

UNIVERSITÉ ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR Sciences et Technologies

Département de Chimie



DEPARTEMENT DE CHIMIE

Mémoire de Master

Mention : Sciences des Matériaux

Spécialité : **Chimie du Solide et des Matériaux**

PURIFICATION D'EAUX DE Puits DE LA COMMUNE DE ZIGUINCHOR PAR MEMBRANES D'ULTRAFILTRATION ORISA

Présenté par : **M. Alioune Badara BADIANE**

Soutenu publiquement le 09 Août 2025 devant le jury composé de :

Président :

Pr. Magatte CAMARA	Professeur Titulaire	CAMES	UASZ
--------------------	----------------------	-------	------

Rapporteur :

Dr. Ibrahima GOUDIABY	Chercheur Associé		UASZ
-----------------------	-------------------	--	------

Examineurs :

Dr. Mame Seyni SYLLA	Maître Assistante	CAMES	UASZ
----------------------	-------------------	-------	------

Dr. Insa BADIANE	Maître -assistant	CAMES	UASZ
------------------	-------------------	-------	------

Directeur de mémoire :

Dr. Saidou Nourou DIOP	Maître de Conférences	CAMES	UASZ
------------------------	-----------------------	-------	------

Dédicaces

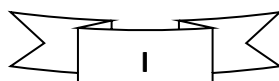
Toute réussite, tout succès et toute gloire reviennent au Tout-Puissant, le Protecteur, le Secours : Allah. C'est Lui qui nous guide, nous assiste et nous comble de ses bienfaits, ainsi qu'à son bien-aimé Prophète Muhammad (paix et salut sur lui).

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père, Omar (paix à son âme), qui a toujours nourri le souhait de me voir accéder à l'université et obtenir les diplômes les plus élevés. À ma mère, source inépuisable d'amour et de sagesse, qui fut avec lui mon tout premier professeur, ma première éducatrice, et dont le soutien n'a jamais failli.

À mon ami, mon grand frère, El Hadji Aly BADIANE que j'appelle affectueusement « papa » pour ses encouragements constants et son appui précieux dans toutes les étapes de ma vie.

À l'ensemble de ma famille, ainsi qu'à toutes celles et ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à ma formation et à mon cheminement personnel et académique.

À Mame Babacar NDAO et à sa famille, ainsi qu'à Aliou SAMBOU et sa famille, pour leur accueil chaleureux et leur générosité tout au long de mon parcours universitaire



Remerciements

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au Professeur Saidou Nourou DIOP, Chef du Département de Chimie, pour avoir accepté de m'encadrer et de m'initier à la recherche scientifique. Je lui suis profondément reconnaissant pour sa disponibilité, son sens de l'écoute, sa patience, ses conseils avisés, ainsi pour la confiance qu'il m'a accordée, qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

J'adresse également ma gratitude au Professeur Magatte CAMARA qui a accepté de présider ce jury. Je remercie Dr Ibrahima GOUDIABY qui a bien voulu être le rapporteur de ce mémoire. Dr Mame Seyni SYLLA et Dr Insa BADIANE sont remerciés pour avoir accepté d'évaluer ce modeste travail en tant qu'examineurs et pour la qualité de leurs observations qu'ils vont y apporter.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à Madame Madeleine Nguidé SARR, Ingénieure au Laboratoire d'Analyse et de Traitement de l'Eau (LATE) de l'Université Assane Seck de Ziguinchor, pour son aide précieuse dans la prise en main des instruments de mesure des paramètres de l'eau, ainsi que pour ses conseils techniques et son accompagnement bienveillant.

Je remercie également Monsieur Marcel Dominique DIOUF pour son assistance et son soutien précieux lors de mes premières manipulations au laboratoire.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Alioune Badara DIENG, Responsable du Service Pédagogique de l'UFR des Sciences et Technologies, pour ses conseils, son encadrement et son appui tout au long de mon parcours.

J'exprime ma gratitude à Dr Insa BADIANE, qui m'appelle affectueusement « fils » ou « frère ». Merci, Docteur, pour votre bienveillance, votre disponibilité et votre soutien moral. J'étends mes remerciements à tous les enseignants du Département de Chimie pour la qualité de l'enseignement reçu et pour m'avoir permis d'intégrer cette formation.

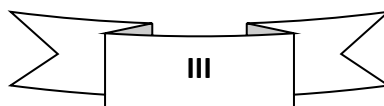
Je remercie très sincèrement mes camarades de promotion : Fatou Bintou Manga NDIAYE, Ismaila FALL, Mamadou Saliou DIALLO, Salimata SADIO, Aminata DIOUF, Lamane MBENGUE, Mamadou Baba DIEDHIOU, Pape Ndiambé DIOP, Nalla NGOM, Aïda DIAGNE, Guiniane NDONG, ainsi que l'ensemble de la promotion, pour leur esprit de collaboration et les moments de fraternité partagés.

Enfin, mes remerciements vont à mes frères et sœurs de la Dahiratoul Mouqtafina, section Université et Ville, ainsi qu'à ceux du COSKAS, pour leurs prières et leur soutien moral tout au long de mon cursus académique.

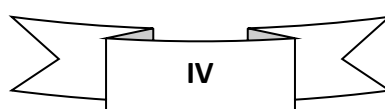


Table des matières

Dédicaces.....	I
Remerciements	II
Table des matières.....	III
Liste des tableaux	V
Liste des figures.....	VI
Abréviations.....	VII
Introduction générale.....	- 1 -
Chapitre I : Revue bibliographique sur les membranes et la qualité de l'eau	- 2 -
I.1. Généralités sur les procédés	- 2 -
I.1.1. Définitions.....	- 2 -
I.1.2. Structures et natures des membranes.....	- 2 -
I.1.2.1. Membrane dense	- 3 -
I.1.2.2. Membrane poreuse.....	- 3 -
I.1.2.3. Membrane homogène.....	- 3 -
I.1.3. Principe de fonctionnement des membranes.....	- 4 -
I.1.3.1. Mécanismes de transfert mis en jeu	- 4 -
I.1.3.2. Paramètres de performance	- 4 -
I.1.4. Colmatage et nettoyages	- 5 -
I.1.4.1. Colmatage	- 5 -
I.1.4.2. Nettoyage des membranes colmatées.....	- 8 -
I.1.5. Type de filtrations	- 10 -
I.2. Principaux procédés membranaires.....	- 12 -
I.2.1. Définition	- 12 -
I.2.2. Types de procédés membranaires	- 12 -
I.2.2.1. Microfiltration et Ultrafiltration.....	- 12 -
I.3. Généralités sur la qualité de l'eau	- 13 -
I.3.1. Eau et qualité	- 14 -
I.3.2. Analyses de la qualité de l'eau	- 14 -
I.3.3. Études de quelques paramètres physico-chimiques.....	- 15 -
Conclusion.....	- 17 -
Chapitre II : Matériel et méthodes	- 18 -
II.1. Matériel.....	- 18 -
II.1.1. Matériel de prélèvement	- 18 -
II.1.2. Appareils de mesures et matériel d'analyses.....	- 19 -

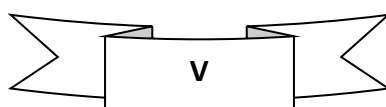


II.1.3.	Module ultrafiltration ORISA.....	- 23 -
II.1.3.1.	Description du module	- 23 -
II.1.3.2.	Lavage des membranes ou système de rinçage	- 24 -
II.1.2.1.	Test de sécurité du module ORISA	- 25 -
II.2.	Méthodes	- 26 -
II.2.1.	Caractérisation des échantillons	- 26 -
II.2.2.	Protocoles pour les analyses physico- chimiques	- 27 -
II.1.2.	Protocoles pour les analyses microbiologiques	- 29 -
Chapitre III : Résultats et discussions.....		- 31 -
III.1.	Résultats obtenus avec la méthode de la filtration manuelle.....	- 31 -
III.1.1.	Résultats sur la turbidité des échantillons.....	- 31 -
III.1.2.	Résultats sur la turbidité des échantillons après filtrations.....	- 32 -
III.2.	Résultats obtenus avec la méthode de filtration gravitaire	- 37 -
III.2.1.	Résultats pour le cycle 1	- 37 -
III.2.2.	Résultats pour le cycle 2	- 46 -
III.2.3.	Résultats pour le cycle 3	- 51 -
III.2.4.	Résultats pour le cycle 4	- 54 -
III.2.5.	Résultats des phases de filtration à V= 30 pour chaque cycle	- 57 -
III.2.6.	Résultats de la moyenne des perméabilités dans un cycle.....	- 58 -
III.2.7.	Moyennes des perméabilités en fonction du volume filtré.....	- 60 -
III.3.	Résultats et interprétations des analyses microbiologiques.....	- 61 -
III.4.	Étude comparative avec d'autres résultats	- 61 -
Conclusion.....		- 64 -
Références bibliographie		- 66 -
Webographie.....		- 68 -
ANNEXES.....		- 69 -
Annexe 1 : suite de la description de l'appareil ORISA		- 69 -
Annexes 2 : résultats des analyses physico-chimiques après filtration par la méthode manuelle...-		69 -
Annexes 3 : résultats des analyses physico-chimiques après la filtration de la méthode gravitaire-		70 -
Annexes 4 : évolution de la turbidité dans l'eau brute		- 71 -



Liste des tableaux

Tableau 1: Types et mécanismes de colmatage dans le domaine membranaire	- 7 -
Tableau 2: Solutions de nettoyage selon les types de dépôts.....	- 8 -
Tableau.3: Différents types de procédés membranaires	- 12 -
Tableau 4: Nature de l'eau en fonction des classes de turbidité usuelles	- 15 -
Tableau 5 : Nature du milieu en fonction de la valeur du pH	- 15 -
Tableau 6: Salinité de l'eau en fonction de la conductivité.....	- 16 -
Tableau 7: Teneurs maximales des oligo-éléments d'une eau potable.....	- 16 -
Tableau 8 : Turbidités des échantillons.....	- 31 -
Tableau.9: Résultats de la turbidité avant et après filtration du 09/12/2024.....	- 33 -
Tableau 10: Résultats de la turbidité avant et après filtration du 17/12/2024.....	- 33 -
Tableau 11: Résultats de la turbidité avant et après filtration du 04/02/2025.....	- 33 -
Tableau.12: Débit du perméat de la date du 09/12/2024	- 34 -
Tableau 13: Débit du perméat de la date du 17/12/2024	- 34 -
Tableau 14: Débit du perméat de la date du 04/02/2025	- 34 -
Tableau 15: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré	- 38 -
Tableau 16: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 38 -
Tableau 17: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration1	- 39 -
Tableau 18: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré	- 40 -
Tableau 19: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 40 -
Tableau 20: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 2	- 40 -
Tableau 21: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré	- 41 -
Tableau 22: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 42 -
Tableau 23: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 3	- 42 -
Tableau 24: Nombre de rétro lavage et la turbidité de chaque lavage	- 46 -
Tableau 25: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré	- 46 -
Tableau 26: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 47 -
Tableau 27: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 1 .2	- 47 -
Tableau 28: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré	- 48 -
Tableau 29: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 48 -
Tableau 30: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 2 de C2.....	- 48 -
Tableau 31: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré	- 49 -
Tableau 32: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 49 -
Tableau 33: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 3 de C2.....	- 50 -
Tableau 34: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 1 de C3.....	- 51 -
Tableau 35: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 52 -
Tableau 36: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 2 de C3.....	- 52 -
Tableau 37: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 53 -
Tableau 38: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 3 de C3.....	- 53 -
Tableau 39: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 54 -
Tableau 40: Nombre de rétro lavage et la turbidité de chaque lavage après le cycle 3	- 54 -
Tableau 41: Calculs des paramètres caractéristiques de membrane pour la filtration 1 de C4.....	- 54 -
Tableau 42: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 55 -
Tableau 43: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 2 de C4.....	- 55 -
Tableau 44: Évolution de la turbidité dans l'eau brute	- 57 -
Tableau 45: Résultats de l'analyse microbiologique de l'échantillon par le module ORISA	- 61 -
Tableau 46: Résultats d'analyses microbiologiques avant et après filtration par Pall Aria.....	- 62 -



Liste des figures

Figure 1: Schéma du principe de fonctionnement d'une membrane	- 2 -
Figure 2: Schéma illustratif du colmatage	- 6 -
Figure 3: Schéma du principe de la filtration frontale [IV]	- 10 -
Figure 4: Schéma du principe de la filtration tangentielle [V].....	- 11 -
Figure 5: Différents procédés baro-membranaires [VII]	- 13 -
Figure 6: Caractère de l'eau selon les valeurs du titre hydrotimétrique	- 16 -
Figure 7: Échantillons prélevés	- 18 -
Figure 8: Chalumeau à Gaz.....	- 19 -
Figure 9: Flacon de 100 ml stérilisé.....	- 19 -
Figure 10: Turbidimètre TN3025.....	- 20 -
Figure 11: Conductimètre COND 70 Vio	- 20 -
Figure 12: pH- mètre pH 7 Vio	- 21 -
Figure 13: Quelques exemples de boîtes de pétri [VIII]	- 21 -
Figure 14: Rampe de filtration dans un milieu de travail.....	- 22 -
Figure 15: Étuve contenant les échantillons.....	- 22 -
Figure 16: Module ORISA annoté (vue de face)	- 23 -
Figure 17: Préfiltre du module ORISA	- 24 -
Figure 18: Montage mode manuel	- 28 -
Figure 19: Montage du mode gravitaire.....	- 29 -
Figure 20: Évolution de la turbidité dans les sources	- 32 -
Figure 21: Variation des débits du perméat en fonction de la Turbidité des eaux des puits du 09/12/2024.....	- 35 -
Figure 22: Variation des débits du perméat en fonction de la Turbidité des eaux des puits du 17/12/2024.....	- 36 -
Figure 23: Variation des débits du perméat en fonction de la Turbidité des eaux des puits du 04/02/2025.....	- 36 -
Figure 24: Évolution de la turbidité dans l'eau brute et dans le perméat pour F1 de C1	- 43 -
Figure 25: Évolution de la turbidité dans l'eau brute et dans le perméat pour F 2 de C1	- 43 -
Figure 26: Évolution de la turbidité dans l'eau brute et dans le perméat pour F3 de C1	- 44 -
Figure 27: Évolution des perméabilités du premier cycle.....	- 45 -
Figure 28: Évolution des perméabilités du deuxième cycle.....	- 50 -
Figure 29: Évolution des perméabilités du troisième cycle	- 53 -
Figure 30: Diagramme des perméabilités du quatrième cycle	- 57 -
Figure 31: Évolution des perméabilités des membranes à V=30 pour chaque cycle.....	- 58 -
Figure 32: Évolution de la perméabilité moyenne par phase de filtration et par cycle.....	- 59 -
Figure 33: Évolution de la moyenne de la perméabilité par volume filtré et par cycle	- 60 -
Figure 34: Étude comparative de deux systèmes de traitement	- 62 -

Abréviations

BAR : bactéries aérobies revivifiables

BW : back-wash

C.T : coliformes totaux

CTH : coliformes totaux hydrophobes

Cond. : conductivité électrique

C : cycle

EB : eau brute

EF : eau filtrée

E. Coli : Escherichia Coli

ENT : entérocoque

LATE : Laboratoire d'Analyses et de Traitement de l'Eau

LCPM : Laboratoire de Chimie et de Physique des Matériaux

MES : matières en suspensions

MO : matières organiques

MF. Microfiltration

NF. nano filtration

Nbr BW : nombres de back wash

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

temp. : température

turb. : turbidité

TDS : total dissolved solids

UFC : unités formant colonie

UF. ultrafiltration

Introduction générale

L'eau, une ressource naturelle et source de vie sur Terre, couvre plus de 70 % de la surface du globe terrestre [1]. Cependant, elle est inégalement répartie et reste peu exploitée en raison de ses différents états (calottes polaires, eaux salées, etc.). Bien que l'eau soit très présente à la surface de la Terre, l'accès à l'eau potable reste difficile. En effet, 97 % de l'eau disponible est salée, et les 3 % d'eau douce restants sont souvent sous forme de glace (calottes polaires, glaciers), donc inaccessibles, ou bien contaminés par des éléments toxiques, des substances indésirables, ou encore altérés sur le plan physico-chimique, organoleptique ou microbiologique.

Une eau potable est une eau que l'on peut consommer sans risque pour la santé, c'est-à-dire une eau qui respecte les recommandations définies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ou les normes en vigueur dans chaque pays. Ainsi, un traitement physico-chimique et/ou bactériologique est nécessaire pour rendre une eau de mauvaise qualité potable [2].

Dans la région de Ziguinchor, les ressources en eau proviennent principalement des forages, du fleuve et des puits. Ces derniers, facilement contaminables, peuvent contenir divers polluants altérant leurs paramètres physico-chimiques ou microbiologiques. À Ziguinchor, de nombreux puits ne sont pas couverts, et certains se trouvent dans des environnements très pollués. Les eaux de ces puits peuvent ainsi présenter une forte turbidité présumant une mauvaise qualité physico-chimique et/ou microbiologique.

L'objectif principal de ce travail est d'améliorer la qualité de l'eau de ces puits (santhiaba 1 et 2, Rond-point Aline Sitoé DIATTA, santhiaba boulevard 54 et Tilène) d'un point de vue physico-chimique et microbiologique en étudiant l'élimination de la turbidité par ultrafiltration.

Ce mémoire est structuré en trois grands chapitres, compris entre une introduction et une conclusion assortie de perspectives. Le premier chapitre présente les généralités sur les principes de fonctionnement des procédés membranaires, les problèmes rencontrés, les défis à relever pour améliorer l'application des technologies membranaires, ainsi que sur la qualité de l'eau. Le deuxième chapitre est dédié aux matériels utilisés et à la méthodologie adoptée. Enfin, le dernier chapitre expose les résultats obtenus et leur discussion.

Chapitre I : Revue bibliographique sur les membranes et la qualité de l'eau

I.1. Généralités sur les procédés

I.1.1. Définitions

Une membrane est définie comme une barrière semi-perméable séparant deux compartiments, permettant le passage préférentiel d'au moins une espèce chimique par rapport aux autres, sous l'action d'un gradient de transfert, qu'il soit chimique (comme une différence de concentration) ou physique (comme une différence de pression) [I, II]. En général, les espèces dont la taille est inférieure à celle des pores de la membrane peuvent les traverser sous l'effet d'une pression appliquée, tandis que les substances de plus grande taille sont retenues (figure 1).

La technologie membranaire est utilisée pour réaliser des séparations de type fluide/fluide ou particules/fluide dans le but de concentrer, purifier ou récupérer des composés valorisables tels que l'eau, le lactose ou les sels minéraux.

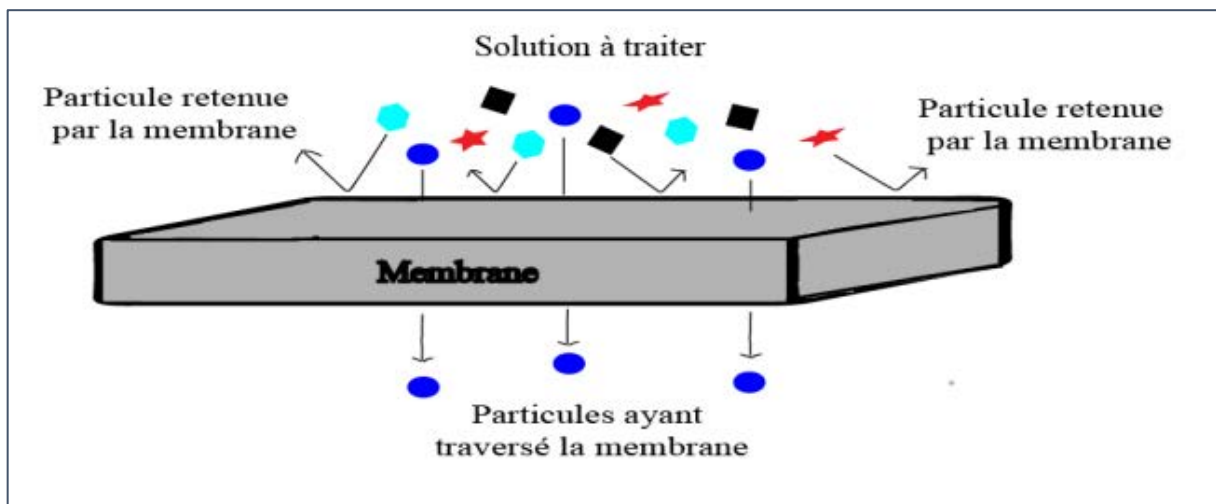


Figure 1: Schéma du principe de fonctionnement d'une membrane

I.1.2. Structures et natures des membranes

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 (où on retrouve le retentât) et l'aval (où on retrouve le perméat) de la membrane [III].

Les membranes sont des matériaux composés de matières minérales ou organiques ou hybrides, homogènes ou plus généralement composites. Les membranes présentent une large variété de textures physiques (denses ou poreuses) et d'origines (naturelle ou artificielle). Elles peuvent être inorganiques (céramiques), organiques (polymères de synthèse), mixtes, neutres ou

chargées (échangeuses d'ions), homogènes ou à structures asymétriques. Cependant, toute classification systématique est assez arbitraire car certaines membranes peuvent présenter à la fois plusieurs propriétés : microporeuses, asymétriques dans leur structure et électriquement chargées.

I.1.2.1.Membrane dense

Elle se caractérise, comme son nom l'indique, par l'absence de porosité. Le transfert des molécules à travers la membrane se fait selon le mécanisme de solubilisation-diffusion (sélectivité chimique) [3]. Elle est soit à base de polymère de haute densité se présentant sous forme de feuilles souples, soit à base de matériaux céramiques ou métalliques.

I.1.2.2.Membrane poreuse

Elle doit posséder une très grande résistance mécanique mais une épaisseur faible qui permet un débit de perméation élevé. Ces deux exigences contradictoires sont résolues par la mise au point de membranes à structure asymétrique [3]. La séparation s'y effectue selon un mécanisme analogue à la filtration, c'est-à-dire qu'une particule traverse ou est retenue par la membrane selon que sa taille est inférieure ou supérieure au diamètre des pores. A cette catégorie appartiennent les membranes composites qui sont réalisées à partir de la superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Qu'elles soient asymétriques ou composites, les membranes sont formées d'un support poreux qui assure les fonctions mécaniques, et d'une peau active de faible épaisseur qui assure les fonctions séparatrices (sélectivité).

I.1.2.3.Membrane homogène

Elle est formée de solides microporeux ou denses constitués d'un seul matériau. Ce sont des couches séparatrices épaisses à porosité constante (isotrope) ou à porosité décroissante ou à structure asymétrique. La zone superficielle a la plus faible porosité. Ces membranes sont de type polymère (acétate de cellulose) ou inorganique. Les membranes échangeuses d'ions appartiennent à ce groupe et leurs propriétés résident dans la présence de charges électriques fixées en certains points de leurs structures. Les ions de signes opposés à celui de ces groupes se déplacent librement dans la membrane tandis que ceux de même signe sont repoussés par celle-ci.

Aujourd'hui, la classification la plus compréhensible semble être la classification par nature : membranes polymères organiques et membranes inorganiques.

Les membranes sont incorporées dans un dispositif appelé module. De nos jours les types de modules qui sont disponibles pour les applications membranaires sont : les modules à fibres creuses, les modules à membrane plane, les modules à membrane spiralée et les modules à membrane tubulaire.

I.1.3. Principe de fonctionnement des membranes

I.1.3.1. Mécanismes de transfert mis en jeu

Les mécanismes fondamentaux mis en jeu dans les techniques membranaires peuvent être classés en trois familles : tamisage, perméation et dialyse [3].

❖ Tamisage

Le mécanisme de transfert par convection fait intervenir les tailles respectives des particules du soluté et des pores de la membrane (effet tamis), mais pas la taille des molécules du solvant : c'est un mécanisme purement physique.

❖ Perméation

Elle se fait selon le mécanisme de solubilisation-diffusion où le solvant est concerné par le transfert. Dans ce cas, il y a une interaction entre les molécules du solvant et de la membrane : c'est un mécanisme purement chimique.

❖ Dialyse

Elle concerne le transfert d'ions où les membranes utilisées permettent le passage sélectif ou non des ions, l'eau ne traversant pas la membrane. Les membranes peuvent être neutres ou chargées ; et si elles sont chargées, elles deviennent sélectives au transfert des ions de signes opposés et l'on peut ainsi former des membranes anioniques et/ou cationiques.

I.1.3.2. Paramètres de performance

Plusieurs paramètres de fonctionnement sont communs à beaucoup de techniques membranaires, en particulier l'osmose inverse (OI), la nano filtration (NF), l'ultrafiltration (UF) et la microfiltration (MF).

❖ Flux à travers la membrane

À partir de la loi de Darcy relative à l'écoulement de l'eau pure en milieu poreux, on montre que quel que soit la vitesse de circulation de l'eau pure en amont d'une membrane, le flux de perméation à travers la membrane est toujours proportionnel à la différence de pression.

La loi de Darcy s'exprime par la relation suivante :

$$J_v = L_p \times \Delta P \quad (1)$$

L_p : Perméabilité de la membrane

ΔP : Différence de pression transmembranaire

❖ Taux de rejet (TR)

La sélectivité d'une membrane est en général définie par le taux de rejet ou taux de rétention des espèces retenues par la membrane. Le taux de rejet est donné par la relation suivante :

$$TR = \left(1 - \frac{C_P}{C_0}\right) \times 100 \quad (2)$$

C_0 : Concentration de l'espèce dans l'eau brute.

C_P : Concentration de l'espèce dans le perméat.

❖ Taux de conversion (Y)

Le taux de conversion définit la fraction du débit de liquide qui traverse la membrane. Il définit la productivité du procédé et est donné par la relation suivante :

$$Y(\%) = \left(\frac{Q_P}{Q_0}\right) \times 100 \quad (3)$$

Q_0 : débit d'eau brute.

Q_P : débit de perméat.

I.1.4. Colmatage et nettoyages

I.1.4.1. Colmatage

Le terme colmatage est utilisé pour décrire l'ensemble des phénomènes qui produisent une diminution de flux de perméat en fonction du temps. Le colmatage est défini comme étant l'accumulation de matières à la surface de la membrane (en particulier à l'entrée des pores) ou à l'intérieur des pores de la membrane (figure 2). Il est considéré comme irréversible lorsque les lavages chimiques ne permettent pas de restaurer la perméabilité de la membrane à son niveau initial. Il nécessite donc périodiquement un arrêt des opérations pour faire le nettoyage. Celui-ci est coûteux et a un impact sur la durée de vie des membranes [2, 3].

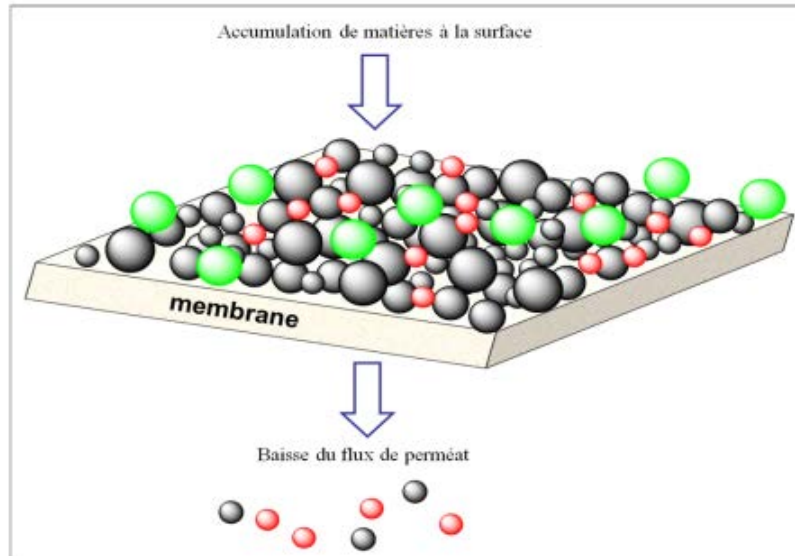


Figure 2: Schéma illustratif du colmatage

❖ Types de colmatages

Un certain nombre de facteurs contribue au colmatage des membranes et ces facteurs sont fortement liés les uns aux autres. Les principaux types de colmatage que l'on peut rencontrer sont : le colmatage organique, inorganique, la formation de dépôts de particules colloïdales ou de films biologiques.

✓ Colmatage organique

Le colmatage organique est dû à l'accumulation de matières organiques dissoutes (MOD) ou naturelles (MON) qui sont contenues à la surface des membranes. Le colmatage par les MON est partiellement réversible pour les membranes de MF et d'UF quand on applique un rétro-lavage avec de l'eau pure [4].

✓ Colmatage inorganique

Il est dû à la formation d'une légère couche de sels inorganiques solubles quand la concentration ionique du sel dans la solution dépasse la limite de solubilité. Les éléments courants qui précipitent sur les membranes sont : CaCO_3 , BaSO_4 , SiO_2 ...etc. [5]. La formation de dépôts s'effectue par des mécanismes de cristallisations homogènes et hétérogènes [6].

✓ Colmatage des colloïdes

Le colmatage des colloïdes peut se produire soit par l'accumulation des particules à la surface de la membrane et formation de gâteau », soit par pénétration et blocage des pores de la membrane [5, 7, 8].

✓ Colmatage de film biologique

La formation de film biologique ou « biofouling » est un processus dynamique qui conduit au développement et à la formation d'un film qui s'attache à la surface de la membrane. La formation de film biologique peut réduire considérablement le flux d'eau et empêcher totalement son passage à travers la membrane quand la surface et l'épaisseur concernées sont grandes [5, 6]. La conséquence du colmatage est une augmentation de la pression d'alimentation ou une baisse drastique de la perméabilité.

❖ Différents mécanismes

Les différents mécanismes qui conduisent au colmatage et à la baisse de flux des membranes sont la polarisation de concentration, l'adsorption, la formation d'une couche de gel, la formation d'un gâteau et le blocage des pores (Tableau 1) [3, 9].

✓ Adsorption

Les macromolécules peuvent s'adsorber au contact de la membrane en raison de la formation des liaisons chimiques. Lorsque la membrane fonctionne sous pression, l'effet de la polarisation est d'augmenter la concentration à la surface de la membrane, ce qui favorise l'adsorption et donc le colmatage.

✓ Formation d'une couche de gel

La couche de polarisation secondaire n'évolue pas dans le temps ; elle ne peut donc être assimilée à un colmatage. Cependant la formation d'un gel à la surface d'une membrane modifie les propriétés de transfert de manière permanente. Le colmatage se traduit par une réduction de la porosité de la membrane. Pour y remédier, on alterne des cycles de nettoyage acides – bases.

✓ Obstruction mécanique des pores

Celle-ci se produit quand la dimension des molécules de soluté à traiter est voisine de celle des pores de la membrane. En effet, les particules entrent à l'intérieur des pores de la membrane et y sont bloquées entraînant ainsi des baisses de flux.

Tableau 1: Types et mécanismes de colmatage dans le domaine membranaire

Types de colmatage	Mécanismes généralement rencontrés
Organique	Adsorption
Inorganique	Blocage des pores
Formation de particules colloïdales	Formation de gel
Formation de biofilms	Formation de « gâteau »

I.1.4.2. Nettoyage des membranes colmatées

❖ Types de nettoyage

Trois types de nettoyage sont pratiqués de façon générale. Le nettoyage physique qui utilise des forces mécaniques pour éliminer le colmatage (lavage à co-courant ou contre-courant et le bullage à l'air avec une forte agitation des membranes et parfois de façon manuelle); le nettoyage chimique et le nettoyage enzymatique.

❖ Solutions de nettoyage

Le choix de la solution de nettoyage dépend de la nature des éléments colmatant et des matériaux composants la membrane. Par exemple :

- ✓ Les produits alcalins (soude et potasse) saponifient les graisses et solubilisent les protéines ;
- ✓ Les produits acides participent à la dissolution de précipités de sels minéraux, leur efficacité est limitée sur les dépôts de nature organique. Les plus utilisés sont l'acide nitrique, citrique et phosphorique [3].
- ✓ Les produits tensioactifs augmentent la mouillabilité de la surface filtrante et favorisent le contact entre l'agent de nettoyage et le dépôt. Les tensioactifs anioniques et non ioniques sont en général les plus efficaces.
- ✓ Les solutions d'enzymes sont surtout utilisées pour les membranes en acétate de cellulose. Elles s'avèrent efficaces, mais elles sont chères et leur action est assez lente [10]. La formulation de ce type de produit exige l'utilisation de différentes enzymes (protéases, lipases, amylases et cellulases).

L'objectif du nettoyage est de dissoudre les dépôts sans détériorer les membranes, ce qui fait que chaque fournisseur de membranes préconise pour chaque cas une solution de nettoyage en fonction de la nature de sa membrane et de la nature du dépôt [5, 11]. Quelques solutions de nettoyage généralement utilisés selon les types de dépôt sont données dans le tableau.2.

Tableau 2: Solutions de nettoyage selon les types de dépôts

Solutions de nettoyage	Types de dépôts
Solutions acides (acide citrique, chlorhydrique)	Dépôts carbonatés, hydroxydes
Solutions basiques (soude caustique)	Dépôts organiques
Solutions de détergents (avec ou sans enzymes)	Dépôts organiques, protéines
Solutions oxydantes (chlore)	Dépôts biologiques

Les nettoyages fréquents des systèmes membranaires peuvent être limités si un prétraitement adéquat est opéré avant le passage de l'eau à traiter à travers les membranes. Les méthodes de prétraitement font souvent appel à d'autres procédés de séparation membranaire comme la microfiltration et l'ultrafiltration [11].

Même si plusieurs agents de lavage peuvent restaurer le flux à près de 100 %, ils peuvent aussi détériorer la sélectivité de la membrane, réduisant ainsi la qualité de l'eau produite [11, 12]. Les facteurs qui affectent les processus de lavage chimique sont la température, le pH, la concentration des agents chimiques de nettoyage, le temps de contact entre la solution chimique et la membrane et les conditions opératoires telles que la vitesse de circulation et la pression. Ces paramètres jouent un rôle très important dans restauration du flux initial des membranes [13].

❖ Évaluation de l'efficacité d'un nettoyage

Il existe plusieurs moyens pour déterminer l'efficacité d'un processus de nettoyage donné. La mesure du flux est un moyen direct d'évaluation de l'efficacité d'un nettoyage [6, 14]. Ainsi pour évaluer l'efficacité d'un processus de nettoyage, il est important de comparer le flux mesuré après le nettoyage et celui mesuré sur la membrane au début de la filtration [3, 5, 14].

Le taux de récupération du flux (TRF) est défini par la relation suivante :

$$\text{TRF}(\%) = \left(\frac{J_c}{J_0} \right) \times 100 \quad (6)$$

J_0 : flux initial

J_c : flux après nettoyage

Le colmatage est considéré comme étant constitué d'une partie réversible et d'une autre irréversible, ces deux types de colmatage opposent une certaine résistance au passage du fluide à traiter, en plus de la résistance intrinsèque de la membrane (R_m). Après le nettoyage, une partie du colmatage irréversible qui ne peut être enlevée donne une résistance résiduelle ($R_{rés}$). La résistance obtenue après le nettoyage (R_{AN}) est la somme de la résistance intrinsèque et de celle résiduelle.

Le nettoyage peut être estimé complet ou efficace si la résistance après nettoyage est voisine de celle intrinsèque de la membrane, comme le montre l'équation (7).

$$R_{AN} = (R_m + R_{rés}) \approx R_m \quad (7)$$

R_m : résistance intrinsèque de la membrane

$R_{rés}$: résistance résiduelle de la membrane

La détermination du taux de rejet de la membrane peut aussi être utilisée pour évaluer l'efficacité d'un processus de nettoyage ainsi que d'autres techniques telles la MEB, l'AFM, le potentiel zêta, etc. [15].

I.1.5. Type de filtrations

Dans les procédés de séparation membranaire, il existe deux modes de filtration : une filtration frontale et une filtration tangentielle.

✓ Filtration frontale

La filtration frontale consiste à faire passer un fluide perpendiculairement à la surface de la membrane. Ce système de filtration comporte une entrée pour le fluide à traiter et une sortie pour le produit filtré.

Ce type de mise en œuvre, qui est discontinu, est très souvent utilisé pour des essais à l'échelle de laboratoire dans des cellules de filtration ayant un volume de moins de quelques litres. Une recirculation de l'eau à filtrer n'est donc pas nécessaire, ce qui fait qu'une source de pression statique telle qu'une bonbonne de gaz inerte peut assurer la force motrice nécessaire à la filtration. La filtration frontale est utilisée dans une moindre mesure à l'échelle industrielle avec les systèmes à fibres creuses.

Dans ce mode de filtration, l'accumulation de matières à la surface de la membrane gêne la filtration (figure 3). En effet, toutes les espèces dissoutes ou en suspension sont entraînées vers la surface de la membrane et les espèces retenues s'y accumulent très rapidement pour former un gâteau favorisant ainsi le colmatage et par conséquent une baisse importante de flux.

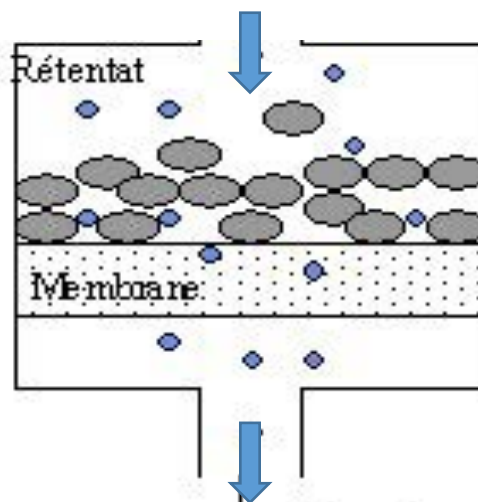


Figure 3: Schéma du principe de la filtration frontale [IV]

✓ Filtration tangentielle

En filtration tangentielle, le fluide à traiter entre dans le module pour venir au contact de la membrane suivant un flux tangential. Dans ce mode de mise en œuvre, il y a donc nécessairement une entrée correspondant à l'alimentation et deux sorties que sont le perméat qui correspond au passage d'une partie du flux initial à travers la membrane et le concentrât ou rétentât qui représente le flux qui n'est pas passée à travers la membrane comme l'illustre la figure 4.

Ce système de filtration est utilisé aussi bien à l'échelle industrielle qu'à l'échelle de laboratoire.

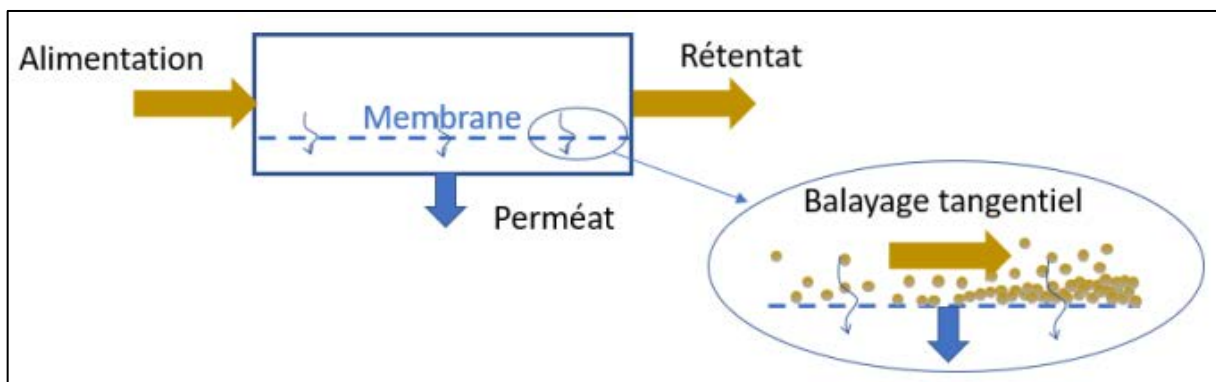


Figure 4: Schéma du principe de la filtration tangentielle [V]

Le principal avantage de l'écoulement tangential, par rapport à l'écoulement frontal, est le fait que le mouvement tangential de l'alimentation balaie la surface de la membrane limitant ainsi l'accumulation des particules et réduit par conséquent le processus de colmatage. Ce balayage accélère la remise en suspension des particules déposées ou accumulées à proximité de la membrane. Cela accélère aussi le transport des solutés qui tendent à s'accumuler à la surface de la membrane vers le cœur de l'écoulement. Plus la vitesse d'écoulement tangential est élevée, plus les effets de rétro-transport vers le cœur de l'écoulement sont accentués, et par conséquent, plus le colmatage peut être réduit d'une façon significative. C'est pour cette raison que l'écoulement tangential est très répandu dans les applications industrielles.

Dans cette mise en œuvre tangentielle, le procédé peut être continu car le rétentât peut être recyclé dans le même module ou envoyé dans un autre module placé en série.

I.2. Principaux procédés membranaires

I.2.1. Définition

Un procédé membranaire permet de séparer les constituants d'un mélange liquide à l'aide d'un matériau synthétique appelé membrane [i]. Cette membrane perm-sélective, selon ses caractéristiques intrinsèques et son mode d'utilisation, constitue une barrière permettant certains transferts de matière en limitant d'autres. Les forces motrices permettant la perméation à travers la membrane peuvent être la diffusion d'une des deux phases (transport actif) mais également des différentiels de pressions, de concentrations, ou de potentiels électriques (transport passif).

I.2.2. Types de procédés membranaires

Selon la nature des membranes utilisées et les forces motrices appliquées, il existe plusieurs procédés membranaires.

Tableau.3: Différents types de procédés membranaires

MEMBRANE FORCE	Microporeuse	Dense	Ionique
Gradient de concentration	Dialyse moléculaire	Osmose	Dialyse ionique
Différence de potentiel	Electro-Ultrafiltration	Électro-osmose	Electrodialyse
Différence de pression	Micro, ultra, ou nanofiltration	Osmose inverse, ou nanofiltration	Piézodialyse

Les procédés membranaires les plus couramment utilisés, notamment dans la production d'eau potable sont : la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse (figure 5).

I.2.2.1. Microfiltration et Ultrafiltration

✓ Principe

La microfiltration (MF) et l'ultrafiltration (UF) sont deux techniques voisines l'une de l'autre dont la force motrice de mise en œuvre est une différence de pression appliquée de part et d'autre de la membrane. La filtration s'opère le plus souvent en mode tangentiel afin de limiter l'accumulation des espèces retenues à la surface de la membrane et par conséquent la baisse du flux d'eau filtrée, contrairement à la filtration frontale. La MF se distingue de l'UF du fait qu'elle retient des constituants de tailles plus importantes à une pression de travail en général plus faible et des flux souvent plus importants [15].

✓ Mécanismes de transfert

En UF tout comme en MF, la sélectivité entre les solutés est d'origine essentiellement physique (convection) car liée au coefficient de transfert et fonction de la taille des solutés par rapport à celle des pores de la membrane [16]. Compte tenu de leur taille, les macromolécules n'exercent qu'une pression osmotique modérée et par conséquent, les pressions nécessaires pour le fonctionnement des membranes de MF et d'UF sont relativement basses [17].

I.2.2.2. Classement des procédés membranaires

De la structure de la membrane et de la pression appliquée les procédés baro-membranaires sont classés sur la figure .5.

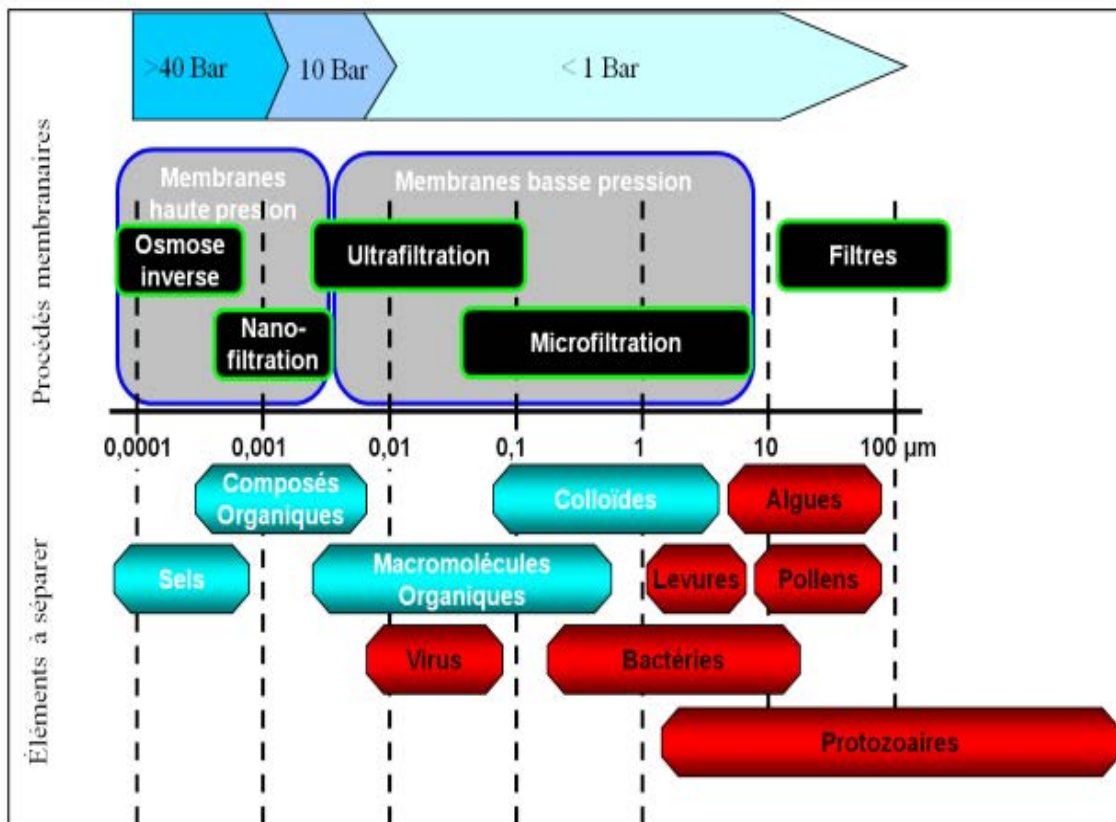


Figure 5: Différents procédés baro-membranaires [VII]

I.3. Généralités sur la qualité de l'eau

L'eau très répandue à la surface de la terre, elle est peu utilisée et est inégalement répartie. L'eau est utilisée dans les secteurs d'activités comme l'industrie, l'agriculture, mais aussi comme la boisson. L'eau utilisée pour boire doit respecter certaines normes (eau potable) [18]. Une eau potable est une eau qu'on peut boire sans risque sanitaire, une eau exemptée de tous les germes pathogènes (bactérie et Virus) et d'organismes parasites.

L'eau source de vie peut être aussi source de nombreuses maladies appelée maladie hydrique comme la diarrhée et le choléra.

I.3.1. Eau et qualité

La qualité de l'eau est définie selon les usages.

- ❖ Une eau destinée à la boisson est définie selon les recommandations de l'OMS ou les normes en vigueur dans chaque pays.
- ❖ Pour définir avec précision une eau potable des normes ont été établies pour fixer les teneurs limites à ne pas dépasser [19].

Les causes d'une mauvaise qualité de l'eau peuvent être engendrées par les activités de l'homme ou les phénomènes naturels. Ces polluants qui peuvent contaminer l'eau et impacter leurs usages sont nombreux.

On a les polluants :

- ✓ Chimiques (minéraux ou organiques): les éléments solubles, les MO, les hydrocarbures...
- ✓ Biologiques : bactéries, virus, champignons...
- ✓ Physiques : les MES, la radioactivité,...

L'OMS a pris en compte 63 paramètres pour apprécier la bonne qualité de l'eau destinée à la boisson et ces paramètres sont classés en 5 groupes :

- ✓ Paramètres organoleptiques : couleur, goût, odeur...
- ✓ Physico-chimique : turbidité, température, conductivité,...
- ✓ les substances indésirables :
- ✓ les substances toxiques :
- ✓ Paramètres microbiologique :

Une eau peut être limpide sans goût, sans odeur mais impropre à la consommation et pouvant causer des maladies graves. Pour s'assurer qu'une eau est de bonne qualité, des analyses sont indispensables.

I.3.2. Analyses de la qualité de l'eau

Il existe deux types d'analyses : les analyses physico-chimiques et les analyses bactériologiques.

✓ Analyses bactériologiques

Elles consistent à chercher les germes pathogènes présents dans l'eau. Les résultats d'une telle analyse permettent de contrôler l'efficacité de la protection de la source ou d'apprécier la qualité d'un traitement effectué.

✓ Analyses physico-chimiques

On effectue les analyses physico-chimiques pour caractériser une source d'eau inconnue ou pour suivre l'évolution d'une source déjà connue.

I.3.3. Études de quelques paramètres physico-chimiques

✓ Turbidité

Elle est mesurée par un turbidimètre, l'unité expérimentale est le NTU. La turbidité prend en compte toutes les matières colloïdales, insolubles, d'origine minérale ou organique. Elle permet de préciser les informations visuelles de l'eau. Selon la valeur de la turbidité on peut classer l'eau de la source. Le tableau 4 donne la nature de l'eau en fonction de la turbidité.

Tableau 4: Nature de l'eau en fonction des classes de turbidité usuelles

Turbidité	Nature de l'eau
NTU < 5	Eau claire
5 < NTU < 30	Eau légèrement colorée
NTU > 30	Eau trouble
NTU >200	Eau de surface très chargée

✓ Potentiel hydrogène (pH)

Le pH mesure la concentration des ions H^+ de l'eau et traduit la balance entre l'acide et la base sur une échelle logarithmique de 0 à 14. Le pH est lié à la nature des terrains traversés. Le tableau 5 montre la caractérisation de l'eau en fonction de la valeur du pH.

Tableau 5 : Nature du milieu en fonction de la valeur du pH

Valeur du pH	Nature du milieu
pH < 7	Milieu acide
pH = 7	Milieu neutre
pH > 7	Milieu alcalin ou basique

✓ Conductivité

La mesure de la conductivité permet d'apprécier approximativement la minéralisation de l'eau. Elle mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique entre deux électrodes d'une sonde car la plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous formes d'ions chargés. Elle est fonction de la température de l'eau. La conductivité a pour unité le Siemens par centimètre et est mesurée par un conductimètre. Le tableau 6 donne la salinité de l'eau en fonction de la conductivité. La mesure de la conductivité donne une interprétation de la

minéralisation de l'eau. La minéralisation est dominée par les 8 ions appelés « ions majeurs » indispensables au bon fonctionnement de l'organisme dont 4 cations et 4 anions.

Tableau 6: Salinité de l'eau en fonction de la conductivité

Valeur de la conductivité	Nature des eaux
$\sigma < 250 \mu\text{S/cm}$	Saline
$250 < \sigma < 750 \mu\text{S/cm}$	à salinité moyenne
$750 < \sigma < 2250 \mu\text{S/cm}$	à forte salinité
$2250 < \sigma < 5000 \mu\text{S/cm}$	Très forte salinité
$5000 < \sigma < 20000 \mu\text{S/cm}$	Salinité excessive

Le tableau 7 donne la teneur des ions majeurs et les valeurs guides recommandées par l'OMS

Tableau 7: Teneurs maximales des oligo-éléments d'une eau potable

Anions	Valeurs guides de OMS (mg/L)	Cations	Valeurs guides de OMS (mg/L)
SO_4^{2-}	500	Na^+	200
Cl^-	250	Ca^{2+}	100
NO_3^-	50	Mg^{2+}	50
F^-	1,5	K^+	12

✓ Titres de l'eau (TH)

Les titres de l'eau permettent dans la plupart des cas de connaître suffisamment les caractéristiques de l'eau afin de connaître la nécessité d'effectuer un traitement ainsi que les conditions de leur transport dans des réseaux de distribution. Parmi les titres de l'eau on peut citer le titre hydrotimétrique (TH). Couramment appelée la dureté de l'eau, le TH représente les concentrations de calcium et de magnésium contenues dans l'eau. La formule du TH est donnée par l'équation (18):

$$TH = TH_{Ca} + TH_{Mg} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] \quad (18)$$

Selon la valeur du TH, on peut classer l'eau en une eau douce ($TH < 30$) une eau dure ($TH > 30$)

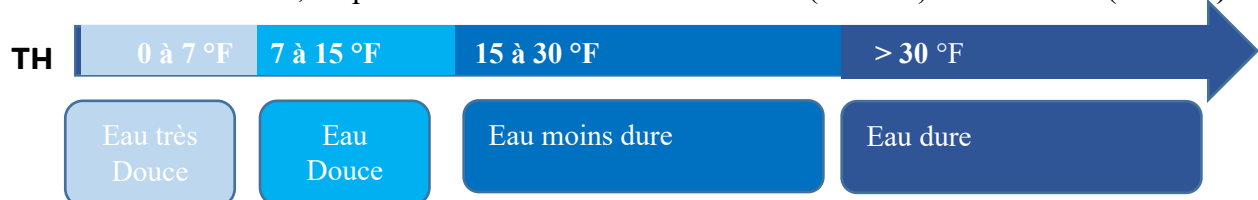


Figure 6: Caractère de l'eau selon les valeurs du titre hydrotimétrique

Conclusion

L'eau est utilisée pour satisfaire les besoins quotidiens de l'homme. Elle sert à la boisson, la cuisson des aliments,.... Du fait de la croissance démographique, de l'accroissement des besoins pour l'agriculture et l'industrie, du changement des habitudes de consommation, de l'expansion des réseaux d'approvisionnement en eau, des changements climatiques, la demande en eau, dans son ensemble, augmente. Cependant dans certaines zones de l'Afrique l'eau manque en quantité et/ou qualité suffisantes.

Dans le souci d'améliorer la qualité de l'eau respectant les recommandations de l'OMS les gouvernements des Pays de l'Afrique de l'Ouest investissent dans le domaine du traitement de l'eau. C'est dans ce contexte que les procédés membranaires considérés comme meilleurs dans le traitement des eaux, gagnent de plus en plus d'espaces dans la politique des pays d'Afrique.

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1. Matériel

L'ensemble des travaux présentés dans ce document a été mené au sein du laboratoire de Chimie et de Physique des Matériaux (LCPM) et du laboratoire d'Analyse et de Traitement de l'Eau (LATE) de l'Université Assane Seck de Ziguinchor.

II.1.1. Matériel de prélèvement

❖ Préparation des échantillons pour les analyses physico-chimiques

Des échantillons d'eau ont été prélevés à travers plusieurs puits (5 puits au total) dans des flacons soigneusement rincés à l'eau de la source, afin de préserver l'intégrité des échantillons et d'éviter toute contamination externe.

Lorsque le puits est situé à l'intérieur d'une maison, la méthode de prélèvement utilisée est celle habituellement pratiquée par le propriétaire. En revanche, pour les puits situés à l'extérieur des habitations, l'eau est prélevée à l'aide de seaux propres, adaptés à ce type d'échantillonnage. La figure 7 illustre les échantillons prélevés à travers les différents puits.



Figure 7: Échantillons prélevés

❖ Préparation des échantillons pour les analyses bactériologiques

L'analyse microbiologique est un processus relativement complexe, allant du prélèvement des échantillons à l'identification des germes. Elle nécessite l'utilisation d'un ensemble d'équipements spécifiques permettant de manipuler les échantillons dans des conditions stériles, ainsi que de cultiver les micro-organismes dans des milieux spécifiques en vue de leur identification.

Le prélèvement d'un échantillon destiné à une analyse microbiologique doit impérativement être réalisé dans des conditions aseptiques. Cela implique l'utilisation d'une source de flamme (comme un bec Bunsen ou un chalumeau à gaz) pour stériliser l'environnement immédiat de

prélèvement (figure 8), ainsi que l'utilisation de flacons stériles pour la collecte de l'eau à analyser (figure 9).

Après le prélèvement, l'échantillon d'eau doit être conservé au froid dans une glacière à une température de 4 °C, du lieu de prélèvement jusqu'au laboratoire, afin de limiter toute altération microbiologique avant l'analyse et la fiabilité des résultats. Après le prélèvement, les échantillons sont immédiatement transportés au laboratoire afin d'y effectuer les analyses de caractérisation nécessaires avant toute étape de traitement.



Figure 8: Chalumeau à Gaz



Figure 9: Flacon de 100 ml stérilisé

II.1.2. Appareils de mesures et matériel d'analyses

Il faut noter que pour chaque paramètre une analyse est effectuée sur l'échantillon d'eau brute et sur l'eau filtrée. La turbidité qui est un paramètre fondamental que nous avons suivi dans le cadre de notre étude a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre dénommé TN3025. Deux autres appareils ont été utilisés pour compléter l'analyse des propriétés physico-chimiques de l'eau : un conductimètre CON 70 Vio pour mesurer la conductivité électrique et un pH-mètre pH 7 Vio pour déterminer l'acidité ou l'alcalinité des échantillons.

❖ Turbidimètre TN3025

L'appareil utilisé pour mesurer la turbidité des échantillons est simple d'utilisation. Sa précision est de ± 1 sur l'échelle complète, avec une gamme de mesure allant de 0 à 1000 NTU.



Figure 10: Turbidimètre TN3025

Pour effectuer une mesure, il suffit de remplir un flacon de 10 ml avec l'échantillon à analyser, puis d'appuyer sur la touche Read. Après un délai de 10 secondes, la valeur de la turbidité s'affiche sur l'écran de l'appareil. La figure 10 montre une expérience avec l'appareil.

❖ **Conductimètre COND 70 Vio :**

Il s'agit d'un appareil multi-paramètres portatif (Figure 11), conçu pour mesurer plusieurs paramètres physico-chimiques de l'eau, notamment la conductivité, la salinité, les TDS et la température. La précision de la mesure de la conductivité est de $\pm 2\%$ de la pleine échelle, avec une large plage de mesure allant de 0 à plus de 12 880 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Figure 11: Conductimètre COND 70 Vio

❖ **pH- mètre pH 7 Vio**

Il s'agit également d'un appareil multi-paramètres (Figure 12), bien qu'il ait été utilisé exclusivement pour la mesure du pH dans le cadre de cette étude. Il dispose d'une plage de mesure allant de 0 à 14 pH et offre une précision de $\pm 0,01$ pH. Tout comme le conductimètre, cet appareil est portatif, compact et facile à utiliser. C'est ce qui les rend particulièrement adaptés

aux travaux de terrain et aux mesures rapides. Pour la mesure des différents paramètres, aussi bien avant qu'après la filtration, l'électrode de l'appareil est plongée dans un bécher de 250 ml contenant l'échantillon. Il est nécessaire de patienter jusqu'à la stabilisation de la lecture, avant de relever la valeur du paramètre affichée à l'écran de l'appareil.



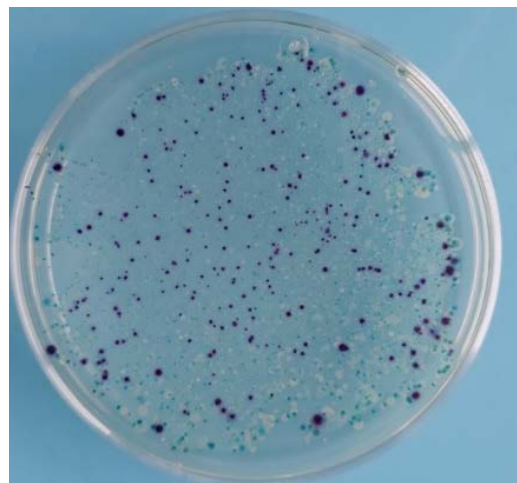
Figure 12: pH- mètre pH 7 Vio

Boîtes de pétri

Des boîtes de Pétri ont été utilisées pour l'analyse des bactéries aérobies revivifiables (BAR) et des entérocoques, tandis que des tubes à essai ont été employés pour la détection des coliformes totaux (C.T) et Escherichia coli (E. Coli) comme illustré sur la figure 13.



a) Boîte de pétri stérile et vide



b) Boîte de pétri contenant un germe testé

Figure 13: Quelques exemples de boîtes de pétri [VIII]

❖ Rampe de filtration à 3 postes

La rampe de filtration à 3 postes est un dispositif utilisé pour la filtration de l'eau brute et de l'eau filtrée dans le cadre des analyses microbiologiques, notamment pour la recherche des entérocoques. La filtration est effectuée à travers des membranes en cellulose mixte ou en PES d'un diamètre de 0,45 μm , conformément aux exigences des méthodes normalisées. La rampe est alimentée par une pompe à vide permettant d'assurer une aspiration efficace de l'échantillon à travers les membranes. La figure 14 illustre une rampe de filtration dans un milieu de travail.



Figure 14: Rampe de filtration dans un milieu de travail

❖ Étuve de séchage

L'étuve de séchage (figure 15) est utilisée pour l'incubation des échantillons dans un milieu stérile, à une température constante de 37 °C pendant 24 heures. Cette incubation permet la croissance des micro-organismes éventuellement présents, étape cruciale pour la détection et le dénombrement de bactéries lors des analyses microbiologiques de l'eau.



Figure 15: Étuve contenant les échantillons

II.1.3. Module ultrafiltration ORISA

II.1.3.1. Description du module

L'élimination de la turbidité des eaux de puits a été réalisée à l'aide du module commercial dénommé ORISA, un système d'ultrafiltration compact et portable (Figure 16). Il est équipé d'une membrane d'ultrafiltration d'une surface de 0,56 m² et dont la taille des pores de 0,01 µm, permettant une rétention efficace des particules fines, bactéries et autres contaminants ayant une taille supérieure à celle des pores de la membrane.

Le module ORISA peut être utilisé selon deux modes de fonctionnement différents:

- Mode manuelle (PUM - ON) : filtration activée par pompage manuel, avec un débit moyen de 3 L/min, variable selon la vitesse de pompage et la turbidité de l'eau à filtrer.
- Mode gravitaire (TAP KIT - ON) : fonctionnement sans électricité, utilisant la pression transmembranaire créée par la hauteur de la colonne d'eau entre le point de sortie et le niveau d'eau dans le réservoir. Le débit de perméat dépendant de la turbidité de l'eau et de la hauteur de charge.

Le système fonctionne selon un principe de filtration interne-externe, garantissant une bonne efficacité de séparation. Pesant moins de 3 kg, le module ORISA est facile à transporter, ce qui le rend idéal pour les interventions sur le terrain ou dans des zones sans accès à l'électricité.

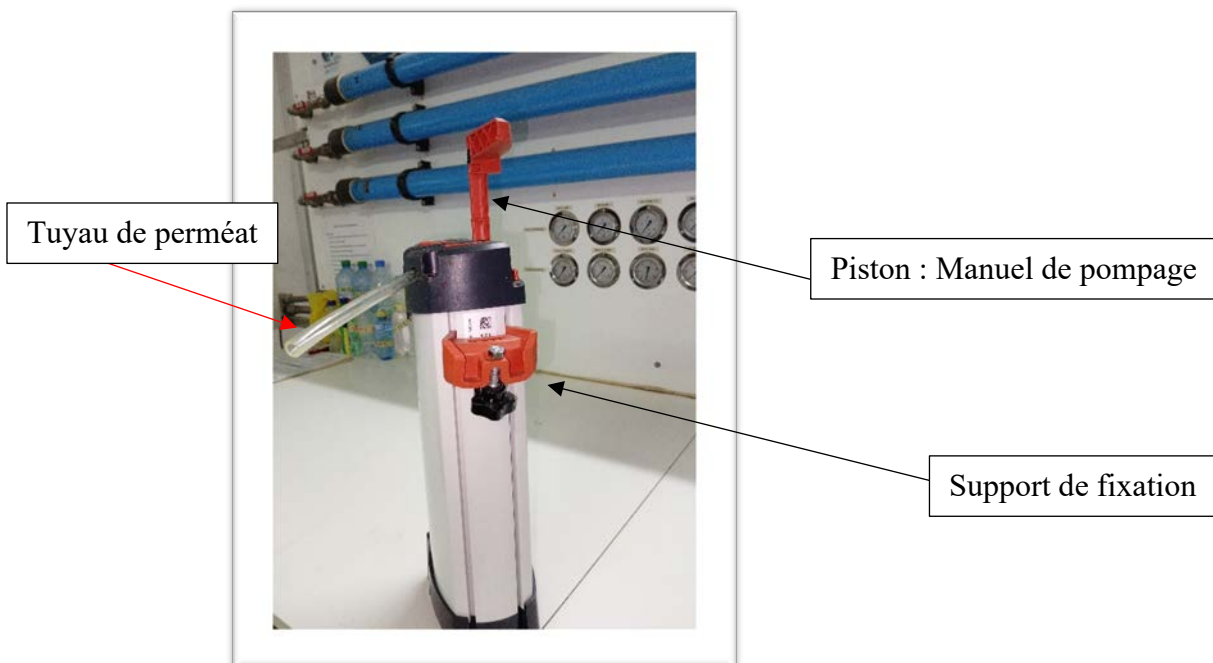


Figure 16: Module ORISA annoté (vue de face)

En mode de filtration manuelle, un préfiltre est utilisé comme composant supplémentaire du module ORISA (Figure 17). Ce préfiltre renforce la protection du système en retenant les

particules en suspension en amont de la membrane d'ultrafiltration, réduisant ainsi le risque de colmatage et prolongeant la durée de vie de la membrane. Le préfiltre, situé à la base du module de filtration, il est constitué d'une membrane poreuse dont le diamètre des pores est d'environ 0,045 μm , ce qui permet de retenir la quasi-totalité des matières en suspension présentes dans l'eau brute.

Ce composant est facile à entretenir : en cas de colmatage, il peut être nettoyé simplement à l'aide d'eau filtrée et d'une brosse à dents, ce qui permet de restaurer son efficacité sans besoin de matériel spécialisé



a°) Préfiltre fixé sur le module



b°) Préfiltre colmaté après usage

Figure 17: Préfiltre du module ORISA

II.1.3.2. Lavage des membranes ou système de rinçage

Un rinçage du système est nécessaire après chaque cycle de filtration, avant d'entamer un nouveau cycle de filtration. Ce rinçage permet d'éliminer les résidus accumulés et de maintenir une performance optimale du module.

Un rétro-lavage peut également être effectué lorsque l'on observe une diminution importante du flux de perméat, signe d'un colmatage partiel des membranes. Cette opération permet de restaurer le débit de filtration et de prolonger la durée de vie du module de filtration.

❖ Le rétro-lavage à l'eau pure

Le module ORISA est conçu de manière à permettre un rétro-lavage sans recours à des produits chimiques. Il suffit d'actionner les touches WASH et OFF pour inverser le flux de l'eau à travers la membrane. L'eau circule alors en sens inverse, entraînant avec elle les particules piégées dans les pores ou restées à l'intérieur du module. Cette opération permet de nettoyer efficacement la membrane en renvoyant l'eau souillée vers le récipient d'origine, contenant la solution initialement filtrée.

Une fois le rétro-lavage terminé, il suffit de repositionner les touches sur PUMP et ON pour reprendre la filtration dans le sens normal.

❖ **Lavage chimique**

Ce type de lavage est effectué lorsque le rétro-lavage n'a plus d'effet. Pour cela, on utilise 6 litres d'eau filtrée, répartis dans deux récipients de 3 litres chacun. Dans le premier récipient, on ajoute de l'eau de javel à une concentration connue (exprimée en pourcentage %).

Les étapes à suivre pour le lavage chimique sont:

- Immerger l'ORISA dans le premier récipient contenant le chlore,
- Pomper 10 coups pour filtrer la solution en position (PUMP – ON),
- Effectuer ensuite un rétro lavage (WASH - OFF) en pompant également 10 coups,
- Laisser ensuite ORISA dans cette solution pendant 15 min, puis reprendre le rétro-lavage avec 10 coups supplémentaires dans la même position,
- Plonger ensuite ORISA dans le second récipient, contenant de l'eau sans chlore,
- Pomper 10 coups ((PUMP et ON), puis effectuer le rétro-lavage (WASH et OFF) en pompant de nouveau 10 coups,
- Enfin, faire sortir ORISA de l'eau (toujours dans les mêmes positions des touches) en pompant au moins 4 coups à l'air libre pour s'assurer qu'il ne reste plus d'eau dans le module.

Remarque: La solution de lavage dépend du type de colmatage.

II.1.2.1. Test de sécurité du module ORISA

Ce test d'intégrité doit être effectué après un lavage du module ou après une longue période d'arrêt, afin de vérifier que le système n'a subi aucun dommage.

Pour réaliser ce test il faut suivre les étapes ci-dessous :

- ❖ Plonger le tuyau de sortie d'eau du module ORISA dans un verre rempli d'eau propre.
- ❖ Activer les touches PUMP et ON pour effectuer quelques pompes manuelles.
- ❖ Observer la présence de bulles d'air :
 - Si quelques bulles s'échappent sans formation de flux continu, cela indique que le module est fonctionnel et sans dommage.
 - Si en revanche un flux continu de bulles d'air est observé, cela signale une anomalie ou une fuite dans le système. Dans ce cas, le module est hors d'usage et il est recommandé de contacter le fournisseur.

NB : Il est impératif de laver soigneusement les mains avant toute manipulation du module ORISA afin d'éviter toute contamination extérieure.

II.2. Méthodes

Des prélèvements d'eau ont été réalisés à partir de cinq (5) puits différents dans la commune de Ziguinchor. Pour chaque prélèvement, les échantillons ont été transportés au laboratoire en vue d'une caractérisation physico-chimique préalable au traitement.

La turbidité a été mesurée en premier, afin d'évaluer le niveau de trouble de l'eau et donc sa qualité visuelle et particulière. Ensuite, d'autres paramètres physiques ont été analysés, notamment : la conductivité électrique, les solides dissous totaux (TDS), la salinité, le pH, et la température.

Ces mesures permettent d'avoir un profil complet de la qualité de l'eau brute permettant d'envisager ou non toute étape de traitement ou de filtration.

II.2.1. Caractérisation des échantillons

Pour la caractérisation des eaux brutes, un volume de 250 ml de chaque échantillon a été prélevé à l'aide d'un bécher propre. Cet échantillon a servi à la réalisation des différentes analyses physico-chimiques.

❖ Mesures de la turbidité

La turbidité de l'eau a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre, selon la procédure suivante :


- Remplir le flacon de mesure avec l'échantillon d'eau brute ;
- Nettoyer soigneusement l'extérieur du flacon avec un chiffon doux et sec afin d'éviter toute interférence (gouttelettes, traces de doigts) qui pourrait perturber la lecture ;
- Introduire le flacon dans le puits du turbidimètre, en s'assurant qu'il est bien positionné ;
- Appuyer sur la touche « Read » pour lancer la mesure ;
- Attendre quelques secondes jusqu'à l'affichage du résultat à l'écran ;

Le résultat s'affiche directement en NTU ; aucune conversion supplémentaire n'est nécessaire.

❖ Mesures des paramètres physico-chimiques :

- Conductivité, TDS, salinité et température

Ces paramètres ont été mesurés à l'aide du conductimètre multifonction COND 70 Vio la procédure est la suivante :

-  Plonger l'électrode de l'appareil dans un bécher de 250 ml contenant l'échantillon d'eau brute ;

- ✚ Attendre la stabilisation de la mesure (valeur fixe à l'écran) ;
- ✚ Utiliser la touche « mode » pour sélectionner successivement les autres paramètres.

- Mesure du pH

Le pH a été mesuré à l'aide du pH-mètre pH 7 Vio. La méthode est simple :

- ✚ Plonger l'électrode du pH-mètre dans un bécher de 250 ml contenant l'échantillon d'eau ;
- ✚ Attendre quelques secondes jusqu'à ce que la valeur du pH s'affiche à l'écran, généralement en moins d'une minute.

NB : il est essentiel de rincer les électrodes à l'eau distillée entre deux mesures pour éviter toute contamination croisée et garantir la précision des résultats.

II.2.2. Protocoles pour les analyses physico- chimiques

❖ Mode manuelle : mode PUMP – ON

L'objectif de cette expérience est de vérifier le bon fonctionnement de l'appareil, puis de suivre une procédure de filtration manuelle afin de mesurer le débit et de réaliser des analyses physico-chimiques. Les étapes à suivre sont les suivants :

- ✓ Remplir un récipient (par exemple un seau) avec l'échantillon d'eau brute ;
- ✓ Plonger le module ORISA dans l'eau du récipient ;
- ✓ Fixer correctement l'appareil sur le récipient;
- ✓ Se placer en mode "Filtre" (PUMP et ON) et commencer à pomper manuellement ;
- ✓ Démarrer un chronomètre dès le premier coup de pompe ;
- ✓ Collecter l'eau filtrée dans un bécher de 1 litre ;
- ✓ Arrêter le chronomètre une fois le bécher rempli ; et noter le nombre de coups de pompe ainsi que la durée totale de filtration ;
- ✓ Prélever un échantillon du filtrat obtenu pour effectuer des analyses physico-chimiques ;
- ✓ Répéter l'opération 10 fois avec le même échantillon d'eau et prélever à nouveau un échantillon pour refaire les mesures ;
- ✓ Effectuer deux séries de 10 filtrations avant de changer d'échantillon d'eau.

Avant de changer d'échantillon, un rétro-lavage du filtre est effectué. Il est important de noter qu'après chaque filtration, le nettoyage du préfiltre est nécessaire afin de faciliter le pompage. Dans ces conditions, il est possible d'estimer un débit moyen en calculant la moyenne des temps pour chaque série, ce qui permet de déterminer le temps minimal nécessaire pour filtrer un litre d'eau

La figure 18 illustre le montage de la méthode manuelle.



Figure 18: Montage mode manuel

❖ **Mode gravitaire : mode TAP KIT - ON**

En mode gravitaire, la pression de la colonne d'eau définit la pression de travail. Le montage consiste à connecter le dispositif avec un réservoir d'eau situé à une hauteur de 1,5 m (figure 19) en adoptant le protocole suivant :

- ✓ Remplir le réservoir d'alimentation de 35 L d'eau à filtrer ;
- ✓ Relier le module ORISA avec le réservoir par un tuyau ;
- ✓ Mesurer les colonnes d'eau pour chaque intervalles de 5 L d'eau filtrée ;
- ✓ Ouvrir le robinet du réservoir ;
- ✓ Préparer un chronomètre ;
- ✓ Mettre le module en mode TAP KIT - ON ;
- ✓ vérifier que la solution passe correctement dans celui-ci. Dans le cas contraire, des bulles d'air sont peut-être bloquées dans les tuyaux ou dans le dispositif. Pour les éliminer, actionner manuellement la pompe du module au moins 3 fois. Pour ce cas on remet le chrono à zéro pour ne pas fausser les calculs et remplir à nouveau le réservoir ;
- ✓ Déclencher le chronomètre à nouveau ;
- ✓ Pour chaque 5L filtrés, marquer une pause, prélever un volume du perméat pour faire des mesures et calculer le débit, le flux et la perméabilité;
- ✓ mesurer la turbidité de la solution dans le réservoir après chaque filtration d'un volume de 5 L ;

- ✓ Reprendre l'expérience jusqu'à la fin de la filtration pour ce cycle (réservoir vide) pour évaluer l'efficacité des membranes ;
- ✓ Refaire des filtrations dans ces mêmes conditions pour évaluer la durée d'un cycle (colmatage des membranes) ;
- ✓ Si les membranes sont colmatées (diminution importante du débit) passer au nettoyage ;
- ✓ commencer toujours par le rétro lavage et en suite le lavage chimique si nécessaire ;
- ✓ Après chaque lavage, effectuer au moins un cycle de filtration pour vérifier l'efficacité du lavage.



Figure 19: Montage du mode gravitaire

II.1.2. Protocoles pour les analyses microbiologiques

Pour les analyses microbiologiques deux méthodes ont été adoptées : ensemencement direct (Méthode colilert) et la filtration de 100 ml d'échantillon par la rampe de filtration.

❖ Ensemencement direct (méthode Colilert)

Cette méthode est utilisée pour l'analyse des bactéries coliformes totales (C.T) et Escherichia coli (E. Coli) selon le protocole suivant :

- ✓ Dans les tubes (5 tubes) contents le réactif de culture (réactif Colilert), ajouter 10 ml de l'échantillon et déposer le tube dans le support ;
- ✓ Placer les tubes dans un support adapté et les incuber à 37°C pendant 24 heures.
- ✓ Après incubation, dénombrer les micro-organismes en comptant le nombre de tubes présentant une coloration indicative de la croissance bactérienne;

- ✓ Identifier les micro-organismes à l'aide de techniques complémentaires telles que la coloration spécifique (jaune pour les C.T) et l'observation sous lampe UV pour distinguer la présence des E .Coli ou non.

❖ Filtration de 100 ml

La méthode de filtration a été utilisée pour l'analyse des bactéries entérocoques, en utilisant un milieu de culture : Slanetz and Bartley Agar, permettant de distinguer les entérocoques par leur capacité de croissance et de coloration.

Le protocole à mettre en œuvre est le suivant:

- ✓ Préparer les boîtes de Pétri en y versant le milieu de culture Slanetz and Bartley stérilisé.
- ✓ Filtrer 100 ml de l'échantillon à analyser à l'aide d'une rampe de filtration munie d'un système sous vide et d'un filtre de membrane stérile.
- ✓ Après filtration, retirer délicatement le filtre et le placer au centre de la boîte de Pétri contenant le milieu de culture préparé.
- ✓ Incuber les boîtes à une température adaptée (généralement 37°C pendant 24 heures).
- ✓ Observer et dénombrer les colonies caractéristiques (rosées à rouges) des entérocoques.

Tout au long du processus d'analyse, des conditions de stérilité rigoureuses ont été maintenues pour éviter toute contamination. Cela inclut la stérilisation des instruments et d'un environnement aseptisé.

Les résultats obtenus par l'ensemble de ces méthodes sont présentés dans des tableaux pour une interprétation plus visuelle et comparative, des courbes et graphiques illustratifs seront également fournis par la suite dans le chapitre intitulé résultats et discussions.

Chapitre III : Résultats et discussions

Dans cette section du document, nous allons décliner les travaux réalisés, les résultats obtenus et leurs interprétations.

Deux types de filtration ont été effectués avec le module ORISA : la filtration manuelle et la filtration gravitaire. Pour la filtration manuelle, des échantillons d'eau provenant de cinq sources différentes ont été prélevés à différents intervalles de temps. En revanche, pour la filtration gravitaire, une seule source d'eau a été sélectionnée et, après chaque cycle de filtration, l'eau turbide a été remplacée par un nouvel échantillon.

III.1. Résultats obtenus avec la méthode de la filtration manuelle

Trois journées de prélèvements ont été effectuées à des intervalles de temps distincts. Les objectifs principaux de cette manipulation étaient de suivre l'évolution de la turbidité des eaux des puits, d'évaluer la durée de vie des membranes de filtration, et d'étudier la relation entre la turbidité de l'eau et le débit de perméat.

III.1.1. Résultats sur la turbidité des échantillons

Le tableau 8 présente les résultats de la turbidité (en NTU) des échantillons prélevés au cours de chaque journée.

Tableau 8 : Turbidités des échantillons

Source Dates	Rond-point Aline Sitoé	Santhiaba boulevard 54	Santhiaba 1	Santhiaba 2	Tilène
09/12/2024	43,9	16	5,12	4,32	3,6
17/12/2024	51,4	24,22	5,	4,63	3,96
04/02/2025	69,9	25	7,15	5	4,25

Les valeurs de turbidité augmentent de manière relativement significative pour les eaux provenant des puits du rond-point et de la rue 54, tandis qu'une légère augmentation est observée pour les eaux des puits de Santhiaba et Tilène. Il convient de noter que ces puits, à l'exception de celui de Tilène, sont tous non couverts et situés en milieu urbain. En raison de cette exposition et de l'absence de protection, les eaux peuvent être facilement contaminées, ce qui accroît les risques de pollution. Cela souligne l'importance capitale du traitement de ces eaux.

En outre, plusieurs paramètres physico-chimiques tels que la conductivité électrique, la salinité, les solides dissous totaux (TDS) et le pH ont été mesurés avant la filtration (cf. Annexes 2). Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre les valeurs mesurées avant et après filtration, c'est pourquoi ces résultats ne sont pas présentés ici.

La figure 20 illustre l'évolution de la turbidité dans les différentes sources d'eau sur trois jours de prélèvement.

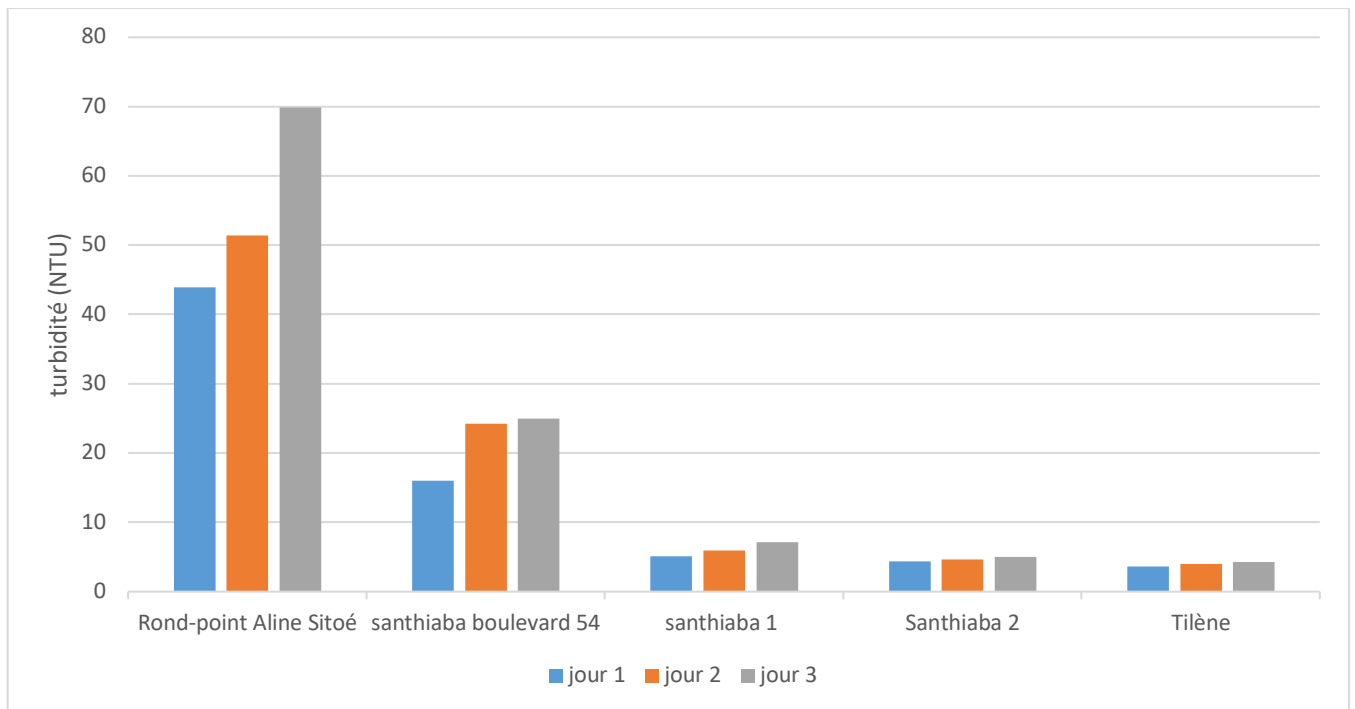


Figure 20: Évolution de la turbidité dans les sources

Cette figure montre que la source Rond-point et Rue 54 présentent des turbidités qui dépassent largement la valeur guide de 5 NTU recommandée par l’OMS quel que soit la période de prélèvement.

III.1.2. Résultats sur la turbidité des échantillons après filtrations

❖ Mesures de la turbidité

Les tableaux 9, 10 et 11 présentent les résultats de la turbidité (NTU) avant et après la filtration par le module ORISA, pour les eaux prélevées de différents puits à des périodes distinctes.

Tableau.9: Résultats de la turbidité avant et après filtration du 09/12/2024

Analyse de la turbidité Sources	Avant filtration	Après filtration
Rond-point Aline Sitoé	43,9	0
Santhiaba Boulevard54	16	0
Santhiaba 1	5,12	0
Santhiaba 2	4,32	0
Tilène	3,6	0

Tableau 10: Résultats de la turbidité avant et après filtration du 17/12/2024

Analyse de la turbidité Sources	Avant filtration	Après filtration
Rond-point Aline Sitoé	51,4	0
Santhiaba Boulevard54	24,22	0
Santhiaba 1	5,96	0
Santhiaba 2	4,63	0
Tilène	3,96	0

Tableau 11: Résultats de la turbidité avant et après filtration du 04/02/2025

Analyse de la turbidité Sources	Avant filtration	Après filtration
Rond-point Aline Sitoé	69,9	0
Santhiaba Boulevard54	25	0
Santhiaba 1	7,5	0
Santhiaba 2	5	0
Tilène	4,25	0

Pour les résultats consignés dans ces 3 tableaux, il a été observé que, quelle que soit la valeur initiale de la turbidité dans l'eau brute, l'eau filtrée présente systématiquement une turbidité nulle. Bien que certaines sources contiennent des eaux fortement turbides (supérieures à 50 NTU). Un des avantages majeurs de cette méthode est la possibilité d'utiliser le module ORISA avec son préfiltre. Ce dernier joue un rôle crucial en retenant la quasi-totalité des particules, ce qui limite le colmatage des membranes. Du premier au dernier jour d'expérimentation, les membranes ont continué à produire des perméats avec une turbidité nulle. Ainsi, les membranes se sont révélées non seulement efficaces pour l'élimination de la turbidité, mais aussi possédaient un flux acceptable pour cette méthode.

La pression exercée lors de la filtration est difficile à estimer précisément. Toutefois, il est possible d'envisager un débit moyen pour chaque cycle de filtration de l'eau brute prélevée. En suivant le protocole décrit dans le chapitre 2 pour le mode manuel, il est possible de mesurer le temps nécessaire à la filtration d'un litre d'eau brute et de pouvoir calculer le débit.

❖ **Calculs des débits du perméat**

Les tableaux 12, 13 et 14 présentent respectivement les débits de perméat pour chaque journée de prélèvement.

Tableau 12: Débit du perméat de la date du 09/12/2024

Puits	Rond- point Aline Sitoé	Santhiaba Boulevard 54	Santhiaba 1	Santhiaba 2	Tilène
Temps(s)	52	36	30	30	30
Débit (L/min)	1,153	1,765	2	2	2

Tableau 13: Débit du perméat de la date du 17/12/2024

Puits	Rond- point Aline Sitoé	Santhiaba Boulevard 54	Santhiaba 1	Santhiaba 2	Tilène
Temps(s)	52	36	32	32	30
Débit (L/min)	1,153	1,666	1,875	1,875	2

Tableau 14: Débit du perméat de la date du 04/02/2025

Puits	Rond- point Aline Sitoé	Santhiaba Boulevard 54	Santhiaba 1	Santhiaba 2	Tilène
Temps(s)	57	40	36	36	32
Débit (L/min)	1,053	1,5	1,666	1,666	1,875

Il a été observé que le débit du perméat diminue progressivement entre la première et la dernière journée de filtration. En effet, plus le module est utilisé, plus les particules s'accumulent dans les membranes, ce qui entraîne une diminution du débit. De plus, au cours d'une journée, le débit varie en fonction de la turbidité de l'eau. Le préfiltre, en retenant une grande quantité de particules, réduit la taille de ses pores, ce qui limite la mobilité de l'eau et entraîne une diminution progressive du débit. C'est pourquoi il est essentiel de nettoyer le préfiltre après chaque filtration d'une source avant de procéder au renouvellement de l'eau brute. Dans ces conditions, le flux de perméat peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$J_V = \frac{Q_P}{A} \quad (19)$$

Q_P : débit de perméat

A : surface membranaire

❖ **Corrélation entre la turbidité et le débit du perméat**

Les figures 21, 22 et 23 illustrent la variation des débits de perméat en fonction de la turbidité des puits pour chaque journée de prélèvement.

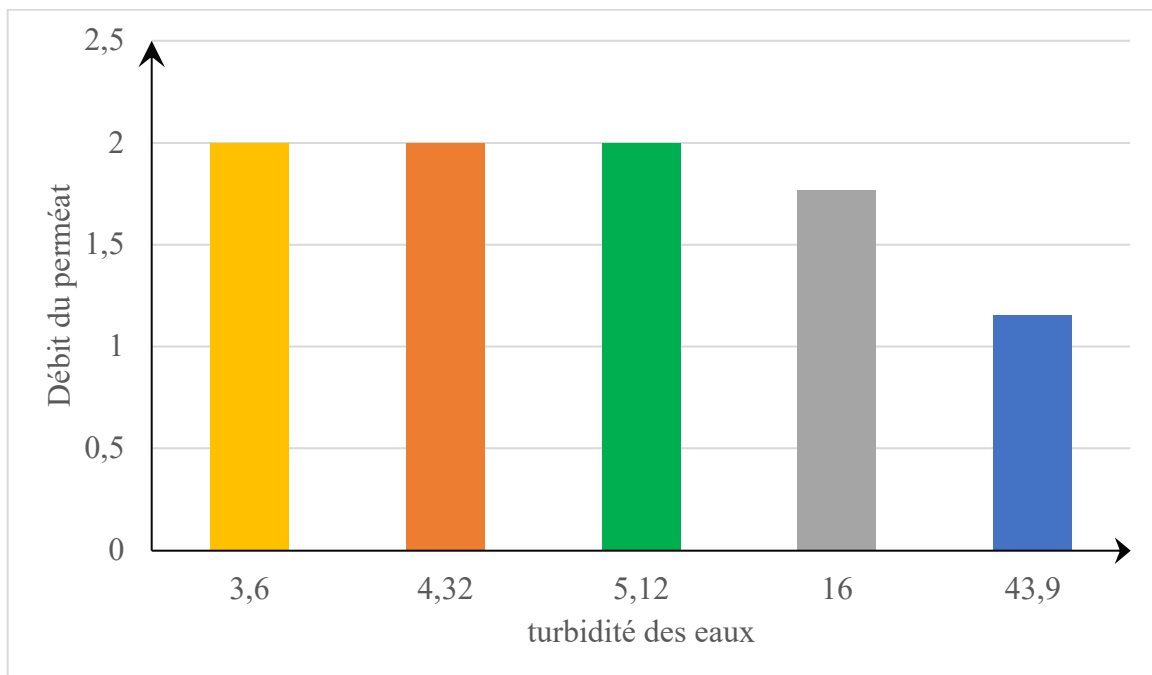


Figure 21: Variation des débits du perméat en fonction de la Turbidité des eaux des puits du 09/12/2024

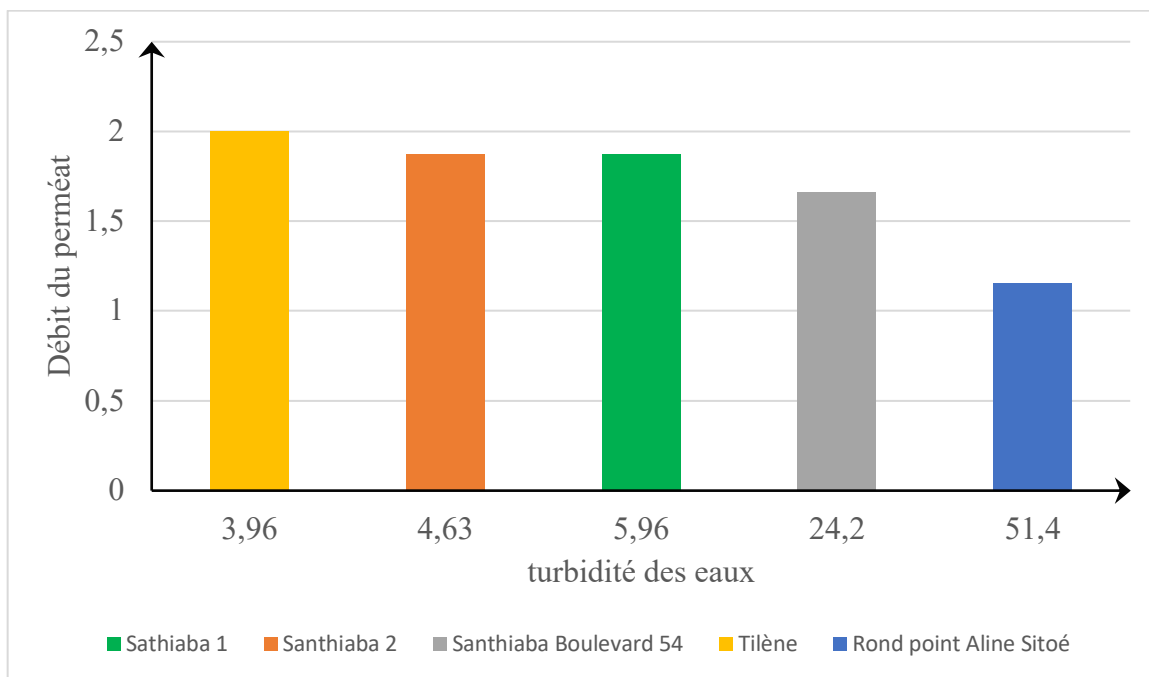


Figure 22: Variation des débits du perméat en fonction de la Turbidité des eaux des puits du 17/12/2024

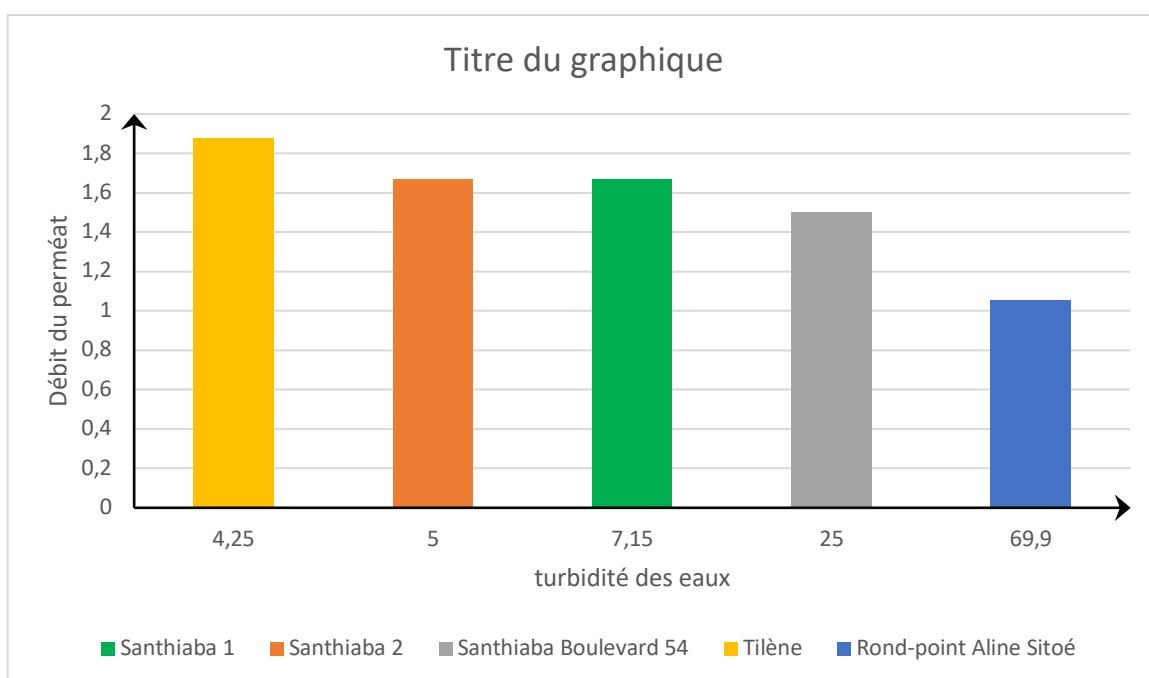


Figure 23: Variation des débits du perméat en fonction de la Turbidité des eaux des puits du 04/02/2025

Il a été observé que le débit du perméat varie de manière inversement proportionnelle à la turbidité de l'eau brute. En effet, dans les conditions expérimentales de cette étude, les eaux présentant une turbidité plus élevée sont associées à des débits de perméat plus faibles. Cette diminution du débit s'explique principalement par l'obstruction progressive des pores de la

membrane du préfiltre. L'accumulation des particules en suspension à ce niveau entrave la circulation de l'eau, réduisant ainsi le flux à travers le module de filtration.

Cette obstruction entraîne également une augmentation de la pression de fonctionnement nécessaire pour maintenir le flux. Plus la turbidité est élevée, plus la quantité de matières solides piégées augmente, ce qui favorise un encrassement des membranes. Ce phénomène, connu sous le nom de colmatage, est accentué par la présence de particules fines (inférieures à 0,045 μm), qui ne sont pas retenues par le préfiltre mais plutôt par les membranes du module ORISA. Lorsque ces particules s'accumulent en grande quantité, elles bouchent partiellement ou totalement les pores des membranes, entraînant une chute significative du débit du perméat.

En somme, une turbidité élevée affecte négativement les performances du système de filtration, en réduisant le débit du perméat et en augmentant la pression de travail.

III.2. Résultats obtenus avec la méthode de filtration gravitaire

Dans ce mode de filtration, une seule source d'eau brute est utilisée. Afin de préserver l'intégrité des membranes, seules des eaux présentant une turbidité inférieure ou égale à 60 NTU sont testées. Cette précaution vise à éviter l'endommagement prématuré des membranes par un colmatage excessif ou une surcharge en particules.

L'objectif principal de cette phase expérimentale est de réaliser des filtrations en plusieurs cycles, dans le but de déterminer les débits de perméat, les flux de perméat, puis d'en déduire les perméabilités des membranes utilisées. Chaque cycle comprend trois (3) filtrations successives. Entre chaque cycle, un lavage ou nettoyage du système de filtration est effectué afin de restaurer totalement ou partiellement les performances de la membrane avant d'entamer le cycle suivant.

III.2.1. Résultats pour le cycle 1

En suivant rigoureusement le protocole expérimental décrit au chapitre 2, relatif à la méthode de filtration gravitaire, les résultats suivants ont été obtenus pour chaque cycle et pour chacune des filtrations réalisées.

❖ Résultats de la filtration 1

Les tableaux 15 et 16 présentent respectivement certains paramètres physico-chimiques mesurés dans le perméat et l'évolution de la turbidité de l'eau brute tout au long de la première phase filtration du cycle

Tableau 15: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Temps (min)	0	17	17,58	19,95	21,16	23,2	26
Turb. (NTU)	16,26	0	0	0	0	0	0
Cond (µS)	1201	1157	1165	1181	1181	1191	1191
TDS (mg/L)	853	823	827	839	839	845	845
Salinité (ppm)	607	583	587	596	596	601	601
pH	6,67	6,66	6,75	6,54	6,68	6,75	6,79
Temp °C	27	27,2	27,3	27,3	27,7	27,6	27,6

Tableau 16: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume filtré(L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	16,26	16,38	23,98	28,66	33,10	40,8	44

La turbidité de l'eau brute augmente progressivement au cours du temps, à chaque volume de 5 litres filtré. Cette augmentation s'explique par le phénomène de décantation : en effet, la filtration continue réduit progressivement le volume d'eau brute disponible dans le réservoir d'alimentation, favorisant ainsi la sédimentation des particules en suspension. Ce processus entraîne une concentration croissante de matières en suspension dans le volume résiduel, ce qui accentue la turbidité de l'eau brute au fil du temps.

Malgré l'augmentation progressive de la turbidité dans l'eau brute, la turbidité du perméat reste nulle, ce qui témoigne de l'efficacité de la membrane sur la rétention des particules.

En se référant aux données du tableau 15, il est possible de calculer le débit et le flux de perméat pour chaque volume de 5 litres filtré. Ces calculs permettent ensuite de déterminer la perméabilité des membranes et les formules des équations 20, 21 sont utilisées à cet effet.

$$Q_p = \frac{V}{t} \quad (20)$$

$$L_p = \frac{J_p}{\Delta P} = \frac{Q_p}{A \times \Delta P} \quad (21)$$

V : volume d'eau filtré en (L)

t : durée de filtration en h

J_p : flux de perméat en m/h

L_p : perméabilité de la membrane en m/h/bar

ΔP : différence de pression transmembranaire

A : surface membranaire

Les résultats obtenus à la suite des calculs sont regroupés dans le tableau.17.

Tableau 17: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration1

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
t (h)	0,283	0,293	0,3325	0,3527	0,3866	0,4333
Q _p (L/h)	17,667	17,064	15,0375	14,1763	12,9332	11,539
J _p (m/h)	0,0315	0,0304	0,0268	0,0253	0,0230	0,0206
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L _p (m/h/bar)	0,2110	0,209	0,1921	0,1895	0,1803	0,1695

Au fur et à mesure de la filtration, on observe une diminution progressive du débit de perméat ainsi que de la perméabilité des membranes. Cette baisse coïncide avec l'augmentation de la turbidité dans l'eau d'alimentation. En effet, la présence croissante de particules en suspension dans l'eau brute, liée notamment au phénomène de décantation, entraîne une obstruction progressive des pores de la membrane, réduisant ainsi son efficacité hydraulique. Ces résultats confirment que, tout comme dans le mode de filtration manuelle, la turbidité exerce une influence significative sur les performances du système de filtration.

❖ Résultats de la filtration 2

À l'issue de la première filtration du cycle 1, le réservoir d'alimentation est de nouveau rempli, puis une nouvelle opération de filtration est effectuée.

Les tableaux 18, 19 et 20 présentent respectivement les résultats de mesures de certains paramètres physico-chimiques dans le perméat, l'évolution de la turbidité dans l'alimentation et les calculs des paramètres caractéristiques des membranes. Le temps nécessaire pour filtrer des premiers 5 litres lors de la deuxième phase de filtration du cycle 1 est supérieur à celui enregistré pour les premiers 5 litres de la première phase de filtration. Cette observation met en évidence l'influence de la durée d'utilisation du module sur le comportement des membranes. En effet, l'encrassement progressif de la membrane au cours des filtrations successives contribue à la diminution de ses performances hydrauliques. Cependant, malgré un temps de filtration plus long, la turbidité du perméat reste constante et égale à zéro (0) après chaque volume de 5 litres filtré. Cela confirme que l'efficacité de la membrane en termes de rétention des particules en suspension reste inchangée à ce stade du processus.

Tableau 18: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Temps (min)	0	18,66	21,18	23,25	25,31	28	30
Turb. (NTU)	10,37	0	0	0	0	0	0
Cond (µS)	1179	1181	1188	1195	1200	1201	1208
TDS (mg/L)	838	841	843	848	852	852	858
Salinité (ppm)	595	598	600	604	607	607	612
pH	6,91	6,98	7,02	6,92	7	7,11	7,28
Temp °C	27,3	28	28,1	28,4	28,7	29,2	29,3

Tableau 19: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	10,37	11	12	15,62	17,23	23,6	28,7

La turbidité initiale de la deuxième phase de filtration est inférieure à celle observée au début de la première phase de filtration. Cette différence s'explique par le fait que l'eau brute utilisée pour la deuxième phase de filtration est constituée du perméat issu de la première filtration, mélangé à l'eau résiduelle restante dans le réservoir. Ce mélange dilue la concentration en particules en suspension, réduisant ainsi la turbidité de départ.

Ce protocole est maintenu tout au long du cycle : à chaque étape, le perméat obtenu d'une filtration est réutilisé comme solution d'alimentation pour la filtration suivante. Ce procédé explique les variations de turbidité observées entre les différentes phases de filtration d'un même cycle.

En appliquant les équations (20), (21) et (22), les valeurs des paramètres caractéristiques des membranes ont été calculées. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 20.

Tableau 20: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 2

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
t (h)	0,3111	0,3530	0,3875	0,4219	0,4666	0,5138
Q _p (L/h)	16,077	14,1643	12,9032	11,8511	10,7158	9,7314
J _p (m/h)	0,0287	0,0252	0,0230	0,0212	0,01913	0,0173
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L _p (m/h/bar)	0,1920	0,1738	0,1652	0,1585	0,1500	0,1430

Les résultats montrent que le débit de perméat diminue progressivement avec le volume filtré entre 5 et 30 L. En comparant les valeurs du débit de perméat obtenues lors de la deuxième phase de filtration avec celles de la première phase de filtration, une diminution significative est observée. Cette réduction progressive du débit peut être attribuée à l'accumulation de particules dans le tuyau d'alimentation et à l'intérieur du module de filtration. Cette accumulation favorise une diminution de la migration de l'eau à travers la membrane, ce qui entraîne la baisse du débit de perméat.

Plus précisément, lorsqu'on compare les valeurs de débit obtenues à 30 litres d'eau filtrée entre les deux phases de filtration, on constate une réduction du débit de perméat de 11,539 L/h à 9,7314 L/h. Cette légère diminution, en particulier en ce qui concerne la perméabilité, suggère que la performance de la membrane commence à se détériorer, ce qui a justifié la nécessité d'une troisième phase filtration pour ce cycle afin d'évaluer davantage l'évolution des paramètres de performance.

❖ Résultats de la filtration 3

Après la deuxième phase de filtration, le réservoir est rempli avec le filtrat obtenu lors de cette même filtration. La troisième phase de filtration est ensuite lancée dans les mêmes conditions opératoires et avec le même mode de fonctionnement que lors des deux précédentes phases.

Les résultats relatifs à cette troisième phase de filtration sont présentés dans les tableaux 21, 22 et 23.

Tableau 21: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Temps (min)	0	25	28,033	31,783	36	39,333	44,333
Turb. (NTU)	8,75	0	0	0	0	0	0
Cond (µS)	1172	1187	1190	1193	1195	1196	1197
TDS (mg/L)	835	843	845	847	849	849	850
Salinité (ppm)	593	599	601	603	604	604	605
pH	7,22	7,32	7,34	7,5	7,32	7,24	7,36
Temp °C	27,4	27,6	27,4	27,8	27,2	27,6	28,1

Comme observé lors des deux premières phases de filtration, le temps nécessaire pour filtrer un volume de 5 litres augmente progressivement au fur et à mesure que l'on filtre l'eau brute. Cependant, il est à noter que la durée de filtration pour les premiers 5 litres de la troisième phase de filtration est particulièrement longue par rapport aux deux premières phases

Ce constat renforce les interprétations faites lors des filtrations précédentes, indiquant que l'accumulation progressive de particules en suspension dans l'eau brute (tableau 22) et le colmatage de la membrane contribuent à cette augmentation du temps de filtration.

Tableau 22: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	8,75	11,84	12,5	14,08	15,95	19,1	21,7

Tableau 23: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 3

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
t (h)	0,4166	0,4672	0,5297	0,6	0,655	0,738
Q _p (L/h)	12,0019	10,7020	9,4393	8,3333	7,6336	6,7750
J _p (m/h)	0,02143	0,0191	0,0168	0,0149	0,0136	0,01209
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L _p (m/h/bar)	0,1433	0,1313	0,1208	0,1114	0,1067	0,0995

Après la troisième phase de filtration, des valeurs particulièrement faibles du débit de perméat et de la perméabilité des membranes sont observées. En effet, la perméabilité mesurée à 30 litres est de $0,0995 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$, ce qui représente un résultat bien en dessous de la perméabilité moyenne attendue pour ces membranes de même que celles obtenues lors des deux premières phases de filtration ($1,1695 \text{ m/h/bar}$ et $1,1431 \text{ m/h/bar}$ respectivement).

Cette faible perméabilité peut être attribuée au colmatage des membranes, causé par l'accumulation de particules, tant à la surface qu'à l'intérieur des pores des membranes. Ce phénomène limite le passage de l'eau à travers les membranes, réduisant ainsi leur efficacité hydraulique et leur capacité à filtrer l'eau brute de manière optimale.

Les figures 24, 25 et 26 présentent respectivement la turbidité de l'eau brute et celle de l'eau filtrée pour les trois phases de filtration du cycle 1.

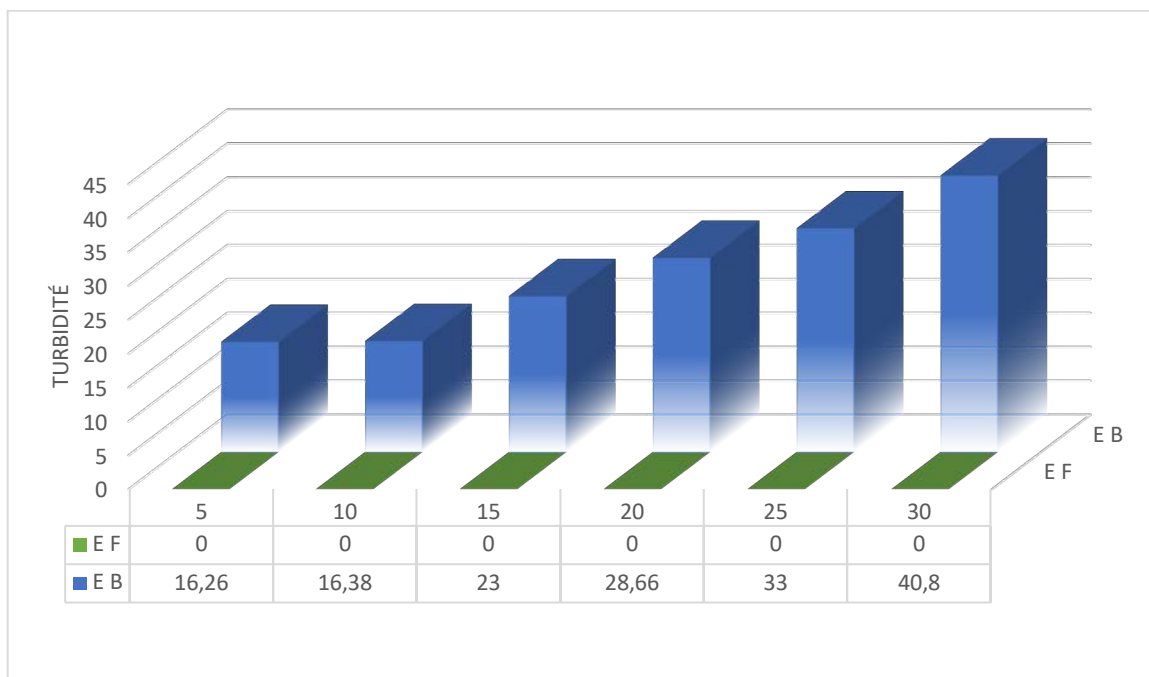


Figure 24: Évolution de la turbidité dans l'eau brute et dans le perméat pour F1 de C1

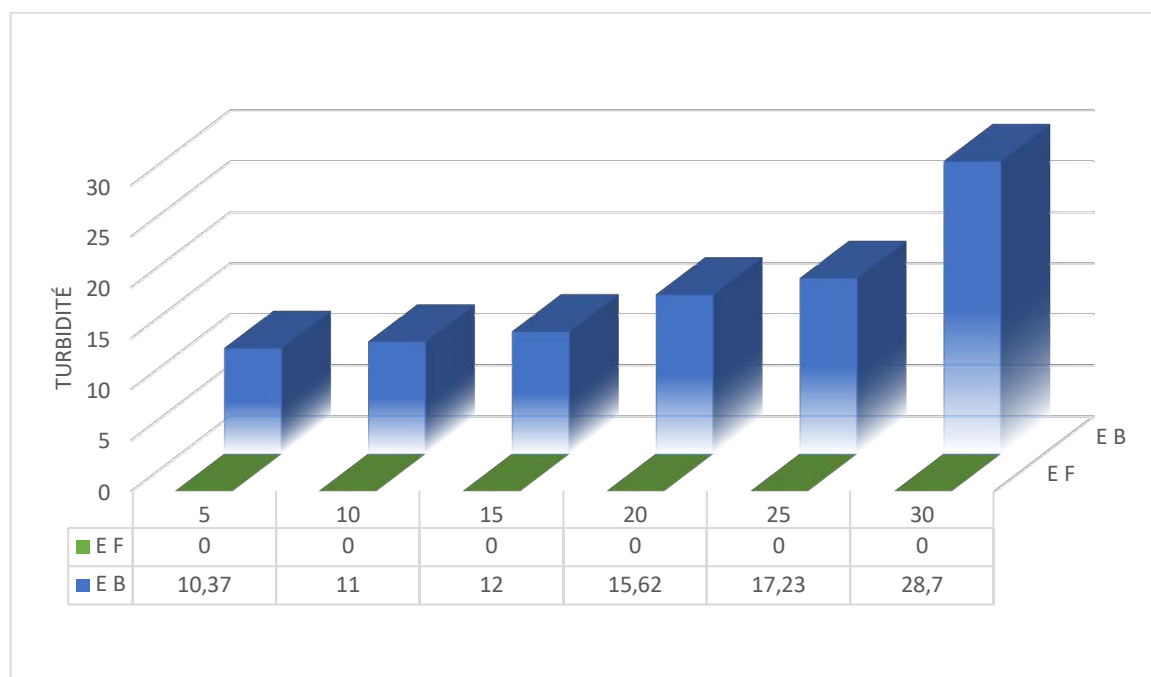


Figure 25: Évolution de la turbidité dans l'eau brute et dans le perméat pour F 2 de C1

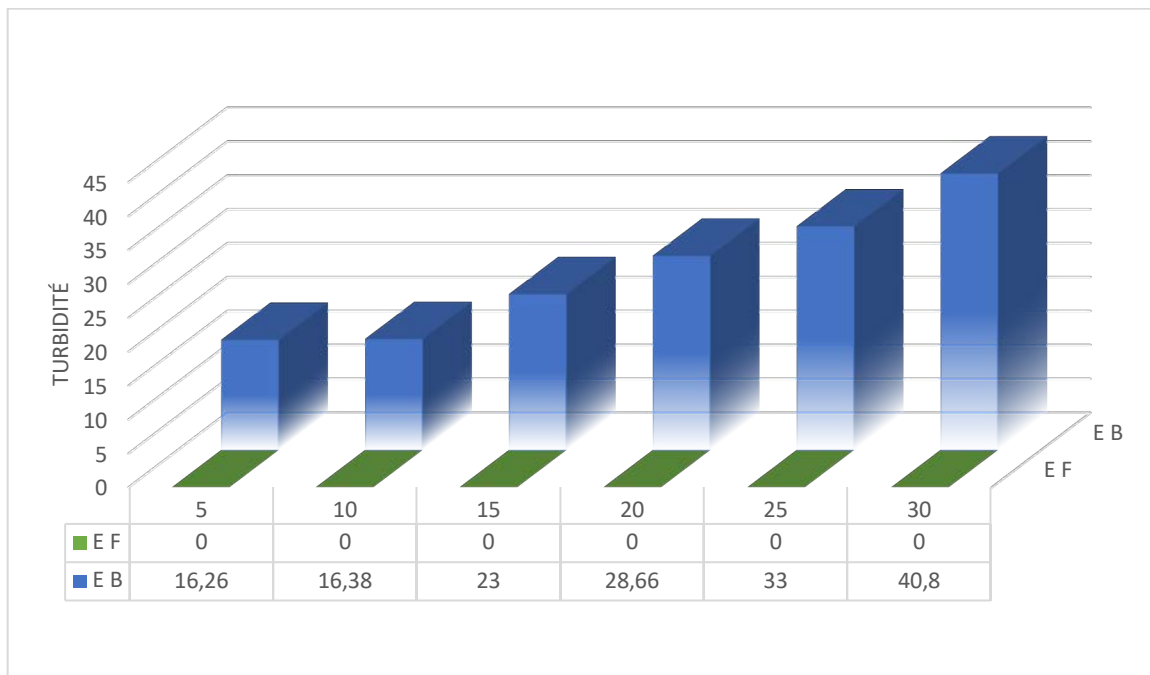


Figure 26: Évolution de la turbidité dans l'eau brute et dans le perméat pour F3 de C1

Les résultats obtenus avec le cycle 1 pour les trois phases de filtration montrent que indépendamment de la turbidité de l'eau brute, la turbidité du perméat reste systématiquement nulle. Cela témoigne de l'efficacité des membranes pour la rétention des particules dissoutes et des matières en suspension, garantissant ainsi un perméat de qualité constante tout au long des filtrations.

Ce processus a été répété pour tous les cycles, et les résultats complets sont consignés en annexe.

La Figure 27 montrent l'évolution de la perméabilité des membranes lors du cycle 1, pour chaque volume de 5 litres filtré, en offrant une vue d'ensemble de leur comportement au cours des différentes phases de filtration.

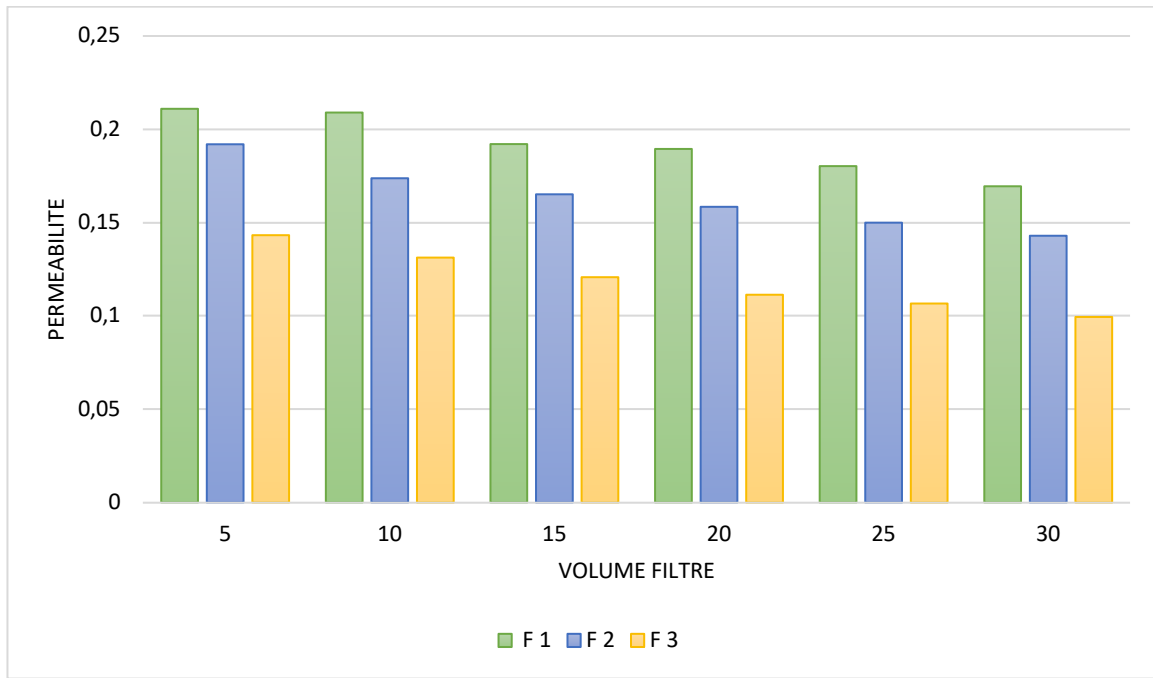


Figure 27: Évolution des perméabilités du premier cycle

Il a été observé que dans un cycle la perméabilité des membranes diminue à la fois en fonction du volume filtré et du nombre de filtrations. En effet, au fur et à mesure que le volume d'eau filtré augmente, le flux de perméat diminue et la turbidité dans l'alimentation augmente, ce qui réduit la perméabilité. Cependant, avec l'utilisation répétée du module ORISA pour la filtration d'eau turbide, un phénomène de colmatage devient apparent. Ce dernier résulte de l'accumulation de particules, soit dans le tuyau d'alimentation, soit à la surface des membranes, voire à l'intérieur des pores des membranes. Cela explique pourquoi, pour une même colonne d'eau et une pression constante, la perméabilité diminue entre deux phases de filtration successives. Par exemple, pour la filtration de 5 litres, la perméabilité passe de plus de $0,2 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ à moins de $0,15 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ de la première à la troisième phase de filtration.

Après la troisième phase de filtration, à un volume de 30 litres (V_{30}), la perméabilité devient trop faible pour garantir une filtration efficace. Pour remédier à cela, un rétro-lavage ou back-wash (BW) du module a été effectué. Le protocole de rétro-lavage est détaillé dans la section II.1.3.2 du chapitre "Matériel et Méthodes". Plusieurs cycles de lavage ont été réalisés (17 BW) avant de procéder à un rinçage final, au cours duquel la turbidité de l'eau est devenue nulle (tableau 24). Ces cycles de lavages ont été effectués dans le but d'éliminer toutes les particules retenues par les membranes du module de filtration.

Tableau 24: Nombre de rétro lavage et la turbidité de chaque lavage

Nbr.BW	BW1	BW2	BW3	BW4	BW5	BW6	BW7	BW8	BW9
Turb. (NTU)	181,9	97,6	87,7	68,5	65,2	49	26,9	22,8	20,1
Nbr.BW	BW10	BW11	BW12	BW13	BW14	BW15	BW16	BW17	BW18
Turb. (NTU)	16,87	16,53	16	12,69	11,44	9,66	1,82	0	0

L'objectif principal de ces opérations de rétro-lavage était de restaurer la perméabilité des membranes à son niveau initial, afin de garantir des performances optimales lors du cycle 2

III.2.2. Résultats pour le cycle 2

Après le rétro-lavage, l'installation a été remise en place et le protocole a été suivi pour démarrer le cycle 2. Comme pour le premier cycle, trois phases de filtrations ont été réalisées pour le cycle 2, en maintenant les mêmes paramètres opératoires. Les résultats obtenus au cours de ce cycle permettront d'évaluer l'efficacité du rétro-lavage et de confirmer si cette opération a permis de restaurer la perméabilité des membranes à des niveaux proches de ceux observés en début de cycle. Ces données seront utilisées pour comparer les performances de filtration avant et après le lavage, et ainsi valider l'impact du rétro-lavage sur le maintien des performances du système.

❖ Résultats de la filtration 1

Le temps nécessaire pour la filtration des premiers 5 litres après le rétro-lavage (tableau 25) est très similaire à celui observé pour les premiers 5 litres de la première phase de filtration du cycle 1. Cette observation confirme l'efficacité du rétro-lavage, qui a permis de restaurer le temps de filtration initial pour cette première valeur de volume filtré.

Tableau 25: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Temps (min)	0	18	19,366	21,2	23,2	25,333	26,333
Turb. (NTU)	3,87	0	0	0	0	0	0
Cond (µS)	1177	1181	1172	1172	1177	1180	1180
TDS (mg/L)	835	839	833	833	835	838	838
Salinité (ppm)	593	596	591	591	593	596	596
pH	7,67	7,66	7,56	7,56	7,67	7,55	7,58
Temp °C	26,9	27	27,2	27,2	27,7	27	28,2

En ce qui concerne la turbidité, comme lors du premier cycle, peu importe le volume filtré, la turbidité du perméat reste constante et égale à zéro. Cela indique que les membranes continuent de performer de manière optimale, en retenant les particules dissoutes et en suspension de manière efficace après le rétro-lavage.

Cependant, dans l'eau brute, une augmentation de la turbidité a été observée à mesure que le volume d'eau filtré augmentait. Cette tendance est similaire à celle observée dans le cycle précédent et souligne l'impact des particules accumulées dans l'eau brute sur l'efficacité du processus de filtration. L'évolution de la turbidité dans l'alimentation est présentée dans le tableau 26.

Tableau 26: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	7,9	9,1	12,5	12,7	14,75	17,5	21

Les temps mesurés pour chaque filtration de 5 L ont permis de réaliser les résultats du tableau 27 donnant les paramètres caractéristiques des membranes.

Tableau 27: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 1.2

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
t (h)	0,3	0,322	0,353	0,386	0,422	0,438
Q _p (L/h)	16,666	15,527	14,164	12,953	11,848	11,4155
J _p (m/h)	0,0297	0,0277	0,0253	0,0231	0,0212	0,0203
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L _p (m/h/bar)	0,1990	0,19051	0,1814	0,1733	0,1659	0,1677

La récupération du temps de filtration des premiers 5 litres grâce au rétro-lavage indique une restauration du comportement initial des membranes vis-à-vis de la solution brute. Après avoir subi un colmatage suite à la filtration de 30 litres (V₃₀) lors de la troisième phase de filtration du cycle 1, les membranes retrouvent une performance optimale avec une perméabilité améliorée. De plus, la production d'un filtrat clair, avec une turbidité nulle, confirme l'efficacité du rétro-lavage. Le fait que la turbidité du filtrat reste nulle et que la perméabilité des membranes reste bonne démontre que ces dernières ne sont pas endommagées après le processus de lavage.

Avec une perméabilité de 0,1677 m·h⁻¹·bar⁻¹, les membranes sont prêtes pour un nouveau cycle de filtrations.

❖ Résultats de la filtration 2

En comparant ces résultats (tableau 28) avec ceux obtenus lors de la deuxième phase de filtration du cycle 1, on constate que les valeurs sont très proches. Cette similitude confirme l'efficacité du rétro-lavage du système, qui a permis de restaurer les performances des membranes à des niveaux comparables à ceux observés après la deuxième phase de filtration du cycle 1.

Tableau 28: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Temps (min)	0	20	23	25,5	28	31	34
Turb. (NTU)	6,87	0	0	0	0	0	0
Cond (μS)	1172	1182	1177	1183	1176	1186	1186
TDS (mg/L)	832	839	836	841	835	842	842
Salinité (ppm)	590	596	594	597	593	599	599
pH	7,66	7,67	7,8	7,87	7,68	7,68	7,68
Temp °C	25,9	25,5	26,2	26,4	26,3	27,7	27,7

Les tableaux 29 et 30 présentent respectivement l'évolution de la turbidité dans l'eau brute et les calculs des paramètres caractéristiques des membranes dans le perméat.

Tableau 29: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	6,87	7,83	9,95	11,75	13	15	18,75

Tableau 30: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 2 de C2

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
t (h)	0,333	0,383	0,425	0,466	0,516	0,566
Q _p (L/h)	15,015	13,0548	11,7647	10,7296	9,689	8,834
J _p (m/h)	0,0268	0,0233	0,0210	0,0192	0,0173	0,01577
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L _p (m/h/bar)	0,1793	0,1602	0,1506	0,1438	0,1357	0,1298

Les résultats des paramètres mesurés dans le perméat issu de la deuxième phase de filtration du cycle 2 sont globalement comparables à ceux obtenus lors de la deuxième phase de filtration du cycle 1. En particulier, les valeurs de débit de perméat et de perméabilité du volume filtré à V = 30 L présentent des écarts relativement faible, ce qui tend à confirmer l'hypothèse formulée

à l'issue de la première phase de filtration du cycle 2. En revanche, la perméabilité des membranes à $V = 30$ L se révèle nettement supérieure à celle observée lors de la troisième phase de filtration du cycle 1, moment où les membranes présentaient un colmatage significatif. Ce constat suggère que, lors de la deuxième phase de filtration du cycle 2, les membranes ne sont pas encore colmatées. Il a été donc envisagé de procéder à une troisième filtration dans ce même cycle.

❖ Résultats de la filtration 3

La valeur limite de colmatage n'est pas atteinte après la deuxième phase de filtration de ce cycle 2, on réalise une troisième phase de filtration dont certains paramètres physico-chimique sont donnés dans le tableau 31.

Tableau 31: Mesures dans le perméat pour chaque 5 L d'eau brute filtré

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Temps (min)	0	24	28,883	32	34,216	41	44
Turb. (NTU)	6,34	0	0	0	0	0	0
Cond (μ S)	1176	1173	1188	1175	1178	1180	1178
TDS (mg/L)	835	833	843	835	836	839	836
Salinité (ppm)	593	592	600	593	594	596	594
pH	7,88	7,70	7,8	7,8	7,7	7,86	7,86
Temp °C	27,2	27,2	28,	28,1	28,6	28,6	28,6

La durée de filtration des 5 premiers litres lors de cette phase de filtration est pratiquement identique à celle observée au cours de la troisième phase de filtration du cycle 1. De plus, l'évolution des temps de filtration pour chaque volume de 5 litres filtré suit une tendance similaire à celle obtenue lors de la filtration 3 du cycle 1. Ces résultats indiquent que le rétro lavage réalisé à l'issue du cycle 1 a permis au module de retrouver son comportement initial. L'objectif du rétro lavage est donc globalement atteint, témoignant ainsi son efficacité dans la restauration des performances membranaires.

Les tableaux 32 et 33 donnent respectivement l'évolution de la turbidité et les paramètres caractéristiques des membranes.

Tableau 32: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	6,34	7,15	9,2	11,2	15,82	16,8	17

Tableau 33: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 3 de C2

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
t (h)	0,4	0,481	0,533	0,5702	0,683	0,736
Q _p (L/h)	12,5	10,395	9,380	8,769	7,321	6,793
J _p (m/h)	0,0223	0,0186	0,0168	0,0157	0,0131	0,0121
P (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L _p (m/h/bar)	0,1493	0,1275	0,1200	0,1156	0,1023	0,0909

La perméabilité mesurée à V= 30 L, d'une valeur de $0,0909 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$, est très faible. Elle est similaire à celle obtenue lors de la troisième phase de filtration du cycle 1, ce qui confirme que les membranes sont colmatées.

Une telle baisse de perméabilité indique une perte significative de performance hydraulique du module, rendant nécessaire la mise en œuvre d'un rétro lavage avant toute réutilisation. La figure 28 illustre cette évolution et permet d'évaluer de manière comparative la perméabilité au cours des différentes étapes de filtration du cycle.

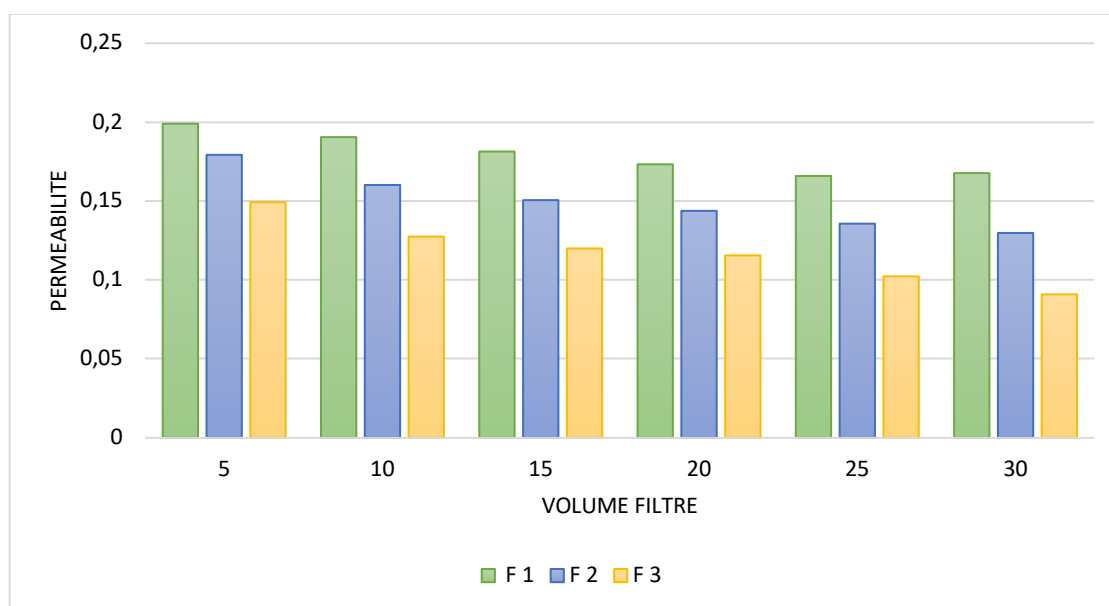


Figure 28: Évolution des perméabilités du deuxième cycle

Les valeurs de perméabilité obtenues lors de la première phase de filtration lors du cycle 1 et cycle 2 sont très similaires. Une évolution comparable de la perméabilité en fonction du volume d'eau filtré et de l'ordre des filtrations a également été observée dans ce cycle. Ces similitudes confirment l'efficacité du lavage effectué après le premier cycle, qui a permis de restaurer les performances initiales du module de filtration.

De manière cohérente, un nouveau lavage, sous forme de rétro lavage, a été réalisé après la troisième phase de filtration du cycle 2 afin de préserver la performance des membranes pour un cycle ultérieur. Après treize (13) séquences de rétro lavage (BW), la turbidité de l'eau de lavage est descendue à 0 NTU, indiquant que la quasi-totalité des particules retenues par les membranes avait été évacuée du module. Pour confirmer l'efficacité du nettoyage complet, deux séquences supplémentaires de rétro lavage ont été effectuées, lesquelles ont également donné une turbidité nulle. Cela confirme l'efficacité du processus de nettoyage.

Par ailleurs, les paramètres physico-chimiques tels que la conductivité électrique, la salinité, les solides dissous totaux (TDS), la température et le pH n'ont montré que très peu de variations entre le premier et le deuxième cycle. Ces résultats suggèrent que le procédé de filtration par le système ORISA n'a pas d'impact significatif sur ces paramètres. Les résultats détaillés concernant ces paramètres pour les cycles 3 et 4 sont présentés en annexes 3.

III.2.3. Résultats pour le cycle 3

Trois phases de filtration ont été réalisées après le rétro lavage du cycle 2, dans les mêmes conditions opératoires que celles appliquées lors des cycles précédents. L'objectif principal de cette étape est d'établir une comparaison entre les résultats obtenus pour chaque phase de filtration du cycle 3 et ceux correspondant aux phases de filtrations de même ordre du cycle 1. Cette approche permet d'évaluer l'efficacité du rétro lavage en analysant la capacité du module à retrouver ses performances initiales en termes de perméabilité et de qualité de perméat.

❖ Résultats de la filtration 1

Les tableaux 34 et 35 représentent respectivement les résultats des paramètres caractéristiques des membranes et l'évolution de la turbidité dans l'eau brute.

Tableau 34: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 1 de C3

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
Temps (min)	18	19	21	23	25	27
Turb. (NTU)	0	0	0	0	0	0
Q_p (L/h)	16,667	15,773	14,286	13,055	12,019	11,111
J_p (m/h)	0,0298	0,0282	0,0255	0,0233	0,0215	0,0198
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L_p (m/h/bar)	0,1990	0,1936	0,1829	0,1746	0,1683	0,1633

La durée de filtration des 5 premiers litres s'est révélée comparable à celle observée lors de la première filtration du cycle 1. Les débits de perméat ainsi que les valeurs de perméabilité des membranes ont été retrouvés, ce qui confirme l'efficacité persistante du rétro-lavage après le cycle 2. De plus, la valeur de la perméabilité mesurée à V=30 L est restée supérieure à celle caractérisant le colmatage, justifiant ainsi la mise en œuvre d'une seconde phase de filtration au cours de ce même cycle.

Tableau 35: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	14,35	16	18	20	26,7	33,7	57,5

Comme dans tous les tableaux donnant l'évolution de la turbidité dans l'eau brute, on note dans ce tableau 35 une augmentation progressive de la turbidité favorisée par le phénomène de décantation.

❖ Résultats de la filtration 2

Le perméat issu de la première phase filtration a été mélangé à l'eau résiduelle (restant dans le réservoir) pour constituer l'eau brute utilisée lors de la deuxième phase de filtration. La turbidité du perméat, ainsi que les valeurs des débits de perméat et des perméabilités membranaires, confirment l'efficacité du second rétro-lavage. Les résultats obtenus sont très proches de ceux observés lors de la deuxième filtration des cycles 1 et 2. Ces observations suggèrent que les membranes conservent de bonnes performances après le deuxième rétro-lavage notamment selon l'abattement de la turbidité. Les tableaux 36 et 37 présentent respectivement les résultats relatifs au perméat obtenus lors de cette seconde filtration du cycle 3 et l'évolution de la turbidité dans l'eau brute.

Tableau 36: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 2 de C3

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
Temps (min)	23	23,667	25,167	27,667	30	33,25
Turbo.(NTU)	0	0	0	0	0	0
Q _p (L/h)	13,055	12,690	11,933	10,846	10	9,0252
J _p (m/h)	0,0233	0,0227	0,0213	0,0194	0,0179	0,0161
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L _p (m/h/bar)	0,1559	0,1557	0,1527	0,1451	0,1400	0,1326

Tableau 37: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	10	12,75	15,91	20	27,1	30,6	45

La valeur de la perméabilité mesurée à V=30 L, soit $0,1326 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$, lors de la deuxième phase de filtration indique que les membranes ne présentent pas encore de signes de colmatage. Une troisième phase de filtration a donc été réalisée au cours de ce cycle 3, en utilisant comme eau brute le perméat issu de la deuxième filtration et l'eau restante dans le réservoir.

❖ **Résultats de la filtration 3**

Les résultats correspondants aux paramètres caractéristiques des membranes pour cette phase de filtration sont présentés dans le tableau 38.

Tableau 38: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 3 de C3

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
temps (min)	24,567	27,167	31,333	34,167	39	45
Turb.(NTU)	0	0	0	0	0	0
Q_p (L/h)	12,225	11,037	9,579	8,787	7,692	6,667
J_p (m/h)	0,0218	0,0197	0,0171	0,0157	0,0137	0,0119
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L_p (m/h/bar)	0,1460	0,1355	0,1226	0,1175	0,1077	0,097

La figure 29 illustre l'évolution des perméabilités de ce cycle 3.

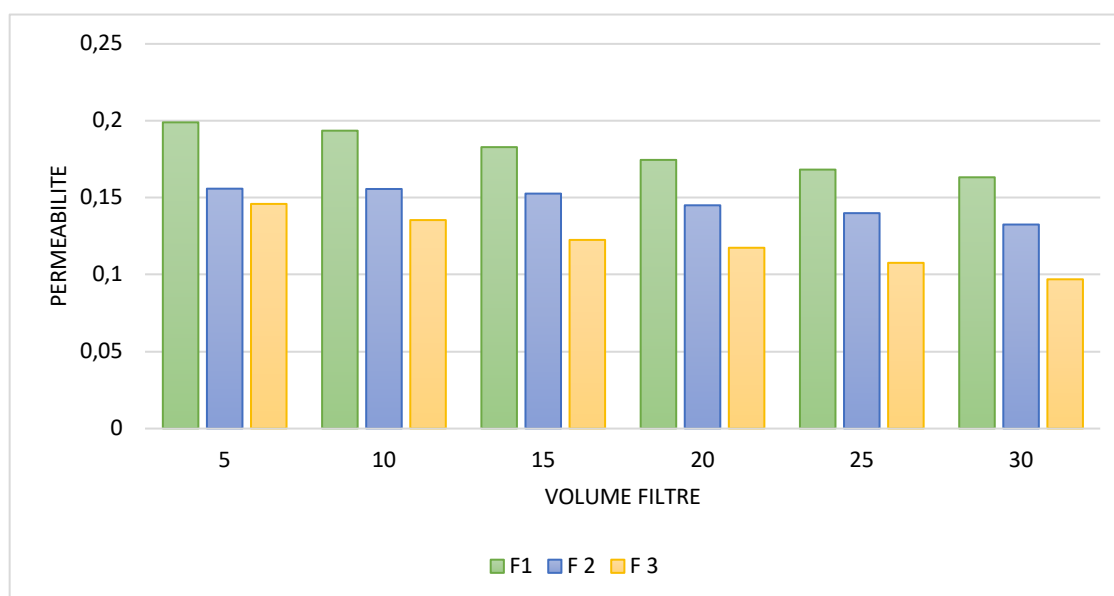


Figure 29: Évolution des perméabilités du troisième cycle

Avec des résultats comparables à ceux obtenus lors des deux cycles précédents, le rétro-lavage s'avère efficace pour maintenir les performances des membranes, leur permettant ainsi de conserver leurs propriétés fonctionnelles. Le tableau 39 donne l'évolution de la turbidité dans l'eau brute.

Tableau 39: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	12,15	13,75	14	17	28	35,5	43

La turbidité augmente progressivement au cours de la filtration à cause de l'accumulation des MES dans le réservoir. La valeur de perméabilité de $0,097 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ (tableau 39), correspondant au seuil de colmatage des membranes, justifie la réalisation d'un nouveau rétro-lavage. Les résultats de cette opération sont présentés dans le tableau 40.

Tableau 40: Nombre de rétro lavage et la turbidité de chaque lavage après le cycle 3

Nbr.Bw	BW1	BW2	BW3	BW4	BW5	BW6	BW7	BW8	BW9
Turb. (NTU)	140	104	83,9	46,6	42	37,1	15,43	9,75	7,98

Nbr.Bw	BW10	BW11	BW12	BW13	BW14	BW15
Turb. (NTU)	3,5	2,93	1,49	0,96	0	0

À la suite de ce troisième cycle de rétro-lavage, qui semble être la dernière intervention efficace dans ces conditions. Un quatrième cycle de filtration a été entrepris afin de confirmer ou non cette hypothèse. Il faut noter que 14 cycles de rétro-lavage ont été nécessaires pour avoir une turbidité nulle contre 13 cycles rétro-lavage lors du cycle 2.

III.2.4. Résultats pour le cycle 4

❖ Résultats de la filtration 1

Après le troisième lavage, un quatrième cycle a été effectué dont ses résultats des paramètres caractéristiques des membranes sont consignés dans le tableau 41.

Tableau 41: Calculs des paramètres caractéristiques de membrane pour la filtration 1 de C4

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
temps (min)	21,15	22,75	24	27	28,5	31
Turb. (NTU)	0	0	0	0	0	0
Q_p (L/h)	14,124	13,192	12,5	11,111	10,526	9,689
J_p (m/h)	0,0252	0,0235	0,02232	0,0198	0,01879	0,0173
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L_p (m/h/bar)	0,1687	0,1619	0,1600	0,1486	0,1474	0,1422

La durée de filtration des 5 premiers litres au cours du quatrième cycle s'est avérée nettement plus longue que celle observée pour les volumes des cycles précédents. Bien que la turbidité des perméats reste nulle pour chaque volume de 5 litres filtrés, ces résultats suggèrent que l'efficacité du rétro-lavage atteint ses limites. En effet, les performances de cette première filtration du cycle 4 sont plus proches de celles observées lors des deuxième phases de filtrations des cycles antérieurs, plutôt que des premières. Cette observation est cohérente avec l'hypothèse selon laquelle le rétro-lavage ne permet pas toujours d'éliminer l'ensemble des particules accumulées sur les membranes. Des colmatages de nature organique, biologique ou mixte peuvent persister. Le traitement de ces types de colmatage nécessite un nettoyage chimique, généralement à l'aide de solutions détergentes ou oxydantes (le chlore étant l'agent le plus couramment utilisé). Il est donc essentiel d'identifier la nature du colmatage avant de procéder à un lavage chimique, afin de garantir l'efficacité du traitement.

Le tableau 42 présente l'évolution de la turbidité de l'eau brute au cours de ce cycle.

Tableau 42: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	15,5	17,12	18	20,6	23	33,5	47,8

Même remarque que les cycles précédents, la turbidité dans l'eau brute augmente.

❖ Résultats de la filtration 2

Après la première phase de filtration du cycle 4, les résultats semblent indiquer que le rétro-lavage a atteint ses limites d'efficacité. Une deuxième filtration a donc été réalisée afin de confirmer éventuellement cette hypothèse.

Tableau 43: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 2 de C4

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
temps (min)	23,167	24	27	29,167	32	37
Turb. (NTU)	0	0	0	0	0	0
Q_p (L/h)	12,953	12,5	11,111	10,288	9,380	8,166
J_p (m/h)	0,0231	0,0223	0,0198	0,0183	0,0167	0,0145
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L_p (m/h/bar)	0,1547	0,1534	0,1422	0,1376	0,1313	0,1192

Les résultats de la deuxième phase de filtration du cycle 4 présentent une différence par rapport à ceux des deuxièmes phases de filtrations des cycles précédents. Ces résultats confirment ainsi la limite de l'efficacité du rétro-lavage.

❖ Résultats de la filtration 3

Tous les cycles ont été réalisés avec trois phases de filtration, la valeur de la perméabilité à $V=30$ L indiquant un colmatage du module ORISA est estimée à environ $0,09 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$. Ce qui justifie la réalisation de cette troisième phase de filtration même si que les membranes perdent déjà leurs performances. Les résultats des paramètres caractéristiques sont donnés par le tableau 44

Tableau 44: Calculs des paramètres caractéristiques des membranes pour la filtration 3 de C4

Volume (L)	5	10	15	20	25	30
temps (min)	28	29,833	31	35	39	46
Turb.(NTU)	0	0	0	0	0	0
Q_p (L/h)	10,729	10,060	9,631	8,576	7,692	6,527
J_p (m/h)	0,0191	0,0179	0,0172	0,0153	0,0137	0,0116
ΔP (bar)	0,1495	0,1455	0,1395	0,1335	0,1275	0,1215
L_p (m/h/bar)	0,1282	0,1234	0,1233	0,1147	0,1077	0,0959

La valeur de $0,0959 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ a été obtenue à $V=30$ L, ce qui montre que, même après avoir atteint la limite de l'efficacité du rétro-lavage, les membranes conservent la valeur de leur perméabilité correspondant au colmatage. La figure 30 illustre l'ensemble des résultats de la perméabilité pour les différentes phases de filtrations du cycle 4 et le tableau 44 les évolutions de la turbidité.

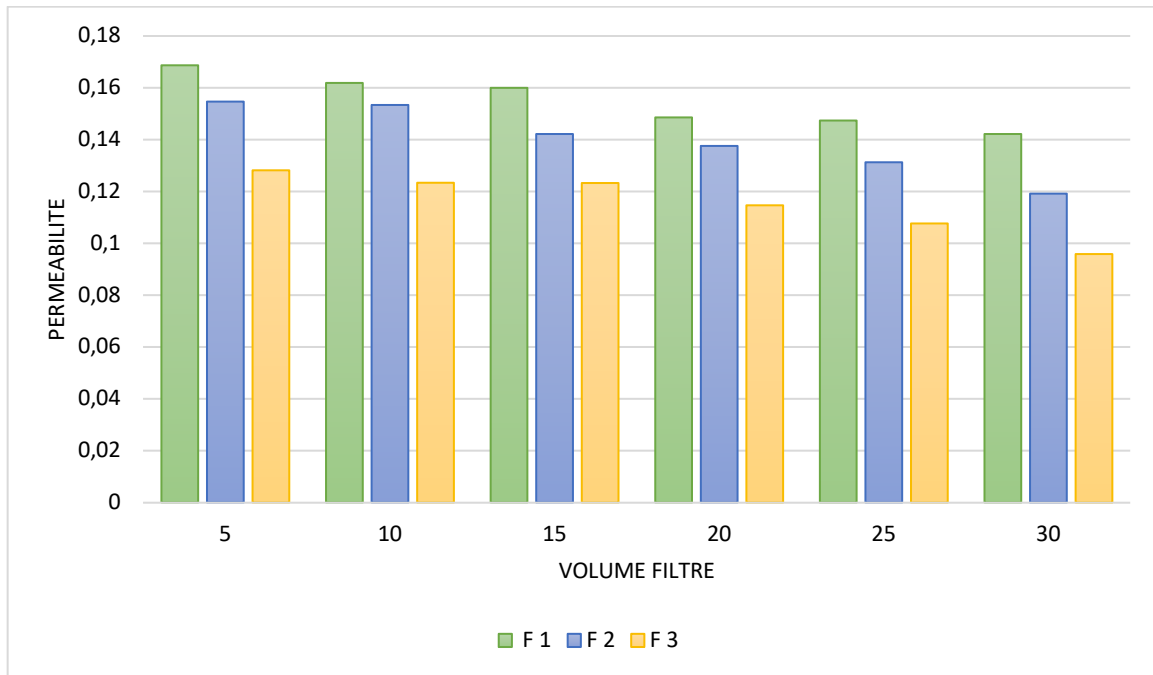


Figure 30: Diagramme des perméabilités du quatrième cycle

Tableau 44: Évolution de la turbidité dans l'eau brute

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	9,7	11,5	12,9	17,4	25,3	35,4	39

III.2.5. Résultats des phases de filtration à V= 30 pour chaque cycle

Pour évaluer correctement l'évolution de la perméabilité des membranes entre deux phases de filtration d'un même cycle ou entre deux cycles différents, la figure 31 a été réalisée afin de comparer ces valeurs.

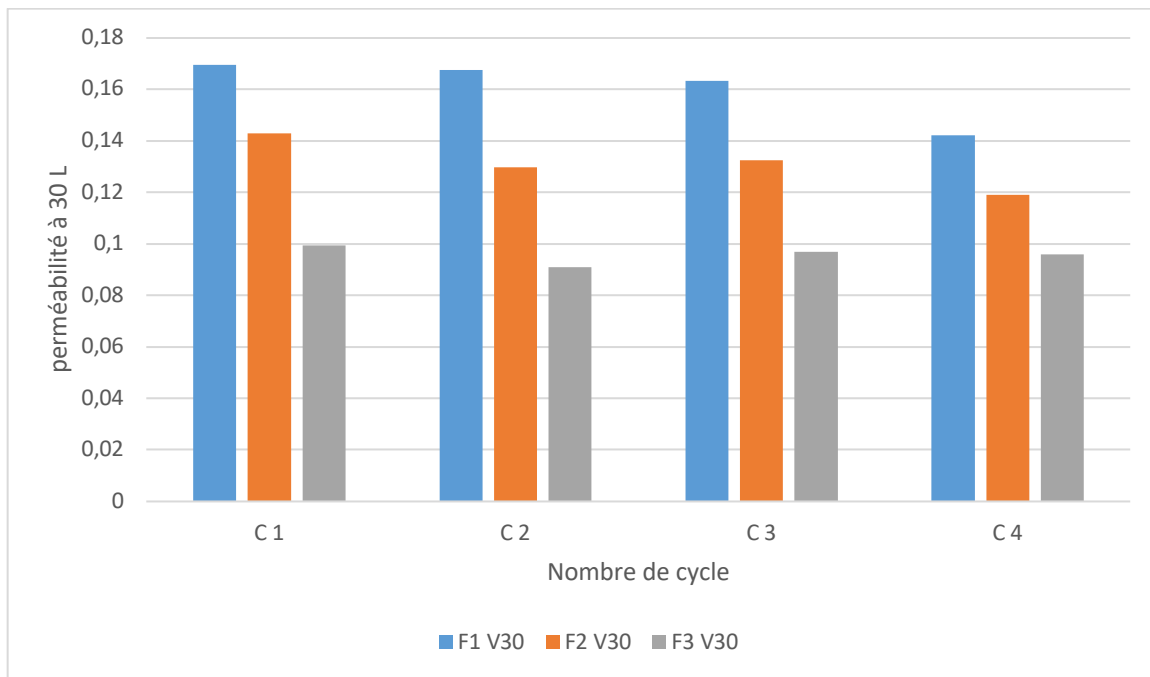


Figure 31: Évolution des perméabilités des membranes à $V=30$ pour chaque cycle

Ce diagramme présente les perméabilités des filtrations (F1, F2 et F3) à $V = 30$ L pour chaque cycle. Dans un cycle donné, la perméabilité diminue à mesure que l'on filtre chaque volume de 30 L. Les valeurs de la perméabilité obtenues pour les phases de filtration F1, F2, F3 sont pratiquement respectivement identiques pour les cycles C1, C2 et C3. Cela montre que les rétro-lavages (1 et 2) sont efficaces, permettant de récupérer les valeurs initiales de perméabilité. En revanche, les valeurs de perméabilités du cycle 4 présentent une différence significative par rapport aux 3 premiers cycles, ce qui indique que le rétro-lavage atteint sa limite d'efficacité à partir du cycle 3. Une observation importante concerne la stabilité des valeurs de la perméabilité pour la phase de filtration F3 à $V=30$ L quel que soit le cycle, ce qui peut être interprétée comme la valeur limite de perméabilité due au colmatage des membranes.

Ces résultats confirment l'hypothèse formulée lors du cycle 3 et offrent une bonne appréciation du module. De plus, un calcul de la valeur moyenne des perméabilités pour chaque cycle a été effectué, afin de réaliser une étude comparative de la variation de la perméabilité entre les cycles.

III.2.6. Résultats de la moyenne des perméabilités dans un cycle

Le calcul de la moyenne des perméabilités a été effectué pour chaque phase de filtration et pour chaque cycle. Pour chaque cycle, la moyenne a été calculée sur l'intervalle de volume filtré allant de $V = 5$ L à $V = 30$ L pour les filtrations F1, F2 et F3. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 32.

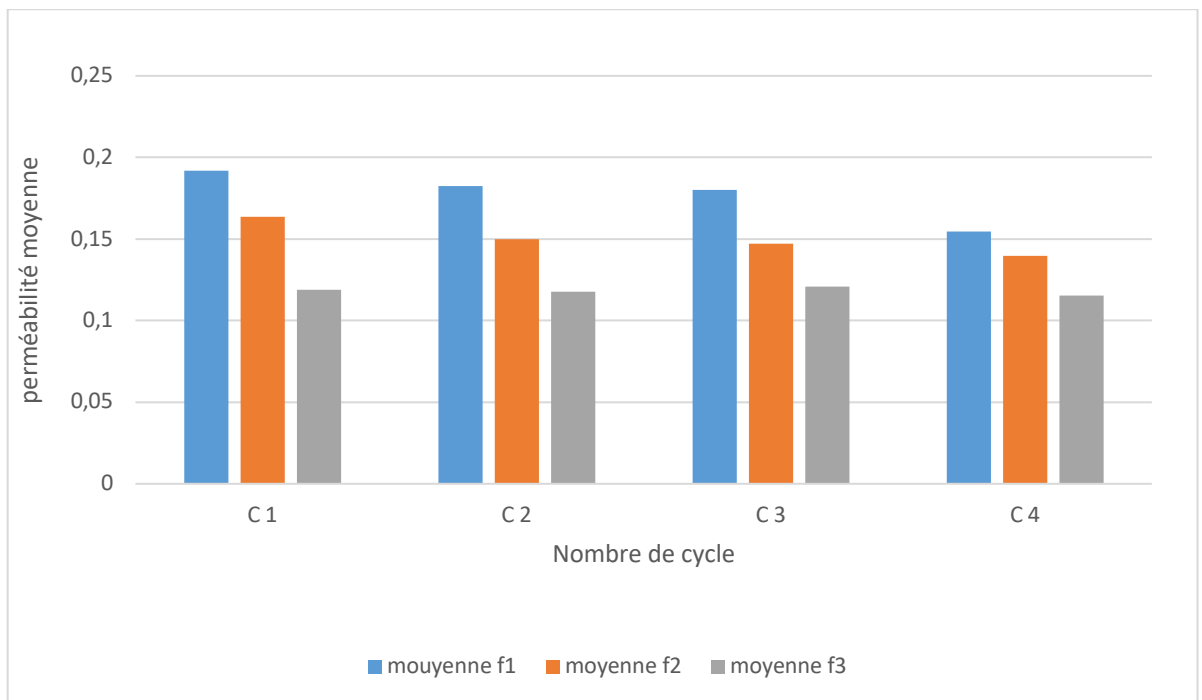


Figure 32: Évolution de la perméabilité moyenne par phase de filtration et par cycle.

Pour tous les 4 cycles la perméabilité diminue nettement lors d'un même cycle en fonction des phases de filtration (F1, F2, F3). Entre deux cycles, on observe également une légère diminution de la perméabilité moyenne pour la même phase de filtration. Cela confirme que la perméabilité diminue non seulement avec le volume filtré, mais également avec la répétition des cycles successifs de filtration. Cette évolution de la moyenne s'explique par l'accumulation progressive des MES à la surfaces des membranes qui entraine la diminution de la perméabilité.

Par ailleurs, la moyenne de la perméabilité lors de la troisième phase de filtration (F3) reste relativement constante d'un cycle à un autre. Ce comportement s'explique par le fait que chaque cycle comprend exactement trois phases filtrations, et que, dès la troisième phase de filtration, les membranes commencent à atteindre leur seuil limite de perméabilité lié au colmatage. Ainsi, la perméabilité tend à se stabiliser autour d'une valeur limite. Cette tendance est bien illustrée par le comportement des barres représentant les moyennes de F3 dans la figure 32.

III.2.7. Moyennes des perméabilités en fonction du volume filtré

La moyenne de la perméabilité a été calculée, pour chaque cycle, en considérant les trois filtrations réalisées sous une même pression et pour un même volume filtré. Les résultats ainsi obtenus ont permis de construire la figure 33.

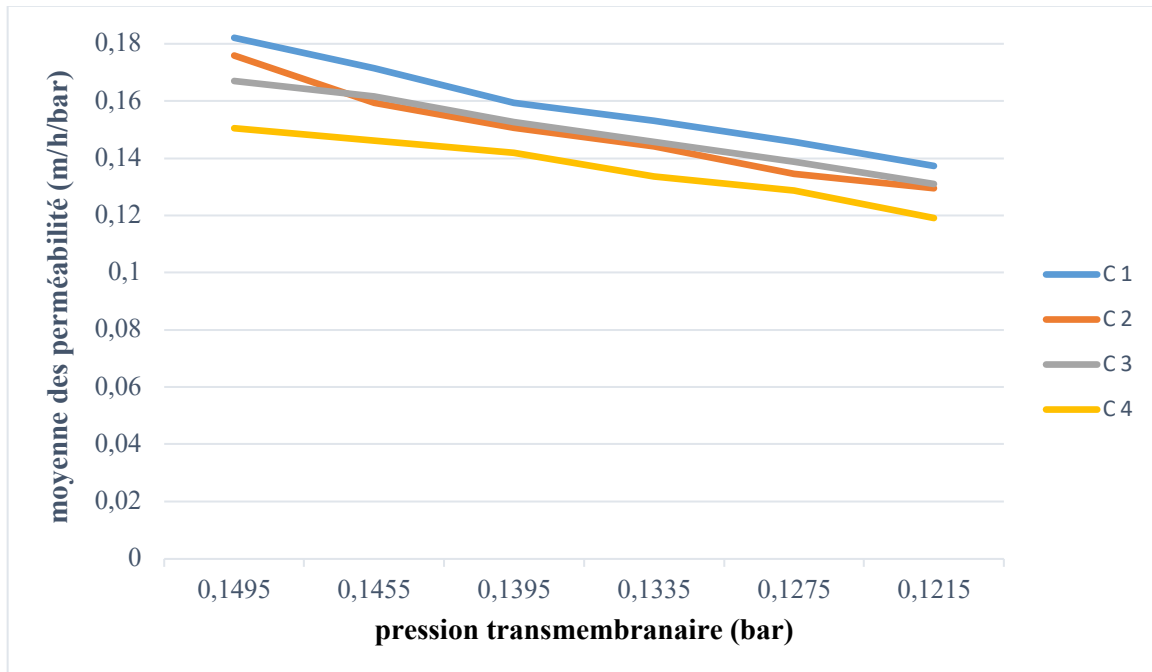


Figure 33: Évolution de la moyenne de la perméabilité par volume filtré et par cycle

Ce diagramme illustre l'évolution perméabilité moyenne pour chaque volume de 5 L filtré, en fonction de la pression, pour chaque cycle. Dans le cadre de cette expérience réalisée à pression variable, il est nécessaire d'effectuer un cycle complet de 30 L pour maintenir une pression constante lors de la filtration de chaque volume de 5 L. La perméabilité moyenne diminue au fur et à mesure de la baisse progressive de la pression au cours du temps. La pression étant déterminée par la hauteur de la colonne d'eau, toute diminution de cette pression se traduit par une baisse du niveau d'eau dans le réservoir au cours de la filtration. Ce phénomène entraîne une augmentation du volume d'eau filtrée dans le temps, mais aussi une accumulation progressive de particules dans le tuyau d'alimentation et à l'intérieur du module au fil du cycle. Cette accumulation contribue à la diminution de la perméabilité moyenne pour chaque volume de 5 L filtré.

Par ailleurs, les résultats obtenus avec le module ORISA ont montré une efficacité remarquable. L'élimination de la turbidité des eaux brutes a été totale, atteignant un taux d'élimination de 100 %. L'eau filtrée, présentant une turbidité nulle, semble exempte de matières en suspension,

de particules organiques dissoutes et, potentiellement, de nombreux autres contaminants, notamment microbiologiques. Ainsi une analyse microbiologique a été réalisée afin de confirmer la potabilisation des eaux issues de la filtration par le module ORISA.

III.3. Résultats et interprétations des analyses microbiologiques

L'échantillon d'eau brute prélevée à la source de Rue 54 conformément au protocole d'échantillonnage microbiologique, a révélé la présence de bactéries coliformes ainsi que de bactéries entérocoques.

Les résultats des analyses effectuées sur l'échantillon avant et après la filtration sont présentés dans le tableau 45.

Tableau 45: Résultats de l'analyse microbiologique de l'échantillon par le module ORISA

Sources	Eau brute	Eau filtrée
Germes Testés	UFC/100 ml	UFC/100 ml
Coliforme Totaux	> 16	0
Entérocoque	> 100	0
Escherichia Coli	> 16	0

L'analyse des résultats de l'eau brute (avant filtration) montre la présence des bactéries fécales. Cela indique une contamination microbiologique importante, ce qui est typique d'une eau non traitée ou exposée à des sources de pollution fécale non conforme aux recommandations de l'OMS en matière d'eau potable.

L'analyse des résultats de l'eau filtrée avec le module ORISA montrent une absence totale de bactéries.

Tous ces résultats confirment que le système de filtration ORISA utilisé est très efficace, puisqu'il a complètement éliminé les bactéries pathogènes détectées dans l'eau brute.

L'eau filtrée est microbiologiquement potable respectant ainsi les directives de l'OMS concernant l'eau destinée à la consommation humaine. L'eau brute présente un risque sanitaire élevé si elle est consommée sans traitement, mais ce risque est totalement éliminé après filtration en utilisant le module préalable ORISA.

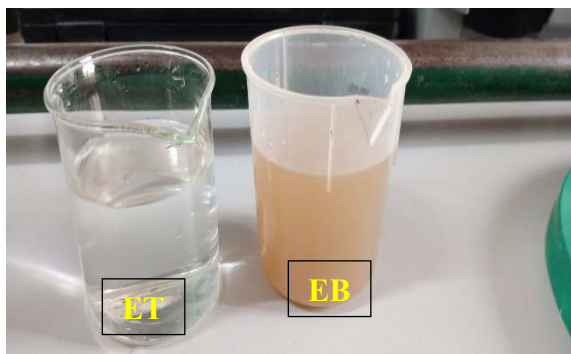
III.4. Étude comparative avec d'autres résultats

❖ Selon la turbidité de l'eau et la qualité microbiologique de l'eau

La filtration à l'aide du module ORISA permet une élimination totale de la turbidité, avec un taux d'abattement de 100 %, ainsi qu'une production d'eau traitée claire, sans coloration visible

(figure 34). De plus, l'eau filtrée est microbiologiquement potable. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Arona Coulibaly et al [20] sur une étude intitulée «Adaptation aux énergies renouvelables d'un dispositif pilote de microfiltration pour le traitement des eaux de surface dans les petites communautés rurales au Mali». Dans cette recherche, un dispositif de type Pall Aria AX2 a été utilisé pour la potabilisation d'une eau brute (figure 34).

Cependant, l'utilisation du module ORISA présente un avantage considérable pour les milieux ruraux, car contrairement à l'unité Pall Aria qui nécessite une alimentation électrique, le système ORISA fonctionne de manière gravitaire, sans besoin d'énergie externe.



Eaux issues du traitement avec ORISA



Eaux issues du traitement de Pall Aria AX2

Figure 34: Étude comparative de deux systèmes de traitement

Les résultats des analyses de la qualité microbiologique de l'eau avant et après traitement à travers les modules Pall Aria AX2 sont consignés dans le tableau 46 ci-dessous

Tableau 46: Résultats d'analyses microbiologiques avant et après filtration par Pall Aria

Date	Échantillons	C.T.H	ENT	E.C	C.T
23/03/2010	EB	174	32	12	528
	EF	0	0	0	0
16/04/2010	EB	860	40	1500	6000
	EF	0	0	0	235
05/05/2010	EB	1555	545	70	3250
	EF	0	0	0	2

❖ **Selon l'efficacité de la réduction de la turbidité**

Les résultats obtenus peuvent également être comparés à ceux de Zogo et al.[21], publiés dans l'article intitulé « Élimination de la couleur et de la turbidité d'une eau de surface par coagulation-floculation au sulfate d'aluminium ». Dans cette étude, les auteurs ont eu recours

à des méthodes classiques de traitement de l'eau, telles que la coagulation floculation, pour réduire la turbidité et la couleur des eaux de surface. Les taux d'élimination obtenus variaient de 15 % à 80 %, selon les conditions de traitement.

En comparaison, le système ORISA s'avère nettement plus efficace, atteignant un taux d'élimination de 100 % pour la turbidité et une eau filtrée totalement claire. Cette performance supérieure, associée à un fonctionnement simple et sans apport énergétique encore moins de réactifs chimique, fait du module ORISA une solution particulièrement adaptée aux contextes ruraux et aux zones à ressources limitées.

Conclusion

Dans la région de Ziguinchor, l'eau de puits constitue une ressource importante pour les populations locales mais elle est souvent soumise à diverses formes de contamination, tant physico-chimique que microbiologique. Ces altérations compromettent directement sa potabilité et donc la santé des populations dont c'est quasiment la seule source d'approvisionnement.

Ce travail a permis de mettre en évidence l'efficacité du procédé d'ultrafiltration avec le module ORISA dans l'élimination de la turbidité de l'eau de puits, paramètre essentiel de la qualité de l'eau. À travers une étude expérimentale, il a été démontré que cette technologie peut significativement améliorer la transparence de l'eau avec un abattement de 100 % de la turbidité et contribuer à une meilleure sécurité sanitaire. Ce module permet une production d'eau microbiologiquement potable. Les résultats ont montré une élimination totale de coliformes totaux, d'entérocoques et E. Coli après le passage à travers le module ORISA. De plus les résultats obtenus permettent d'évaluer l'efficacité des performances hydrauliques des membranes dans une phase de filtration d'un cycle ou entre deux cycles de filtration. Au cours d'un cycle, la perméabilité diminue progressivement en fonction du volume d'eau filtré ainsi que du nombre de phases de filtration. Entre deux cycles consécutifs, les variations de perméabilité observées pour une même phase de filtration sont globalement similaires. Dans ces conditions, les membranes peuvent supporter jusqu'à trois phases de filtration avant d'atteindre un état de colmatage. Ainsi, chaque cycle de filtration est constitué de trois phases, et à la troisième phase, pour un volume filtré de 30 L, la perméabilité la plus faible atteinte est estimée à environ 0,09 m/h/bar, indiquant ainsi le début du colmatage des membranes. Quatre cycles de filtration ont été réalisés, au terme desquels l'efficacité du rétro-lavage commence à diminuer significativement.

Toutefois, bien que prometteuse, l'ultrafiltration nécessite une maîtrise technique, une maintenance régulière et un accès à des équipements adaptés, ce qui peut représenter un défi dans certaines zones rurales. Il est donc essentiel de combiner ces technologies avec des mesures d'éducation à l'hygiène, de protection des sources et de surveillance continue de la qualité de l'eau.

En somme, ce travail souligne l'importance d'investir dans des solutions de traitement de l'eau simples, efficaces et adaptées au contexte local pour garantir un accès durable à une eau saine.

Les résultats obtenus ouvrent la voie à des perspectives telles qu'une application à plus grande échelle, notamment dans les zones à forte vulnérabilité hydrique, une étude plus complète sur la reproductibilité des cycles de colmatage mais aussi un protocole de nettoyage chimique adapté lorsque les rétro-lavage ne permettent plus de retrouver la perméabilité des membranes. Des séries de mesures sur la qualité microbiologique du perméat doivent également être effectuées afin de valider l'efficacité de ces systèmes quant à leur capacité à produire de l'eau potable.

Références bibliographie

- [1] M. D. Afonso, J. O. Jaber, M. S. Mohsen. Brackish groundwater treatment by reverse osmosis in Jordan. *Desalination* 164 (2004) 157-171.
- [2] A. Maurel. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et d'autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. *Technique et Documentation*, 2^{ème} édition (2006) : 286p.
- [3] Baker, R. W. (2012). *Membrane Technology and Applications* (3rd ed.). Wiley.
- [4] M. Pontié, A. Thekkedath, K. Kecili, H. Habarou, H. Suty, J.P. Croué. Membrane autopsy as a sustainable management of fouling phenomena occurring in MF, UF NF processes. *Desalination* 204 (2007): 155-169.
- [5] B. Van der Bruggen, M. Mänttari, M. Nyström. Drawbacks of applying nanofiltration and how to avoid them : A review. *Sep. & Purif. Tech.* 63 (2008) 251-263.
- [6] A. Al-moudi, R. W. Lovitt. Fouling strategies and the cleaning system of NF membranes and factors affecting efficiency. *J. Memb. Sci.* 303 (2007); 4-28.
- [7] S. Lee, J. Kim, C. H. Lee. Analysis of CaSO₄ scale formation mechanism in various nanofiltration modules. *J. Memb. Sci.* 163 (1999) : 63-74.
- [8] C. Y. Tang, Y. N. Kwon, J. O. Leckie. The rôle of foulant-foulant electrostatic interaction on limiting flux for RO and NF membranes during humic acid fouling- Theoretical basis, experimental evidence, and AFM interaction force measurement. *J. Memb. Sci.* 326 (2009): 526- 532.
- [9] N. Hilal, H. Al-Zoubi, N.A. Darwish, A.W. Mohamed, M. A. Arabi. A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy. *Desalination* 170 (2004) : 281-308.
- [10] Dupont, L., Ndiaye, M., & Fall, A. (2019). Optimisation des protocoles de nettoyage des membranes de filtration dans le traitement de l'eau potable. *Revue des Sciences de l'Eau*, 32(2), 115-128.
- [11] Hydranautics. (2006). *Membrane Cleaning Guide*. Nitto Denko Corporation. Disponible sur : <https://www.membranes.com>
- [12] Al-Amoudi, A. (2010). Factors affecting natural organic matter (NOM) and scaling fouling in NF membranes: A review. *Desalination*, 259(1-3), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.030>
- [13] A. I. Schäfer, A. G. Fane, T. D. Waite. *Nanofiltration - principles and applications*. 1^{ère} édition (2005) : 560p.

- [14] M. Pontié et coll. Les techniques séparatives à membranes. Théorie, applications et perspectives. (2001) : 212p
- [15] M. D. Diouf ; Mémoire de Master ; Dessalement De L'eau Du Fleuve Casamance Par La Technique Membranaire D'osmose Inverse ; Page 35.
- [16] I. M.El-Azizi, A. A. M. Omran. Design criteria of 10,000 m³/d SWRO desalination plant of Tajura, Libya. *Desalination* 153 (2002) 273-279.
- [17] J. P. Brun. Procédés de séparation par membranes. Transport, techniques membranaires, applications. Masson, (1989).
- [18] Organisation Mondiale de la Santé (OMS). (2017). Lignes directrices pour la qualité de l'eau de boisson (4^e édition). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- [19] OMS (2018). Global overview of national regulations and standards for drinking-water quality (2^e éd.). Organisation mondiale de la Santé, Genève. ISBN : 978 92 4 002364 2.
- [20] A. Coulibaly, M. S. Diarra , I. Dipama , A. Tolofoudye, S. Sow , A. Doucoure , M. Farcy. Adaptation aux énergies renouvelables d'un dispositif pilote de microfiltration pour le traitement des eaux de surface dans les petites communautés rurales au Mali.
- [21] D. Zogo, , L. M. Bawa, , H. H. Soclo, , & D. Atchekpe, (2010). Élimination de la couleur et de la turbidité d'une eau de surface par coagulation-floculation au sulfate d'aluminium: cas de la retenue d'eau de l'Okpara en République du Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(5).

Webographie

- [I] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/procedes-de-traitement-des-eaux-potables-industrielles-et-urbaines-42318210/filtration-membranaire-oi-nf-uf-mf-j2794/principe-general-de-la-filtration-membranaire-j2794v2niv10001.html>
- [II] <http://thesis.univ-biskra.dz/1283/4/Chapitre1.pdf>
- [III] https://www.patricebacchin.fr/cours/membrane/co/11_gen.html
- [IV] https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-fonctionnement-de-la-filtration-frontale-et-de-la-filtration-tangentielle_fig24_37243765
- [V] <http://www.fndae.fr/documentation/PDF/fndae14.pdf>
- [VI] <https://tpeorbleu.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/03/electrodialyse-2.jpg>
- [VII] <https://www.researchgate.net/publication/327881715/figure/fig3/AS:674945663238145@1537930994858/Classement-des-procedes-membranaires-selon-la-taille-des-molecules-a-separer.png>

ANNEXES

Annexe 1 : suite de la description de l'appareil ORISA

❖ Partie supérieure de l'appareil

Les touches de réglage, situées sur la partie supérieure du module ORISA, permettent de sélectionner le mode de fonctionnement souhaité en fonction de l'objectif visé. Voici les principales configurations possibles :

- Filtration : activer les touches PUMP et ON simultanément.
- Pressurisation de l'eau avant le rétro-lavage : positionner les touches sur PUMP et OFF.
- Rétro-lavage : sélectionner les touches WASH et OFF.

Ces réglages permettent un contrôle précis et flexible de l'appareil, en facilitant à la fois la filtration et l'entretien de la membrane.



Annexes 2 : résultats des analyses physico-chimiques après filtration par la méthode manuelle

Annexe 2a : résultats de la date du 09/12/2024

Sources Paramètres	Rond-point	Rue 54	Santhiaba 1	Santhiaba 2
cond. (μS)	465-469	1134-1140	1886-1900	2800-2820
pH	6,93-7,07	6,96-7,37	6,89-7,09	7,09-7,2
Salinité (ppm)	220-240	568-600	963-1000	1702-1850
TDS (mg/l)	324-354	805-850	1341-1787	2000-2060
T °C	27,6	27	26-27	27

Annexe 2b : résultat de la date du 17/12/2024

Sources Paramètres	Rond-point	Rue 54	Santhiaba 1	Santhiaba 2
cond. (µS)	560-565	1273-1333	1900-1990	2600-2660
pH	6,97-699	7,12-7,37	7,59-7,79	7,25-7,53
Salinité (ppm)	240-275	655-686	1000-1500	1508-1540
TDS (mg/l)	354-408	900-950	1787-1200	1894-1899
T °C	27,1-27,5	27-27,12	27,2-27,9	27

Annexe 2c : résultat de la date du 04/02/2025

Sources Paramètres	Rond-point	Rue 54	Santhiaba 1	Santhiaba 2
cond. (µS)	560-565	1273-1333	1900-1990	2600-2660
pH	6,97-699	7,12-7,37	7,59-7,79	7,25-7,53
Salinité (ppm)	240-275	655-686	1000-1500	1508-1540
TDS (mg/l)	354-408	900-950	1787-1200	1894-1899
T °C	27,1-27,5	27-27,12	27,2-27,9	27

Annexes 3 : résultats des analyses physico-chimiques après la filtration de la méthode gravitaire

Annexes 3a : résultats du cycle 3

❖ Pour la F1 de C3

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Cond (µS)	1156	1156	1159	1151	1154	1152	1159
TDS (mg/L)	821	821	823	818	820	818	823
Salinité (ppm)	581	581	583	579	580	579	583
pH	7,65	7,66	7,7	7,64	7,8	7,9	7,7
Temp °C	26,5	26,6	26,7	26,3	27,2	27,3	27,8

❖ Pour la F2 de C3

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Cond (µS)	1152	1155	1155	1155	1156	1156	1156
TDS (mg/L)	818	820	820	820	821	821	821
Salinité (ppm)	579	581	581	581	582	582	582
pH	7,33	7,44	7,34	7,34	7,36	7,36	7,48
Temp °C	26,6	26,3	26,9	27	27	27,3	27,4

❖ Pour la F3 de C3

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Cond (µS)	1143	1149	1151	1161	1161	1168	1177
TDS (mg/L)	812	816	818	824	824	829	835
Salinité (ppm)	573	578	578	584	584	588	593
pH	7,1	7,9	8	8,3	8,3	8,1	8,1
Temp °C	27,5	27,4	27,7	28,3	28,4	28,3	28,7

Annexes 3b : résultats du cycle 4

❖ Pour la F1 du C4

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Cond (µS)	1149	1148	1148	1150	1151	1152	1152
TDS (mg/L)	816	815	815	816	818	818	818
Salinité (ppm)	577	576	576	577	578	579	579
pH	6,94	6,95	6,98	7	7	7,04	7,01
Temp °C	27,4	27,3	27,2	27,4	27,6	27,7	28,3

❖ Pour la F2 du C4

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Cond (µS)	1137	1139	1139	1140	1141	1141	1141
TDS (mg/L)	806	808	808	809	810	810	810
Salinité (ppm)	570	571	571	572	572	572	572
pH	7,07	7,1	7,17	7,2	7,31	7,3	7,39
Temp °C	27,5	27,7	27,9	28,3	28,4	28,6	28,8

❖ Pour la F3 du C4

Volume filtré (L)	0	5	10	15	20	25	30
Cond (µS)	1147	1142	1142	1142	1142	1142	1143
TDS (mg/L)	815	811	811	811	811	811	812
Salinité (ppm)	576	573	573	573	573	573	574
pH	7,64	7,59	7,52	7,6	7,57	7,50	7,52
Temp °C	27,3	27,2	27,3	27,5	27,7	28	28,1

Annexes 4 : évolution de la turbidité dans l'eau brute

Annexe 4a : dans l'eau brute du cycle 2

❖ Dans l'eau brute pour la F1 du C2

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	7,9	9,1	12,5	12,7	14,75	17,5	21

❖ Dans l'eau brute pour la F2 du C2

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	6,87	7,83	9,95	11,75	13	15	18,75

❖ Dans l'eau brute pour la F3 du C2

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	6,34	7,15	9,2	11,2	15,82	16,8	17

Annexe 4b : dans l'eau brute du cycle 3

❖ Dans l'eau brute pour la F1 du C3

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	14,35	16	18	20	26,7	33,7	57,5

❖ **Dans l'eau brute pour la F2 du C3**

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	13,11	14,75	17,91	20	27,1	32,6	49

❖ **Dans l'eau brute pour la F3 du C3**

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	12,15	13,75	14	17	28	35,5	43

Annexe 4c : dans l'eau brute du cycle 4

❖ **Dans l'eau brute pour la F1 du C4**

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	15,5	17,12	18	20,6	23	33,5	47,8

❖ **Dans l'eau brute pour la F2 du C4**

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	11,75	16,3	17,28	20	27,9	36,4	42,5

❖ **Dans l'eau brute pour la F3 du C4**

Volume (L)	0	5	10	15	20	25	30
Turb. (NTU)	9,7	11,5	12,9	17,4	25,3	35,4	39