance de la membrane, il découle de l'accumulation de matières à la surface des membranes [36].

Le colmatage des membranes est causé par l'interaction entre la surface de la membrane et des colmatants qui comprennent des substances organiques, inorganiques et biologiques de différentes formes. Ces substances sont retenues et se déposent à la surface des membranes ou sur les parois des pores. Les colmatants interagissent physiquement ou chimiquement avec la surface de la membrane et dégradent réversiblement ou irréversiblement les propriétés de transfert des membranes (perméabilité, sélectivité) [37]. Ce colmatage peut être d'origine chimique (adsorption), physique (formation de gel, précipitation, dépôt de surface, blocage de pores), ou biologique (prolifération bactérienne), (**figure 11**).

La couche de colmatage formée à la surface de membranes induit une résistance au flux supplémentaire. Les membranes colmatées voient donc leur flux de perméation diminuer avec le temps [25].

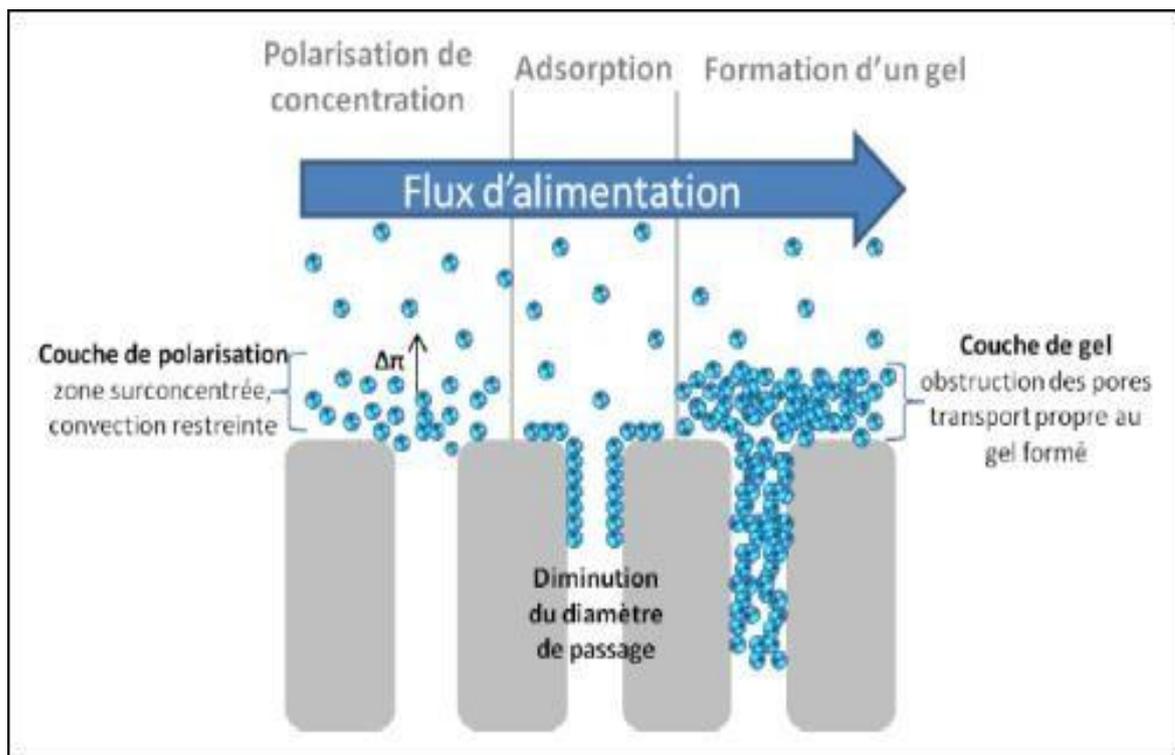


Figure 11. Schéma récapitulatif des principaux mécanismes du colmatage membranaire [4].

III.2.2. Types de colmatage

Comme défini auparavant, le colmatage est l'ensemble des mécanismes qui limitent le flux à travers une membrane. Dans le cas de l'osmose inverse, le phénomène du colmatage peut se précipiter selon quatre (04) formes :

- La formation du **dépôt** par des particules ou des matières organiques sur la membrane ;
- La précipitation des composés inorganiques sur la membrane « **l'entartrage** » ;
- **L'adsorption** dans la membrane ;
- La formation d'un biofilm et l'excrétion in situ d'exopolymères sur la membrane « **le biocolmatage** » [28].

III.2.2.1. Colmatage par dépôt

Le dépôt peut être de deux natures différentes qui peuvent coexister : dépôt **particulaire** (argiles, débris, microorganismes, substances humiques particulières, silice...) ou **colloïdal** (huile, protéines, acides humiques dissous...). Le colmatage par dépôt induit souvent une augmentation de la pression différentielle normalisée (perte de charge longitudinale côté concentrât).

L'analyse de cette pression peut aider à prévenir ce type de colmatage. Des rinçages à l'eau à forte vitesse et faible pression peuvent être efficaces pour éliminer ce type de colmatage si les composés du dépôt ne se sont pas adsorbés sur la membrane.

III.2.2.2. Colmatage par entartrage

L'entartrage correspond au dépôt des matériaux inorganiques qui se cristallisent à la surface des membranes lorsque la limite de solubilité des composés inorganiques est dépassée. Les dépôts rencontrés le plus fréquemment en dessalement sont principalement constitués de carbonate de calcium (CaCO_3), de sulfate de calcium (CaSO_4), de sulfate de baryum (BaSO_4), de sulfate de strontium (SrSO_4), de phosphate de calcium ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), d'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et de composés à base de silice. L'augmentation du taux de conversion élève la concentration en sel du côté concentrât augmentant ainsi la possibilité de colmatage par entartrage. L'entartrage peut être prévenu par différents traitements chimiques tels la vaccination acide (pour déplacer les équilibres calco-carboniques) ou l'utilisation d'antitartre spécifique, Les trois principales familles de produits antitartre utilisées sont les polyphosphates, les organophosphonates et les polymères carboxyliques [38].

III.2.2.3. Adsorption

L'adsorption résulte d'interactions physico-chimiques entre les solutés présents en solution ayant une affinité pour la membrane et cette dernière. Elle peut intervenir tant qu'à la surface de la membrane qu'à l'intérieur des pores. La conséquence étant la formation de couches conduisant à une diminution

de la section de passage dans les pores d'où une augmentation de la résistance hydraulique. Les molécules les plus susceptibles de colmater les membranes par adsorption sont les macromolécules. Ce colmatage est défini comme irréversible [36, 38].

III.2.2.4. Biocolmatage (bio-fouling)

Les micro-organismes se caractérisent par le fait qu'ils se multiplient plus ou moins rapidement selon les conditions rencontrées dans les circuits. Ces micro-organismes excrètent des substances polymériques extracellulaires qui adhèrent à la surface de la membrane et provoquent la formation d'un biofilm [28].

L'observation directe des biofilms par microscopie, ainsi que les nombreuses études génétiques réalisées sur les biofilms ont conduit à un modèle de développement en cinq étapes (**Figure 12**) :

- 1) la phase de transport et d'attachement des cellules vers un substrat, ainsi que la création de ce qu'on appelle un film de conditionnement ;
- 2) l'adhésion des cellules de façon réversible avec la production d'EPS (Substances polymériques extracellulaires) ;
- 3) le début de la croissance microbienne et de l'évolution de l'architecture du biofilm avec le développement des micro-colonies primaires ;
- 4) la maturation du biofilm avec le développement des colonies ;
- 5) le détachement microbien ou le détachement de colonies de biofilm en réponse aux conditions hydrodynamiques.

Suite au détachement, les microorganismes (ou colonies) sont dispersés à nouveau dans le milieu environnant, où ils peuvent coloniser d'autres portions de la surface [39].

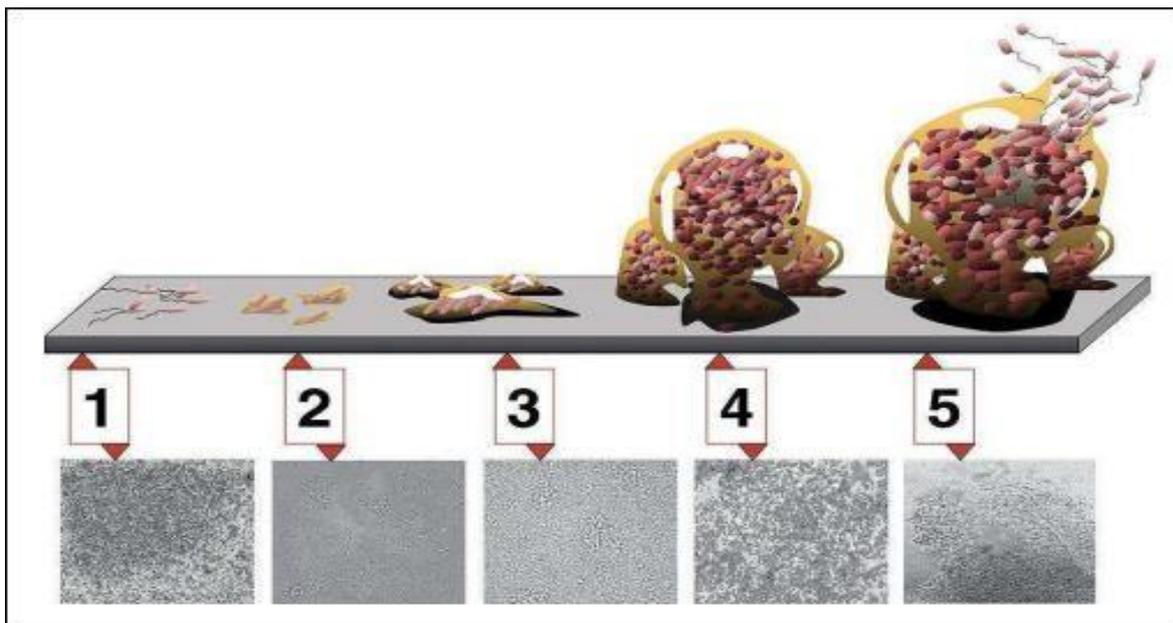


Figure 12. Les différentes étapes de formation d'un biofilm [39].

III.2.3. Indicateurs de colmatage

Dans une usine de traitement d'eau, le colmatage se traduit par une chute de la production accompagnée d'une augmentation de la fréquence des nettoyages [40].

Les eaux naturelles contiennent une grande diversité de composants. La taille, la nature et les caractéristiques physico-chimiques de ces composants déterminent le potentiel colmatant d'une eau. Le rôle d'un indicateur de colmatage est d'intégrer tous ces facteurs en un seul paramètre [4].

Pour caractériser le colmatage des membranes d'osmose inverse, différentes méthodes d'évaluation du potentiel de colmatage d'une eau ont été développés. Les plus utilisées sont le (Silt Density Index) ou le MFI (Modified Fouling Index). Le SDI est la méthode standardisée par l'ASTM (*American Society for testing and materials*) [41].

III.2.3.1. Standard Density Index (SDI)

Le SDI est considéré comme l'indicateur le plus classique dans le domaine de la filtration membranaire. Il s'agit d'un test de l'American Society for Testing and Materials (ASTM) qui a été adopté en 1995 [40].

Le SDI est un paramètre représentatif du potentiel de colmatage d'une eau saline d'alimentation dans un procédé d'osmose inverse. Il dépend de la quantité de particules mais également des autres composants colloïdaux. Il est important pour les applications de filtration tangentielle. Il est défini comme étant la réduction moyenne sur 15 minutes, en % par minute du débit à travers un filtre 0,45 µm à une pression constante de 2.1 bars (30 psi) avec un perméat s'écoulant à pression atmosphérique [41].

La détermination du SDI est basée sur la mesure de la vitesse à laquelle une membrane ayant un diamètre de pores de 0,45 µm se colmate à une pression constante (filtration frontale) [40].

Le SDI se calcule comme suit [28] :

$$SDI = \frac{1 - \frac{t_1}{t_2}}{15} \times 100$$

Avec :

SDI: Standard Density Index (% *min*⁻¹) ;

t₁ : temps initial pour filtrer un échantillon de 500 mL (*sec*) ;

15 : temps après le départ de la mesure (*min*) ;

t₂ : temps pour filtrer un échantillon de 500 mL après le temps T (*sec*).



Figure 13. Dispositif de mesure du SDI [10]

✚ Les valeurs du SDI peuvent être interprétées comme suit :

Tableau 5. Classification des valeurs du SDI [10].

SDI < 3	pas à peu d'entartrage de la membrane
3 < SDI < 5	conditions normales d'utilisation
SDI > 5	entartrage excessif à prévoir

Comme précisé dans la méthode standardisée de l'ASTM : « *This test method is not an absolute measurement of the quantity of particulate matter* » et « *it is not applicable to every kind of water* », le SDI est donc utilisé pour estimer le potentiel de colmatage causé par des matières organiques ou inorganiques en suspension et colloïdales. Les bio-polymères (de faible poids moléculaire) qui amènent au biocolmatage ne sont pas retenus par la membrane de microfiltration, par conséquent le potentiel de biocolmatage ne peut pas être estimé par le test du SDI [28].

III.2.3.2. Modified Fouling Index (MFI)

Le *Modified Fouling Index* est un indice qui estime le potentiel de colmatage d'une eau. Le MFI est basé sur le fait que la formation de dépôt est proportionnelle à la concentration de la matière colloïdale et particulaire. La mesure du MFI est effectuée avec les mêmes membranes (0,45 µm) que la mesure du SDI. Le volume filtré est mesuré à la pression transmembranaire (2,07 bar) toutes les 30 secondes pendant le temps maximum de 20 minutes [28].

Cet indicateur de colmatage ne rend compte que du seul mécanisme de colmatage de type gâteau. Les scientifiques considèrent que le colmatage d'une membrane en filtration frontale où le gradient de pression est constant a lieu en 3 étapes (figure 14) :

- Blocage des pores ;
- Formation d'un gâteau incompressible ;
- Formation d'un gâteau compressible [40].

Pour une filtration frontale à pression constante, la formation d'un gâteau incompressible conduit à une relation linéaire entre t/V et V :

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu R_m}{\Delta P_m S} + \frac{\mu l}{2\Delta P_m S^2} V$$

Le MFI est alors déterminé graphiquement en prenant la pente de la partie linéaire du tracé $t/V = f(V)$. Il correspond spécifiquement au colmatage par formation d'un gâteau à la surface de la membrane. Pour un fonctionnement satisfaisant de l'osmose inverse, le MFI recommandé est entre 0 et 2 s/L² [28].

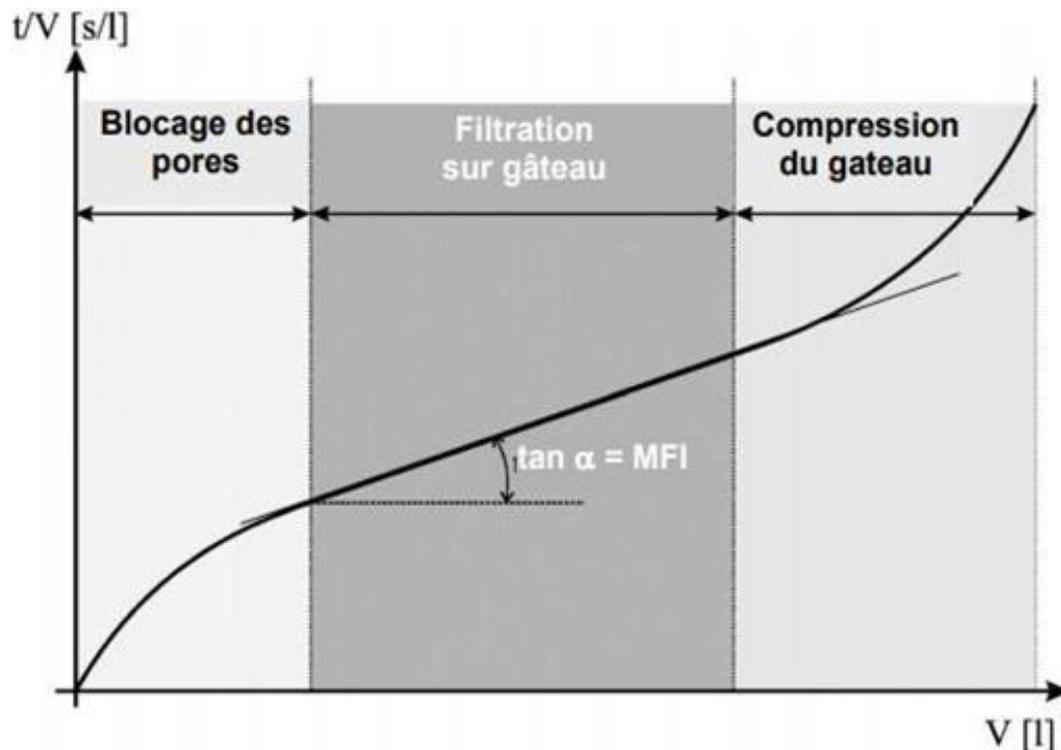


Figure 14. Exemple de courbe typique pour déterminer le MFI d'une eau [40].

De façon pratique, la détermination du MFI est similaire à celle du SDI, le même dispositif expérimental est utilisé. Le volume de perméat est mesuré avec un cylindre gradué à chaque intervalle de **30 secondes** pour une durée totale maximale de **20 minutes**. L'origine du temps correspondant au moment où la pression d'opération de **210 kPa (30 psi)** est stabilisée. Comme une membrane de **0,45 μm** est utilisée dans le MFI original, et pour se différencier d'un autre indicateur qui a été développé ultérieurement, l'indice « 0,45 » est ajouté.

L'indicateur étant appelé **$MFI_{0,45}$** , On aura donc :

$$\frac{\mu l}{2\Delta P S^2} = MFI_{0,45} = \tan \alpha$$

La valeur de l'indicateur de colmatage peut être ramenée à une température de **20°C** et à une pression de 210 kPa, qui sont considérées comme des conditions standard, avec la relation suivante :

$$MFI_{0,45} = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \times \frac{\Delta P}{210} \times \tan \alpha$$

Avec :

μ_{20} : Viscosité de l'eau à la température 20°C (*Pa.s*) ;

μ_T : Viscosité de l'eau à la température de la solution (*Pa.s*) ;

ΔP : Pression Transmembranaire appliquée (*kPa*) ;

$\tan \alpha$: Pente de la partie linéaire de la courbe de $t/V = f(V)$.

En pratique, dans les usines d'osmose inverse, le MFI ne peut pas être corrélé avec le colmatage dû aux colloïdes. Ce dernier est certainement lié à la présence de particules colloïdales plus petites que 0,45 μm . Par conséquent, le MFI présente la même limitation dans l'estimation du pouvoir de colmatage que le SDI [28].

III.2.3.3. Modified Fouling Index-Ultrafiltration (MFI-UF)

Le « Modified Fouling Index-Ultrafiltration » (MFI-UF) est un nouvel indicateur de colmatage. Contrairement aux indicateurs précédents (SDI et MFI), cet indicateur est déterminé à partir d'un test réalisé avec une membrane d'UF donc avec des pores plus fins. Cela vise à mieux caractériser le pouvoir colmatant des eaux qui contiennent des colloïdes assez fins pour passer à travers une membrane dont la porosité est de 0,45 μm . Il est vrai que le gâteau formé sur une membrane de 0,45 μm retient une partie des particules de plus petite taille que celle des pores de la membrane, mais en choisissant une membrane d'UF de faible SC, tous les colloïdes devraient être retenus.

De ce fait, le MFI-UF devrait mieux rendre compte que le SDI et le MFI du colmatage observé en NF ou en OI où les membranes ont des pores extrêmement fins [40]. Les mécanismes de filtration pris en considération MFI-UF sont exactement les mêmes qu'en **MFI_{0,45}** [36].

III.2.4. Limiter l'accumulation [40].

De nombreux moyens physiques, chimiques et technologiques sont mis en œuvre pour limiter au mieux le colmatage. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- Celles visant à **limiter les interactions** entre le fluide à traiter et la membrane ; il peut s'agir de prétraitement du fluide ou de la membrane elle-même.

➤ Prétraitement du fluide

Bien que ne devant pas se substituer aux fonctions de la membrane, un ou plusieurs prétraitements sont souvent nécessaires pour assurer qualité et rendement optimal de l'opération.

La majorité de ces techniques étant, généralement spécifique à un (ou des) composé(s), nécessitent d'être adaptées au fluide à traiter. Les caractéristiques du milieu jouent également un rôle important : une simple modification du pH peut améliorer la productivité de l'opération.

➤ **Modification de la membrane**

Elle a pour but de réduire les forces attractives entre la membrane et le soluté. Il peut être question d'une modification de la membrane lors de sa fabrication ; il s'agit alors de déposer par filtration des surfactants non ioniques à la surface de la membrane qui conduisent à limiter l'adsorption de matière organique naturelle. Cette dernière technique peut poser des problèmes en production d'eau potable du fait de relargage éventuel : les produits choisis doivent alors être agréés en eau potable.

- Celles visant à **modifier l'écoulement** au voisinage de la membrane sont :

- Par **insertion d'obstacles** dans l'écoulement ce qui ne peut se faire dans la configuration fibres creuses,
- Par **générations d'écoulement secondaire** : il s'agit de vortex de Dean ou de Taylor. Ces derniers nécessitant, cependant, une conception compliquée et un investissement important,
- Par des **moyens mécaniques** tels que la mise en œuvre de filtres rotatifs ou de vibrations,
- Par application d'**écoulements diphasiques** qui permettent de doubler le flux en filtration de suspension d'argile sur des fibres creuses d'ultrafiltration.

III.2.5. Nettoyage des membranes

Il est inévitable qu'après un certain temps, les performances d'un osmoseur diminuent. Les méthodes à employer pour le nettoyage sont fonction de la nature du dépôt que l'on trouve sur la membrane [41].

Le nettoyage consiste à éliminer d'une surface donnée toute souillure visible ou invisible pouvant s'y trouver. Ceci est réalisé par la détergence, processus selon lequel les agents colmatants sont détachés de la surface où ils sont fixés et mis en solution ou en suspension. C'est, en effet, la résultante de plusieurs phénomènes physico-chimiques survenant aux interfaces dans le système support/souillure/détergent [40].

III.2.5.1. Méthodes physiques de décolmatage

À ce stade, nous pouvons décrire les procédés hydrauliques de décolmatage comme une optimisation possible du fonctionnement de la technique de filtration sur membrane. Il existe plusieurs méthodes physiques de décolmatage : le **rétrolavage**, le **backpulse** et la méthode par **ultrasons** [42].

- **Rétrolavage (backflush)**

Le rétrolavage consiste à renverser le sens de passage de l'eau au travers de la membrane en pressurant le côté perméat. Ceci décolle le gâteau accumulé puis repousse les débris à l'extérieur de

la fibre creuse (peau interne) puis du module (peau interne ou externe). De même un rétrolavage à l'air consiste en mise sous pression d'air du compartiment eau brute perméat pour provoquer un bullage qui déloge le gâteau [10]. (Figure 15)

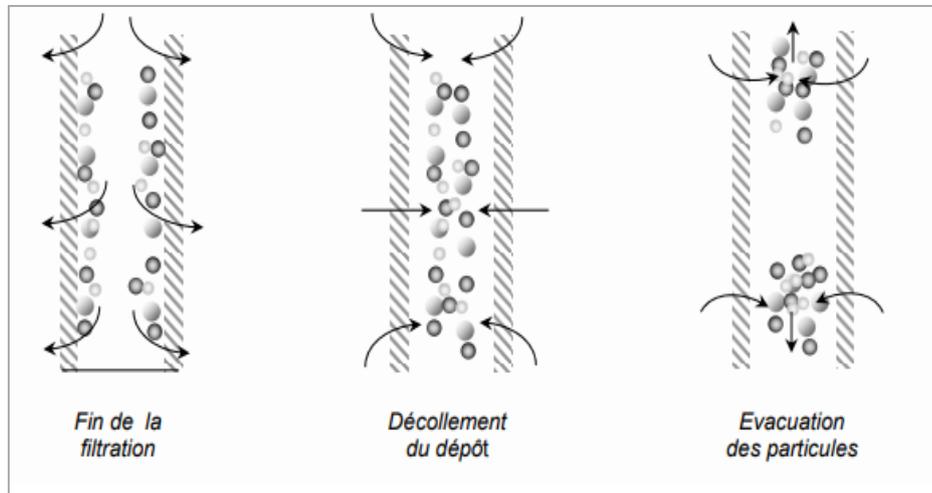


Figure 15. Représentation schématique des procédés de filtration et de rétrolavages [43].

Quoi qu'il en soit, les rétrolavages, quel que soit leur mode de mise en œuvre, ne permettent généralement pas d'assurer la restauration intégrale à long terme de la perméabilité des membranes. Ainsi, il est d'usage de pratiquer des nettoyages chimiques [40].

- **Backpulse**

Le « **backpulse** » est une technique très proche du rétrolavage. La pression transmembranaire est inversée une fois toutes les 5 secondes sur une durée inférieure à la seconde (0,1 – 1 seconde), avec le but d'éliminer le dépôt de la surface de la membrane.

Cela permet d'augmenter le flux net (calculé sur la base de gain de perméat moins ce qui est perdu durant la rétrofiltration). Cette technique a l'avantage de permettre un décolmatage in-situ et une utilisation industrielle.

Les techniques « **backflush** » et « **backpulse** » ne peuvent être employées qu'avec des membranes de résistance mécanique suffisante pour éviter le décollement de la peau active [40].

- **Ultrasons**

Une autre méthode de décolmatage utilisée est l'ultrason. L'intensité des vibrations des ondes ultrasonores doit toutefois être contrôlée pour ne pas détériorer la membrane. L'effet des ultrasons est relié au phénomène de cavitation : déformation, croissance et implosion de bulles (formées quand une forte pression est appliquée à un milieu liquide). La destruction de cavité a une énergie suffisante pour vaincre les interactions et ainsi enlever la matière encrassant la surface membranaire [40].

III.2.5.2. Méthodes de décolmatage chimique et/ou enzymatique

Lorsque les méthodes de nettoyage ne sont pas assez efficaces pour réduire le débit (d'alimentation) à un niveau acceptable, il est nécessaire de nettoyer les membranes chimiquement [26].

Les étapes de rétrolavage ou backwash utilisées à un rythme plus ou moins élevé, nécessitent en complément la mise en œuvre de procédures de lavage chimique, voire enzymatique. Si les protocoles de nettoyage mis en place par les opérateurs font partie du savoir-faire des compagnies, ils peuvent également varier en fonction des sites et donc du colmatage rencontré [40].

Lorsque la dérive des capacités de la membrane prend une proportion trop importante, limite définie par le fabricant, des nettoyages plus poussés doivent être mis en œuvre de façon à restaurer la perméabilité de la membrane (**Figure 16**)

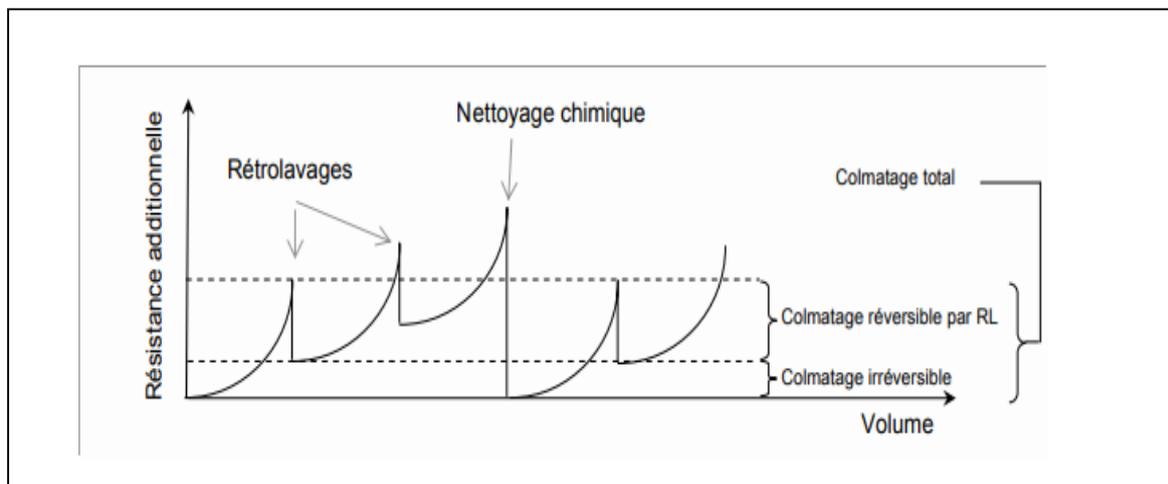


Figure 16. Efficacité comparée des rétrolavages et nettoyages chimiques [43].

Quoi qu'il en soit, les différents réactifs utilisés seuls ou de façon combinée peuvent être différenciés de par leur nature chimique. Leurs principes d'actions sont rappelés ci-dessous [40].

- **Surfactants et détergents**

Ceux sont des composés qui possèdent des structures hydrophiles et hydrophobes. Ils peuvent former des micelles avec l'huile, les matières grasses et les protéines contenues dans l'eau. Ils neutralisent les particules colloïdales chargées permettant ainsi leur résolvubilisation ou leur remise en suspension. Ils sont généralement efficaces lorsque le colmatage est surtout généré par un biofilm [40].

- **Agents chaotropiques ou caustiques**

Ils sont généralement appliqués lors de colmatage organique ou d'origine biologique. En effet, ils dénaturent les substances organiques telles que les protéines ou les polysaccharides par hydrolyse ce qui entraîne leur solubilisation. Par ailleurs, l'emploi de ce genre de réactifs induit une très forte

augmentation de la charge négative portée par les substances humiques et accroît les forces électrostatiques de répulsion entre la membrane et ses macromolécules facilitant, ainsi, leur élimination [40].

- **Oxydants**

Les oxydants les plus communément utilisés pour effectuer le nettoyage des membranes sont le chlore (généralement sous forme d'hypochlorite de sodium NaOCl) et le peroxyde d'hydrogène. Ils éliminent les microorganismes par solubilisation ou hydrolyse de leurs cellules. Par ailleurs, ils provoquent l'oxydation des groupements fonctionnels (cétones, aldéhydes, acides carboxyliques, etc.), ce qui augmente le caractère hydrophile des substances colmatantes et diminue les forces d'adhésion entre les parties hydrophobes des macromolécules et la membrane contribuant, ainsi, à son décolmatage [40].

- **Enzymes**

Elles provoquent l'hydrolyse des exopolymères de nature protéique ou glycoprotéique qui protège les microorganismes [40].

- **Agents complexants et acides**

Les premiers éliminent les ions susceptibles d'interagir avec les matières organiques naturelles (surtout les cations divalents) par la formation de complexes, les seconds ont une action reconnue pour éliminer les précipités inorganiques (d'oxydes métalliques ou tartre) :

- D'un point de vue général, l'augmentation de la température améliore l'efficacité des procédés utilisés. En raison de la variabilité des matériaux membranaires utilisés et des solutions filtrées, l'efficacité des nettoyages chimiques reste empirique [40].
- L'augmentation de la concentration d'enzymes n'augmente pas l'efficacité contrairement, aux détergents dont l'efficacité augmente avec l'augmentation de la concentration [40].
- Lors du nettoyage des membranes, le rinçage peut être efficace pour éliminer les espèces colmatantes, mais il doit être réalisé à la même température que celle des produits chimiques utilisés. Dans le cas contraire, le rinçage peut conduire à une compaction de la [40].

Le Tableau, qui suit, présente les différents produits de nettoyage que l'on peut rencontrer (**Tableau 6**). Il est à préciser que des formules commerciales complexes sont proposées pour combiner trois actions : hydrolyse alcaline et/ou enzymatique, effet complexant sur les éléments minéraux (fer et aluminium) et effet dispersant des matières organiques par l'action de tensioactifs anioniques, cationiques ou non ioniques [40].

Tableau 6. Produits utilisés lors de nettoyages chimiques [40].

Origines	Produits	Actions	Inconvénients
Alcalins	<ul style="list-style-type: none"> Hydroxyde (sodium et potassium), Polyphosphates 	<ul style="list-style-type: none"> Saponification des graisses et solubilisation des protéines Dispersant, émulsifiant des graisses, agent d'hydrolyse des protéines, solubilisant des carbonates. 	<ul style="list-style-type: none"> PH > 11 dans le cas d'alcalins chlorés pour éviter la corrosion Élément nutritif des microorganismes.
Acides	<ul style="list-style-type: none"> Acide nitrique, chlorhydrique, phosphorique, hydroxyacétique, gluconique, citrique, lactique, sulfamique... 	<ul style="list-style-type: none"> Dissolution de précipités de sels minéraux. 	<ul style="list-style-type: none"> Efficacité limitée sur les dépôts de nature organique.
Tensio-actifs	<ul style="list-style-type: none"> Cationiques Anioniques et non ionique 	<ul style="list-style-type: none"> Peu d'action Améliorent l'efficacité du nettoyage et réduisent le temps de rinçage 	<ul style="list-style-type: none"> Inopérants à pH acides Adsorption sur certains matériaux membranaires
complexant	<ul style="list-style-type: none"> Orthophosphate, polysulfate, acide éthylène diamino tétra acétique (EDTA), sels de sodium. 	<ul style="list-style-type: none"> Réaction avec les ions multivalents (calcium, magnésium,...) qui conduit au déplacement des équilibres de précipitation 	<ul style="list-style-type: none"> N'ont pas de conséquence sur la dureté de l'eau.

Bien entendu, ces nettoyages présentent plusieurs inconvénients de taille : arrêt de la production pour réaliser le nettoyage, consommation élevée en eau pour rincer l'installation, utilisation de produits chimiques néfastes pour l'environnement, traitement nécessaire des effluents de nettoyage, dégradation des propriétés mécaniques des membranes ; autant de raisons qui poussent les producteurs d'eau à trouver des solutions alternatives pour minimiser au mieux l'utilisation de ces lavages poussés [4].

III.2.6. Effet des produits de nettoyage sur le matériau membranaire

L'utilisation fréquente des produits chimiques pour le nettoyage des membranes semble être responsable du changement de propriétés de celles-ci, à savoir la réduction de leur durée de vie et la dégradation du matériau. Ces effets sont spécialement observés sur les membranes organiques [40].

Partie B : Méthodologie et mise en œuvre expérimentale

Méthodologie et mise en œuvre expérimentale

I. Présentation du complexe CEVITAL

Le Groupe Cevital est un conglomérat algérien de l'industrie agroalimentaire. Créé par l'entrepreneur Issad Rebrab en 1998, Cevital est la première entreprise privée algérienne à avoir investi dans des secteurs diversifiés. Le complexe a traversé d'importantes étapes historiques pour atteindre sa taille et sa notoriété actuelle [44].

I.1. Historique et situation géographique de Cevital

Depuis sa création, Cevital Agro-industrie s'est installée au sein du port de Bejaia (Algérie) à **3 Km** au sud-ouest de cette ville, à proximité de la **RN 26** et s'étale sur une superficie de **45000 m²** [43]. Elle est limitée au Nord et au Nord-est par la mer méditerranée, à l'Ouest par le port de Bejaia, au Sud-est par l'entreprise *SONATRACH* et enfin au Sud-ouest par l'entreprise *NAFTAL* (**Figure 17**) [46]. Cevital est le leader en Afrique et dans le Bassin Méditerranée. Il est en chiffre d'affaire, la 3^{ème} entreprise algérienne [47], elle englobe 26 filiales aux activités diversifiées, portée par 18 000 collaborateurs dont 15 000 en Algérie [44].

Cevital a beaucoup grossi. Depuis, son chiffre d'affaire a atteint près de 4 milliards d'euro annuel [45]. Il agit en présent dans différents secteurs économiques comme l'agroalimentaire, l'électronique, la sidérurgie et même les medias. Cevital a investi aussi hors des frontières algériennes, notamment en France où il a racheté les entreprises *OXXO* (spécialistes des portes et fenêtres en PVC), ainsi que *Brandt* (fabricant d'électroménager) [48].

Cevital a fait passer l'Algérie du stade d'importateur au stade d'exportateur dans le secteur agroalimentaire (sucre, huiles végétales, margarine) dans 28 pays différents [47].

Le sucre et les huiles de Cevital Agro-industrie sont des produits dont le système de qualité de fabrication est certifié par la norme ISO 22000 [49].

Ce complexe raffine du sucre de canne et des corps gras alimentaires. Il est doté de silos de stockage portuaire d'une capacité de **180 000 tonnes** pour le sucre et les céréales avec une capacité de traitement de **1850 tonnes/jour**. Aussi, il dispose d'une raffinerie d'huile végétale d'une capacité de **1800 tonnes/jour** pour les corps gras alimentaires liquides et solides. La nouvelle unité de boisson de *Lala Khadîdja* bénéficie de l'eau minérale particulièrement pure. Les installations, à la pointe de la technologie, garantissent le strict respect de cette pureté. L'unité produit de l'eau minérale plate et gazeuse ainsi que des boissons gazeuses aromatisées d'une capacité de **3 000 000 bouteilles/jour** [50].

Au niveau du complexe agro-alimentaire CEVITAL, l'eau brute utilisée est obtenue à partir de deux sources. La première source est une eau de forage issue d'un puits artésien situé à *Ibourassen* environ **12 km** du complexe à Oued Ghir (Bejaïa) et de trois autres puits ouverts. Les puits possèdent des pompes d'environ **40m** de profondeur qui envoient environ **(9000-10000) m³ /jour**. La deuxième source est l'eau provenant du réseau d'eau potable de l'ADE de Béjaïa (*envoie 2000-3000 m³ par jour*).

Ce mélange d'eau subit une déminéralisation au niveau de l'osmose inverse et un traitement thermique et chimique au niveau de la chaufferie et de la cogénération pour une production de la vapeur d'eau et du gaz carbonique [51].



Figure 17. Situation géographique et plan de masse CEVITAL [52].

I.2. Principales activités de Cevital [53]

Le complexe Cevital a débuté son activité par le conditionnement d'huile en Décembre 1998. En Février 1999, des travaux de génie civil de la raffinerie d'huile ont débuté. Cette dernière est devenue fonctionnelle en Aout 1999.

L'ensemble des activités de Cevital est concentré sur la production et la commercialisation des huiles, de margarine et de sucre. Il se présente comme suit :

- Raffinage des huiles (**1800 tonnes / jour**) ;
- Conditionnement d'huile (**1400 tonnes / jour**) ;
- Fabrication de margarine (**600 tonnes / jour**) ;
- Fabrication d'emballage (*PET*) : Poly-éthylène-Téréphtalate (**9600 unités / heure**) ;
- Raffinage de sucre (**2000 tonne / jour et 3500 tonnes / jour**) ;
- Stockage de céréales (**120000 tonnes**) ;
- Cogénération (une capacité de production arrive jusqu'à **64 MW**) ;
- Minoterie et savonnerie en cours d'étude.

II. Procédé de traitement de l'eau par l'osmose inverse

II.1. Description du processus de traitement par osmose inverse utilisé à CEVITAL [16, 18, 54].

Au niveau de Cevital, l'unité d'osmose inverse est dotée de 4 lignes d'une capacité de production de **400 m³** par heure d'eau déminéralisée (**100 m³.h⁻¹ pour chaque ligne**) et de 5 lignes regroupées en une seule qui est la ligne des rejets, permettant le recyclage des eaux de rejet des 4 précédentes lignes. Les 4 lignes sont alimentées en eau de forage (eau brute), après une préalable sédimentation. Cette eau est traitée avant son passage à travers 20 filtres à sable (10 filtres de préfiltration, et 10 filtres de filtration). Ce traitement consiste à injecter en permanence 1,5 à 2 mg.L⁻¹ d'hypochlorite de sodium (**NaOCl**) et ainsi de flocculant (**TD-FLOC**) à l'aide d'une pompe doseuse.

L'eau préfiltrée est collectée dans un réservoir de **170 m³**, ensuite passe par un système de vannes et parallèlement reçoit une dose de métabisulfite de sodium (**Na₂S₂O₅**) et du séquestrant (**TD-ASCAL**), puis traverse les filtres à cartouche (2 filtres) ayant un seuil de coupure de 2 µm.

L'eau filtrée parcourt le premier étage de l'osmoseur sous pression de l'ordre **18 bars** exercés par 3 pompes à haute pression.

Le perméat (eaux osmosées) est stocké dans un bac de **200 m³**, tandis que les premiers rejets sont introduits dans le deuxième étage de l'osmoseur sous une pression de 10 bars.

II.2. Étapes du procédé

Le système de traitement à Cevital se divise en divers sous-systèmes décrit ci-dessous :

- ❖ Un système d'alimentation en eau brute ;
- ❖ Un système de prétraitement composé de :
 - Système de stérilisation et régénération du dioxyde de manganèse ;
 - Préfiltration avec filtres à sable ;
 - Réservoir de stockage de l'eau filtrée ;
 - Groupe de déchloration ;
 - Groupe de dosage de produit séquestrant ;
 - Groupe de dosage de produits biocides ;
 - Filtres à cartouche ;
 - Système de contre lavage.
- ❖ Système d'osmose inverse ;
- ❖ Lavage sur place CIP (Cleaning In Place).

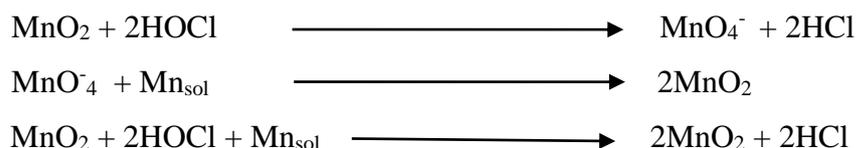
II.2.1. Système d'alimentation en eau brute

L'eau brute utilisée au niveau de la ligne d'osmose inverse de Cevital, est une eau qui provient d'un puits de forage artésien à *Ibourassen* et d'une station d'épuration de *TICHYHAFF*. L'eau est pompée puis acheminée vers un bassin de pré-décantation de **120 m** de long et **30 m** de large. A ce niveau, de l'hypochlorite de sodium (*NaOCl*) est dosé avant l'entrée de l'eau aux filtres à sable ce qui favorise l'oxydation des ions ferreux et la formation de l'hydroxyde de fer.

II.2.2. Système de prétraitement

➤ Système de stérilisation et régénération du dioxyde de manganèse

A l'entrée des filtres à sable, de l'hypochlorite de sodium est introduit avec une dose bien contrôlée afin de prévenir toutes proliférations bactériennes. Le dosage en continu du chlore permet la régénération du dioxyde de manganèse par réaction catalytique du manganèse soluble, après oxydation superficielle du MnO_2 en MnO_4^- , ce qui est détaillé dans les réactions suivantes :



Pour éliminer le fer, le flocculant (*TD-FLOC*) est dosé. La déferrisation utilise aussi le MnO_2 (pyrolusite) par l'oxydation des ions ferreux pour former de l'hydroxyde de fer.

➤ **Préfiltration avec filtres à sable**

CEVITAL est doté de 20 filtres à sable, 10 filtres de préfiltration, et 10 filtres de filtration, qui ont une capacité de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ pour chaque filtre. Dans ce cas, la filtration s’effectue dans un milieu poreux (le sable est constitué de multicouches en pyrolusite). Le mouvement de l’eau dans ces filtres est vertical. Par la suite, il pénètre par la partie supérieure du filtre et descend à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie inférieure. Celle-ci se colmate en profondeur au fur et à mesure de l’accumulation des particules en suspension lors du passage du fluide. Ce système permet d’éliminer la plupart des particules en suspension, ayant un diamètre supérieur à $40 \mu\text{m}$ (Figure 18).

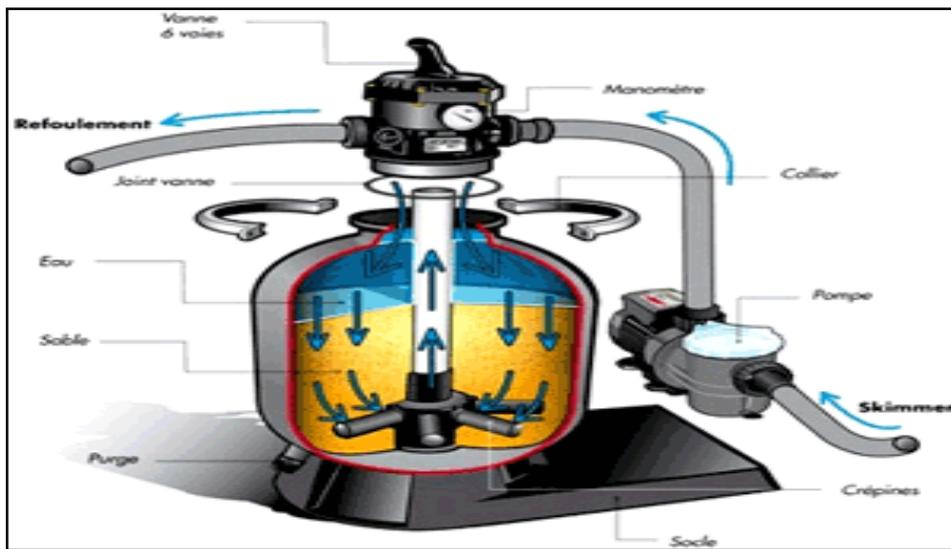


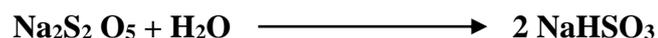
Figure 18. Principe d’un filtre à sable [54].

➤ **Réservoir d’eau filtrée**

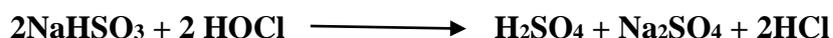
L’eau filtrée est stockée dans un réservoir intermédiaire d’une capacité de 200 m^3 .

➤ **Groupe de déchloration**

La déchloration doit être effectuée avant l’osmose inverse car le chlore résiduel peut oxyder les parois superficielles des membranes en polyamide. Pour ceci, du métabisulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) est dosé pour neutraliser le chlore libre. La réaction du métabisulfite de sodium avec le chlore et l’eau est détaillée ci-dessous :



Le bisulfite de sodium réduit l’acide hypochloreux :



➤ Groupe de dosage de produit séquestrant

Avant les filtres à cartouche, une quantité du produit séquestrant (*TDASCAL*) est dosée pour permettre la dispersion des carbonates de calcium, des sulfates de calcium, des sulfates de baryum...etc. Il retarde, ainsi, leurs précipitations. De cette manière, les membranes s'encrassent moins rapidement et le nombre de CIP diminue.

➤ Groupe de dosage de produit biocide

Pour éviter toute prolifération bactérienne et formation de biofilms, une dose de produit biocide est injectée fois par semaine. Les biocides fréquemment utilisés pour assainir l'eau sont le chlore (Cl_2) ou les dérivés chlorés comme l'acide hypochloreux (*HOCl*), le dioxyde de chlore (ClO_2) ou l'hypochlorite de sodium (*NaOCl*). Le dosage (le nettoyage) s'effectue d'une demi-heure jusqu'à trois heures.

➤ Filtre à cartouche

Cevital dispose de deux (2) filtres à cartouche. Chaque filtre contient 18 cartouches avec un orifice d'arrivée d'eau à filtrer et un orifice de sortie d'eau filtrée. Ces filtres sont prévus pour éliminer toutes les particules ayant un diamètre supérieur à $5 \mu\text{m}$. (Figure 19)



Figure 19. Filtre à cartouche [26].

➤ Contre lavage

Pour éviter tout encrassement, les filtres à sable sont nettoyés par des lavages qui s'effectuent en deux phases :

- **Première phase** : L'air passe à travers ces filtres pour détacher les impuretés retenues du matériau filtrant;
- **Deuxième phase** : un retour d'eau est effectué à fort débit assurant une mise en expansion des matériaux filtrants. Cette dernière permet d'évacuer les impuretés détachées lors de la première phase.

II.2.3. Système d'osmose inverse

C'est la section principale de tout le système pour les traitements de l'eau par osmose inverse. Ce système est composé de 4 lignes de ($100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) chacune. L'eau provenant des filtres à cartouches est envoyée aux lignes par des pompes à haute pression. Dans ces lignes, l'eau est séparée en eau déminéralisée (produit) et en concentré (eau de rejet). Cette dernière, est aussi filtrée par une cinquième. Une partie de l'eau produite est stockée et acheminée vers les chaudières par deux pompes centrifuges (utilisation des vapeurs des eaux osmosées dans la raffinerie du sucre) et l'autre partie du perméat des eaux osmosées est dirigée vers l'étape suivante, l'électrodionisation pour la production de l'eau ultra pure.

Dans chaque ligne d'osmose inverse, il existe six modules spiraux. Ces derniers sont composés d'un enroulement compact de plusieurs membranes planes de même composition, autour d'un tube percé qui permet également de collecter le perméat. Le nombre de membranes dépend de la taille du module.

II.2.4. Lavage sur place CIP (Cleaning In Place)

Lorsque la pression exercée sur la membrane est diminuée de 10 % pour les mêmes conditions d'exercice, il est nécessaire de laver ces membranes dans le but de les débarrasser de toutes les particules et les minéraux qui provoquent le colmatage. Le lavage sur place s'effectue en deux phases :

➤ *Phase acide :*

TD WASH₁ ou bien du **HCl** si l'entassement est fort avec une apparition de carbonate.

➤ *Phase basique :*

TD WASH₂ pour un faible entassement et **TD WASH₃ + TD WASH₄** pour un fort entassement.

Le processus général de traitement de l'eau par osmose inverse est schématisé dans la figure suivante (**Figure 20**).

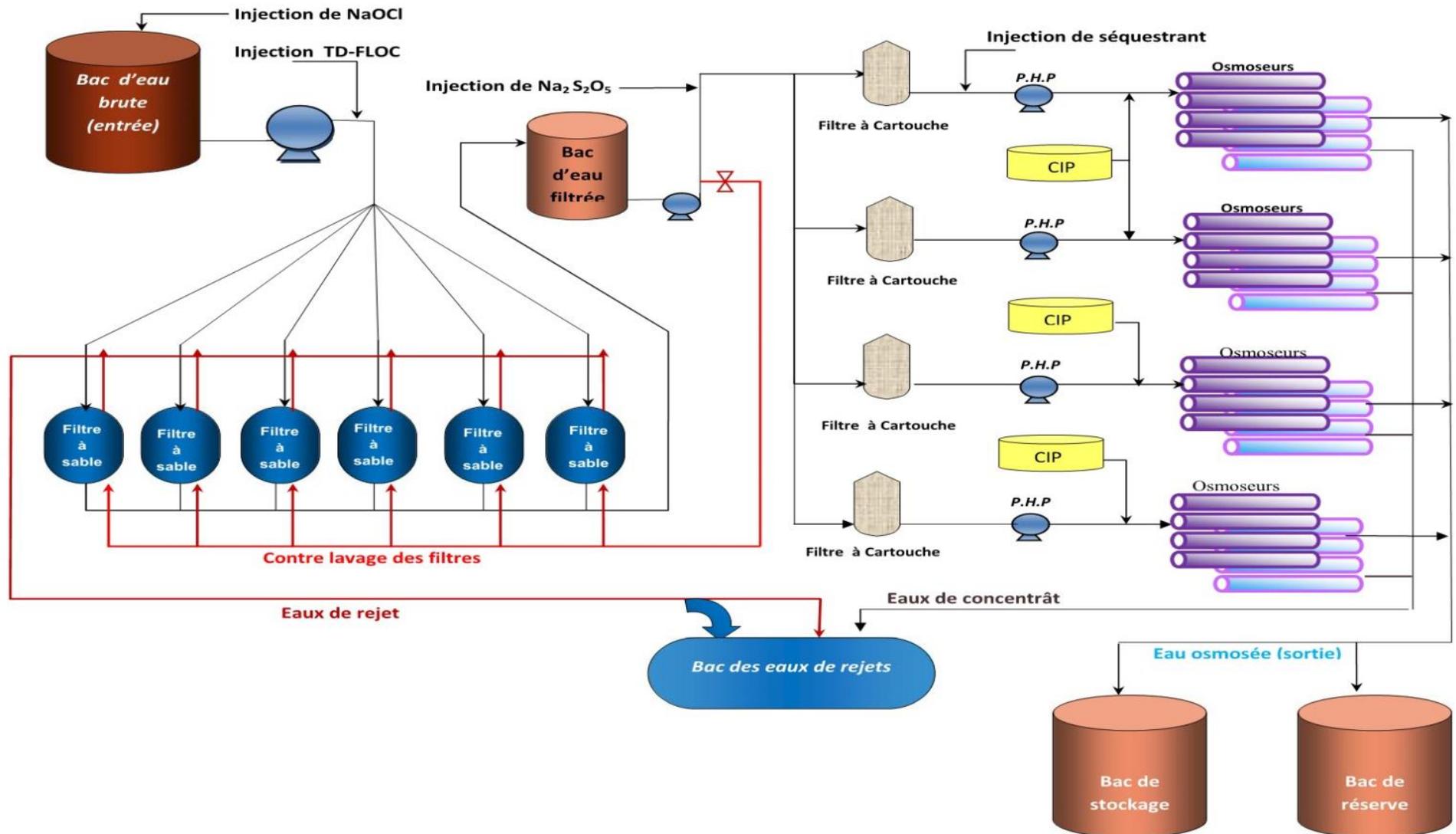


Figure 20. Schéma du processus de traitement de l'eau par osmose inverse [21].

III. Analyses effectuées à Cevital pour assurer la qualité de l'eau

Le complexe Cevital utilise deux méthodes d'analyses pour contrôler ses eaux : des analyses physico-chimiques et des analyses spectrophotométrique UV- Visibles.

III.1. Analyses physico-chimiques [4, 16, 21].

Les types d'analyses physicochimiques effectués sur les échantillons d'eau récoltés sont des analyses journalières. Elles concernent : le potentiel d'hydrogène, la conductivité, le titre alcalimétrique complet TAC, le titre alcalimétrique TA, le titre hydrométrique (TH) et la teneur en chlorures. Pour ces analyses, les prélèvements d'eau s'effectuent à l'entrée et à la sortie de l'unité de l'osmose inverse chaque jour pendant 30 jours.

III.1.1. Potentiel hydrogène (pH)

C'est un paramètre physique qui correspond à la concentration d'ions hydrogènes (H^+) présents en solution dans l'eau. Il détermine l'acidité ou l'alcalinité de l'eau et traduit la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14. La valeur 7 étant le pH neutre, il est mesuré à l'aide d'un pH-mètre ou par titrage volumétrique avec un indicateur coloré, le bleu de bromothymol.

III.1.1.1. Principe

La mesure du pH est la mesure de la différence de potentiel existant entre une électrode de verre et une électrode de référence plongeantes dans une même solution. Le potentiel de l'électrode est lié à l'activité des ions H^+ . La détermination du pH par la méthode potentiométrique est réalisée à l'aide d'un pH-mètre.

III.1.1.2. Matériels

- Un bécher ;
- pH mètre.

III.1.1.3. Mode opératoire

- ✓ L'échantillon doit être bien homogène ; prélever une prise d'essai suffisamment pour permettre l'immersion des électrodes.
- ✓ La mesure de pH est faite directement sur le pH-mètre (**Figure 21.**).



Figure 21. pH mètre [55].

III.1.2. Conductivité

La conductivité détermine l'ensemble des minéraux présents dans une solution. Elle est exprimée en micro siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

La minéralisation des eaux en fonction de la conductivité électrique est exprimée dans le tableau ci-dessous (**Tableau 7**) :

Tableau 7. Expression de la minéralisation des eaux en fonction de la conductivité électrique [15].

La conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	La minéralisation de l'eau
Conductivité < 100	Très faible
100 < conductivité < 200	Faible
100 < conductivité < 333	Moyenne
333 < conductivité < 666	Moyenne accentuée
666 < conductivité < 1000	Importante
conductivité > 1000	Elevée

III.1.2.1. Principe

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1cm^2 de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle est l'inverse de la résistivité électrique.

III.1.2.2. Matériels

- Un bécher ;
- Un conductimètre.

III.1.2.3. Mode opératoire

- ✓ L'échantillon doit être bien homogène ; prélever une prise d'essai suffisamment pour permettre l'immersion des électrodes.
- ✓ La mesure de la conductivité est faite directement par le conductimètre (**Figure 22**).



Figure 22. Conductimètre [56].

III.1.3. Dureté totale (TH total) et dureté calcique

La dureté totale de l'eau est l'indicateur de la minéralisation de l'eau qui correspond à la teneur en calcium et en magnésium. La dureté calcique définit uniquement la teneur en calcium (Ca^{2+}).

Souvent, l'eau est simplement classifiée comme eau «douce » ou « dure ». En général, les valeurs suivantes s'appliquent à ces termes (normes algériennes) (**Tableau 8**)

Tableau 8. Classification de l'eau selon la valeur du TH [15].

Valeur du TH	Type d'eau
TH < 5°F (50 mg/L de CaCO ₃)	eau très douce
De 5 à 12°F (50 – 120 mg/L de CaCO ₃)	eau douce
De 12 à 24°F (120 – 240 mg/L de CaCO ₃)	eau dure moyenne
De 24 à 36°F (240 – 360 mg/L de CaCO ₃)	eau dure
> à 36°F (360 mg/L de CaCO ₃)	eau très dure.

III.1.3.1. Principe

Le TH total est déterminé par dosage complexométrique en présence de sel disodique (EDTA) et du Noir Eriochrome comme indicateur coloré. Le sel disodique de l'EDTA (complexon) se combine aux ions calcium puis magnésium en donnant des complexes solubles peu dissociés. La fin de la réaction est mise en évidence par le noir Eriochrome T qui vire lorsque les dernières traces d'ions magnésium sont complexées.

III.1.3.2. Matériels

- burette de 100 ml;
- pipette volumétrique de 5 ml;
- bécher de 100 ml;
- flacon Erlenmeyer de 250 ml;
- de la solution standard d'EDTA 0,02 N;
- solution tampon ammoniacal;
- indicateur Noir Eriochrome T (NET).

III.1.3.3. Mode opératoire

- ✓ placer dans un bécher de 100 ml et ajouter 1 à 2 ml de la solution tampon pour augmenter le pH à $10 \pm 0,1$;
- ✓ placer dans un flacon Erlenmeyer de 250 ml et ajouter deux gouttes de l'Indicateur Noir Eriochrome T (NET) ;
 - ❖ Si la coloration est bleue, implique que **TH = 0 °f** (*pas besoin de titrage*)
 - ✓ Si la coloration est rouge brique, implique que **TH ≠ 0** (*besoin de titrage*)
- ✓ titrer avec l'EDTA à **0,02N** en remuant continuellement jusqu'à disparition de la couleur rouge brique et l'apparition de la couleur bleue (fin du titrage);
- ✓ noter le volume d'EDTA utilisé (ml) (**Figure 23**).

le calcul

$$\text{TH} = \text{chute de burette } ^\circ\text{f}$$

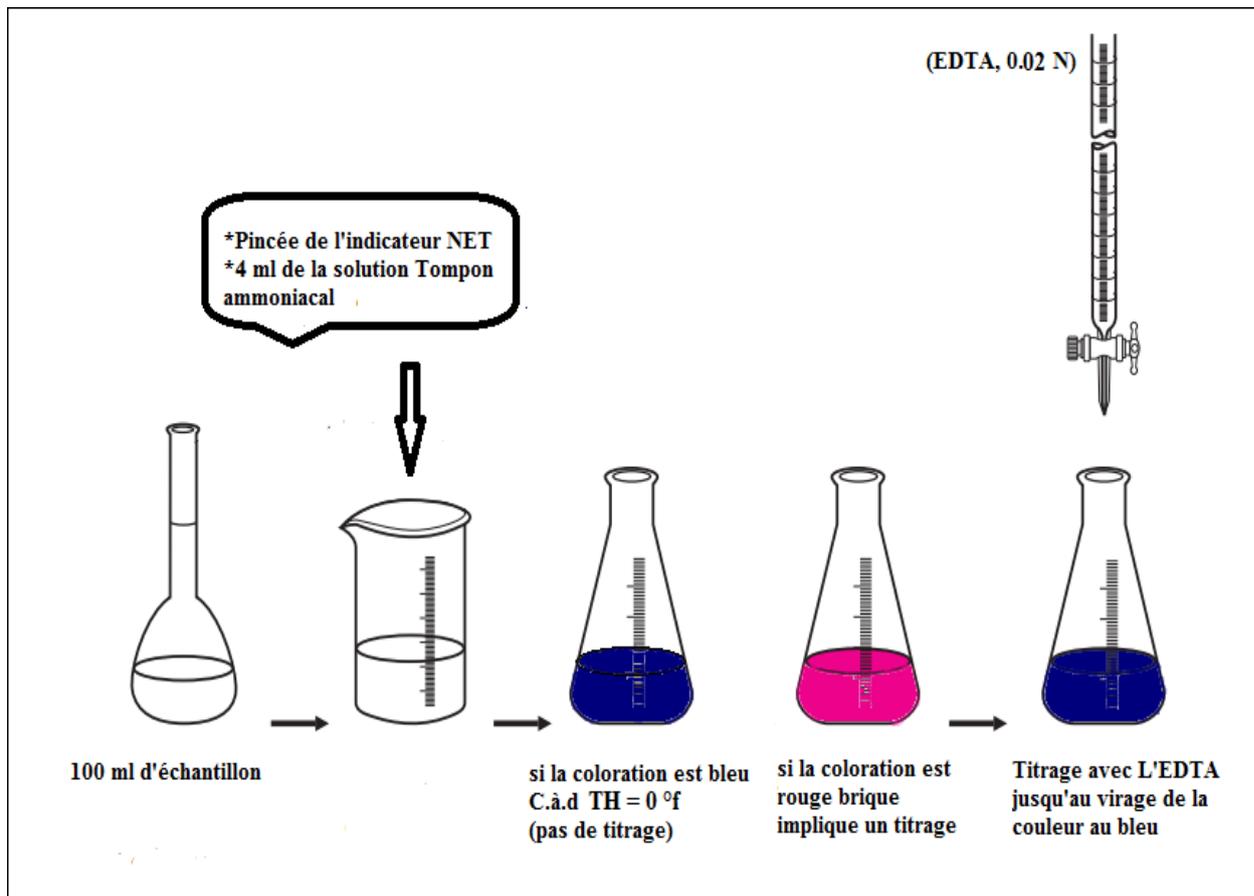


Figure 23. Fluxogramme de l'analyse de titre hydrométrique (TH).

III.1.4. Détermination du titre alcalimétrique (TA):

Il permet de connaître les teneurs de l'eau en ions carbonates (CO_3^{2-}) et des ions hydroxydes (OH^-) présentes dans l'eau. Si le pH d'une eau est inférieur à 8,2 le TA est nul.

III.1.4.1. Principe

Cette analyse se fait en présence de phénolphthaléine qui vire du rose fuchsia à l'incolore à un pH de 8,2. Le titre alcalimétrique s'exprime en ppm m/V (ou mg/L) de CaCO_3 ou en degrés français (°f).

III.1.4.2. Matériels

- burette de 100 ml;
- pipette volumétrique de 5 ml;
- bécher de 100 ml;
- flacon Erlenmeyer de 250 ml;
- Solution de phénolphthaléine à 1% dans l'éthanol;
- une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) 0,02 N.

III.1.4.3. Mode opératoire

- ✓ placer dans un bécher de 100 ml d'eau
- ✓ placer dans un flacon Erlenmeyer de 250 ml et ajouter quelques gouttes de l'Indicateur coloré phénolphtaléine ;
 - ❖ S'il n'y a pas de coloration, implique que $TA = 0$ °f (pas besoin de titrage)
 - ❖ Si la coloration est rose, implique que $TA \neq 0$ (besoin de titrage)
- ✓ titrer avec l'acide sulfurique à $0,02 N$ en remuant continuellement jusqu'à la disparition de la couleur rose (fin du titrage);
- ✓ noter le volume de H_2SO_4 utilisé (ml) (Figure 24.).

✚ Le calcul

$$TA = \text{chute de burette } ^\circ f$$

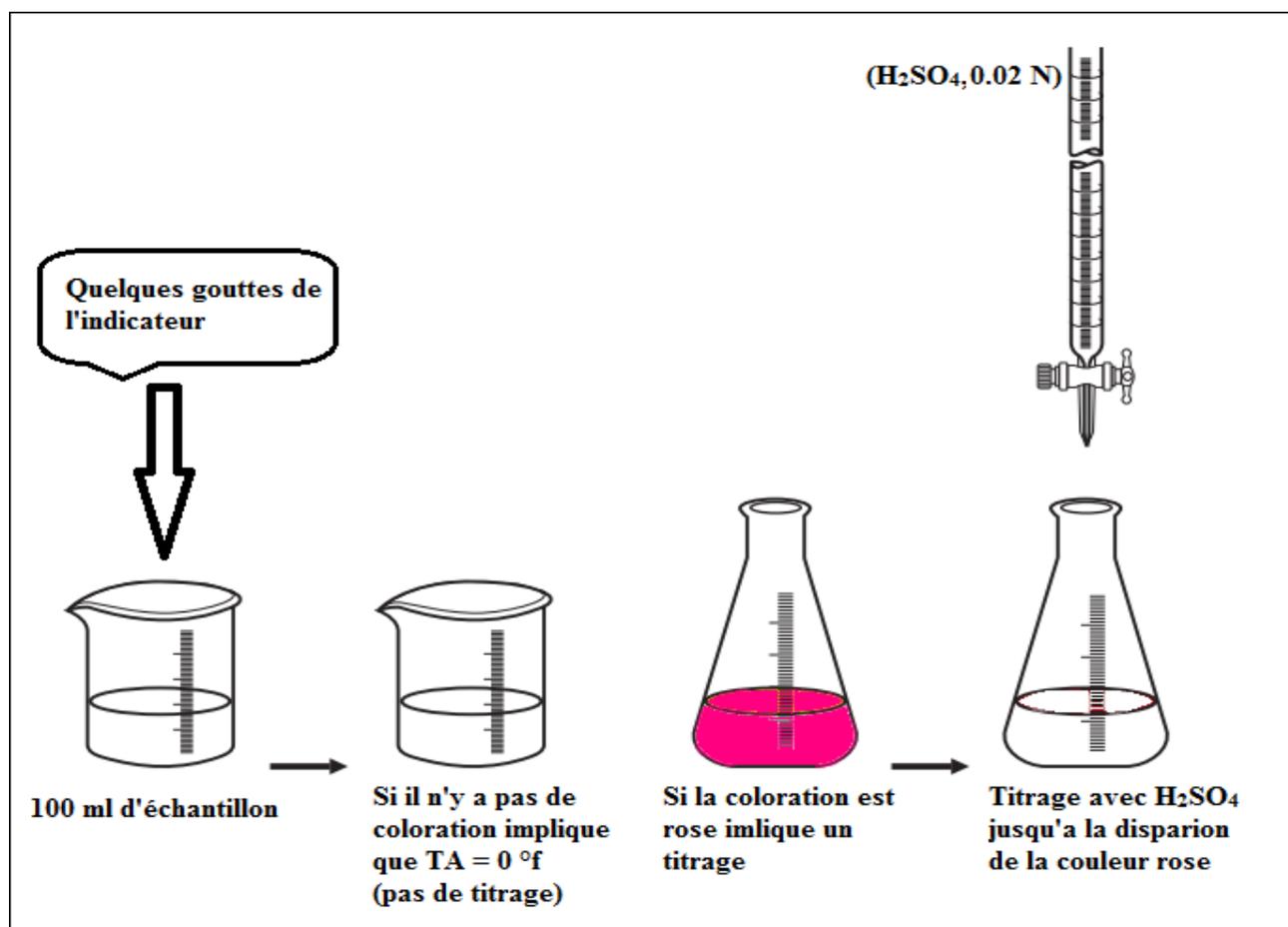


Figure 24. Fluxogramme de l'analyse du titre alcalimétrique (TA).

III.1.5. Titre alcalimétrique complet (TAC)

Après le pH, le TAC est le paramètre chimique le plus important à connaître. Ce « Titre Alcalimétrique Complet » mesure la teneur de la totalité des minéraux en hydroxydes (OH^-), en carbonates (CO_3^{2-}), et en bicarbonates ou hydrogénocarbonates (HCO_3^-) alcalins et alcalinoterreux.

III.1.5.1. Principe

Le titre alcalimétrique complet (TAC) correspond à la neutralisation de la totalité des ions hydroxydes, carbonates et hydrogénocarbonates par un acide fort (H_2SO_4).

III.1.5.2. Matériels

- burette de 100 ml;
- pipette volumétrique de 5 ml;
- bécher de 100 ml;
- flacon Erlenmeyer de 250 ml;
- un indicateur méthylorange;
- une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) 0,02 N ;

III.1.5.3. Mode opératoire

- ✓ placer dans un bécher de 100 ml
- ✓ placer dans un flacon Erlenmeyer de 250 ml et ajouter quelques gouttes de l'Indicateur coloré méthylorange;
 - ❖ Si la coloration est orange, implique que $\text{TAC} = 0$ °f (*pas besoin de titrage*)
 - ❖ Si la coloration est jaune, implique que $\text{TAC} \neq 0$ (*besoin de titrage*)
- ✓ titrer avec l'acide sulfurique à 0,02 N en remuant continuellement jusqu'à l'apparition de la couleur orange (fin du titrage);
- ✓ noter le volume de H_2SO_4 utilisé (ml) (**Figure 25**).

le calcul

$$[\text{TAC}] = \text{chute de burette en } ^\circ\text{f}$$

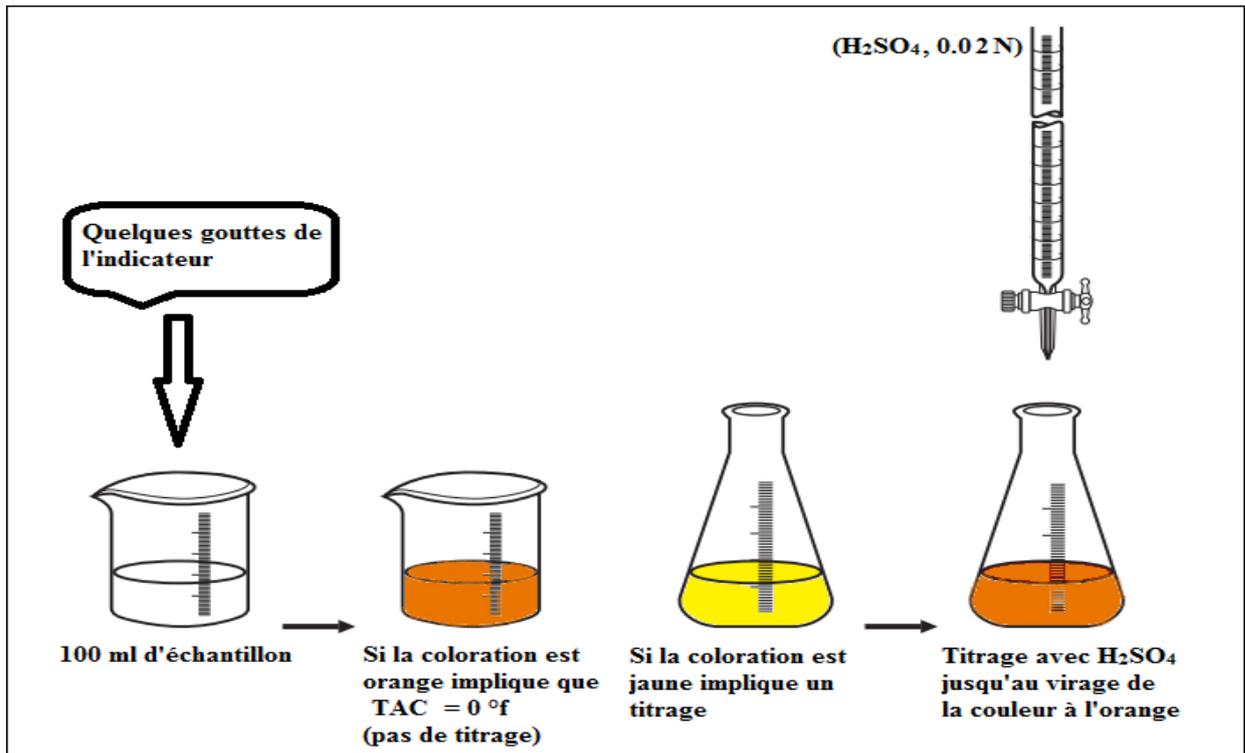


Figure 25. Fluxogramme de l'analyse du titre alcalimétrique complet (TAC).

III.1.6. Chlorure (Cl⁻)

III.1.6.1. Principe

C'est la réaction des ions chlorure avec des ions argent pour former des chlorures d'argent insoluble qui est précipité.

III.1.6.2. Matériels

- une burette de 100 ml;
- un flacon Erlenmeyer de 250 ml;
- un bécher de 100 ml;
- de la solution titrée de nitrate d'argent **0,01 N** ;
- de l'indicateur coloré chromate de potassium (**K₂CrO₄**);

III.1.6.3. Mode opératoire

- ✓ placer 100 ml d'échantillon dans le flacon Erlenmeyer;
- ✓ ajouter 2 ml de la solution indicatrice de **K₂CrO₄**;
 - ❖ Si la coloration est brune, implique que [Cl⁻] = 0 mg/l (*pas besoin de titrage*)
 - ❖ Si la coloration est jaune, implique que [Cl⁻] ≠ 0 (*besoin de titrage*)
- ✓ titrer la solution avec du nitrate d'argent (**AgNO₃**) **0,01N** jusqu'à ce que la solution vire à la couleur brune qui est le point de fin de titrage (**Figure 26**).

le calcul

$$[\text{Cl}^-] = \text{chute de burette} \times 3,55 \text{ en mg/l}$$

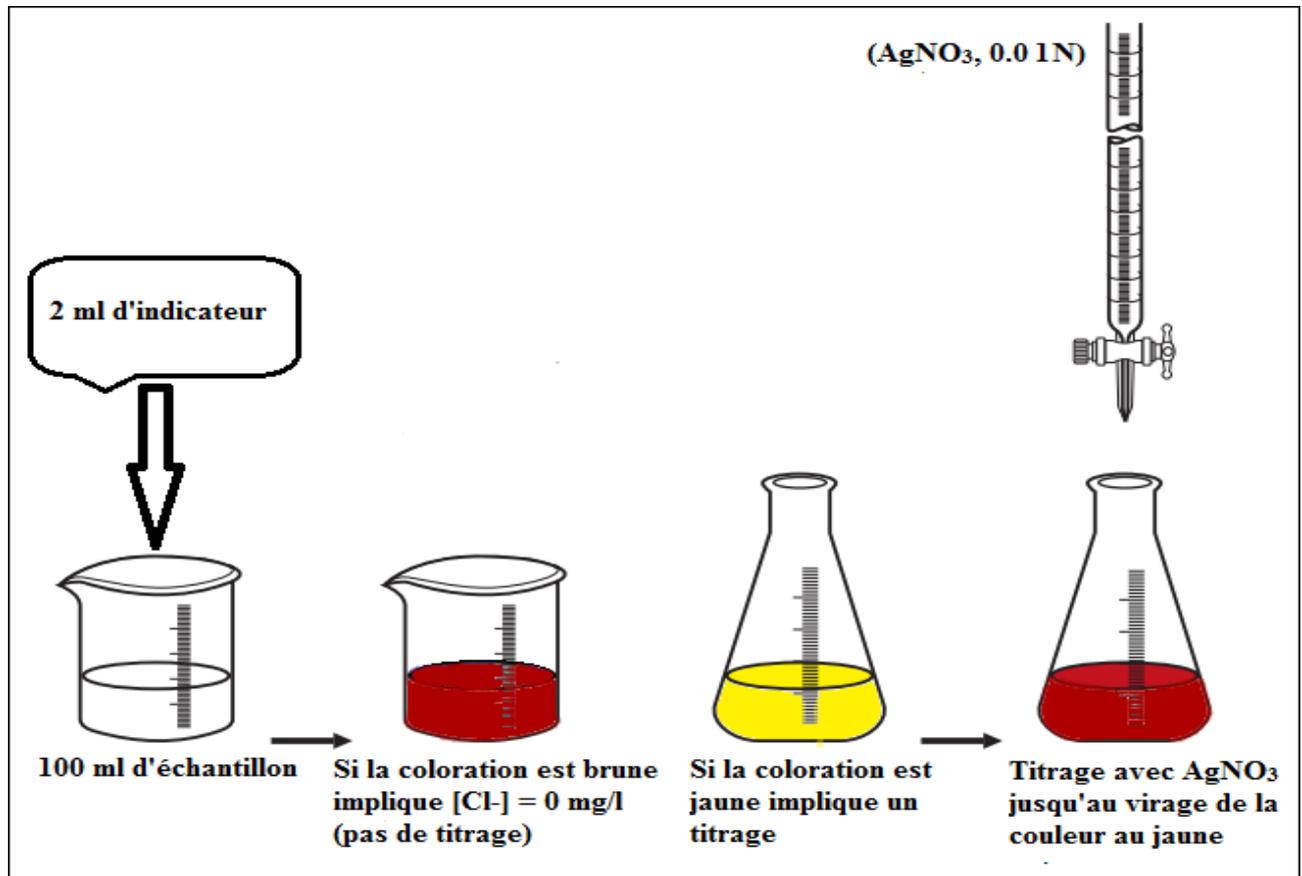


Figure 26. Fluxogramme de l'analyse des chlorures (Cl⁻).

II.2. Analyse spectrophotométrique UV- Visible [57]

La spectrophotométrie est une méthode analytique quantitative et qualitative qui consiste à mesurer l'absorbance ou la densité optique d'une substance chimique donnée. Plus l'échantillon est concentré, plus il absorbe la lumière dans les limites de proportionnalité énoncées par la loi de Beer-Lambert. La densité optique des échantillons est déterminée à la longueur d'onde d'absorption de la substance à étudier, par un spectrophotomètre préalablement étalonné.

Cevital utilise la méthode spectrophotométrique UV-Visible souvent pour la mesure des teneurs en silice et en fer existantes dans l'eau.

- Les analyses hebdomadaires concernent : le Fer (Fe) et la Silice (SiO₂) et les prélèvements sont effectués au seuil des circuits de l'eau (forage, osmose, ADE, chaudière et ultra pure).



Figure 27. Illustration d'un spectrophotomètre UV- Visible

III.2.1. Silice

On distingue la silice neutre, la silice colloïdale et la silice activée. La silice est neutre à pH neutre. On parle de silice colloïdale quand la silice se combine avec des molécules organiques.

III.2.1.1. Principe

La silice est dosée par colorimétrie en présence de molybdate d'ammonium et en milieu acide. Le pH est compris entre 2,3 et 2,4, ainsi, se forme de l'acide molybdosilique jaune. L'intensité de la couleur est proportionnellement à la concentration de la silice. On élimine l'interférence due aux phosphatées en ajoutant de l'acide oxalique qui détruit sélectivement l'acide molybdophosphorique susceptible de se former.

III.2.1.2. Matériels

- cuve rectangulaire 5cm NANOCOLOR ;
- pipette 1 ml, 20ml ;
- fiole de 25 ml ;
- spectrophotomètre NANOCOLOR UV/VIS
- réactifs 1, 2 et 3 NANOCOLOR UV/VIS.

III.2.1.3. Mode opératoire

- ✓ Introduire respectivement dans une fiole de 25 ml ;
- ✓ 20 ml d'échantillon à analyser ;
- ✓ 1 ml de R1², mélanger et attendre 3 mn ;
- ✓ 1 ml de R2, mélanger et attendre 1 mn ;
- ✓ 1 ml de R3 Ajuster à 25 ml avec de l'eau distillée et mesurer après 15 mn après avoir transvasé dans des cuves rectangulaires ;
- ✓ La lecture se fait à une longueur d'onde de 690 nm.

III.2.2. Teneur en Fer :

Le dosage en fer dissous est primordial dans la détermination de la corrosion pouvant se produire dans les circuits industriels.

III.2.2.1. Principe

Le fer(II) réagit avec un dérivé de la triazine pour donner un complexe violet. La capsule NANOFIX sert pour la réduction de Fe(III) en Fe(II) et pour l'ajustage du pH.

III.2.2.2. Matériels

- Cuve ronde NANOCOLOR ;
- Pipette 5 ml;
- Spectrophotomètre NANOCOLOR UV/VIS.

III.2.2.3. Mode opératoire

Dans une cuve ronde, ajouter 4ml de l'échantillon à analyser et un NANOFIX **R2** (fermer le tube de NANOFIX immédiatement après l'addition de **R2**³) et mesurer après 10 mn. Le blanc est préparé avec 04 ml d'eau distillée et un NANOFIX R2. La lecture se fait à une longueur d'onde de **540 nm**.

² R1, R2, R3 : sont des kits chimique de dosage de silice.

³ **R2** : est un kit chimique pour le dosage du fer.

Partie C : Résultats et Discussions

Partie C : Résultats et discussion

Afin de mettre en évidence les éléments susceptibles d'être à l'origine du colmatage rapide des membranes des osmoseurs de la chaîne de traitement de l'eau du complexe agro-alimentaire Cevital, nous nous sommes intéressés à une étude comparative sur les analyses physico-chimiques des eaux qui alimentent le complexe à savoir : l'eau provenant du réseau de l'eau potable ADE de Béjaia et l'eau provenant des forages d'eaux situés à Ibourassen dans la commune de Oued Ghir (W. Béjaia). Il est à noter que la durée de vie des membranes est de loin plus grande dans le cas de l'alimentation en eau par les eaux de l'ADE (2 à 3 ans) comparativement à celle des membranes alimentées par les eaux de forages d'Ibourassen qui n'est que de 6 à 9 mois.

A cet effet, nous avons réalisé une étude comparative sur les données physico-chimiques des deux sources d'eau (ADE et forages Ibourassen) fournies par Cevital pour l'année 2019 dans le but de détecter les éléments éventuellement responsables du colmatage des membranes des osmoseurs.

En fonction des données disponibles, aussi bien sur les eaux de l'ADE que sur les eaux des forages d'Ibourassen, nous avons retenu les propriétés et les éléments chimiques suivants : pH, conductivité, titre hydrotimétrique (TH), titre alcalimétrique complet (TAC), chlorures, silice et chlore.

1. Potentiel hydrogène (pH)

Les résultats du pH mesurés pour les eaux de forage et de l'ADE sont présentés dans le tableau suivant (tableau 9).

Tableau 9. Valeurs du pH des eaux de forage et de l'ADE

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Norme (°f)
forage	7,60	7,55	7,47	7,46	7,31	7,43	7,43	7,58	7,83	7,5	7,74	7,61	8
ADE	7,64	7,77	7,64	7,67	7,38	7,47	7,47	7,74	7,75	7,73	7,8	7,54	8,5

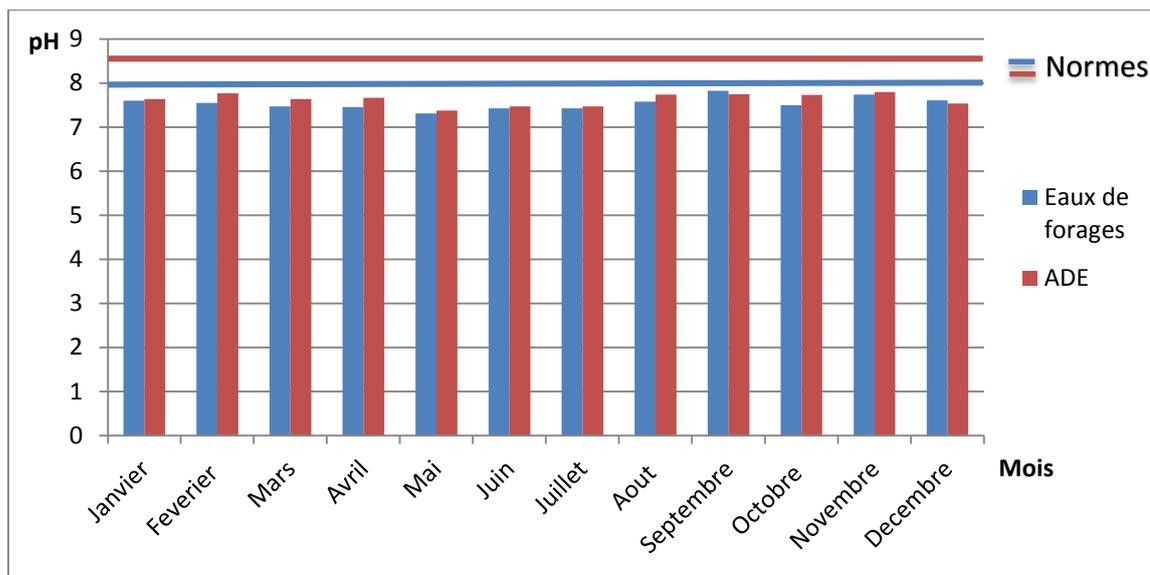


Figure 28. Représentation graphique des pH des eaux de forages et de l’ADE

La mesure du pH est une considération importante en ce qui concerne la détermination de l'action corrosive de l'eau et l'évaluation des pratiques de traitement d'eau au niveau des procédés industriels. D'après ces résultats, les pH mesurés sont presque semblables.

2. Conductivité

Les résultats de conductivité trouvés pour les eaux de forage et de l’ADE sont présentés dans le tableau suivant (tableau 10)

Tableau 10. Valeurs de conductivité des eaux de forage et de l’ADE

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Norme (°f)
Forage	2673,33	2700,00	2750	2716,67	2653,33	2663,33	2710	2706,67	2740	2740	3880	2885	2400
ADE	772,00	1341,00	1326	1150	740	789	839	781	798	785	1375	799	2800

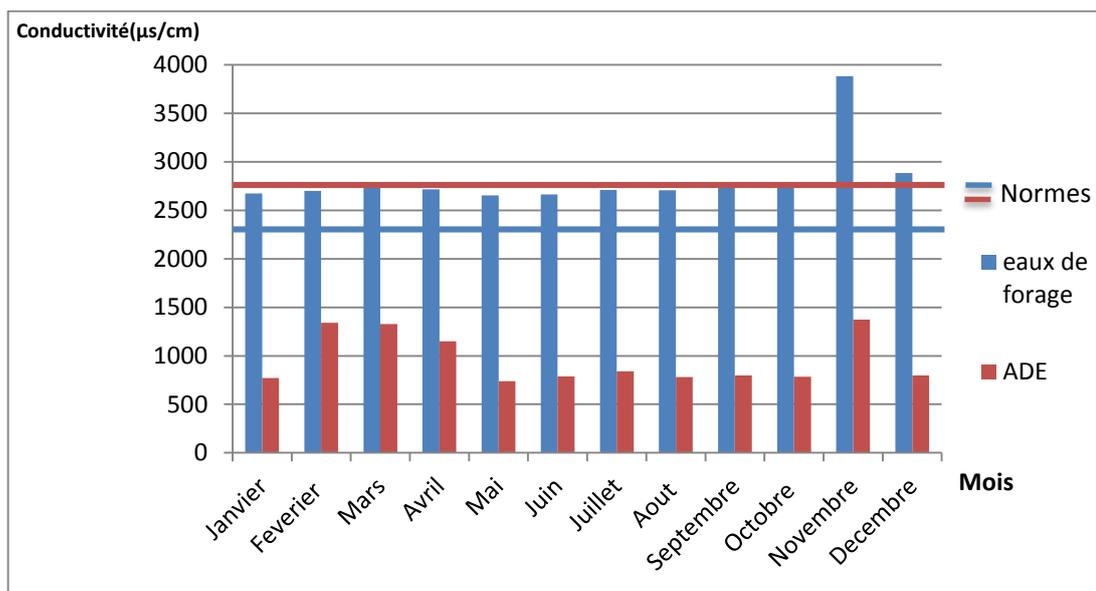


Figure 29. Représentation graphique des conductivités des eaux de forages et de l’ADE

Pour l'examen de la qualité de l'eau, la conductivité électrique peut être utilisée comme mesure de la concentration des solutés ionisables présents dans l'échantillon, car la conductivité de l'eau est directement proportionnelle à la quantité de solides dissous dans l'eau (les sels minéraux).

Les valeurs de conductivités des eaux de forage sont importantes, dépassent la norme (2400 µs/cm) et surpassent largement celles de l’ADE.

Cette minéralisation excessive traduit le plus souvent une salinité élevée. Elle conduira à un entartrage des conduites si l'excès est dû aux ions de calcium.

3. Dureté totale (TH total) et Dureté calcique (TH Ca²⁺)

Les résultats de dureté totale et calcique trouvés pour les eaux de forage et de l’ADE sont présentés dans les tableaux suivants. (Tableaux 11, 12).

Tableau 11. Valeurs de dureté totale des eaux de forage et de l’ADE

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Norme (°f)
Forage	92,00	94,07	93,47	94,13	94,73	95,33	96,33	94,73	94,53	93,6	93,6	94	80
ADE	35,80	53,20	52,2	48,4	37,2	38,6	38,2	37,4	38,8	37,8	51,4	38,8	20

Tableau 12. Valeurs des duretés calciques des eaux de forage et de l'ADE

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Norme (°f)
Forage	61,80	63,93	62,93	63,2	63,73	63,93	65,6	65,6	63,6	64,93	64,53	63	-
ADE	24,00	41,80	36,8	33,2	24,8	24,8	35	24,2	24,2	24,2	35,2	24,2	50

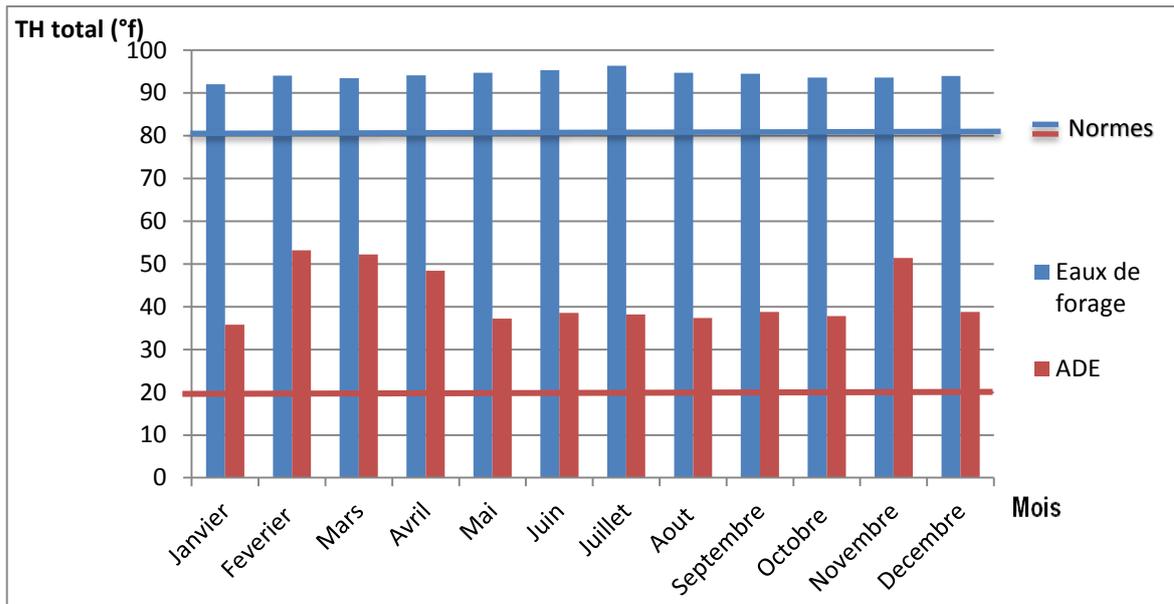


Figure 30. Représentation graphique des duretés totales des eaux de forages et de l'ADE

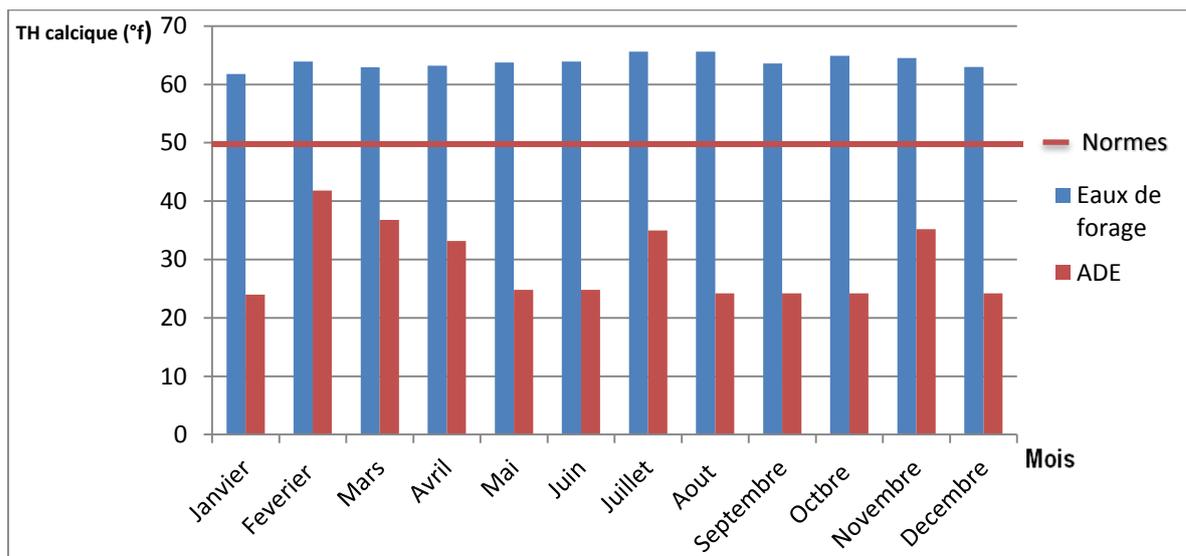


Figure 31. Représentation graphique des duretés calciques des eaux de forages et de l'ADE

La dureté de l'eau est un indicateur de la minéralisation de l'eau qui correspond à la teneur en calcium et en magnésium. La dureté calcique définit uniquement la teneur en calcium.

D'après les résultats obtenus, on constate une haute présence d'ions de calcium qui traduit une grande dureté de l'eau. Cette dernière est à l'origine de la formation de dépôts de tarte important ce qui est probablement à l'origine du dysfonctionnement du procédé de traitement d'eau.

4. Titre alcalimétrique (TA) et Titre alcalimétrique complet (TAC)

Les résultats d'analyses relatifs au titre alcalimétrique (TA) et (TAC) pour les eaux de forage et de l'ADE sont présentés dans le tableau suivant (tableau 13, 14).

Tableau 13. Valeurs de TAC des eaux de forage et de l'ADE

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Norme (°f)
forage	32,80	34,47	37,27	36,47	36,67	35,6	35,47	35,4	34,67	33,13	33,4	34,73	35
ADE	22,80	24,00	23,2	23,8	23,4	23,2	23	22,2	23,6	23,6	22,6	23	5,5

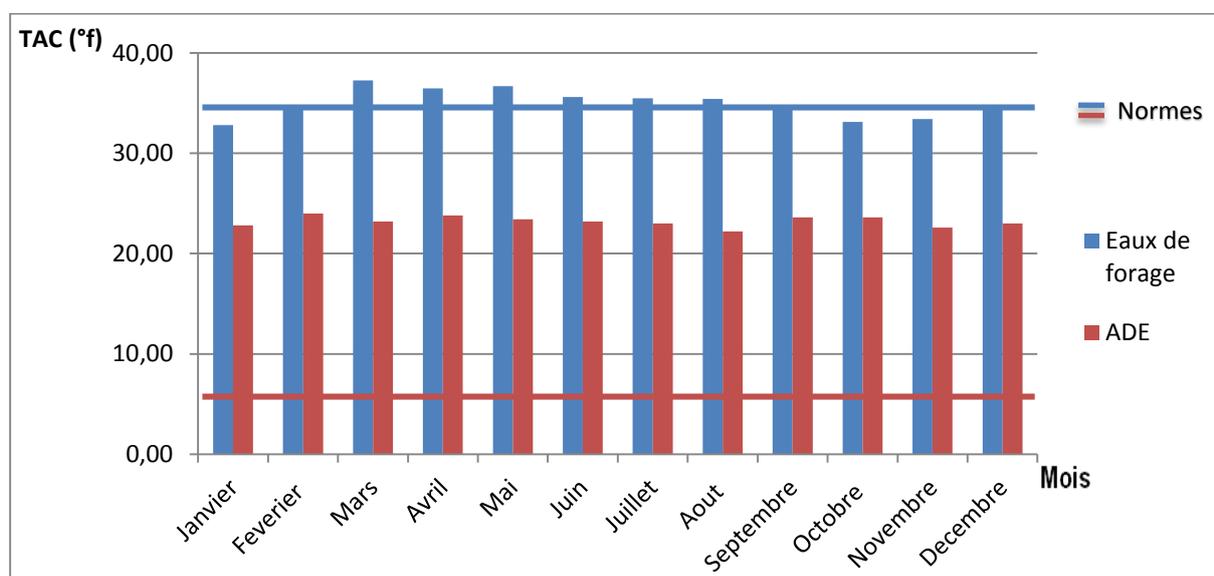


Figure 32. Représentation graphique des valeurs de TAC des eaux de forage et de l'ADE

Tableau 14. Valeurs de TA des eaux de forage et de l'ADE

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	septembre	Octobre	Novembre	Décembre
forage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Le TAC définit les teneurs en hydroxyde, carbonates et bicarbonates. Il est aisé de remarquer une très grande teneur de TAC au niveau des eaux de l’ADE. En tenant compte de la teneur en TA *qui est de 0,7* aussi bien que pour les eaux de forage et l’ADE et de leurs pH qui est inférieur à 8,3, on peut conclure que cette énorme teneur en TAC trouvée reflète uniquement les ions bicarbonates (HCO₃⁻). Une teneur élevée en TAC sous l'action de chaleur et la libération du CO₂ provoque la précipitation du CaCO₃ (entartage).

5. Chlorures (Cl⁻)

Les résultats mesurés sur les ions chlorures, pour les eaux de forage et de l’ADE, sont présentés dans le tableau suivant (tableau 15).

Tableau 15. Valeurs de chlorure des eaux de forage et de l’ADE

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Norme (°f)
Forage	67,80	66,47	69	67,2	67,07	68,33	68,87	69	75,13	69,6	68,8	73,67	50
ADE	7,40	20,40	17,8	15,6	7	7,4	8,4	8,2	8	7,6	20,6	7,8	50

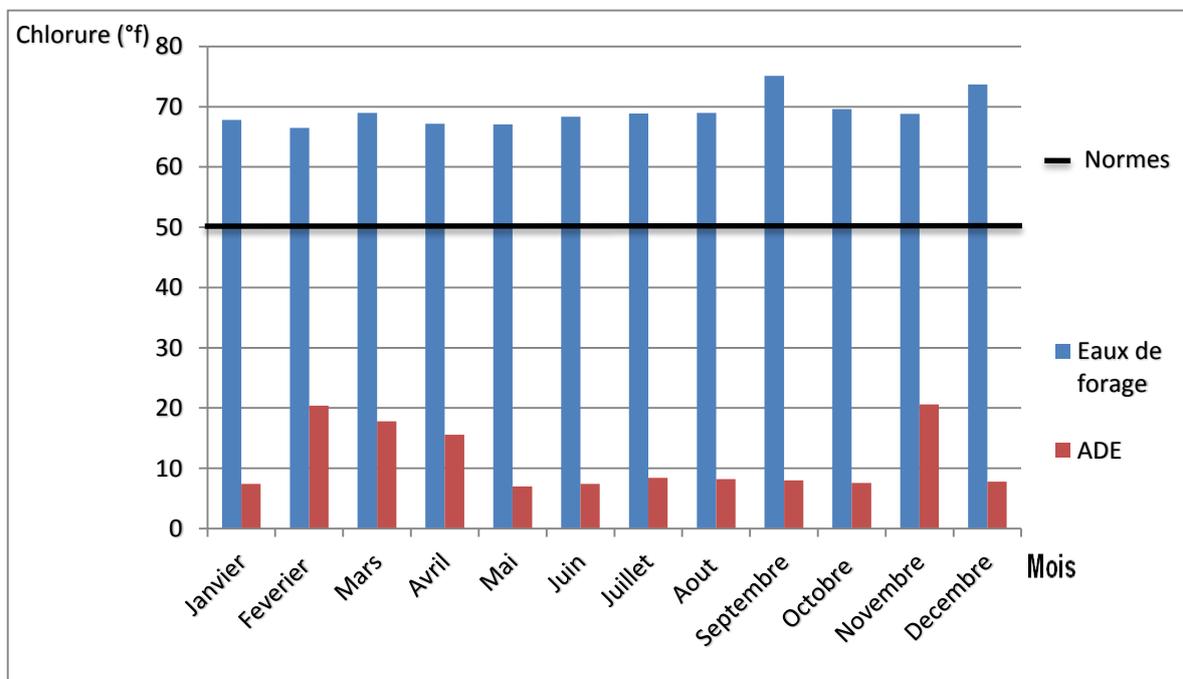


Figure 33. Représentation graphique valeurs de chlorure des eaux de forages et de l’ADE

Pour les eaux de forage d'Ibourassen, la concentration en ions chlorures (de l'ordre de 66°f) paraît très élevée comparée aux normes qui est de 50 °f, ce qui peut expliquer en partie les valeurs élevées de la conductivité. Par contre, les eaux de l'ADE présentent des valeurs inférieures (de l'ordre 7°f) à la norme [58].

D'après d'autres études menées au niveau du complexe Cevital, les chlorures sont éliminés à hauteur de 98% par les osmoseurs [16, 26,54].

6. Silice (SiO₂)

Les résultats de Silice (SiO₂) trouvés pour les eaux de forage et de l'ADE sont présentés dans le tableau suivant (tableau 16).

Tableau 16. Valeurs de silice des eaux de forage et de l'ADE

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Norme (°f)
forage	5,42	5,92	8,4	8,6	6,4	5,14	10,78	10,44	19,22	11,59	16,2	14,4	12
ADE	1,54	2,13	2,36	3,25	3,2	3,1	7,4	4,84	9,1	9,65	7,4	3,21	0

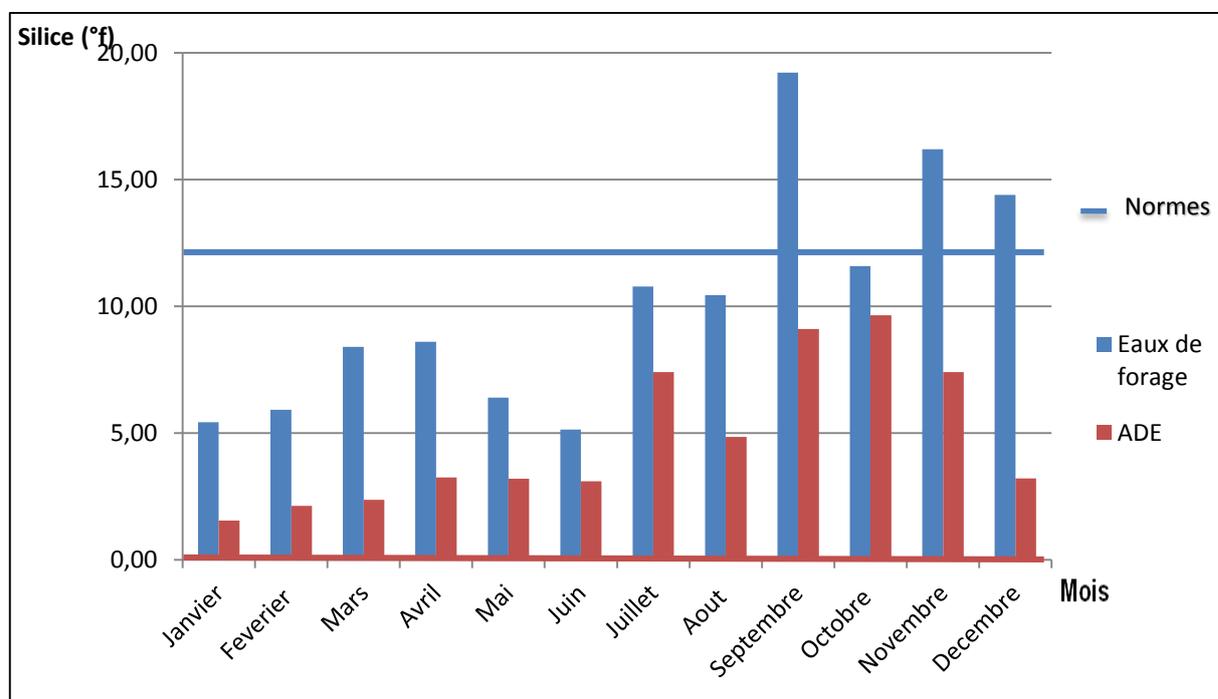


Figure 34. Représentation graphique des valeurs de silice des eaux de forages et de l'ADE

La silice peut précipiter dans certaines conditions (TAC faible, concentration et température élevées) et donner naissance à de « tartres siliceux » excessivement durs, ayant parfois un aspect vitreux, très adhérents.

L'élimination des tartres siliceux ne peut se faire que par voie chimique et ne peut se faire que par moletage.

7. Elimination du chlore Cl₂

Les résultats du chlore avant et après déchloration sont dans la figure suivante (figure 35) :

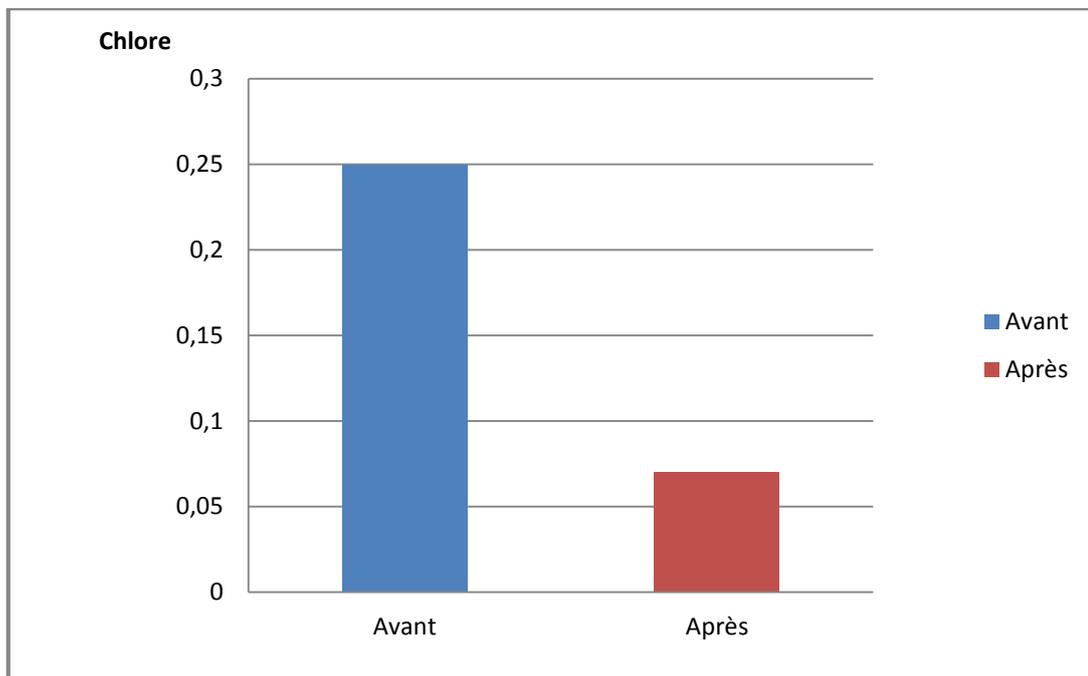


Figure 35. Représentation graphique des valeurs du Cl₂ avant et après déchloration

Malgré une faible présence de chlore, cela peut nuire facilement à la qualité de la membrane, et ce, en élargissant les pores de cette dernière. Cet élargissement diminuera considérablement la capacité de rétention des membranes ce qui les rendra inutilisables.

8. Influence de quelques ions et leurs impacts sur les séquestrants

- L'un des ions les plus ciblé est le sulfate (SO_4^{2-}). Dans une eau suffisamment riche en sulfate et en présence d'autres ions tels que les Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , on peut observer la formations de tartre sous forme de gypse (CaSO_4), de sulfate de magnésium (MgSO_4), d'arcanite (K_2SO_4) ou de thénardite (Na_2SO_4).

Supposant que le travail inhibiteur du séquestrant concerne que les carbonates de calcium (CaCO_3), cela nous indiquerait que l'entartrage formé par les autres ions n'est pas traité, ce qui causerait par la suite un colmatage au niveau des membranes.

- La silice peut être aussi une cause de colmatage. Un fort dépôt en SiO_2 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.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les procédés membranaires font partie des nouvelles technologies qui peuvent être utilisés pour le traitement des eaux et pour la production de l'eau potable. Cependant le colmatage des membranes est l'un des problèmes le plus aigu rencontré en filtration membranaire des eaux de surface.

Afin de distinguer les éléments responsables du colmatage des membranes d'osmose inverse, la présente étude consiste à comparer deux sources d'eaux différentes qui alimentent le complexe agroalimentaire CEVITAL, à savoir le forage d'eau situé à Ibourassen (*OUED GHIR*) et l'alimentation en eau par le réseau ADE.

A l'issue de cette étude, nous pouvons conclure que les eaux de forage sont extrêmement chargées en ions par rapport aux eaux de l'ADE. Cette forte ionisation entraîne des précipitations de tartre et colmate les membranes. Ceci explique aisément la durée de vie très courte des membranes (6 à 9 mois) lorsque le complexe Cevital est alimenté par les eaux du forage d'Ibourassen.

La durée de vie des membranes dépend pratiquement du colmatage. De ce fait, ces membranes nécessitent des lavages fréquents, le plus souvent chimiques (détergents, acides). Cependant, des lavages répétitifs entraînent la dégradation de la membrane et provoquent son épuisement en plus des surcoûts importants à supporter.

Pour augmenter la durée de vie de ces membranes, le complexe pourrait opter pour un autre type de lavage de ses membranes moins nocif et plus écologique, tel que le lavage enzymatique.

Néanmoins, plusieurs ions ne sont pas analysés alors qu'ils devraient l'être, tels que les sulfates qui représentent un sérieux agent de colmatage.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Balz KAMBER, « Comets or volcanoes? Scientists are Changing their minds about how the earth's water got here », article en science de la terre du college trinity dublin Irlande, publié sur 'The conversation UK' le 6/03/2017.
- [2] Centre d'informations sur l'eau « Quelles sont les ressources en eau dans le monde », (www.cieau.com).
- [3] Éric VALETTE, « Les feuillets de l'oïse », article N° 181 du Service de l'Aménagement, de l'Urbanisme et de l'Environnement par la direction départementale de l'équipement de l'OISE, Beauvais (Juin 2008).
- [4] Lydia ADJED et Lydia BENANOUNE, « Etude de Colmatage des Membranes d'Osmose Inverse du Complexe de CEVITAL-Bejaia », Mémoire de Master en Génie des Procédés de l'Environnement, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa (2018).
- [5] Yves LEVI, « Eaux et risques pour la santé publique » livre " l'eau à découvert" , page 38-39 de (Agathe EUZEN ; Catherine JEANDEL et Rémy MOSSERI), Edition : CNRS, Paris, (2015).
- [6] Claire KÖNIG, « les cycles et propriétés de l'eau », article publié le 21/10/2016 sur Futura-sciences (www.futura-sciences.com)
- [7] Hasnia BENMOUSSA, « Chimie des eaux », Cours Master I en Génie des procédés de l'environnement, Université Mohamed BOUDIAF, ORAN (2017).
- [8] Agnès DUCHARNE et Katia LAVAL, « Comment et pourquoi un cycle ? » livre " l'eau à découvert ", page 26-27 de (Agathe EUZEN ; Catherine JEANDEL et Rémy MOSSERI), Edition : CNRS, Paris, (2015).
- [9] [site pinterest \(www.pinterest.com\)](http://www.pinterest.com)
- [10] Anne Piemont and all, « Memento degremont® de SUEZ » Edition digitale du Mémento Technique de l'eau, (www.suezwaterhandbook.fr).
- [11] A.TALEB et Z.KHIRREDINE, « Suivi des caractéristiques physico-chimiques de l'eau de la source à la consommation »Mémoire de master en Chimie industrielle ; option Analyse, Centre universitaire ; institut de chimie industrielle, BEJAIA (1992).
- [12] Amina AOUISSI, « Microbiologie et physico-chimie de l'eau des puits et des sources de la région de Guelma (Nord-est de l'Algérie) », Mémoire de Magister en Hydro-écologie Option : Santé Eau et Environnement, UNIVERSITE du 08 Mai 1945, GUELMA (2010).

- [13] Taous BEN CHABANE et Sabrina HAMDI, « Caractérisation des eaux des sources de la région de Yakourene. Suivi d'une étude comparative avec les eaux minérales (Ifri, Toudja, Lalla Khadîdja) », Mémoire de Master en chimie de l'environnement, Université MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU (2018).
- [14] Celia YAHIAOUI, « Étude cinétique du phénomène de la précipitation du CaCO_3 par dégazage de CO_2 de l'eau. Effet des inhibiteurs verts », Mémoire de master en Génie chimique, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2019).
- [15] Site Lentech « www.lentech.fr » consulté en décembre 2019
- [16] Chahra TIGHZERT et Lynda SADELLI, « Les technologies de traitement des eaux appliquées au niveau du complexe CEVITAL de Bejaia », Mémoire de master en Génie Alimentaire, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2019).
- [17] Daniel FLORENTIN et Olivier COUTARD, « l'eau et la ville en Europe : quelques pordaxes actuels » livre " l'eau à découvert", page 36-37 de (Agathe EUZEN ; Catherine JEANDEL et Rémy MOSSERI), Edition : CNRS, Paris, (2015).
- [18] Belkhir KEDAFI, « Elaboration et caractérisation des membranes polymères composites : application à la perméation gazeuse » Mémoire en Génie chimique, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa (2012).
- [19] Mourad ISSAADI et Abdeslam KHEBAT, «Contrôle du procédé combiné osmose inverse-électrodionisation CEDI par analyses physicochimiques des eaux de process de CEVITAL », Mémoire en Génie de l'environnement, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa (2015).
- [20] Farida HARRLEKAS, « Couplage des procédés membranaires aux techniques physico-chimiques ou biologiques pour le traitement des rejets liquides de l'industrie textile », thèse de doctorat en Génie des Procédés et des produits, Université Cadi , Marrakech (2008).
- [21] Feyrouz AZZOUNE et Samira MAZA, « Contrôle de la Qualité des eaux de process Osmose Inverse du Complexe Cevital Agroalimentaire, Bejaia», Mémoire de master en Biodiversité et Sécurité Alimentaire, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2018).
- [22] Jean-Marc BERLAND et Catherine JUERY, « Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau », document technique n°14 du fonds national pour le développement des adductions d'eau, sous la direction Office International de l'Eau SNIDE, Paris (décembre 2002).
- [23] Adrian Paul TAMAS « Étude comparée du colmatage en nanofiltration et en ultrafiltration d'eau de surface », Mémoire de Master en Génie Civil, Université Laval, Québec (2004).
- [24] Abdenabi ABIDI, « Étude de mécanismes de transfert des orthophosphates à travers une

membrane de nanofiltration en mode batch. Effet de la matrice expérimentale sur la sélectivité et modélisation phénoménologique », Thèse de doctorat en sciences en Chimie Industrielle ; Option Génie des Procédés, Université Mohamed Khider, Biskra (2014).

[25] Bastien PELLEGRIN « Analyse multi-échelle de la dégradation de membranes d'ultrafiltration en polyethersulfone / poly (N-vinyl pyrrolidone) en conditions d'usage », thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, Université de Paul Sabatier, Toulouse (2013).

[26] Hayette BAIR et Fayçal GHEMARI « Techniques et méthodes de traitement des eaux primaires », Mémoire en Chimie ; Spécialité : Chimie analyses, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa (2016).

[27] Youssef BZIZI, « Traitement des Eaux », article de la société ORAGIUM 'l'énergie sous toutes ses formes', Maroc (2018).

[28] Chatkaew TANSAKUL, « Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse », thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, Université INSA, Toulouse (2009).

[29] Axel ETTORI, « Vieillissement chimique de membranes d'osmose inverse », Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, Université de Paul Sabatier, TOULOUSE (2011).

[30] Camille SAGNE, « Etude des mécanismes de transfert de molécules organiques en osmose inverse. Application au recyclage des condensats issus de la concentration des vinasses de distilleries », Thèse de doctorat en Génie des Procédés, Université de Montpellier II, Montpellier (2008).

[31] Abdellah HAFDI, « Evaluation du pouvoir entartrant des eaux du secteur agricole du grand AGADIR et mise en évidence de l'effet inhibiteur de quelques engrais phosphatés », Thèse de doctorat en Chimie : spécialité physico-chimie des matériaux à caractères appliqués, Université de IBN ZOHR, AGADIR (2012).

[32] Zineb BELARBI, « Entartage par voie électrochimique et par dégazage contrôlé : utilisation d'inhibiteurs verts », Mémoire de magister en Génie des procédés de polymères, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2009).

[33] AIDOU Roumaïssa, « Etude de l'effet de certains inhibiteurs sur le pouvoir entartrant de l'eau potable de la ville de Ain Kébira », Thèse de doctorat en Electrochimie des Matériaux, Université de FERHAT ABBAS, SETIF (2017).

[34] Seghir DEKKOUCHE et Bouzid BECHAR, « Etude du phénomène d'entartrage et de son inhibition par un tartrifuge vert par la méthode de dégazage contrôlé du CO₂ », Mémoire de master en Génie chimique, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2014).

[35] Gaëlle COLLET, « Etude et modélisation du colmatage de membrane d'ultrafiltration par des

suspensions de matières organiques et de particules minérales », Thèse de doctorat en chimie et microbiologie de l'eau, Université Poitiers (2013).

[36] Imène ABDELBAKI « Evaluation et mise en œuvre d'un nouvel indice de colmatage modifié dans les installations d'osmose inverse », Mémoire de Magister en Génie de l'environnement, Université SAAD DAHLAB, BLIDA (2012).

[37] Waritha Jantaporn, « Technologies membranaires innovantes pour la réutilisation des eaux », Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, Université de Paul Sabatier, Toulouse (2016).

[38] Mathias MONNOT, « Conception d'une filière intensifiée par membrane pour le dessalement autonome d'eau de mer : Etude du prétraitement et de son effet sur le biocolmatage », Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, Université de Midi-Pyrénées, Toulouse (2015).

[39] Ana Cecilia de Andrade Pinho Medeiros, « Etude expérimentale de la formation des biofilms sous conditions hydrodynamiques contrôlées », Thèse de doctorat en Mécanique des fluides, Université Grenoble Alpes, GRENOBLE (2016).

[40] Karima KECILI, « Etude et caractérisation de membranes synthétiques organiques immergées de microfiltration (MF) et d'ultrafiltration (UF) employées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine : Intensification des opérations de déconditionnement et de nettoyage », Thèse de doctorat en Chimie Physique et Chimie Analytique, Université de Pierre et Marie Curie, Paris VI (2006).

[41] Enrico Riboni, « Purification de l'eau dans l'industrie », livre réalisé par la Fondation Suisse pour la Recherche en Microtechnique, (2003).

[42] Pierre-Jean REMIZE, « Etude des rétrolavages assistés par l'air et contrôle du colmatage résiduel. Application à la production d'eau potable en filtration frontale », Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, Université de INSA, Toulouse (2006).

[43] Yolane Bessiere, « Filtration frontale sur membrane : mise en évidence du volume filtré critique pour l'anticipation et le contrôle du colmatage », Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, Université de Paul Sabatier, Toulouse (2005).

[44] site CEVITAL, (www.cevital.com).

[45] Yacine AZAKRI et Youcef DRICI, « Automatisation des vibreurs électriques aux niveaux des trémies de conditionnement de sucre 1 Kg Cevital », Mémoire de master en Electronique Option : Automatique, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2017).

[46] Ahcène BOUNCEUR et Mohamed-Lamine MAMMASSE, « Gestion optimale des silos à céréales de l'entreprise CEVITAL », Mémoire d'ingénieur d'état en Recherche Opérationnelle,

Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2002).

[47] Isaad REBRAB, « REUSSITE : Issad Rebrab Le milliardaire algérien qui rachète des entreprises européennes », interview partagé sur la chaine youtube REUSSITE, (Le 24/09/2018).

[48] Julien WAGNER, « Cevital- Ou va le conglomérat algérien ? », article publié dans la magazine 'jeune Afrique' Le 12/03/2018.

[49] site Agro CEVITAL, « www.cevital-agroalimentaire.com ».

[50] « Cevital Algérie », Reportage sur l'entreprise CEVITAL partagé sur la chaine youtube Algérie Toujours Le 25/12/2009.

[51] Djamila Belhocine et Karima AZZI, « Etude et contrôle physico-chimique des mélanges d'eaux brutes du barrage de Tichy-Haf et du puits de forage d'Ibourassen (Oued Ghir) pour la production de l'eau ultra-pure», Mémoire de master en Génie des procédés de l'environnement, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2016).

[52] Naima OULD MATOUK, « Etude de la procédure d'importation et d'exportation dans une entreprise : Cas de l'exportation du sucre blanc au niveau de CEVITAL », Mémoire de master en Sciences Commerciales Option : Finance et Commerce International, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI, TIZI-OUZOU (2018).

[53] Roza SEBKHI et Souhila RAHMANI, « Régulation et Supervision d'une station de création de vide à base des automates Siemens, réalisé à Cevital – Bejaia », Mémoire en Automatique, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2016).

[54] Yasmina AIT BOUDA et Fairouz MHENNI, « traitement des eaux par osmose inverse au niveau du complexe agroalimentaire CEVITAL », Mémoire en Génie de l'environnement, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2015).

[55] Site Amazon (www.Amazon.fr).

[56] Site HANNA instruments Maroc (www.hannainstruments.fr).

[57] Tassadit Chalgou et Amel Naili, « Etude physico-chimique et microbiologique de la floculationcoagulation et de l'adoucissement de l'eau du puits de forage d'Ibourassen (CEVITAL) », Mémoire en Génie de l'environnement, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA (2017).

[58] Décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine, journal officiel de la république algérienne n° 18.

Résumé

Le complexe Agro-alimentaire Cevital utilise quotidiennement 12000 à 13000 m³ d'eau dont 9000 à 10000 m³ issues des forages et 2000 à 3000 m³ issues de l'ADE. Cependant, la durée de vie de la majorité de ses membranes d'osmose inverse est très courte par rapport aux normes fixées par les constructeurs.

Le phénomène de colmatage est considéré comme l'une des principales causes de problème dans les procédés de filtration. Le colmatage affecte les performances des membranes d'osmose inverse (OI) ainsi que leur durée de vie. Dans le présent travail, on essaie de distinguer l'influence de certains paramètres sur le colmatage des membranes d'osmose inverse du complexe de Cevital, et ce, tout en comparant les différents résultats de certains paramètres (le pH, la conductivité, le TH, le TAC, les Chlorures, la silice et le chlore). Les eaux étudiées proviennent de deux sources différentes : la première est issue de forages situés à Iboulassen (*OUED GHIR*) et la deuxième est celle fournie par l'ADE.

Mots clés : eau, membrane, osmose inverse, colmatage, tartre, Cevital.

Abstract

The Cevital food-processing complex uses 12000 to 13000 m³ of water daily, including 9000 to 10000 m³ from boreholes and 2000 to 3000 m³ from the ADE. However, the lifespan of the majority of its reverse osmosis membranes is very short compared to the standards set by the manufacturers.

Clogging is considered to be one of the main causes of problems in filtration processes. Clogging affects the performance of reverse osmosis (RO) membranes as well as their lifetime. In the present work, we try to distinguish the influence of certain parameters on the clogging of the Cevital's complex reverse osmosis membranes, while comparing the different results of certain parameters (pH, conductivity, TWH, m-ALK, Chlorides, Silica and Chlorine). The waters studied come from two different sources: the first is from boreholes located in Iboulassen (*OUED GHIR*) and the second is the one provided by the ADE.

Key words: water, membrane, reverse osmosis, clogging, scale, Cevital.