

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES

En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER EN GENIE DES PROCEDES
Spécialité : Génie des procédés des matériaux

Thème

**Conception et optimisation d'un système de
filtration rapide pour l'eau de mer : Elaboration de
l'argile expansée et comparaison avec le sable
naturel comme médias filtrants**

Réalisé par :

M^{elle} FAREHA AYA

M^{elle} BENAICHOUBA MERIEM

Promotrice : Dr. DADOU Salima

Co-promotrice : Dr.DJADI Amina

2024/2025

Remerciements

Remerciements

Avant toute chose, nous tenons à remercier Le Tout Puissant, Allah, de nous avoir donné la force, la volonté et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nos remerciements les plus sincères vont ensuite à Madame DADOU.S, notre promotrice, pour son encadrement de qualité, ses précieux conseils et son soutien indéfectible tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nous la remercions pour le temps qu'elle nous a consacré et pour avoir fait preuve de rigueur scientifique qui a grandement contribué à la valorisation de nos travaux.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à Monsieur Mourad, Ingénieur de laboratoire au PV 22, son disponibilité tout au long de cette recherche ont été inestimables. Un grand merci est adressé aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs remarques constructives. Les critiques et suggestions ont permis d'enrichir et d'améliorer la qualité de ce mémoire. Leur investissement et leurs efforts sont très appréciés.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des professeurs du département de Génie des procédés de l'Université Blida 1, pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mes années d'études. Leur passion et leur dévouement pour la recherche m'ont inspiré et motivé à poursuivre mes propres questionnements scientifiques.

Nos remerciements vont également à l'ensemble de personnel administratif de département génies des procédés pour leur soutien et leur aide tout au long de nos parcours universitaire.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à mes parents, dont le soutien inconditionnel, l'amour et la confiance m'ont toujours porté tout au long de ce parcours. Leur encouragement constant et leurs sacrifices m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie également toute ma famille pour leur présence, leur patience et leurs mots réconfortants dans les moments de doute. Leur soutien moral a été une source précieuse de motivation et de sérénité.

ملخص

يأتي هذا البحث ضمن دراسة معالجة المياه عن طريق الترشيح بالجاذبية، باستخدام مادتين طبيعيتين للترشيح: الطين الموسع والرمل. الهدف الرئيسي هو تقييم تأثير معدل التدفق على تغير ثلاثة معايير فيزيائية وكيميائية أساسية في المياه: الرقم الهيدروجيني (pH)، العكارة، والتوصيلية الكهربائية. تم إجراء سلسلة من التجارب المخبرية باستخدام جهاز ترشيح مصمم خصيصاً لهذا الغرض، حيث تمر المياه من خلال وسط ترشيح. ولكل معدل تدفق تم اختباره، أجريت قياسات عند مدخل ومخرج الجهاز لتحديد فعالية المواد المرشحة. تُبرز نتائج هذه الدراسة إمكانات الطين الموسع والرمل كمواد ترشيح طبيعية واقتصادية ومتوفرة. كما تؤكد أهمية تحسين الظروف الهيدروديناميكية لضمان أقصى فعالية في معالجة المياه. **الكلمات المفتاحية:** الترشيح السريع، الطين الموسع، الرمل الطبيعي، وسائط الترشيح، المعالجة المسبقة لمياه البحر.

Abstract

This thesis is part of a study on water treatment by gravity filtration using two natural filter media: expanded clay and sand. The main objective is to evaluate the effect of flow rate on the variation of three key physico-chemical parameters of water: pH, turbidity, and electrical conductivity. A series of laboratory experiments was conducted using a specially designed filtration system, through which water passed across a filter bed. For each tested flow rate, measurements were taken at both the inlet and outlet of the system to assess the filtration efficiency. The findings highlight the potential of expanded clay and sand as natural, cost-effective, and accessible filtering materials. The study also emphasizes the importance of optimizing hydrodynamic conditions to ensure maximum treatment efficiency.

Keywords: Rapid filtration, expanded clay, natural sand, filter media, seawater pretreatment.

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude du traitement de l'eau par filtration gravitaire, en utilisant deux matériaux filtrants naturels : l'argile expansée et le sable. L'objectif principal est d'évaluer l'influence du débit d'écoulement sur l'évolution de trois paramètres physico-chimiques essentiels de l'eau : le pH, la turbidité et la conductivité électrique. Des expérimentations ont été menées en laboratoire à l'aide d'un dispositif de filtration spécialement conçu, permettant le passage de l'eau à travers un lit filtrant. Pour chaque débit testé, des mesures ont été effectuées à l'entrée et à la sortie du système afin d'évaluer l'efficacité des matériaux filtrants. Les résultats de cette étude mettent en lumière le potentiel de l'argile expansée et du sable comme supports filtrants naturels, économiques et facilement accessibles. L'étude souligne également l'importance d'optimiser les conditions hydrodynamiques pour améliorer l'efficacité du traitement.

Mots clés : Filtration rapide, argile expansée, sable naturel, médias filtrants, prétraitement de l'eau de mer.

Table des matières

Introduction générale.....	2
Chapitre I : Dessalement en Algérie : technologies membranaires et enjeux de prétraitement.....	4
I.1.État de l’art du dessalement en Algérie	4
I.2. Dessalement de l’eau de mer	5
I.3. Gestion du colmatage des membranes d'osmose inverse : les systèmes de prétraitement	6
I.4. Les filières de prétraitement conventionnelles utilisées en dessalement.....	7
I.5. Filtration sur lit granulaire : principe et fonctionnement	8
I.5.1. Sensibilité des filtres aux pics de turbidité	8
I.6. Milieux poreux – Caractéristiques physiques des matériaux filtrants.....	8
I.6.1. Granulométrie	9
I.6.2. Forme des grains	9
I.6.3. Friabilité	9
I.6.4. Résistance à l’acidité (perte à l’acide)	9
I.6.5. Masse volumique des grains.....	10
I.6.6. Masse volumique apparente	10
I.7. Nature des milieux poreux.....	10
I.7.1. Sable quartzeux : le matériau de base	10
I.7.2. Filtres multicouches : associations de matériaux.....	10
I.8. Filtration sur plusieurs couches superposées (bicouche ou multicouche).....	11
I.9. Lavage du milieu filtrant.....	11
I.10.Écoulement de l’eau dans un filtre	12
I.11. Filtres à sable rapides ouverts à flux descendant	12
I.12. Contrôle et optimisation du fonctionnement.....	13
I.13. Conclusion	14
Chapitre II : Présentation et caractérisation des matériaux filtrants locaux : Sable et Argile Expandée.....	16
II.1. Argile expansée commercialisée.....	17
II.1.1. Description du procédé de fabrication de l’argile expansée	19
II.1.2. Préparation de l’argile expansée	23

Table des matières

II.1.3. Caractérisation physico-chimique de l'argile expansée.....	24
II.1.4. Analyse granulométrique	27
II.1.4.1. Analyse des Propriétés Granulométriques de l'argile expansé.....	28
a) Détermination de la porosité des grains	28
b) Détermination de la surface spécifique Blaine (SSB).....	29
c) Détermination et Interprétation du Coefficient d'Uniformité de l'Argile Expansée.....	31
II.1.5. Observation microscopique des grains d'argile expansée	32
II.2. Sable commercialisé.....	34
II.2.1. Préparation du sable.....	35
A. Lavage.....	35
B. Séchage	35
C. Tamisage	36
II.2.2. Caractérisation physico-chimique de sable	36
II.2.2.1. Masse volumique des grains de sable.....	36
II.2.2.2. Matière soluble dans l'acide	37
II.2.3. Analyse granulométrique	39
II.2.3.1. Analyse des Propriétés Granulométriques du Sable	40
a. Porosité des grains	40
b. La surface spécifique	41
c. Coefficient d'uniformité.....	42
II.2.4. Analyse microscopique	43
II.3. Comparaison des caractéristiques des matériaux filtrants (Sable et Argile Expansée) avec la norme AFNOR"	45
Chapitre III : Étude hydrodynamique et évaluation des performances du procédé de filtration	47
III.1. Protocole expérimentale	48
III.1.1. Calcul de la vitesse de filtration	49
III.1.2. Détermination et analyse de la porosité du lit de l'argile expansée et de sable en fonction de la granulométrie.....	50
III.2. Etude de l'effet des différents paramètres pour l'argile expansée	51
III.2.1. Effet du débit d'alimentation	51
III.2.3. Etude de l'effet de diamètre des grains de l'argile	58
III.2.4. Détermination et interprétation de la perte de charge de l'argile expansée	59

Table des matières

III.3. Etude de l'effet des différents paramètres pour le sable	60
III.3.1. Effet du débit d'alimentation	60
III.3.3. Etude de l'effet de la hauteur du lit filtrant de sable	63
III.3.4. Influence de la turbidité initiale sur l'efficacité de la filtration sur sable	64
III.3.5. Effet du débit pour diamètre des particules (0,4-0,6 mm)	65
III.3.6. Étude hydrodynamique de la filtration : l'évolution du débit à la sortie du lit filtrant	66
III.4. Performance de la filtration bicouche	68
III.4.1. Détermination de la perte de charge	68
Conclusion générale	73

Table des figures

Figure I.1. Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse	5
Figure I.2. Filière de prétraitement conventionnel rencontrée en OI	7
Figure I.3. Courbe de filtration sur lit granulaire	14
Figure II.1. Photo de l'usine de l'argile expansée « ALGEXPAN »	18
Figure II.2. Argile expansée de diamètre 0,63–0,8 mm	18
Figure II.3. Gisement de la matière première (argile brute)	19
Figure II.4. Machine équipée pour isoler les particules de grande taille	21
Figure II.5. L'argile brute	21
Figure II.6. Machine de malaxage	21
Figure II.7. Tamis rotatif perforé	22
Figure II.8. Image agrandie de produit fini argile expansée	23
Figure II.9. Argile expansée de diamètre 0.63–0.8 mm (a) non séchée (b) séchée	24
Figure II.10. L'analyse granulométrique de l'argile expansée	28
Figure II.11. Appareil de mesure de la surface spécifique (Perméabilimètre de Blaine)	30
Figure II.12. Observation microscopique des grains d'argile expansée de diamètre 0,63–0,8 mm sous microscope optique	33
Figure II.13. Observation microscopique des grains d'argile expansée de diamètre 0,4–0,6 mm sous microscope optique	33
Figure II.14. Sable utilisé de diamètre 0,63–0,8mm	35
Figure II.15. L'analyse granulométrique de fraction (0,4–1 mm)	39
Figure II.16. L'analyse microscopique de sable de diamètre 0,4–0,6 mm	43
Figure II.17. L'analyse microscopique de sable de diamètre 0,63–0,8 mm	44
Figure III.1. Dispositif expérimental	49
Figure III.2. Dispositif en dynamique	49
Figure III.3. Évolution de la turbidité en fonction de temps de débit 6 mL/min (0,63–0,8 mm)	52
Figure III.4. Évolution de la turbidité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,63–0,8 mm)	53
Figure III.5. Évolution de la turbidité en fonction de temps de débit 10mL/min (0,63–0,8 mm)	54
Figure III.6. Évolution du pH en fonction de temps de débit 6mL/min (0,63–0,8 mm)	55
Figure III.7. Évolution du pH en fonction de temps de débit 8mL/min (0,63–0,8 mm)	55
Figure III.8. Évolution du pH en fonction de temps de débit 10mL/min (0,63–0,8 mm)	55
Figure III.9. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 6 mL/min (0,63–0,8 mm)	56
Figure III.10. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,63–0,8 mm)	56
Figure III.11. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 10ml/min (0,63–0,8 mm)	57
Figure III.12. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 6mL/min (0,4–0,6 mm).	57
Figure III.13. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,4–0,6 mm).	58
Figure III.14. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 10mL/min (0,4–0,6 mm)	58

Table des figures

Figure III.15. Évolution de la turbidité en fonction de temps pour les trois fractions	59
Figure III.16. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 6mL/min (0,63–0,8 mm).....	61
Figure III.17. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,63–0,8 mm).....	61
Figure III.18. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 10mL/min (0,63–0,8 mm)	61
Figure III.19. Évolution du pH en fonction de temps de débit 10mL/min (0,63–0,8 mm).....	62
Figure III.20. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 6mL/min (0,63–0,8 mm)	63
Figure III.21. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,63–0,8 mm)	63
Figure III.22. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 10mL/min (0,63–0,8 mm)	63
Figure III.23. Évolution de turbidité en fonction de temps de hauteur différente.	64
Figure III.24. Évolution de turbidité à la sortie en fonction de temps sous l'effet de la turbidité initiale.....	64
Figure III.25. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 6mL/min (0,4–0,6 mm). ..	65
Figure III.26. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,4–0,6 mm). ..	66
Figure III.27. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 10mL/min (0,4–0,6 mm).....	66
Figure III.28. Évolution du débit de sortie en fonction de temps de débit 6 mL/min (0,4–0,6 mm)	67
Figure III.29. Évolution du débit de sortie en fonction de temps de débit 8 mL/min (0,4–0,6 mm)	67
Figure III.30. Évolution du débit de sortie en fonction du temps de débit 10 mL/min (0,4–0,6 mm)	68
Figure III.31. Évolution de turbidité en fonction de temps de filtration bicouche	70
Figure III.32. Évolution de pH en fonction de temps de filtration bicouche.....	71
Figure III.33. Évolution de conductivité en fonction de temps de filtration bicouche	71
Figure III.34. Évolution du débit de sortie en fonction de temps de filtration bicouche	72

Table des tableaux

Tableau I.1. Stations de dessalement en service en Algérie : localisation, capacité de production et technologie de dessalement utilisée.....	4
Tableau I.2. Stations de dessalement en Algérie en cours de réalisation (2024–2025).....	5
Tableau II.1. Récapitulation des médias filtrants utilisés dans les stations de dessalement en Algérie : Origine, Stations et Efficacité	16
Tableau II.2. Composition minéralogique de la matière première ALGEXPAN (Analyse par diffraction RX - Source : C.E.T.I.M, Env2019)	20
Tableau II.3. Propriétés physiques de l'argile expansée	24
Tableau II.4. L'analyse chimique de l'argile expansée.....	26
Tableau II.5. La surface spécifique Blaine de l'argile expansée	30
Tableau II.6. Densités apparente et réelle du sable utilisé	37
Tableau II.7. Comparaison entre le sable étudié, la norme AFNOR et les sables utilisés dans les stations de dessalement en Algérie	37
Tableau II.8. Pourcentage des matières solubles dans l'acide de sable	38
Tableau II.9. La surface spécifique Blaine de sable	41
Tableau II.10. Coefficient d'uniformité de sable.....	42
Tableau II.11. Récapitulation des résultats de caractérisation des matériaux filtrants	45
Tableau III.1. Vitesse de filtration pour les trois débits	50
Tableau III.2. Porosité du lit de l'argile expansée selon les diamètres des particules	51
Tableau III.3. Porosité du lit de sable selon les diamètres des particules	51
Tableau III.4. Perte de charge de l'argile expansée de diamètre (0,63–0,8 mm) et de diamètre (0,4–0,6 mm) pour les trois débits.	59
Tableau III.5. Perte de charge du sable de diamètre (0,63–0,8 mm) pour différents débits. ..	68

Liste des abréviations

A	Section transversale
CU	Coefficient d'uniformité
MES	Matières en suspension
MF	Microfiltration
NTU	Nephelometric Turbidity Units
OI	Osmose inverse
ΔP	Perte de charge
RO	Reverse osmosis
SDI	Indice de colmatage
SSB	Surface Spécifique Blaine
TE	Taille effective
UF	Ultrafiltration

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie est confrontée à un stress hydrique chronique en raison de la rareté des ressources en eau douce, de la croissance démographique et du changement climatique. Pour pallier ce déficit, le gouvernement a adopté une stratégie ambitieuse basée sur le dessalement de l'eau de mer. Au cours des 40 dernières années, le dessalement est passé du statut de technologie prometteuse à celui de procédé le plus recherché pour répondre aux besoins en eau douce. La technologie permettant de séparer les sels de l'eau de mer et d'utiliser l'eau dessalée à des fins potables, industrielles et agricoles a ouvert de nouvelles perspectives en matière de recherche et développement grâce à son fonctionnement rentable et efficace. Le dessalement de l'eau de mer, souvent réalisé par osmose inverse, implique un prétraitement essentiel pour protéger les membranes et garantir une filtration efficace. Parmi les étapes clés, la filtration rapide joue un rôle primordial en éliminant les matières en suspension et les particules fines, assurant ainsi la qualité et la durabilité du procédé.

Aujourd'hui, les stations de dessalement en Algérie utilisent principalement des médias filtrants importés, comme l'anthracite ou le Filtralite®, ce qui engendre des coûts élevés et une dépendance aux fournisseurs étrangers. Dans ce contexte, il devient essentiel de rechercher des alternatives locales, en privilégiant des matériaux nationaux soigneusement sélectionnés et traités pour remplacer ces médias importés.

Dans ce travail, nous nous intéressons à utilisation de sable et un nouveau média filtrant de l'argile expansée. Le but principal de notre travail est d'améliorer la qualité de l'eau de mer filtrée avant l'osmose inverse, en réduisant les particules et contaminants qui pourraient endommager les membranes ou diminuer leur efficacité.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Chapitre I : présente une revue de la littérature scientifique

Chapitre II : présente les deux matériaux filtrants locaux étudiés : le sable siliceux commercialisé et l'argile expansée. Il détaille leur origine, leurs caractéristiques physiques et chimiques. Cette analyse permet de mieux comprendre leur potentiel en tant qu'alternatives aux matériaux filtrants importés dans le cadre du prétraitement de l'eau de mer.

Chapitre III : décrit le protocole expérimental mis en place pour évaluer l'efficacité et la sélectivité du média filtrant en filtration rapide en monocouche et bicouche. Les résultats obtenus sont présentés puis discutés afin d'en tirer des conclusions sur la performance comparative des deux matériaux dans le cadre du prétraitement de l'eau de mer.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale et les perspectives.

Chapitre I

Dessalement en Algérie : technologies membranaires et enjeux de prétraitement

Face à la raréfaction des ressources en eau douce, le dessalement de l'eau de mer s'impose comme une solution stratégique, en particulier dans les régions arides comme l'Algérie. Ce procédé permet de transformer l'eau de mer en eau potable ou industrielle, grâce à des technologies de plus en plus performantes. Parmi celles-ci, l'osmose inverse représente aujourd'hui la méthode la plus répandue, en raison de son efficacité et de sa modularité. Toutefois, le bon fonctionnement des unités de dessalement repose en grande partie sur la qualité du prétraitement, dont le rôle est de protéger les membranes contre le colmatage. Ce chapitre présente un état des lieux du dessalement en Algérie, le fonctionnement de l'osmose inverse, les problématiques liées au colmatage des membranes, ainsi que les principales filières de prétraitement, notamment la filtration conventionnelle, largement utilisée dans les stations nationales.

Chapitre I

Dessalement en Algérie : technologies membranaires et enjeux de prétraitement

I.1. État de l'art du dessalement en Algérie

L'Algérie est confrontée à un stress hydrique chronique en raison de la rareté des ressources en eau douce, de la croissance démographique et du changement climatique. Pour pallier ce déficit, le gouvernement a adopté une stratégie ambitieuse basée sur le dessalement de l'eau de mer, notamment pour l'approvisionnement des grandes villes côtières et de certaines industries. La quasi-totalité des stations de dessalement en Algérie repose sur la technologie de l'osmose inverse (RO - Reverse Osmosis), qui est :

- Moins énergivore que les procédés thermiques (distillation multi-étage, etc.)
- Plus flexible à l'échelle industrielle
- Adaptée aux conditions locales (eau de mer chaude, salinité variable)

Plusieurs stations de dessalement sont déjà opérationnelles à travers le territoire national, principalement le long de la côte algérienne. Le tableau ci-dessous présente les principales unités en service, avec leurs localisations, capacités de production et années de mise en service.

Tableau I.1. Stations de dessalement en service en Algérie : localisation, capacité de production et technologie de dessalement utilisée.

Station	Wilaya	Capacité (m³/jour)	Mise en service
El Mactaa	Oran	500 000	2015
Beni Saf	AïnTémouchent	200 000	2011
Mostaganem	Mostaganem	200 000	2010
Souk Tleta	Tlemcen	200 000	2009
Cap Djinet	Boumerdès	100 000	2008
Fouka	Tipaza	120 000	2008
Zéralda	Alger	10 000	2021
AïnBenian	Alger	10 000	2021
Palm Beach (Staouéli)	Alger	75 000	2021
Corso	Boumerdès	80 000	2022
Bordj El Kiffan (Bateau cassé)	Alger	10 000	2022
El Marsa	Alger	60 000	2022

Dans le cadre du programme national de sécurisation de l'eau, plusieurs stations de dessalement ont récemment été réalisées. Le tableau suivant présente ces nouvelles unités, avec leurs localisations, capacités de production et dates de mise en service.

Tableau I .2. Stations de dessalement en Algérie en cours de réalisation (2024–2025)

Station	Wilaya	Capacité (m ³ /jour)	Mise en service prévue
Cap Blanc	Oran	300 000	Février 2025
Fouka 2	Tipaza	300 000	Février 2025
Cap Djinet 2	Boumerdès	300 000	Février 2025
Béjaïa	Béjaïa	300 000	Février 2025
El Tarf	El Tarf	300 000	Février 2025

I.2. Dessalement de l'eau de mer

Le dessalement de l'eau de mer repose principalement sur deux types de procédés : les techniques thermiques, telles que la distillation multi-effets et la distillation flash, et les procédés membranaires, avec l'osmose inverse (OI) comme méthode dominante. Aujourd'hui, l'osmose inverse représente environ 75 % de la capacité mondiale de dessalement en raison de son faible coût énergétique et de sa capacité à traiter des eaux de mer très salines. Cependant, cette méthode nécessite un prétraitement rigoureux de l'eau pour éviter le colmatage des membranes. Celles-ci, en effet, ont une durée de vie moyenne de plus de 5 ans, mais un renouvellement annuel de 10 à 20 % est nécessaire pour maintenir l'efficacité du processus. L'OI est donc particulièrement adaptée aux conditions locales dans de nombreuses régions, comme le long des côtes méditerranéennes, où les stations de dessalement sont de plus en plus courantes [1].

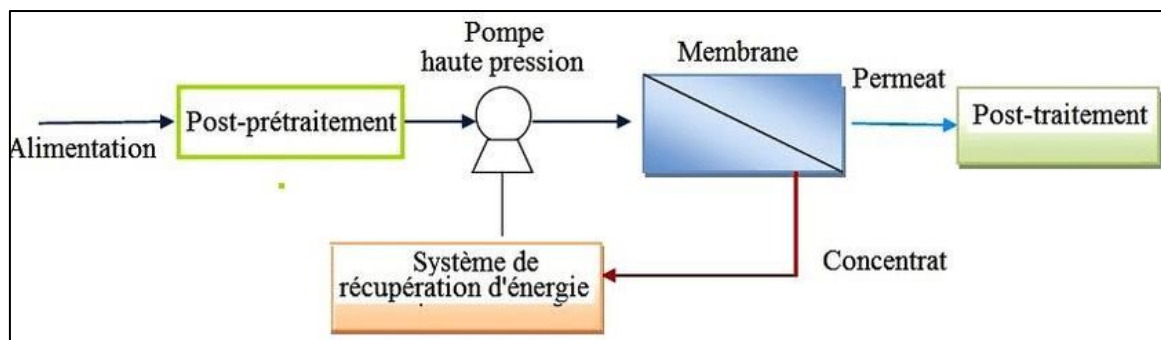


Figure I.1. Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse

I.3. Gestion du colmatage des membranes d'osmose inverse : les systèmes de prétraitement

Les filières de prétraitement ont considérablement évolué pour améliorer le fonctionnement de l'osmose inverse (OI) et mieux maîtriser son colmatage. Deux principales filières de prétraitement sont désormais utilisées pour le dessalement des eaux : la filière conventionnelle, encore largement adoptée, et la filière membranaire, plus récente et en pleine expansion.

Le prétraitement membranaire, bien que très efficace pour éliminer les particules en suspension et réduire le colmatage des membranes, présente certains inconvénients par rapport à la filtration conventionnelle :

- 1. Coût initial plus élevé** : Les systèmes de prétraitement membranaire, comme la microfiltration (MF) et l'ultrafiltration (UF), nécessitent un investissement initial plus important en raison de l'achat et de l'installation des membranes, ainsi que des équipements associés.
- 2. Maintenance accrue** : Les membranes nécessitent une surveillance constante et un entretien régulier pour éviter le colmatage, la dégradation et les Fuling biologiques. Cela peut entraîner des coûts d'exploitation et de maintenance plus élevés par rapport aux systèmes de filtration classiques.
- 3. Consommation énergétique plus élevée** : Les systèmes membranaires, en particulier les processus de microfiltration et d'ultrafiltration, sont plus gourmands en énergie, ce qui peut augmenter les coûts opérationnels.
- 4. Durée de vie limitée des membranes** : Les membranes de prétraitement, bien qu'efficaces, ont une durée de vie limitée (souvent inférieure à cinq ans) et doivent être remplacées régulièrement, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires.
- 5. Sensibilité aux conditions de l'eau brute** : Les membranes sont sensibles aux variations de la qualité de l'eau brute, telles que la salinité, la turbidité ou la concentration en matière organique, ce qui peut affecter leur performance et leur durée de vie.

En comparaison, la filtration conventionnelle (filtration sur sable) est généralement moins coûteuse en termes d'investissement initial et de maintenance. Elle est également plus robuste face aux variations des caractéristiques de l'eau brute et nécessite moins d'énergie pour fonctionner.

Dans ce mémoire, l'accent sera mis sur la filtration conventionnelle, car elle constitue la méthode de prétraitement la plus couramment utilisée dans les stations de dessalement en Algérie. Cette technologie, en raison de sa simplicité d'application, de son faible coût et de son efficacité éprouvée, reste prédominante dans les installations locales. Ainsi, il est essentiel de l'examiner en détail, car elle représente l'option la plus répandue et directement applicable dans le contexte algérien, ce qui constitue l'objet principal de ce travail.

I.4. Les filières de prétraitement conventionnelles utilisées en dessalement

Le processus de prétraitement commence généralement par la prise d'eau dans le milieu naturel avant son entrée dans la filière de dessalement. Cette prise peut se faire de deux manières : par prise d'eau de surface ou prise d'eau souterraine. La prise d'eau de surface consiste à pomper l'eau de mer à travers des canalisations situées à faible profondeur. Toutefois, cette méthode peut rencontrer des problèmes hydrauliques, tels que la réduction du débit due au développement d'espèces marines ou l'enchevêtrement de méduses. En revanche, la prise d'eau souterraine s'effectue par l'intermédiaire de puits côtiers ou de galeries. Bien que cette technique soit plus coûteuse, nécessitant des travaux et des matériaux plus résistants à l'eau de mer, elle permet de réduire l'impact environnemental sur la vie aquatique. De plus, la filtration naturelle à travers le sol améliore la qualité de l'eau, qui est souvent meilleure que celle prélevée en surface [2]. Un schéma d'une telle filière de prétraitement conventionnel d'OI est proposé sur la Figure I-2.

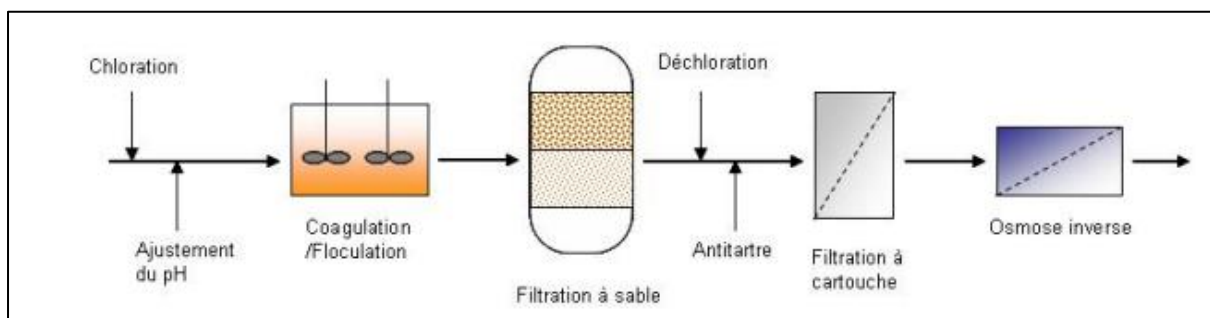


Figure I.2. Filière de prétraitement conventionnel rencontrée en OI

I.5. Filtration sur lit granulaire : principe et fonctionnement

Dans un filtre à lit granulaire, l'eau à traiter s'écoule à travers un ou plusieurs lits composés de matériaux granulaires (sable, anthracite, etc.). Les caractéristiques du média filtrant (type, taille des grains, hauteur de la couche) doivent être adaptées à la qualité de l'eau et au type de filtre utilisé. Les particules en suspension sont piégées dans les espaces entre les grains, sur une grande partie de la hauteur du lit filtrant.

Les filtres à média granulaire utilisés pour la filtration de l'eau de mer peuvent être classés en deux grandes catégories selon la force motrice employée : les filtres à gravité et les filtres sous pression. Ces deux types de filtres diffèrent principalement par la hauteur de charge hydraulique nécessaire pour faire circuler l'eau à travers le lit filtrant, par la vitesse de filtration, ainsi que par la nature du réservoir contenant le média filtrant [3].

I.5.1. Sensibilité des filtres aux pics de turbidité

Les filtres à gravité possèdent un volume de média filtrant et un temps de rétention deux à trois fois plus importants que les filtres sous pression pour une même capacité de production d'eau. Cela leur permet de retenir davantage de matières solides, rendant leur performance moins sensible aux pics occasionnels de turbidité de l'eau d'alimentation.

À l'inverse, les filtres sous pression, en raison de leur capacité de rétention plus limitée, réagissent mal à ces pics de turbidité (par exemple > 20 NTU), souvent causés par des pluies, des efflorescences algales, des activités navales ou de dragage, ou encore par des changements saisonniers des courants marins. Dans de telles situations, la qualité de l'eau filtrée (SDI et turbidité) est dégradée, ce qui peut entraîner un nettoyage plus fréquent des membranes d'osmose inverse [4].

Pour pallier ces limites, les filtres sous pression peuvent être conçus en deux étages (série de deux filtres), mais un système de prétraitement à gravité bien dimensionné en un seul étage peut offrir des performances équivalentes, avec une fiabilité accrue.

I.6. Milieux poreux – Caractéristiques physiques des matériaux filtrants

Les matériaux utilisés dans les filtres sur lit granulaire présentent un ensemble de propriétés physiques essentielles à leur efficacité. Ces propriétés influencent directement les performances de filtration, la durabilité du média et la facilité d'entretien. Les protocoles de mesure associés sont généralement détaillés dans la section dédiée à l'examen des matériaux granulaires et pulvérulents.

I.6.1. Granulométrie

La granulométrie d'un matériau filtrant est définie par deux paramètres principaux :

- **La taille effective (TE)** : taille des particules pour laquelle 10 % du poids du matériau est constitué de particules plus petites.
- **Le coefficient d'uniformité (CU)** : rapport entre la taille des particules à 60 % et à 10 % en masse (D60/D10).

I.6.2. Forme des grains

La forme des grains peut varier selon l'origine du matériau :

- **Anguleux** (ex. : matériaux concassés)
- **Rond** (ex. : sable de rivière ou de mer)
- **Plats ou irréguliers** (évalués par le coefficient d'aplatissement)

Impact de la forme :

- À taille effective équivalente, un matériau anguleux offre souvent une qualité de filtration comparable voire supérieure à celle d'un matériau à grains ronds.
- À granulométrie identique, les grains anguleux présentent généralement une perte de charge plus faible grâce à une porosité plus élevée, car ils s'imbriquent moins bien les uns dans les autres que les grains ronds. Cela permet des passages d'eau plus larges dans le lit filtrant.

I.6.3. Friabilité

La friabilité désigne la tendance d'un matériau à se fragmenter sous l'effet de contraintes mécaniques, notamment durant les phases de lavage.

Critères :

Un matériau trop friable est à éviter, car il génère des fines qui s'accumulent en surface du filtre, surtout dans les systèmes à lavage par expansion (à l'eau seule).

Ces fines peuvent provoquer un colmatage prématuré et réduire l'efficacité du filtre.

I.6.4. Résistance à l'acidité (perte à l'acide)

La résistance chimique des matériaux est évaluée par leur perte à l'acide.

Pourquoi c'est important ?

- Une forte perte à l'acide est inacceptable, notamment si l'eau à traiter contient du gaz carbonique agressif ou présente une acidité minérale.

- Le matériau doit conserver sa structure et ses propriétés même en environnement légèrement acide.

I.6.5. Masse volumique des grains

La masse volumique réelle des grains est un paramètre essentiel pour :

- Évaluer la stabilité du lit filtrant,
- Calculer la vitesse minimale de fluidisation (vitesse à partir de laquelle le média commence à se soulever lors du lavage).

I.6.6. Masse volumique apparente

Deux types de masse volumique apparente (ou en vrac) sont considérés :

- Dans l'air
- Dans l'eau

Ces données sont utiles pour la conception du filtre (calcul de la hauteur de couche, de la charge hydraulique, etc.) et le dimensionnement des équipements de lavage.

I.7. Nature des milieux poreux

Les matériaux utilisés dans les filtres sur lit granulaire varient selon les objectifs de traitement, la qualité de l'eau brute et les exigences du procédé. Voici les principaux types de milieux filtrants, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application :

I.7.1. Sable quartzeux : le matériau de base

Le sable quartzeux est historiquement le premier matériau utilisé en filtration, et il reste aujourd'hui le média filtrant le plus courant. Il est apprécié pour :

- Sa disponibilité,
- Sa bonne résistance mécanique,
- Sa faible réactivité chimique.

Il constitue la base des filtres monocouches ou entre dans la composition des filtres multicouches.

I.7.2. Filtres multicouches : associations de matériaux

Pour améliorer les performances de filtration, certains filtres utilisent une superposition de couches de matériaux de densités et tailles différentes. On peut ainsi combiner :

- ✓ **Sable + anthracite**
- ✓ **Sable + pierre ponce**
- ✓ **Sable + grenat**

✓ **Sable + schistes poreux**

Critères de sélection:

Les matériaux doivent présenter une faible friabilité et une perte à l'acide négligeable, afin d'assurer une bonne durabilité du lit filtrant et d'éviter la formation de fines particules.

I.8. Filtration sur plusieurs couches superposées (bicouche ou multicouche)

La filtration multicouche est une technique d'optimisation du rendement des filtres à lit granulaire. Elle repose sur la superposition de matériaux filtrants de densités et granulométries différentes, permettant une meilleure répartition des matières en suspension (MES) tout au long du lit filtrant.

Dans la configuration bicouche, une partie du sable est remplacée par une couche supérieure de matériau plus léger – le plus souvent de l'anthracite – dont la taille effective (TE) est supérieure à celle du sable situé en dessous [5].

- La couche d'anthracite, à granulométrie plus grosse, retient les MES les plus grossières.
- La couche de sable, plus fine, joue un rôle de filtration de finition et de sécurité.

Condition de fonctionnement optimale :

Les deux matériaux doivent pouvoir être mis en expansion de façon similaire lors du lavage, avec un même débit d'eau, afin de reclasser les couches correctement après chaque lavage à contre-courant.

Avantages du système bicouche

- Répartition progressive des impuretés dans la hauteur du lit filtrant,
- Allongement des cycles de filtration grâce à une meilleure capacité de rétention de MES,
- Amélioration de la qualité du filtrat,
- Adaptation efficace aux eaux très chargées et à forte hétérogénéité de MES (cas des filtrations directes sans coagulation-décantation préalable).

I.9. Lavage du milieu filtrant

Le lavage du milieu filtrant est une étape cruciale pour maintenir l'efficacité de la filtration. Un lavage insuffisant peut provoquer un colmatage progressif et irréversible de certaines zones du filtre, réduisant les voies de passage de l'eau. Cela entraîne une augmentation rapide de la perte de charge, une accélération localisée de la vitesse de filtration et une diminution de l'efficacité de rétention des impuretés — un phénomène connu sous le nom de « renardage ».

Pour assurer un nettoyage efficace, le lit filtrant est soumis à un courant d'eau ascendant, réparti de manière homogène sur toute la surface du fond du filtre. Ce courant a pour objectif de transmettre suffisamment d'énergie au matériau filtrant pour détacher les particules accumulées. L'opération se réalise par mise en expansion du lit à l'eau seule, avec un lavage de surface destiné à entraîner et évacuer les impuretés. Cette étape permet de restaurer la porosité initiale du milieu et de garantir un fonctionnement optimal lors du cycle de filtration suivant [6].

I.10. Écoulement de l'eau dans un filtre

Lors de sa percolation à travers un lit filtrant granulaire, l'eau subit une perte d'énergie due aux frottements contre les grains du milieu filtrant. Cette perte d'énergie, traduite par une diminution de la pression, est appelée perte de charge. Lorsque l'écoulement se fait à faible vitesse, en régime laminaire, cette perte de charge est décrite par la loi de Darcy, qui établit une relation proportionnelle entre le débit d'écoulement, la perméabilité du milieu, et le gradient de pression.

La perte de charge ΔP est proportionnelle à la vitesse de filtration V , à la viscosité dynamique de l'eau, à la hauteur de couche et inversement proportionnelle à la perméabilité du milieu filtrant (ou directement proportionnelle à la résistance de ce milieu).

I.11. Filtres à sable rapides ouverts à flux descendant

Dans le cadre du prétraitement de l'eau de mer dans les stations de dessalement, les filtres à sable rapides sont largement utilisés pour éliminer les matières en suspension avant le passage sur membranes (notamment en osmose inverse). L'eau s'écoule verticalement à travers un lit filtrant granulaire, généralement composé de sable ou d'un mélange de matériaux adaptés à la qualité de l'eau brute.

Ce type de filtration fonctionne à flux descendant, dans des dispositifs ouverts à écoulement gravitaire, à des vitesses généralement comprises entre 5 et 20 m³/h·m². Les particules sont retenues dans les interstices du lit, principalement sur la hauteur de la couche filtrante.

Cette étape est cruciale pour limiter le colmatage des membranes et améliorer leur durée de vie, en réduisant la charge particulaire. La filtration rapide peut être précédée d'un traitement physico-chimique (coagulation-floculation) lorsque la turbidité ou la charge organique de l'eau de mer est élevée. Lorsque le milieu filtrant est encrassé, on lave le filtre en inversant le sens de l'écoulement de l'eau ; le milieu filtrant est alors en expansion, et les particules d'impuretés,

beaucoup moins denses que les grains de sable, sont décollées et évacuées vers l'égout à l'aide des goulottes de lavage. Les principaux éléments d'un filtre rapide sont : le fond de filtre, le gravier de support et le milieu filtrant [7].

I.12. Contrôle et optimisation du fonctionnement

Dans les stations de dessalement, le contrôle de l'efficacité des filtres à sable rapides est essentiel pour assurer un prétraitement optimal de l'eau de mer avant l'osmose inverse. Ce contrôle repose principalement sur deux paramètres : la qualité de l'eau filtrée et l'évolution de la perte de charge.

- **Mesure et évolution de la qualité de l'eau filtrée :**

L'évolution de la turbidité du filtrat au cours du cycle de filtration est représentée sur la figure 1.3 (b). Les différentes périodes sont les suivantes :

c : Période de maturation, pendant laquelle le filtre atteint une phase de stabilisation.

b : Période de fonctionnement normal, où le filtre fonctionne de manière optimale, et la turbidité reste sous contrôle.

d : Début de crevaisson du filtre, lorsque la capacité de filtration commence à se dégrader.

e : Limite de turbidité acceptable, lorsque la turbidité du filtrat atteint un seuil critique (à l'instant t_1), et que le cycle de filtration doit être arrêté pour nettoyage ou entretien.

- **Mesure et évolution de la perte de charge :**

La courbe **a** sur la figure 1.3 (a) montre l'évolution de la perte de charge (P) en fonction du temps. Elle indique les étapes suivantes :

- ✓ La perte de charge augmente progressivement pendant la filtration.
- ✓ t_2 représente le temps auquel la perte de charge atteint une valeur maximale admissible.
- ✓ Pour un fonctionnement optimal, il est crucial que t_1 (temps auquel la turbidité atteint la limite acceptable) soit supérieur à t_2 (temps auquel la perte de charge atteint sa valeur maximale). Cela garantit que la filtration est arrêtée avant que la capacité de filtration ne soit trop compromise.

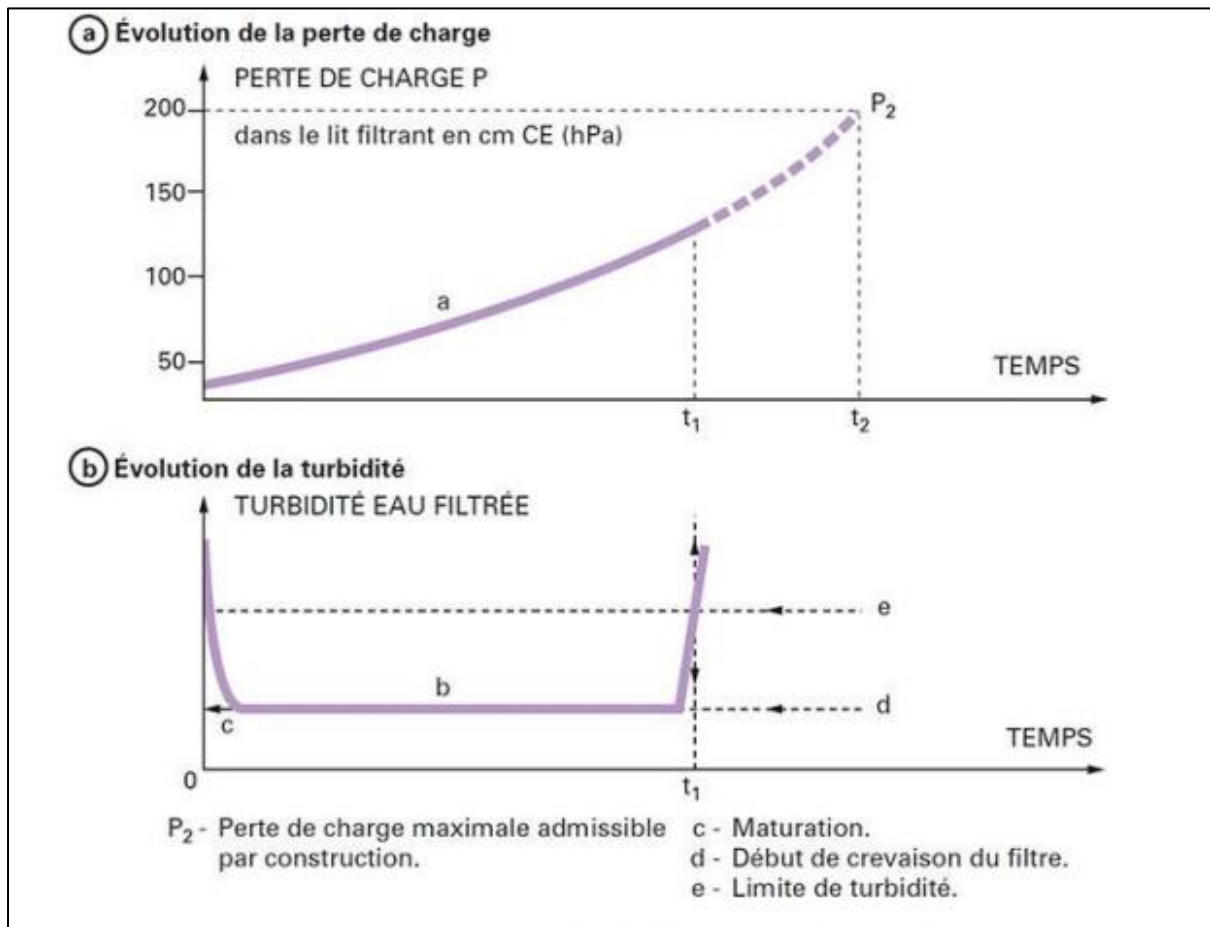


Figure I.3. Courbe de filtration sur lit granulaire

I.13. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les principes fondamentaux du prétraitement de l'eau de mer dans les stations de dessalement, avec un accent particulier sur les filtres à sable rapides à flux descendant. Nous avons examiné leur fonctionnement, les critères de contrôle et d'optimisation, ainsi que l'influence des paramètres opératoires sur la performance des filtres. Ce type de filtration est essentiel pour garantir une eau de qualité avant l'osmose inverse, contribuant ainsi à la longévité des membranes et à l'efficacité des processus de dessalement.

Dans le chapitre suivant, nous détaillerons les matériaux utilisés comme médias filtrants dans le cadre de ce travail, en mettant l'accent sur leurs caractéristiques et les méthodes de caractérisation employées pour évaluer leur efficacité dans le processus de prétraitement de l'eau de mer.

Chapitre II

Présentation et caractérisation des matériaux filtrants

locaux : Sable et Argile Expansée.

Chapitre II

Présentation et caractérisation des matériaux filtrants locaux : Sable et Argile Expansée.

Dans un contexte de raréfaction des ressources en eau douce, l'Algérie s'est tournée massivement vers le dessalement de l'eau de mer afin d'assurer l'approvisionnement en eau potable de sa population. Le bon fonctionnement des unités de dessalement, en particulier par osmose inverse, dépend étroitement de l'efficacité du prétraitement appliqué à l'eau brute. Parmi les étapes critiques du prétraitement, la filtration conventionnelle vise à réduire la turbidité et à éliminer les particules susceptibles d'endommager les membranes. Actuellement, les médias filtrants utilisés dans les stations de dessalement algériennes, tels que l'anthracite ou le Filtralite®, sont en grande partie importés, entraînant des coûts supplémentaires et une dépendance aux marchés étrangers. Pourtant, le territoire algérien dispose de ressources naturelles abondantes, notamment en sable siliceux et en argile, qui pourraient être valorisées localement pour servir de médias filtrants.

Face à cette situation, une alternative locale s'impose : substituer les médias importés par des matériaux disponibles sur le territoire national, après un traitement et une sélection rigoureuse. Le tableau ci-dessous présente les différents médias filtrants utilisés dans les stations de dessalement en Algérie, leur origine, les stations où ils sont appliqués et une évaluation de leur efficacité.

Tableau II.1. Récapitulation des médias filtrants utilisés dans les stations de dessalement en Algérie : Origine, Stations et Efficacité

Média filtrant	Origine	Station utilisée	Efficacité
Sable Siliceux	Local	Stations côtières (ex : Tlemcen, Tipaza, Oran, Alger)	Bonne performance en termes de filtration, coût réduit
Anthracite	Importé (Chine)	Stations de Skikda, Bejaïa, El-Hamma, Annaba	Haute capacité de filtration, mais coût élevé
Filtralite®	Importé (Norvège)	Station de Béni Saf, Station de Jijel, Station d'El-Marsa	Très bonne performance en termes de filtration, maintenance réduite

Charbon actif	Importé (Asie, USA)	Stations de Bejaïa, Skikda, Mostaganem	Excellent pour l'élimination des contaminants organiques, mais coûteux
----------------------	---------------------	--	--

En hiver, l'augmentation de la turbidité dans l'eau de mer, due aux fortes précipitations, au ruissellement accru et aux tempêtes marines, représente un défi majeur pour les stations de dessalement. Cette turbidité élevée entraîne un colmatage rapide des médias filtrants, même les plus performants comme l'anthracite et le Filtralite®, en raison de l'accumulation de particules fines en suspension. Le colmatage réduit l'efficacité de la filtration, augmentant la perte de charge et nécessitant des nettoyages fréquents, ce qui génère des coûts supplémentaires. De plus, la présence de particules résiduelles sur les membranes d'osmose inverse peut affecter leur performance et leur durée de vie. Face à ces problèmes, certaines stations peuvent être contraintes de fermer temporairement ou de réduire leur capacité de production, notamment pour procéder à des travaux de maintenance intensifiés ou en raison de l'incapacité des systèmes de filtration à suivre le débit d'eau à forte turbidité.

Dans cette optique, ce travail propose d'évaluer les performances de deux matériaux locaux : le sable siliceux naturel et l'argile expandée thermiquement, en tant que médias filtrants pour le prétraitement de l'eau de mer, par exemple, pourraient constituer une alternative intéressante aux médias filtrants importés, offrant ainsi une solution durable et rentable pour améliorer l'efficacité du prétraitement dans les stations de dessalement, notamment en hiver.

Dans ce chapitre, nous présenterons les matériaux filtrants locaux que nous proposons comme alternatives aux matériaux importés, à savoir le sable et l'argile expandée. Nous détaillerons leurs caractéristiques physiques et chimiques, en mettant l'accent sur leur capacité à résister au colmatage et à filtrer efficacement les eaux de mer, notamment en période de forte turbidité. L'objectif est de fournir une analyse complète des propriétés de ces matériaux en tant que solutions filtrantes locales viables pour les stations de dessalement, offrant ainsi une alternative aux matériaux importés.

II.1. Argile expandée commercialisée

L'argile expandée utilisée dans le cadre de cette étude est fournie par l'entreprise ALGEXPAN. ALGEXPAN est le seul fabricant de granulats d'argile expandée en ALGERIE. L'usine est située en ALGERIE dans la wilaya de Blida, commune de Bouinan. ALGEXPAN collecte 1m³ d'argile de la nature afin de créer 2 à 3 m³ de matériaux de construction. La capacité de production est de 600 m³ par jour.



Figure II.1. Photo de l'usine de l'argile expansée « ALGEXPAN »

Le média filtrant à base d'argile expansée est un matériau minéral granulaire léger, fabriqué par cuisson d'argiles naturelles spéciales à haute température, ce qui lui confère une structure interne caractéristique avec une coque dure et compacte. Ce média est utilisé principalement dans le traitement et la filtration des eaux de mer, où il remplace avantageusement les filtres à sable traditionnels. Il se distingue par sa faible densité, ce qui permet une manipulation plus aisée et une réduction de la consommation d'énergie lors des opérations de lavage du filtre. De plus, il offre une grande résistance mécanique, notamment à l'abrasion et aux chocs, assurant une durabilité importante dans les installations de filtration.



Figure II.2. Argile expansée de diamètre 0,63–0,8 mm

Taille de grain : Les billes d'argile expansée sont offertes dans différentes tailles de grains, ce qui permet de choisir le média filtrant optimal pour les besoins spécifiques du système de traitement de l'eau.

Durabilité et faible densité : L'argile expansée se distingue par sa durabilité et sa faible densité, qui garantissant une filtration efficace sur une longue durée de vie.

II.1.1. Description du procédé de fabrication de l'argile expansée

Une visite technique a été réalisée dans une unité industrielle ALGXPAN spécialisée dans la fabrication de l'argile expansée, dans le but d'observer les différentes étapes du procédé de production. Cette immersion a permis de mieux comprendre les opérations de transformation, de la matière première brute jusqu'au produit fini, en mettant en évidence les paramètres clés tels que la granulométrie, le taux d'humidité, ou encore les conditions thermiques appliquées. Le présent chapitre décrit de manière structurée le déroulement du processus industriel observé.

Le procédé de fabrication de l'argile expansée débute par l'extraction de la matière première depuis un gisement.



Figure II.3. Gisement de la matière première (argile brute)

Tableau II.2. Composition minéralogique de la matière première ALGEXPAN (Analyse par diffraction RX - Source : C.E.T.I.M, Env2019)

Minéral	Type	Formule chimique	Couleur dominante	Temp. fusion (°C)	Éléments traces
Quartz	Silice	SiO ₂	Incolore, blanc, gris, jaune...	1650 ± 75	Al, Li, B, Fe, Mg, Ca, Ti, Rb, Na, OH
Calcite	Carbonate de calcium	CaCO ₃	Incolore à teintes claires	—	Mn, Fe, Zn, Co, Ba, Sr, Pb, etc.
Kaolinite	Silicate d'aluminium hydraté	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Blanc à rouge, bleu ou brun	—	—
Illite	Argile (mica non gonflant)	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀	Gris-blanc, argenté, parfois verdâtre	—	—
Dolomite	Carbonate double Ca et Mg	CaMg(CO ₃) ₂	Incolore, blanc, gris, jaunâtre	790–960	Fe, Mn, Co, Pb, Zn
Gypse	Sulfate de calcium hydraté	CaSO ₄ •2H ₂ O	Incolore, blanc à jaune, vert	—	—
Albite	Feldspath sodique	NaAlSi ₃ O ₈	Incolore, blanc, bleuté, verdâtre	—	Ca, K, Mg
Clinochlore	Silicate (chlorite)	(Mg,Fe ²⁺) ₅ Al(OH) ₈ AlSi ₃ O ₁₀	Noir bleuté ou vert noirâtre	—	—
Sépilolite	Argile fibreuse magnésienne	Mg ₄ Si ₆ O ₁₅ (OH) ₂ •6H ₂ O	Blanc, grisâtre, jaunâtre	1550	—

L'argile brute est ensuite soumise à une première étape de préparation mécanique, visant à séparer les fractions granulométriques. Cette opération est réalisée à l'aide d'une machine équipée de grilles permettant d'isoler les particules de grande taille d'un côté, et les particules plus fines de l'autre. Une étape de tamisage permet d'assurer la purification et la séparation granulométrique des matériaux.



Figure II.4. Machine équipée pour isoler les particules de grande taille



Figure II.5. L'argile brute

Par la suite, l'argile brute est mélangée avec de l'eau dans une machine de malaxage. La teneur en eau ajoutée à la matière première est contrôlée rigoureusement, et se situe généralement entre 13 % et 14 %, afin d'obtenir une pâte homogène.



Figure II.6. Machine de malaxage

Le mélange pâteux est ensuite façonné à l'aide d'une machine de formage (façonnage), qui permet d'obtenir des granulés d'argile de différentes tailles (grands et petits), en fonction des applications visées. Le choix du format dépend de l'usage final : chaque fraction granulométrique correspond à une application spécifique dans le domaine du traitement de l'eau ou d'autres utilisations industrielles.



Figure II.7. Tamis rotatif perforé

Le tamis rotatif sépare l'argile expansée en faisant tourner lentement un tambour perforé, ce qui mélange les particules et permet aux plus petites de passer à travers les trous, assurant ainsi une séparation granulométrique efficace.

Les granulés d'argile subissent un traitement thermique en trois étapes :

- **Préchauffage** à environ 300 °C pendant une heure pour éliminer l'humidité,
- **Cuisson** entre 1100 °C et 1200 °C provoquant la vitrification partielle et l'expansion des granulés sous l'effet des gaz dégagés,
- **Refroidissement** progressif pour stabiliser la structure et éviter les chocs thermiques.

À la sortie du four, les granulés mesurent entre 0 et 25 mm. Pour obtenir des fractions plus fines (0–3 mm, 3–8 mm...), les granulés de 8–25 mm sont concassés puis tamisés.



Figure II.8. Image agrandie de produit fini argile expansée

L'observation en milieu industriel du procédé de fabrication de l'argile expansée a mis en évidence l'importance du contrôle rigoureux de chaque étape (préparation, façonnage, cuisson, tri granulométrique) pour garantir la qualité du produit final. Ces connaissances pratiques sont essentielles pour optimiser le matériau ou l'adapter à des usages spécifiques, notamment en traitement de l'eau, en améliorant ses performances fonctionnelles.

II.1.2. Préparation de l'argile expansée

L'argile expansée, récupérée auprès de l'usine Algexpan, a été utilisée comme matériau filtrant. Elle a d'abord été soumise à un tamisage rigoureux à l'aide de tamiseurs de laboratoire, permettant de séparer les particules selon différentes granulométries, allant de 1 mm à 0,25mm. Chaque fraction granulométrique obtenue a été soigneusement isolée en vue d'une analyse individuelle. Par la suite, un lavage à l'eau du robinet a été effectué pour chaque catégorie de taille, dans le but d'éliminer les impuretés superficielles et d'assurer une propreté adéquate du matériau avant son utilisation dans les essais de filtration. Après ces étapes, l'argile est séchée dans une étuve pendant 24 heures à une température de 100°C, afin d'éliminer complètement l'humidité résiduelle.

Parmi les différentes fractions obtenues, les granulométries comprises entre 0,6 – 0,8 mm et 0,4 – 0,6 mm ont été spécifiquement sélectionnées pour les essais de filtration. Le choix de ces deux tailles s'explique par leur bon compromis entre capacité de rétention des particules et perméabilité, les rendant particulièrement adaptées aux applications de traitement de l'eau.



Figure II.9. Argile expansée de diamètre 0.63–0.8 mm (a) non séchée (b) séchée

II.1.3. Caractérisation physico-chimique de l'argile expansée

Dans cette section, nous présentons les principales caractéristiques physico-chimiques de l'argile expansée utilisée, produite localement sous la marque ALGEXPAN - Algérie. Les résultats sont résumés dans les tableaux suivants : Le Tableau II.3 présente les propriétés physiques de l'argile expansée et Le Tableau II.4 fournit les résultats de l'analyse chimique de ce matériau.

Tableau II.3. Propriétés physiques de l'argile expansée

AN 0/3 1000	VAL. Déclarée	Norme
Résistance à l'écrasement en vrac	6,82	EN 13055-1
Masse volumique en vrac	1074 kg/m ³	EN 1097-3
Masse volumique réelle	1730 kg/m ³	EN 1097-6
Le coefficient de corrélation	1,61	/
L'humidité en été	<3%	EN 1097-5
Absorption d'eau (5')	8,24%	EN 1097-6
Absorption d'eau (10')	10,96%	EN 1097-6
Absorption d'eau (24h)	15,00%	EN 1097-6

Le tableau II.3 présente les principales propriétés physiques de l'argile expansée de type AN 0/3 1000, commercialisée localement sous la marque ALGEXPAN (Algérie).

Ces données, déclarées par le fournisseur et conformes aux normes européennes, permettent d'évaluer l'aptitude de ce matériau pour des applications dans le domaine du traitement de l'eau, notamment en filtration dynamique. La résistance à l'écrasement en vrac est appréciée de 6,82. Cette valeur indique la capacité du matériau à résister aux charges appliquées dans un état non compacté. Une bonne résistance à l'écrasement garantit la stabilité mécanique du lit filtrant et réduit le risque de dégradation sous l'effet du passage de l'eau.

La différence significative entre les deux valeurs de la masse volumique en vrac (1074 kg.m^{-3}) et réelle (1730 kg.m^{-3}) met en évidence une porosité élevée, caractéristique essentielle des matériaux filtrants. Une masse volumique en vrac relativement faible signifie que l'argile expansée est légère et contient de nombreux interstices internes, favorables à l'adsorption et à la circulation de l'eau.

La corrélation est une mesure statistique qui exprime le lien ou la dépendance entre deux variables. Elle permet d'évaluer si deux variables varient ensemble, de manière positive ou négative, et dans quelle mesure. 1,61, cette valeur ne s'agit pas ici du coefficient de corrélation statistique classique, mais vraisemblablement d'un indice d'uniformité ou d'un coefficient de forme spécifique au matériau. Une valeur de 1,61 suggère une homogénéité acceptable de la distribution granulométrique, ce qui corrobore les résultats de l'analyse granulométrique.

Une faible teneur en humidité (<3%) confirme la stabilité du matériau en conditions sèches. Cela réduit les risques de moisissures ou de réactivité indésirable lors du stockage.

Les valeurs de l'absorption indiquent la cinétique d'absorption de l'eau par l'argile expansée. Une absorption progressive mais relativement rapide dans les premières minutes est favorable à une mise en charge efficace du filtre. La capacité d'absorption finale, atteinte après 24 h, confirme que le matériau est hautement poreux, ce qui peut contribuer à l'amélioration de la rétention des polluants dans le processus de filtration.

En conclusion, l'ensemble des propriétés physico-chimiques mesurées montre que l'argile expansée ALGEXPAN présente une bonne stabilité mécanique, une structure poreuse adéquate et une capacité d'absorption d'eau significative, ce qui la rend parfaitement adaptée à une utilisation dans un système de filtration dynamique de l'eau de mer.

Tableau II.4. L'analyse chimique de l'argile expansée

Composition	Teneur en %	
SiO₂	56,68	58,37
Al₂O₃	19,49	18,18
Fe₂O₃	7,77	7,53
Ca O	1,09	0,93
Mg O	2,59	2,86
SO₃	0,53	0,71
K₂O	3,85	3,51
Na₂O	0,71	0,93
P₂O₅	0,1	0,09
TiO₂	0,73	0,72
PF	6,36	6,18

L'analyse chimique de l'argile expansée montre une composition adaptée aux applications de filtration. La forte teneur en dioxyde de silicium (SiO₂, 56,68–58,37 %) assure une excellente stabilité chimique et mécanique, conférant au matériau une grande inertie face à l'eau de mer. L'alumine (Al₂O₃, 18,18–19,49 %) renforce la résistance mécanique et thermique, indispensable pour supporter des conditions d'opération variables. Le fer (Fe₂O₃, 7,53–7,77 %), présent en quantité modérée, n'affecte pas négativement les propriétés du matériau et limite les risques d'oxydation. Les faibles concentrations en CaO (0,93–1,09 %) et MgO (2,59–2,86 %) contribuent à maintenir la stabilité chimique sans provoquer de précipitations indésirables. De même, la faible teneur en SO₃ (0,53–0,71 %) réduit les risques de relargage de sulfates dans l'eau filtrée. Les oxydes alcalins, K₂O (3,51–3,85 %) et Na₂O (0,71–0,93 %), bien que présents, restent à des niveaux compatibles avec une bonne performance de filtration. Les traces de P₂O₅ (0,09–0,10 %) et TiO₂ (0,72–0,73 %) sont négligeables et n'altèrent pas les propriétés mécaniques ou chimiques du matériau. Enfin, la perte au feu (6,18–6,36 %) indique une faible proportion de matières volatiles, garantie la stabilité thermique et chimique de l'argile expansée lors de son utilisation prolongée dans les stations de dessalement. L'argile expansée étudiée possède des propriétés physiques et chimiques favorables pour une utilisation en tant que média filtrant dans les stations de dessalement.

Sa porosité, sa bonne résistance mécanique, sa stabilité chimique, ainsi que sa faible perte au feu en font un matériau prometteur pour remplacer partiellement ou totalement les médias filtrants importés, surtout face aux défis liés à l'augmentation de la turbidité en hiver.

II.1.4. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à évaluer les dimensions des particules d'un mélange de matériau et à définir leur forme en utilisant des tamis normalisés avec des mailles de tailles décroissantes pour caractériser le matériau.

Les différentes tailles des grains d'un échantillon sont évaluées en faisant passer une quantité spécifique de matériau à travers des tamis à mailles de plus en plus petites, puis en pesant les fractions de l'échantillon qui ont traversé chacun des tamis.

Chaque tamis sépare l'échantillon en deux produits : le matériau qui passe à travers le tamis, appelé le passant, et le matériau qui reste sur la surface du tamis, appelé le refus. Le passant représente la proportion de particules plus fines que l'ouverture du tamis, tandis que le refus correspond aux particules plus grosses. Le passant minimum est observé au niveau du tamis à la maille la plus large, indiquant que la majorité des particules sont encore retenues, alors que le passant maximum est mesuré avec le tamis à la maille la plus petite, représentant la fraction la plus fine du matériau.

La série de tamis utilisée pour les deux médias est comme suit : 1 mm, 0,8 mm, 0,63 mm, 0,5 mm, 0,4 mm, et 0,25 mm.

Le graphe granulométrique (Figure II.10) montre que l'argile expansée présente une distribution relativement homogène des tailles de particules, avec une majorité de grains situés entre 0,4 mm et 0,8 mm. Cette granulométrie relativement régulière est favorable à la filtration car elle permet de combiner une bonne capacité de rétention des particules avec une faible perte de charge à travers le média.

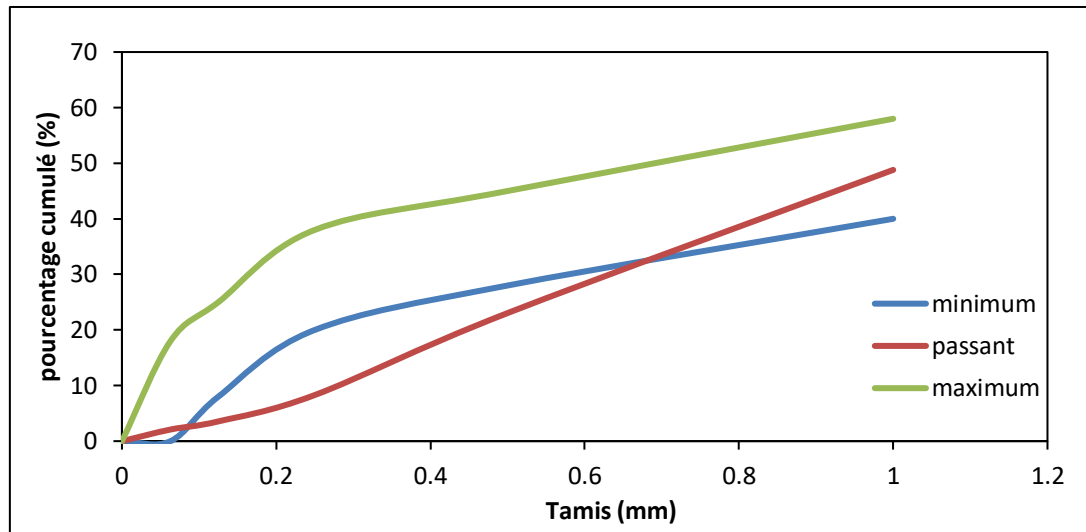


Figure II.10. L'analyse granulométrique de l'argile expansée

II.1.4.1. Analyse des Propriétés Granulométriques de l'argile expansé

Les paramètres granulométriques, tels que la surface spécifique (SSB) et le coefficient d'uniformité (Cu), ont été déterminés pour les deux matériaux étudiés, à savoir le sable et l'argile expansée. La porosité permet d'évaluer la capacité du matériau à laisser passer l'eau ou l'air, un critère important pour son efficacité en tant que média filtrant. La surface spécifique mesure la surface totale des particules par unité de masse et donne une idée de la finesse des grains, ce qui peut influencer leur réactivité et leurs performances dans les processus de filtration. Enfin, le coefficient d'uniformité renseigne sur la distribution des tailles des particules, un facteur qui peut affecter la fluidité et la rétention des particules dans le matériau. Ces trois paramètres sont essentiels pour comprendre le comportement du sable et de l'argile expansée dans des applications pratiques, notamment en filtration ou dans d'autres domaines industriels.

a) Détermination de la porosité des grains

La porosité des grains du matériau est une grandeur physique qui quantifie la fraction du volume total occupée par les vides (pores) à l'intérieur du matériau. Cette porosité est liée à la densité apparente et à la densité réelle des grains par la relation suivante [10] :

$$\varepsilon = 1 - \frac{d_a}{d_r} \quad (\text{éqII.1})$$

Où :

ε : la porosité (%)

d_a : la densité apparente (masse volumique du matériau en vrac, incluant les vides)

d_r : la densité réelle (masse volumique des grains solides, sans vides)

À partir du tableau (Figure II.3) :

$$D_{\text{en vrac}} = 1074 \text{ kg/m}^3$$

$$d_r = 1730 \text{ kg/m}^3$$

Alors, on calcule :

$$\varepsilon = 1 - \frac{d_a}{d_r} = 1 - \frac{1074}{1730} = 0,379 \approx 38\%$$

Plus la densité apparente est faible par rapport à la densité réelle, plus la quantité de vides est importante. Ainsi, une porosité de 38 % indique que près de 40 % du volume total de l'argile expansée est constitué d'espaces vides, ce qui confère au matériau ses propriétés légères et isolantes. Cette porosité élevée est caractéristique des matériaux expansés, résultant du gonflement et de la formation de pores internes lors du traitement thermique de l'argile.

b) Détermination de la surface spécifique Blaine (SSB)

La surface spécifique Blaine (SSB) est une mesure de la finesse des particules d'un matériau pulvérulent, exprimée en surface développée par unité de masse (cm^2/g). Elle reflète la capacité du matériau à offrir une grande surface d'échange, ce qui est essentiel en filtration.

La mesure n'est pas réalisée directement : on utilise un perméabilimètre de Blaine, un appareil qui mesure le temps nécessaire pour qu'un certain volume d'air traverse un échantillon compacté de matériau.



Figure II.11. Appareil de mesure de la surface spécifique (Perméabilimètre de Blaine)

La surface spécifique est calculée à partir de la formule suivante :

$$SSB = \frac{K\sqrt{\varepsilon^3}t^{1/2}}{\rho(1-\varepsilon)\left(\frac{1}{\eta}\right)} \quad (\text{éqII.2})$$

Avec :

η : viscosité de l'air = $1.8 \cdot 10^{-4}$ g/cm.s

K : constante de l'appareil=20,52

ρ : la masse volumique réelle = $1,73 \text{ g/cm}^3$

ε : la porosité des grains

t : temps d'écoulement

Les résultats obtenus dans le tableau II.5 pour la surface spécifique de l'argile expansée.

Tableau II.5. La surface spécifique Blaine de l'argile expansée

Essais	temps (s)	SSB (cm ² /g)
1	5,44	779,073
2	5,41	776,922
3	5,60	790,447

$$SSB_{\text{moyenne}} = 782,147 \text{ cm}^2/\text{g}$$

La surface spécifique relativement élevée (environ 782,147 cm²/g) indique que l'argile expansée possède une importante surface de contact, ce qui est très favorable pour la filtration :

- Plus de zones d'interaction avec les particules en suspension dans l'eau,
- Meilleure rétention des particules fines,
- Amélioration des performances de filtration sur toute la durée d'utilisation du média filtrant.

La faible variation entre les essais montre également une bonne reproductibilité de la mesure, témoignant de l'homogénéité du matériau testé.

c) Détermination et Interprétation du Coefficient d'Uniformité de l'Argile Expansée

Le coefficient d'uniformité Cu est un paramètre granulométrique qui permet de caractériser l'étendue de la distribution des tailles de particules dans un matériau.

Il est défini par le rapport :

$$CU = \frac{\text{la taille du tamis laissant passer 60 \% de l'échantillon}}{\text{la taille du tamis laissant passer 10 \% de l'échantillon}} = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{éqII. 3})$$

Où :

- D₆₀: diamètre des particules correspondant à **60 %** du passant cumulé en masse,
 - D₁₀: diamètre des particules correspondant à **10 %** du passant cumulé en masse.
-
- ✓ Si Cu ≈ 1, cela signifie que les particules sont de tailles très homogènes (distribution étroite).
 - ✓ Si Cu > 4, cela indique une large distribution granulométrique (mélange de particules fines et grossières).

Un bon coefficient d'uniformité est important pour garantir un écoulement fluide du fluide à travers le matériau et limiter le colmatage.

À partir du graphe (Figure II.10):

Si on lit D10 et D60 sur la courbe :

- ✓ Supposons que D10 ≈ 0,4 mm (à 10 % passant cumuler),
- ✓ Et D60 ≈ 0,7 mm (à 60 % passant cumulé).

Alors, on calcule :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,7}{0,4} = 1,75$$

$C_u=1,75$ signifie que les grains sont relativement homogènes en taille.

Distribution étroite des particules, structure plus régulière du lit filtrant.

Cela est favorable pour la filtration, car :

- ✓ Le passage de l'eau est plus uniforme,
- ✓ Moins de risque de colmatage brutal,
- ✓ Bonne perméabilité tout en assurant une rétention efficace des impuretés.

Mais si C_u était plus grand (>4), cela aurait indiqué une granulométrie trop étalée, ce qui pourrait causer des phénomènes de tassement ou de blocage.

II.1.5. Observation microscopique des grains d'argile expansée

La microscopie optique, aussi appelée microscopie photonique, permet d'agrandir l'image d'objets très petits grâce à un système de lentilles qui focalisent la lumière sur l'échantillon. Dans notre étude, cette technique a été utilisée pour observer la morphologie des grains d'argile expansée. Elle offre une visualisation directe de la taille, de la forme (arrondie, anguleuse) et de la surface des particules.

L'intérêt de cette analyse est de mieux comprendre la structure granulaire du matériau, ce qui influence des propriétés importantes comme la porosité, la perméabilité et la capacité de filtration. Une bonne connaissance de la texture des grains permet également d'anticiper le comportement du matériau dans des conditions d'utilisation réelle, notamment en filtration d'eau de mer.

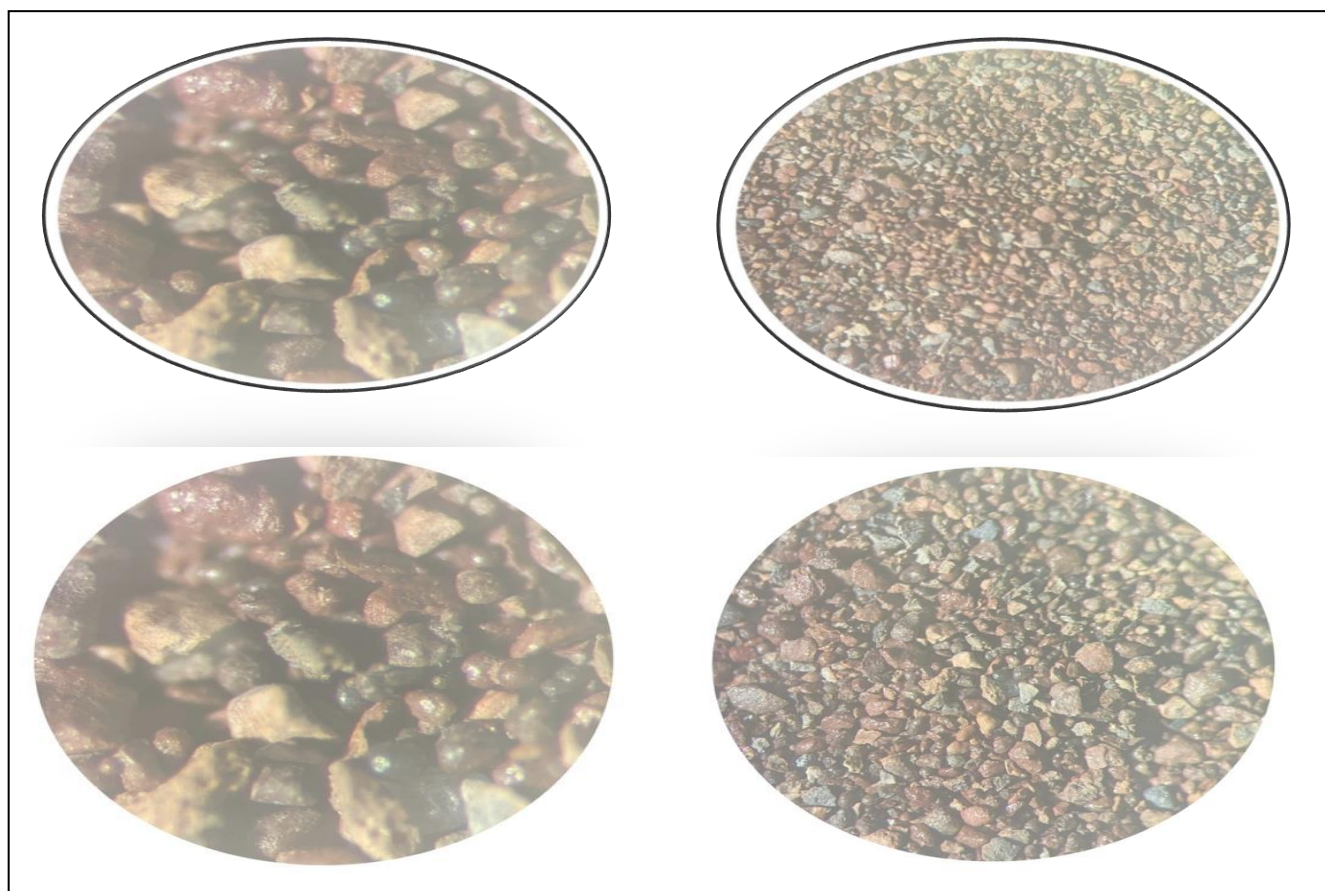


Figure II.12. Observation microscopique des grains d'argile expansée de diamètre 0,63–0,8 mm sous microscope optique



Figure II.13. Observation microscopique des grains d'argile expansée de diamètre 0,4–0,6 mm sous microscope optique

Des observations microscopiques sur les fractions 0,6–0,8 mm et 0,4–0,6 mm d'argile expansée, réalisées à divers grossissements ($\times 10$, $\times 16$, $\times 25$, $\times 50$), ont révélé les caractéristiques suivantes :

- **Morphologie** : Les grains sont initialement arrondis après frittage, mais certains deviennent anguleux à la suite du cassement mécanique pour obtenir des fractions plus fines.
- **Surface** : À fort grossissement, la surface apparaît rugueuse et poreuse, ce qui favorise l'adsorption des particules en suspension.
- **Homogénéité** : Chaque fraction présente une taille bien répartie, essentielle pour un écoulement fluide et régulier dans les applications de filtration.

La combinaison de grains arrondis et anguleux, issue du processus de frittage puis de cassage, confère à l'argile expansée une structure physique adaptée à la filtration, alliant porosité, rugosité et distribution granulométrique contrôlée.

II.2. Sable commercialisé

Le sable filtrant est un matériau couramment utilisé dans les systèmes de traitement de l'eau en raison de ses propriétés physiques et chimiques favorables à la filtration. Dans le cadre de cette étude, le sable utilisé provient de la région d'OuedSouf, située au sud-est de l'Algérie. Cette région, connue pour ses vastes étendues sablonneuses d'origine éolienne, offre un sable naturellement propre, bien calibré et utilisé localement dans divers processus de filtration, notamment pour les stations de traitement des eaux usées et potables.

Le sable d'OuedSouf se caractérise généralement par une granulométrie fine à moyenne, une bonne perméabilité et une faible teneur en matières organiques, ce qui en fait un excellent support filtrant. Bien que les caractéristiques techniques détaillées de ce sable soient en cours d'analyse, les premiers essais effectués par le Bureau Géotechnique des Routes et Construction (B.G.R.C) à la demande de l'entreprise EURL MAJOR INVESTISSEMENT apportent un premier aperçu de ses propriétés.

Ces essais visent à évaluer les propriétés physiques et chimiques essentielles à l'utilisation du sable comme média filtrant dans les systèmes de traitement de l'eau. Trois classes granulométriques ont été analysées : 0,4–1 mm ; 0,6–1,2 mm ; 1,2–2,5 mm.



Figure II.14. Sable utilisé de diamètre 0,63–0,8mm

II.2.1. Préparation du sable

Afin d'obtenir un média filtrant propre, homogène et adapté à la filtration de l'eau de mer, plusieurs étapes de préparation sont réalisées sur le sable brut commercialisé.

A. Lavage

Le sable est lavé à l'eau de robinet pour éliminer les impuretés physiques telles que poussières, matières organiques et particules en suspension. Cette opération est répétée plusieurs fois jusqu'à clarification de l'eau.

B. Séchage

Après lavage, le sable humide est placé dans une étuve pour séchage. Le séchage est réalisé à une température de 100 °C pendant 24 heures, afin d'éliminer complètement l'humidité résiduelle.

Ce séchage est essentiel pour garantir un tamisage efficace par la suite, car un sable humide pourrait former des agglomérats et fausser la séparation granulométrique.

C. Tamisage

Une fois le sable sec, il est soumis à une opération de tamisage à l'aide d'une série de tamis aux mailles de tailles décroissantes : 1 mm, 0,8 mm, 0,63 mm, 0,5 mm et 0,4 mm.

Le tamisage permet de séparer les différentes fractions granulométriques :

- ✓ Les particules trop grosses (supérieures à 1 mm) sont éliminées ;
- ✓ Les particules trop fines (inférieures à 0,4 mm) sont également rejetées ;
- ✓ Seule la fraction de sable ayant une taille comprise entre 0,4 mm et 0,8 mm est retenue pour être utilisée comme média filtrant.

Cette sélection garantit un équilibre entre :

- ✓ Une capacité de filtration suffisante (captage efficace des particules en suspension dans l'eau),
- ✓ Une perte de charge modérée (bonne perméabilité de la couche filtrante),
- ✓ Une durabilité et une stabilité du média filtrant.

II.2.2. Caractérisation physico-chimique de sable

Avant d'utiliser le sable comme média filtrant, il est essentiel de réaliser une caractérisation physico-chimique complète. Cette étape permet de vérifier que le sable possède les propriétés requises en termes de densité, de granulométrie, de pureté chimique et de stabilité mécanique. Pour assurer la cohérence et la comparabilité des résultats, les mêmes protocoles d'analyse que ceux utilisés pour la caractérisation du premier média filtrant, à savoir l'argile expansée, seront appliqués au sable.

II.2.2.1. Masse volumique des grains de sable

La masse volumique des grains correspond à la masse par unité de volume de la matière constituant les grains de sable, sans tenir compte des vides entre les particules. Cette propriété est essentielle pour évaluer la compacité du média filtrant et son comportement en filtration.

Afin de caractériser le sable préparé, deux types de densité ont été déterminés :

- **Densité apparente** : masse par unité de volume incluant les vides entre les grains.
- **Densité réelle** : masse par unité de volume du matériau solide sans les vides.

Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour les différentes fractions granulométriques du sable :

Tableau II.6. Densités apparente et réelle du sable utilisé

Diamètre de l'échantillon	Densité apparente (kg.L ⁻¹)	Densité réelle (kg.L ⁻¹)
0,4/1	1,54	2,63
0,6/1,2	1,52	2,62
1,2/2,5	1,51	2,63

On remarque que la densité réelle du sable reste pratiquement constante pour toutes les fractions granulométriques, avec des valeurs autour de 2,62–2,63 kg/L. Cela indique que le matériau constitutif du sable est homogène, ce qui est attendu pour un sable siliceux naturel.

La densité apparente, quant à elle, diminue légèrement avec l'augmentation de la taille des grains. Cette légère diminution s'explique par une augmentation des vides entre les grains lorsque ceux-ci sont plus gros, ce qui réduit la masse par unité de volume apparent.

Ces résultats confirment que le sable préparé présente une bonne homogénéité et des propriétés physiques adaptées pour une utilisation comme média filtrant dans le prétraitement de l'eau de mer.

Tableau II.7. Comparaison entre le sable étudié, la norme AFNOR et les sables utilisés dans les stations de dessalement en Algérie

Type de sable	Densité apparente (kg/L)	Densité réelle (kg/L)	Source / Référence
Sable siliceux conforme à la norme AFNOR (NF P18-564)	1,50 – 1,60	2,65	(Norme AFNOR NF P18-564)
Sable utilisé à la station de Hamma (Alger)	1,52 – 1,55	2,62 – 2,64	(Rapport technique SEAAL, 2020)
Sable utilisé à la station de Fouka (Tipaza)	1,50 – 1,54	2,63	(Benaissa et al., 2019)
Sable utilisé à la station de Cap Djinet (Boumerdès)	1,53	2,62	(ENSO, 2017)
Sable étudié	1,51 – 1,54	2,62 – 2,63	(Travail expérimental)

II.2.2.2. Matière soluble dans l'acide

La matière soluble dans l'acide chlorhydrique (HCl) présente dans le sable correspond essentiellement aux impuretés minérales telles que les carbonates, les oxydes métalliques et d'autres composés solubles, qui ne font pas partie du quartz (SiO₂) majoritaire.

Pour déterminer la matière soluble dans l'acide, environ 10 g de sable sec et propre (préalablement séché à 100 °C pendant 24 heures) sont utilisés. Le sable est mis en contact avec 100 mL d'une solution d'acide chlorhydrique dilué (à 1 % ou 2 %, préparée en diluant 10 à 20 mL d'HCl concentré dans 1 L d'eau distillée) dans un bécher. Le mélange est agité doucement à l'aide d'une baguette en verre pour assurer une bonne interaction entre l'acide et les grains. Après 30 minutes d'agitation douce, le mélange est filtré à l'aide d'un filtre en papier ou d'un entonnoir Büchner sous vide pour récupérer les résidus insolubles. Ces résidus sont ensuite rincés abondamment à l'eau distillée jusqu'à obtention d'un pH neutre (environ 7) afin d'éliminer toute trace d'acide. Les résidus sont enfin séchés à 100 °C jusqu'à masse constante. Le pourcentage de matière soluble est calculé en mesurant la perte de masse, selon la formule :

$$\text{Matière soluble (\%)} = \frac{m_{\text{initial}} - m_{\text{résidu sec}}}{m_{\text{initial}}} \times 100 \quad (\text{éqII. 4})$$

Cette analyse permet d'évaluer la pureté minérale du sable et son aptitude à être utilisé comme média filtrant. Un sable présentant une faible teneur en matières solubles est plus stable chimiquement, limite la libération d'impuretés dans l'eau filtrée, et garantit une longévité ainsi qu'une performance de filtration optimales. Selon les recommandations techniques (inspirées de la norme AFNOR NF P18-564), la teneur en matières solubles dans un sable de filtration de qualité doit généralement être inférieure à 2 %.

Tableau II.8. Pourcentage des matières solubles dans l'acide de sable

Echantillon	Perte (%)
0,4/1	0,8
0,6/1,2	1,46
1,2/2,5	1,49

Les résultats du tableau II.8 montrent que la teneur en matières solubles dans l'acide varie légèrement selon la granulométrie du sable. Le sable de granulométrie 0,4/1 présente la plus faible perte en matière soluble (0,8 %), tandis que les sables de granulométrie plus grande (0,6/1,2 et 1,2/2,5) montrent des pertes plus élevées, respectivement 1,46 % et 1,49 %. Ces pertes correspondent principalement aux impuretés minérales, telles que les carbonates et certains oxydes métalliques, qui se dissolvent dans l'acide chlorhydrique. Une teneur plus élevée en matière soluble peut indiquer la présence d'impuretés minérales dans le sable, ce qui

pourrait affecter sa stabilité chimique et, par conséquent, son efficacité en tant que média filtrant. En général, un sable de filtration de qualité ne doit pas dépasser 2 % de matière soluble, ce qui rend ces résultats compatibles avec les exigences de pureté pour l'utilisation en filtration de l'eau, notamment dans les stations de dessalement.

Ces valeurs assurent que le sable utilisé ne libère pas d'impuretés dans l'eau filtrée, garantissant ainsi une efficacité et une durabilité optimales du média filtrant dans des applications telles que le dessalement de l'eau.

II.2.3. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique du sable utilisé pour la filtration suit le même principe que celle réalisée pour l'argile expansée, à savoir une séparation des différentes fractions granulométriques en fonction de la taille des particules. Nous avons arrêté l'analyse à 0,4 mm, car au-delà de cette taille, il n'y a plus de refus significatif, ce qui signifie que les particules plus grandes ne contribuent plus de manière significative à la performance du média filtrant. Les résultats sont représentés sous forme de graphiques granulométriques ci-dessous, illustrant la répartition des tailles de particules du sable utilisé.

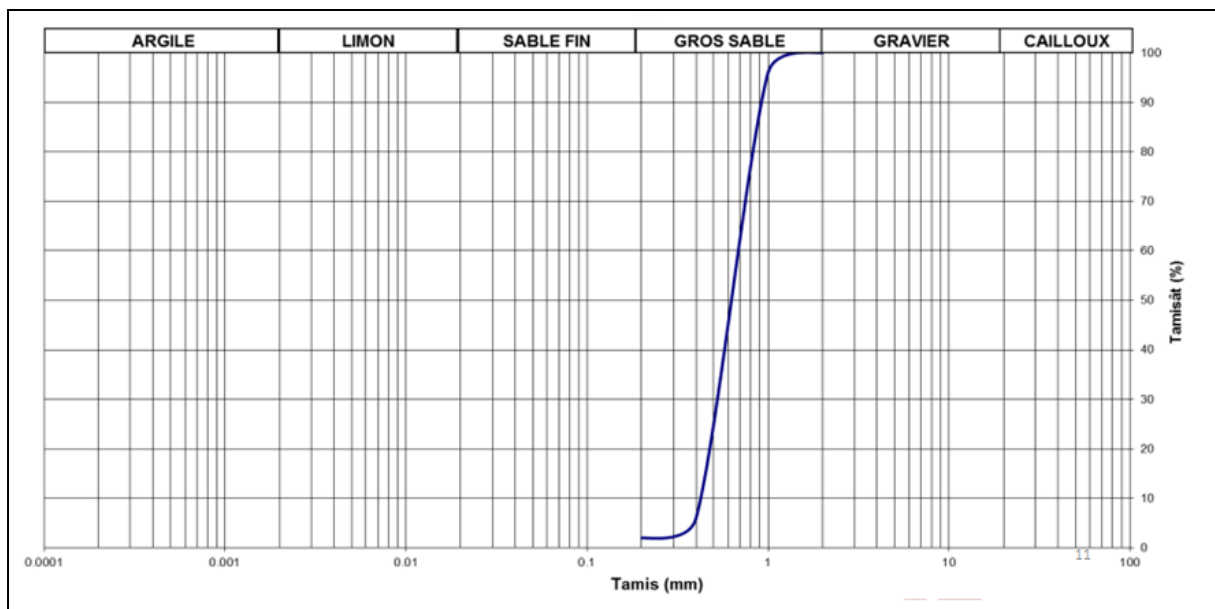


Figure II.15. L'analyse granulométrique de fraction (0,4-1 mm)

L'échantillon de sable (0,40–1 mm) présente une courbe granulométrique abrupte, caractéristique d'un matériau bien classé et homogène. Cette granulométrie précise est idéale

pour des applications où un écoulement fluide et régulier est nécessaire, comme en filtration dynamique. L'échantillon 0,40–1 mm se situe principalement dans la catégorie du gros sable, Cette fraction a été correctement séparée, avec une faible superposition granulométrique, ce qui témoigne de la qualité du criblage.

II.2.3.1. Analyse des Propriétés Granulométriques du Sable

Avant de commencer l'analyse des paramètres granulométriques du sable, il est important de souligner que ces caractéristiques influencent directement son efficacité en tant que média filtrant, notamment en termes de capacité à retenir les particules et à permettre le passage de l'eau. Les propriétés granulométriques telles que la taille des particules, la distribution granulométrique et la porosité sont des facteurs clés pour évaluer la performance du sable dans les processus de filtration. Dans cette section, nous allons examiner ces paramètres à travers des tests de granulométrie, et les comparer aux normes afin de mieux comprendre comment les variations dans la taille des grains et la structure du sable affectent ses capacités de filtration.

a. Porosité des grains

La porosité est directement liée à la densité apparente d_a (masse volumique du matériau en vrac, incluant les vides) et à la densité réelle d_r (masse volumique des grains solides seuls, sans vides).

La formule de porosité signifie que plus la densité apparente est faible par rapport à la densité réelle, plus la porosité est élevée, car cela traduit un volume important de vides entre les grains.

À partir du tableau (Figure II.6) :

$$d_a = 1.54 \text{ g/cm}^3$$

$$d_r = 2.63 \text{ g/cm}^3$$

Alors, on calcule :

$$\varepsilon = 1 - \frac{d_a}{d_r} = 1 - \frac{1.54}{2.63} \approx 41\%$$

Une porosité de 41 % indique un empilement relativement lâche, typique des sables à grains arrondis et propres. Les grains ne s'emboîtent pas de manière compacte, laissant des

interstices importants. Cette porosité élevée favorise la circulation de l'air et de l'eau dans le sable, influençant ses propriétés mécaniques.

b. La surface spécifique

La surface spécifique du sable a été déterminée à l'aide de la méthode de Blaine, et les résultats des essais sont présentés dans le tableau II.9 ci-dessous :

Tableau II.9. La surface spécifique Blaine de sable

Essais	temps(s)	SSB (cm ² /g)
1	3,40	477,143
2	3,17	460,722

$$\text{SSB}_{\text{moyenne}} = 468,933 \text{ cm}^2/\text{g}$$

La surface spécifique mesurée pour le sable (468,933 cm²/g) témoigne d'une basse réactivité de ce matériau, ce qui est caractéristique d'un sable composé de grains arrondis et propres, majoritairement en quartz. En effet, une surface spécifique faible suggère que les particules du sable sont relativement grossières et peu fines, ce qui limite leur surface d'échange et leur réactivité par rapport à des matériaux plus fins, comme l'argile expansée.

Le fait que la surface spécifique du sable soit inférieure à celle de l'argile expansée (qui présente une surface spécifique beaucoup plus élevée) montre que le sable a une moins grande surface développée, ce qui peut affecter son efficacité dans certaines applications de filtration.

Sable de plage : Ce sable est souvent constitué de grains arrondis et de quartz, ce qui se reflète dans une surface spécifique relativement faible. Les grains de sable de plage sont également souvent plus propres et mieux triés.

Sable de rivière : En revanche, le sable de rivière peut contenir plus de grains anguleux et rugueux, avec une surface spécifique potentiellement plus élevée, car ces grains sont moins arrondis et ont une surface d'échange plus importante en raison de leur forme plus irrégulière. La surface spécifique de 468,933 cm²/g indique que ce sable, de par ses grains arrondis et propres, est probablement un sable de plage, ce qui correspond à un matériau moins réactif et

plus stable pour des applications où la réaction chimique est moins importante que la filtration physique.

c. Coefficient d'uniformité

Le coefficient d'uniformité (Cu) est un paramètre essentiel pour caractériser la distribution granulométrique d'un matériau. Il permet d'évaluer l'homogénéité du matériau en termes de tailles de particules. Plus le coefficient d'uniformité est faible, plus le matériau est homogène. À l'inverse, un coefficient plus élevé indique une large gamme de tailles de particules et, par conséquent, une plus grande hétérogénéité.

Le tableau suivant présente les résultats du coefficient d'uniformité pour le sable en fonction de différentes classes granulométriques :

Tableau II.10. Coefficient d'uniformité de sable

Echantillon	Taille effective TE		
	D10 (mm)	D60 (mm)	CU
0,4/1	0,41	0,51	1,24
0,6/1,2	0,65	0,89	1,37
1,2/2,5	1,3	1,78	1,37

Pour l'échantillon de sable 0,4/1 mm, le coefficient d'uniformité (Cu) est de 1,24, ce qui suggère une distribution relativement homogène des particules, mais avec des variations modérées de taille.

Les échantillons 0,6/1,2 mm et 1,2/2,5 mm présentent un coefficient d'uniformité plus élevé (1,37), indiquant une plus grande variation dans la taille des particules. Cela suggère une distribution plus hétérogène des grains dans ces classes granulométriques plus grandes.

Ces valeurs de Cu indiquent que le sable présente une distribution de particules relativement bien définie, avec des coefficients d'uniformité inférieurs à 2, ce qui est caractéristique des matériaux filtrants de bonne qualité. En effet, pour un bon matériau filtrant, un coefficient d'uniformité inférieur à 4 est généralement recherché, car cela permet d'assurer une filtration plus efficace avec une répartition adéquate des particules et des vides.

II.2.4. Analyse microscopique

Pour l'observation microscopique du sable, nous avons utilisé le même appareil que pour l'analyse de l'argile expansée. Cette méthode permet d'examiner la morphologie des grains de sable à une échelle plus fine, offrant ainsi des informations sur leur forme, leur taille, et leur surface. L'utilisation d'une microscopie optique permet de mieux comprendre la texture du sable et d'analyser la présence d'éventuelles impuretés ou irrégularités dans la structure des grains. Cette analyse est cruciale pour déterminer si les grains sont appropriés pour des applications spécifiques, notamment comme matériau filtrant, où la forme et la régularité des particules peuvent influencer les propriétés de filtration.

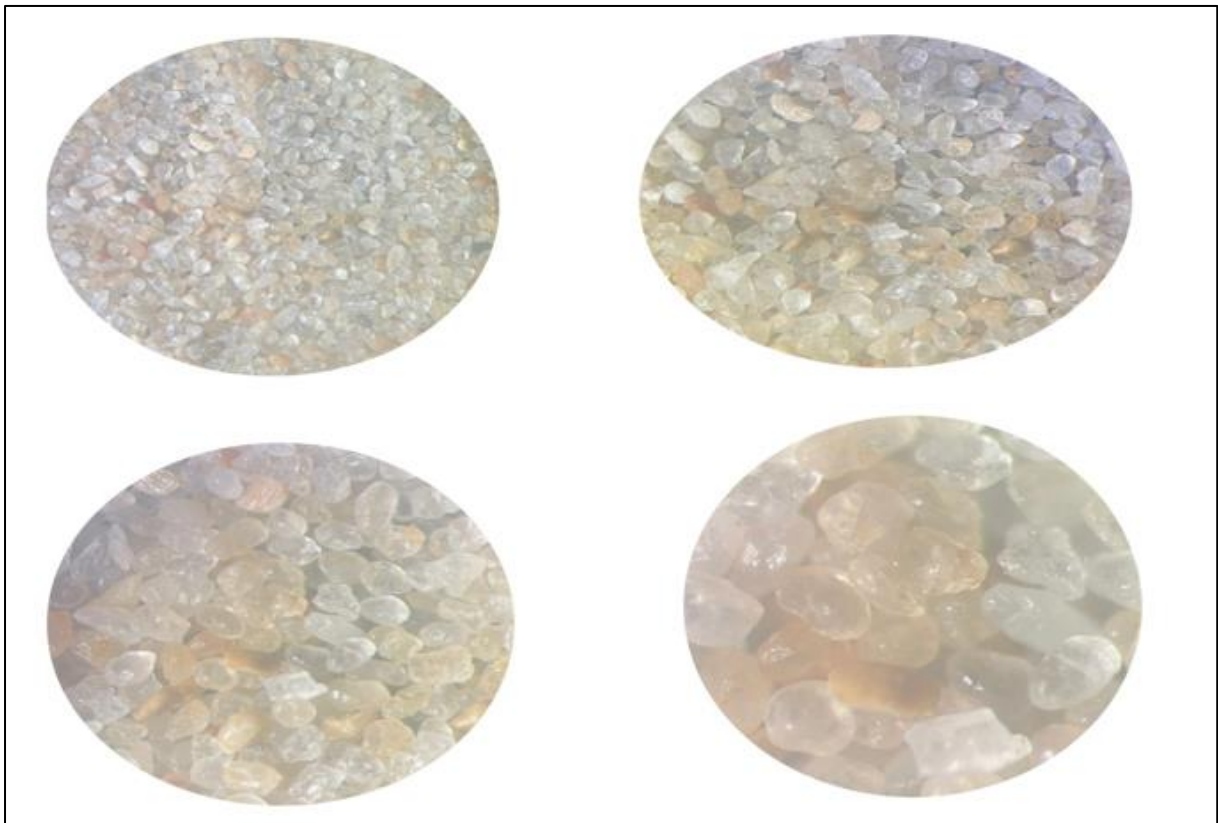


Figure II.16. L'analyse microscopique de sable de diamètre 0,4-0,6 mm

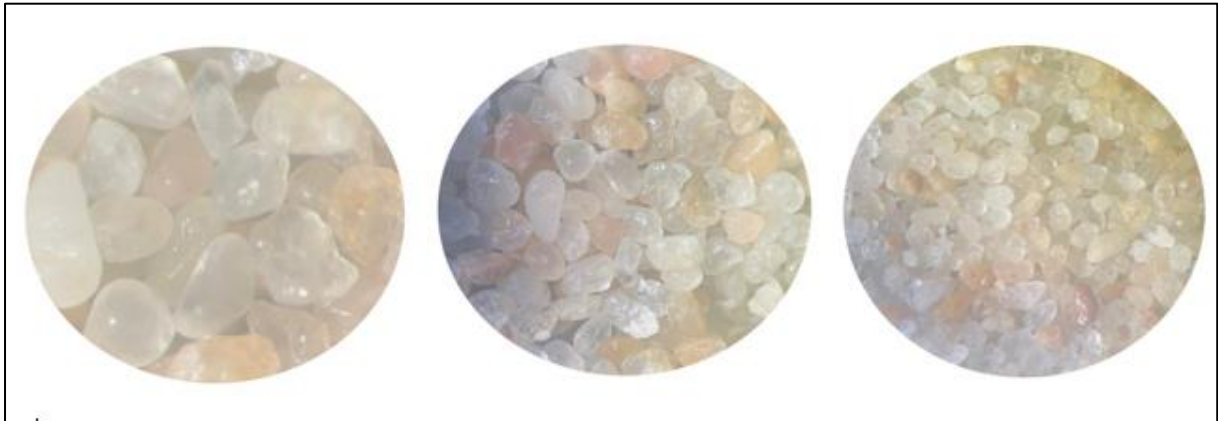


Figure II.17. L'analyse microscopique de sable de diamètre 0,63–0,8 mm

Des observations microscopiques ont été réalisées sur deux fractions de sable (0,4–0,6 mm et 0,6–0,8 mm), à différents grossissements ($\times 10$ à $\times 50$). Les résultats permettent de caractériser la qualité morphologique et minéralogique du matériau :

- **Morphologie générale** : Les grains sont majoritairement arrondis, signe d'un long transport mécanique par l'eau ou le vent. Cette usure naturelle explique non seulement la forme arrondie des particules, mais aussi leur surface propre, exempte de poussières ou d'argiles adhérentes.
- **Nature minéralogique** : Les grains sont essentiellement constitués de quartz, un minéral clair, dur et chimiquement stable. Ce type de sable est idéal pour les applications en filtration grâce à sa durabilité et son inertie.
- **Surface des grains** : À fort grossissement, les grains apparaissent lisses, propres et brillants, sans contaminants visibles. Cette propreté naturelle est due au processus de roulage prolongé subi par les particules pendant le transport.
- **Homogénéité granulométrique** : Les deux fractions présentent une bonne répartition des tailles, avec une légère supériorité en homogénéité pour la fraction 0,4–0,6 mm. Cette régularité est essentielle pour assurer un débit stable et limiter les phénomènes de colmatage dans les filtres.

La présence dominante de quartz, la propreté naturelle et la bonne homogénéité granulométrique indiquent probablement une origine alluviale (transport par l'eau), le sable a été transporté par des rivières ou des cours d'eau, surtout si le sable provient d'un gisement proche d'un ancien lit de rivière ou d'un environnement marin.

II.3. Comparaison des caractéristiques des matériaux filtrants (Sable et Argile Expandée) avec la norme AFNOR"

Voici un tableau récapitulatif de tous les résultats pour le sable et l'argile expandée, ainsi qu'une comparaison avec d'autres matériaux filtrants et les normes courantes, en particulier celles recommandées pour les matériaux filtrants dans les stations de traitement des eaux. Ce tableau comprend les principaux paramètres caractérisant les matériaux : porosité, surface spécifique et coefficient d'uniformité.

Tableau II.11. Récapitulation des résultats de caractérisation des matériaux filtrants

Paramètres	Sable (0,4- 1mm)	Sable (0,6-1,2 mm)	Sable (1,2-2,5 mm)	Argile Expandée	Norme AFNOR / Guide (Filtration)
Porosité (%)	41	41	41	38	≤ 50
Surface Spécifique (cm ² /g)	468,933	468,933	468,933	782,147	≥ 400 cm ² /g
Coefficient d'Uniformité (Cu)	1,24	1,37	1,37	1,56	≤ 4

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et caractérisé les matériaux filtrants locaux, à savoir le sable et l'argile expandée, en examinant leurs propriétés physiques et granulométriques. L'analyse granulométrique, la surface spécifique, la porosité et d'autres paramètres ont permis de mettre en évidence les différences notables entre ces matériaux. Le sable, constitué principalement de quartz, se distingue par sa granulométrie relativement grossière et sa surface spécifique modérée, ce qui en fait un matériau adapté aux applications nécessitant une filtration relativement rapide avec une faible capacité d'adsorption. En revanche, l'argile expandée, avec sa granulométrie fine et sa surface spécifique élevée, se montre plus efficace dans des applications où la capacité de rétention des particules fines et la surface d'échange sont cruciales.

Ces résultats, comparés aux critères normatifs et aux performances attendues pour les systèmes de filtration, suggèrent que chaque matériau a des avantages spécifiques en fonction des besoins

de filtration et des conditions opérationnelles. Le sable, plus abondant et moins coûteux, peut-être plus adapté pour des applications de filtration plus générales, tandis que l'argile expansée pourrait être privilégiée pour des applications nécessitant une plus grande finesse de filtration et une meilleure rétention des particules.

Dans le chapitre suivant, nous appliquerons ces connaissances sur les deux matériaux, en réalisant des tests de filtration pour évaluer leur efficacité respective dans des conditions réelles et comparer leurs performances en tant que médias filtrants. Cette analyse pratique nous permettra de mieux comprendre leur potentiel dans le cadre de systèmes de filtration industriels.

Chapitre III
Étude hydrodynamique et évaluation des
performances du procédé de filtration

Chapitre III
Étude hydrodynamique et évaluation des performances du procédé de filtration

III.1. Introduction

Au cours de cette recherche, nous avons examiné l'efficacité de deux types de matériaux filtrants, à savoir l'argile expansée et le sable, dans le processus de filtration de l'eau de mer. Ces matériaux ont été choisis en raison de leurs caractéristiques spécifiques et de leur capacité à améliorer la pureté de l'eau. L'argile expansée, offre des avantages significatifs comme une amélioration de la capacité de rétention des particules et une prolongation de la durée du cycle de filtration, ce qui en fait un média filtrant innovant et efficace. Le sable, un matériau naturel fréquemment utilisé dans les systèmes de filtration, se distingue par sa taille de grains, sa forme et sa composition chimique, des éléments clés pour améliorer son efficacité dans le traitement des eaux. L'indice de la turbidité, exprimée en NTU, donne des informations sur la clarté de l'eau et la quantité de particules en suspension, ce qui est crucial pour évaluer l'efficacité de la filtration. L'étude de l'effet de débits d'alimentation est cruciale, car elle impacte le temps de séjour de l'eau dans le lit filtrant, influençant l'efficacité de la filtration et la qualité de l'eau traitée. Ce chapitre présente les résultats issus de l'étude des paramètres, offrant une évaluation de l'efficacité et la sélectivité comparative des matériaux filtrants utilisés.

III.2. Protocole expérimentale

Cette étude est réalisée à l'échelle du laboratoire, elle a pour but de mettre en œuvre un procédé de filtration de l'eau de mer sur une argile expansée ou un sable. Le dispositif utilisé consiste en une colonne cylindrique, d'une hauteur de 50 cm et d'un diamètre intérieur de 1cm, remplie d'argile (ou sable). Le lit d'argile dans la colonne est immergé grâce au flux ascendant de l'alimentation. La solution aqueuse contenant le polluant circule à partir d'un réservoir à l'aide d'une pompe péristaltique (Figure X.1), à des débits de 6, 8 et 10 mL/min, choisis pour s'approcher des conditions de filtration rapide appliquées dans les stations de dessalement. Les paramètres suivis avant, pendant et après chaque essai sont : la turbidité (mesurée avec le turbidimètre TB 300 IR, conforme à la norme EN ISO 7027), le pH, la conductivité et le débit de sortie.

Chapitre III

Étude hydrodynamique et évaluation des performances du procédé de filtration

Deux médias filtrants ont été testés : le sable et l'argile expansée, utilisés soit séparément (filtration monocouche), soit combinés (filtration bicouche, avec l'argile en bas et le sable au-dessus).

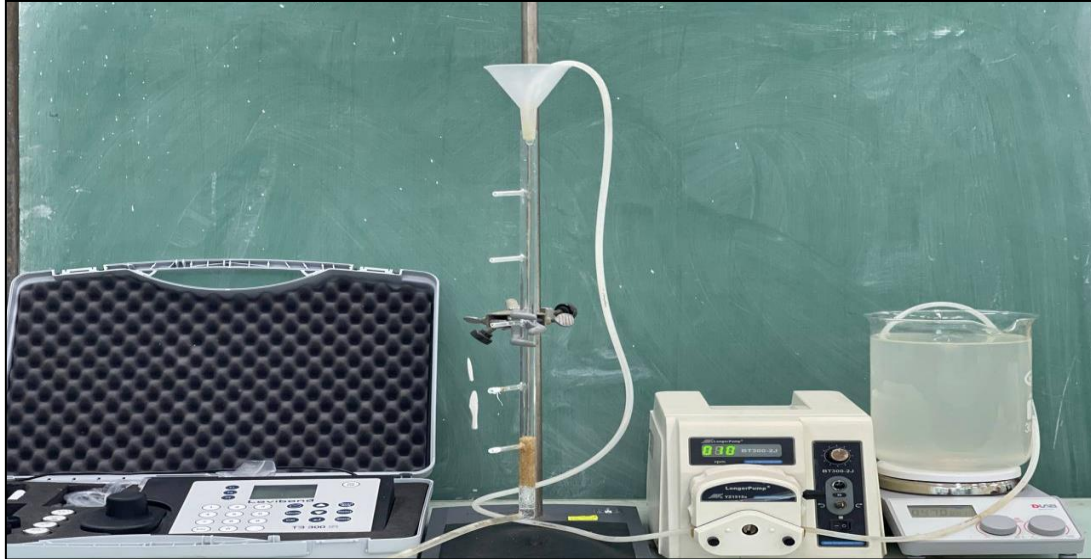


Figure III.1. Dispositif expérimental

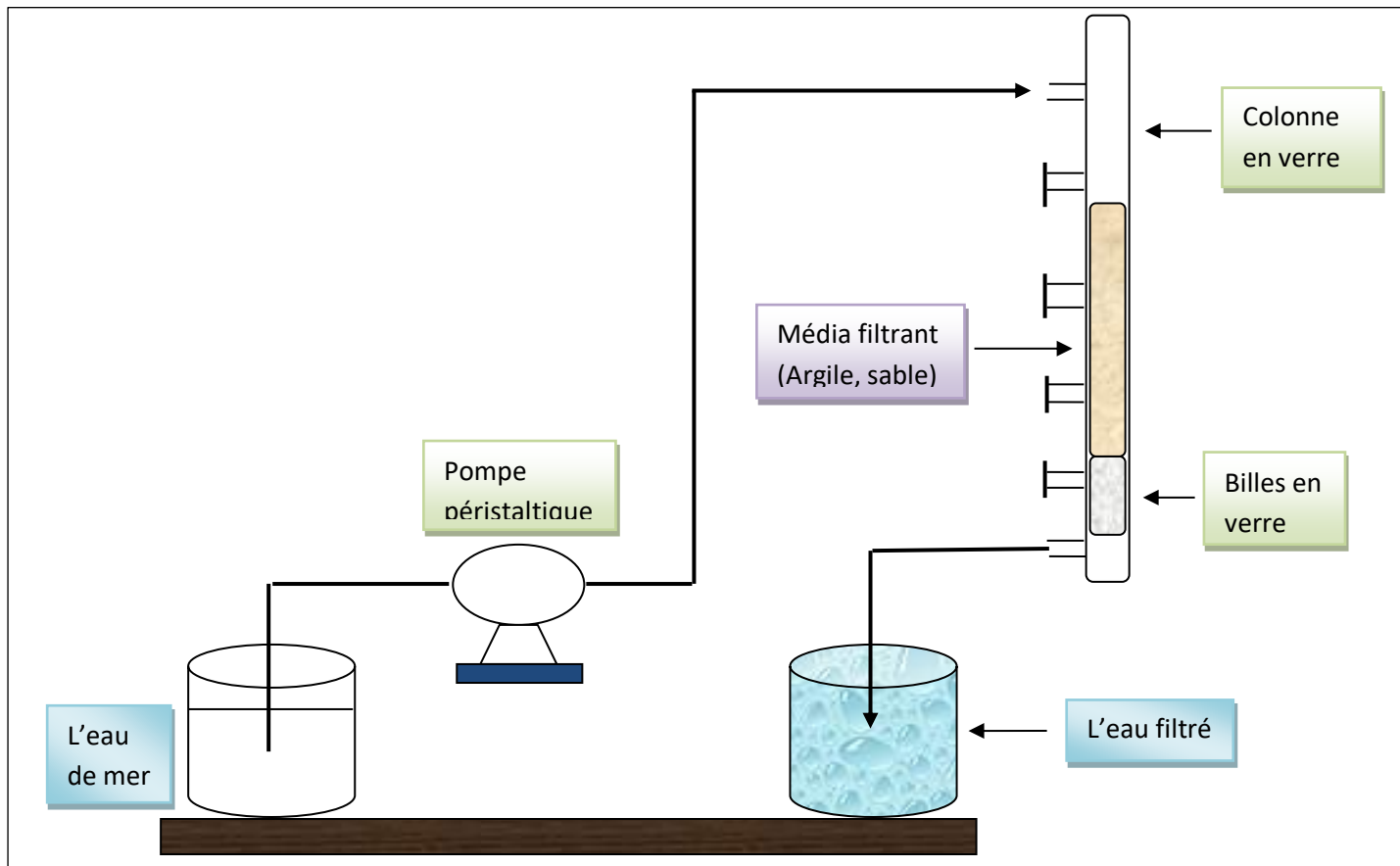


Figure III.2. Dispositif en dynamique

III.1.1. Calcul de la vitesse de filtration

Pour chaque point de mesure du débit de sortie, on calcule la vitesse de filtration (V) en divisant le débit volumique (Q) par la section transversale de la colonne (A) :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \frac{d^2}{4}} \quad (\text{éqIII.1})$$

Où :

d est le diamètre de la colonne = 1 cm.

Les résultats de la vitesse de filtration pour chaque débit sont réalisés dans le tableau suivant :

Tableau III.1. Vitesse de filtration pour les trois débits

Q (ml/min)	V (m/h)
6	4,58366
8	6,11155
10	7,63944

La vitesse de filtration augmente avec le débit, ce qui est attendu. Un débit plus faible favorise une meilleure qualité de filtration, tandis qu'un débit plus élevé améliore le rendement mais augmente le risque de colmatage. Un bon compromis est nécessaire pour optimiser l'efficacité et la durabilité du filtre.

III.1.2. Détermination et analyse de la porosité du lit de l'argile expansée et de sable en fonction de la granulométrie

Pour déterminer la porosité du lit de l'argile expansée et de sable, la méthode du volume de pores a été utilisée. Un échantillon représentatif de chaque matériau est préparé et pesé à l'état sec. Un volume connu d'eau est mesuré dans un récipient gradué, puis l'échantillon est immergé dans l'eau pour permettre l'infiltration du liquide dans ses pores. Après une période d'imprégnation adaptée, la diminution du volume d'eau dans le récipient est mesurée. Cette variation de volume correspond au volume des pores remplis, et la porosité est calculée comme le rapport entre le volume de vide (volume d'eau absorbé) et le volume total de l'échantillon, selon l'équation :

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{total}}} \quad (\text{éqIII.2})$$

Cette méthode permet une mesure directe de la structure poreuse et évalue la capacité des matériaux à retenir et faire circuler des fluides, ce qui est essentiel pour les performances en

Chapitre III

Étude hydrodynamique et évaluation des performances du procédé de filtration

filtration d'eau. Elle est particulièrement adaptée aux matériaux poreux comme l'argile expansée, où les pores internes peuvent être difficiles à détecter par des calculs géométriques simples. Les résultats de la mesure de la porosité des deux matériaux sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau III.2. Porosité du lit de l'argile expansée selon les diamètres des particules

Diamètre des particules (mm)	Porosité (%)
0,63–0,8	60%
0,4–0,6	40%

Tableau III.3. Porosité du lit de sable selon les diamètres des particules

Diamètre des particules (mm)	Porosité (%)
0,63–0,8	60%
0,4–0,6	40%

Les résultats montrent que pour les deux matériaux (argile expansée et sable), la porosité est de 60 % pour les particules de diamètre (0,63–0,8 mm) et de 40 % pour les particules de diamètre 0,4–0,6 mm.

Ce phénomène peut être interprété de manière similaire pour les deux matériaux : les particules de plus grand diamètre (0,63–0,8 mm) créent des espaces vides plus importants entre elles, ce qui permet à l'eau de circuler plus facilement, ce qui se traduit par une porosité plus élevée. À l'inverse, les particules plus petites (0,4–0,6 mm) s'agencent plus étroitement, réduisant ainsi les espaces libres entre les particules et, par conséquent, la porosité, ce qui peut ralentir l'écoulement de l'eau tout en améliorant la rétention des fines particules en suspension.

Ces résultats indiquent que la granulométrie joue un rôle crucial dans les performances des matériaux filtrants. La porosité plus faible des matériaux avec des grains plus fins pourrait entraîner une meilleure capacité de rétention des particules fines mais également un risque de colmatage plus rapide, tandis que les matériaux avec des grains plus grossiers permettraient une meilleure circulation de l'eau, mais pourraient être moins efficaces pour retenir les petites particules. Ces facteurs doivent être pris en compte lors de l'optimisation du processus de filtration de l'eau de mer.

III.2. Etude de l'effet des différents paramètres pour l'argile expansée

III.2.1. Effet du débit d'alimentation : Cas des grains de l'argile (0.63-0.8 mm)

Afin d'évaluer l'influence du débit d'alimentation sur l'efficacité du procédé, nous avons varié ce dernier entre 6,0, 8,0 et 10,0 ml/min, tout en maintenant constante la masse d'adsorbant utilisée, fixée à 10,0 g dans toutes les expériences. Les trois paramètres clés suivis au cours du

traitement étaient la turbidité de l'eau de mer, sa conductivité, ainsi que son pH. Les figures (III.3), (III.4) et (III.5) illustrent l'évolution de la turbidité en fonction du temps pour chaque débit appliqué. La hauteur du lit filtrant était de 10 cm, et la turbidité initiale de l'eau de mer était de 51,8 NTU. Ces figures montrent l'évolution de la turbidité au fil du temps pour les trois débits testés : 6, 8 et 10 ml/min. De manière générale, la turbidité de l'eau filtrée est nettement inférieure à celle de l'eau brute, quel que soit le débit, indiquant l'efficacité de l'argile expansée.

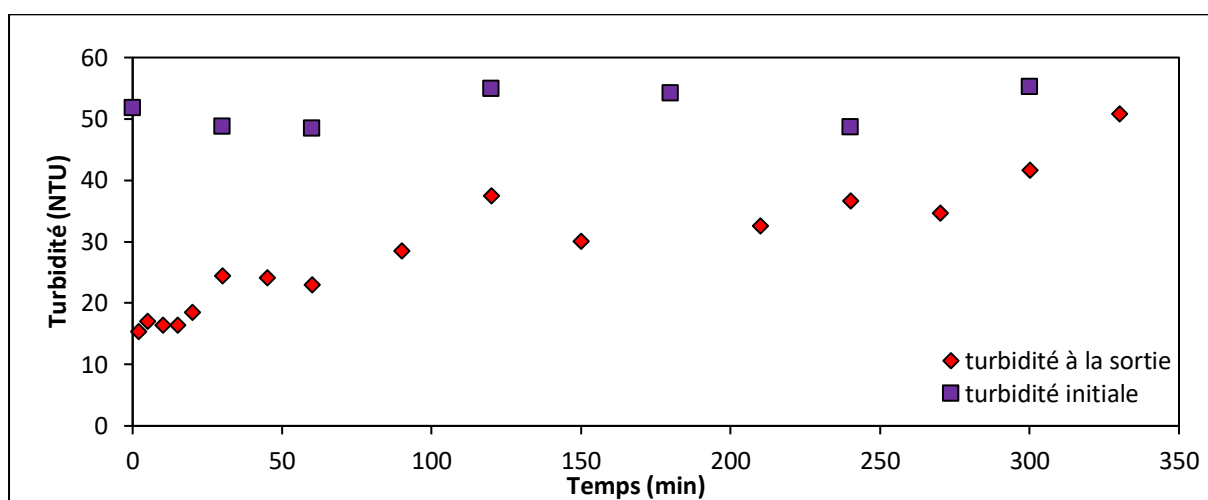


Figure III.3. Évolution de la turbidité en fonction de temps de débit 6 mL/min (0,63–0,8 mm)

Le lit filtrant utilisé, caractérisé par une porosité de 60 % et une granulométrie relativement moyenne (0,63–0,8 mm), a été testé en condition de filtration rapide à un débit de 6 mL/min. L'eau brute présentait une turbidité initiale de 50 NTU. Une élimination rapide de 70 % a été observée dans les 30 premières minutes, indiquant une bonne efficacité initiale du système.

Cependant, l'efficacité a diminué progressivement, atteignant 50 % après 2 heures, puis se stabilisant autour de 40 % jusqu'à 5 heures. Ce comportement est typique d'une filtration rapide, où la rétention des particules se fait principalement en surface, entraînant un colmatage partiel au fil du temps. Le lit n'est pas saturé, mais une perte de performance est constatée. L'argile expansée de granulométrie 0,63–0,8 mm s'est révélée modérément efficace pour la filtration de l'eau de mer à un débit de 6 mL/min.

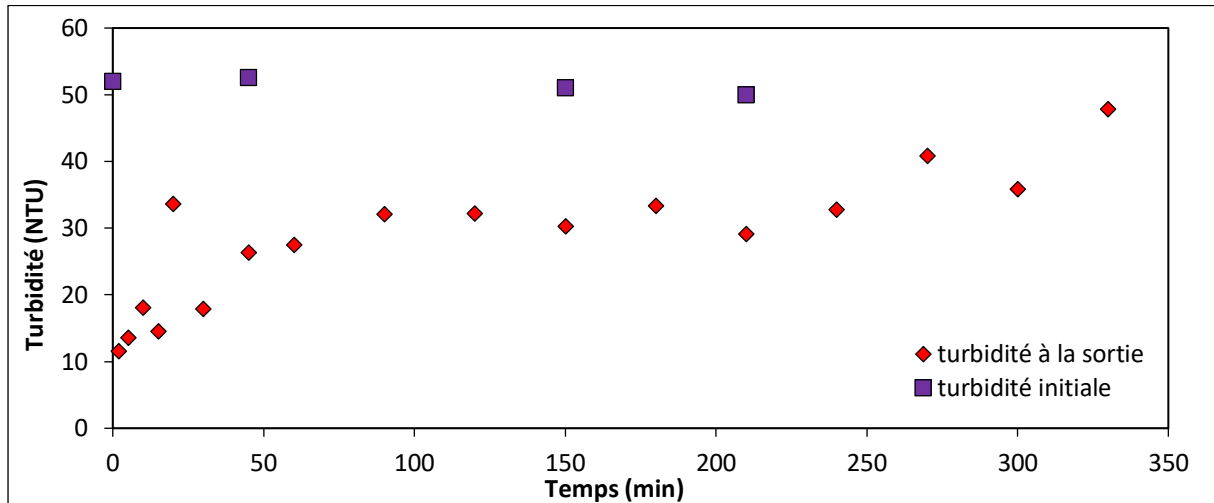


Figure III.4. Évolution de la turbidité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,63–0,8 mm)

La figure (III.4) montre qu'à un débit de 8 mL/min, la filtration de l'eau réalise une élimination initiale de 60 % de la turbidité pendant les 30 premières minutes, indiquant une bonne efficacité dès le début. Cependant, cette efficacité diminue ensuite et se stabilise progressivement autour de 40 % après 5 heures de filtration. Ce comportement suggère un colmatage partiel du lit filtrant ou une baisse progressive de sa capacité à retenir les particules fines au fil du temps. L'augmentation du débit à 8 mL/min permet un meilleur renouvellement de l'eau et limite en partie le colmatage, assurant une performance plus stable sur la durée. Le débit plus faible favorise une filtration plus efficace au début, mais conduit à un colmatage plus rapide du lit filtrant.

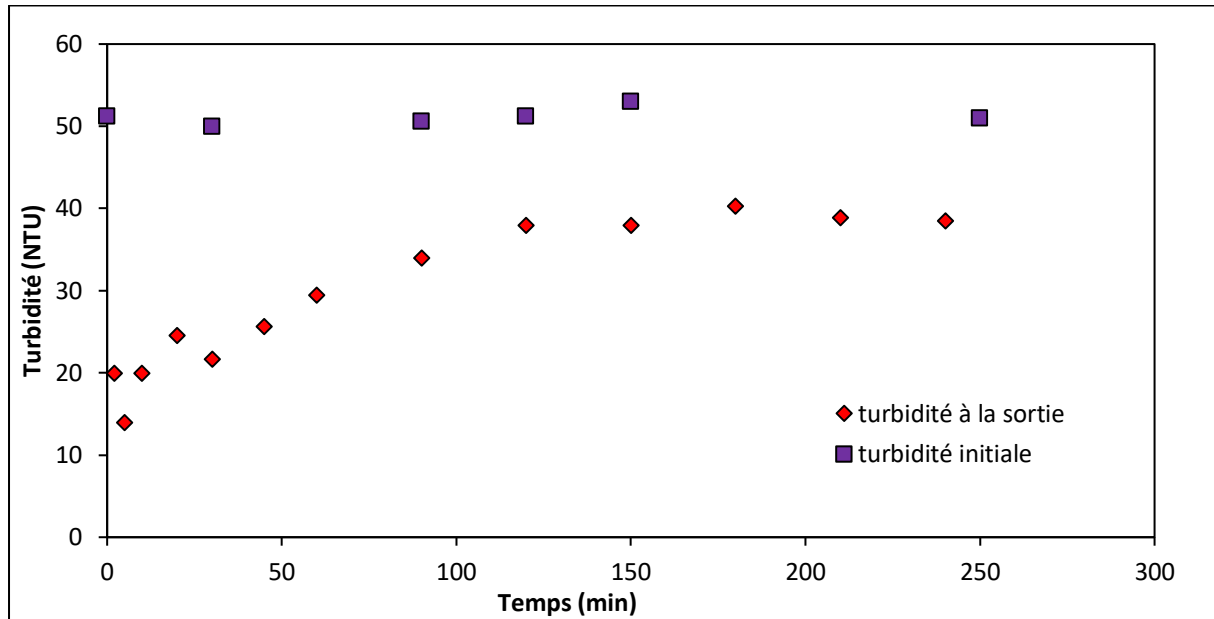


Figure III.5. Évolution de la turbidité en fonction de temps de débit 10mL/min (0,63–0,8 mm)

La figure (III.5) montre qu'à un débit de 10 mL/min, l'élimination de la turbidité atteint 40 % après 1 heure de filtration, puis diminue à 20 % et reste stable pendant environ 3 heures, indiquant que le lit filtrant conserve une performance constante malgré le débit élevé suggérant un temps de contact trop court pour une filtration efficace [8].

Le débit de 8 mL/min apparaît comme le meilleur compromis pour la filtration avec l'argile expansée (granulométrie 0,63–0,8 mm), car il offre une efficacité initiale satisfaisante et une stabilité durable de la performance. Ce débit permet un renouvellement de l'eau suffisant tout en maintenant un temps de contact optimal pour la rétention des particules, limitant ainsi le colmatage et assurant une filtration efficace sur la durée..

▪ Influence du débit d'alimentation sur le pH

Les figures (III.6), (III.7) et (III.8) présentent l'évolution du pH en fonction du temps pour chaque débit appliqué. Pour chaque point de mesure à la sortie, une mesure à l'entrée est également relevée, permettant de tracer deux courbes distinctes pour chaque cas : l'une représentant la variation du pH à l'entrée et l'autre à la sortie.

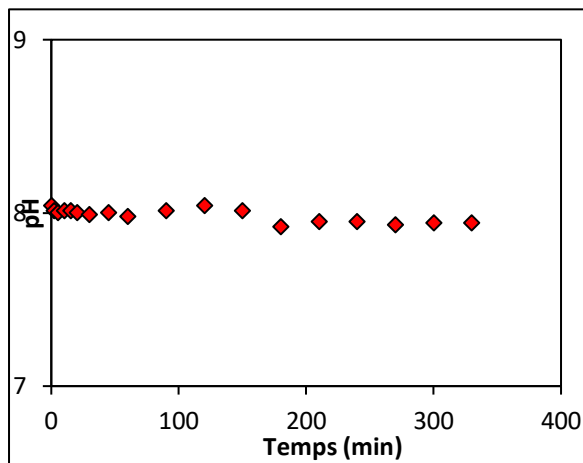


Figure III.6. Évolution du pH en fonction de temps de débit 6mL/min (0,63–0,8 mm)

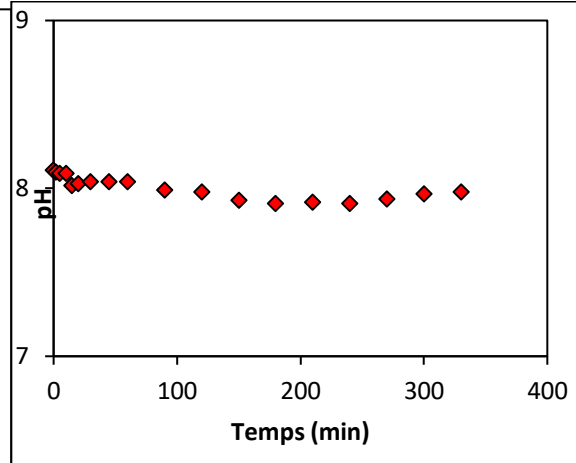


Figure III.7. Évolution du pH en fonction de temps de débit 8mL/min (0,63–0,8 mm)

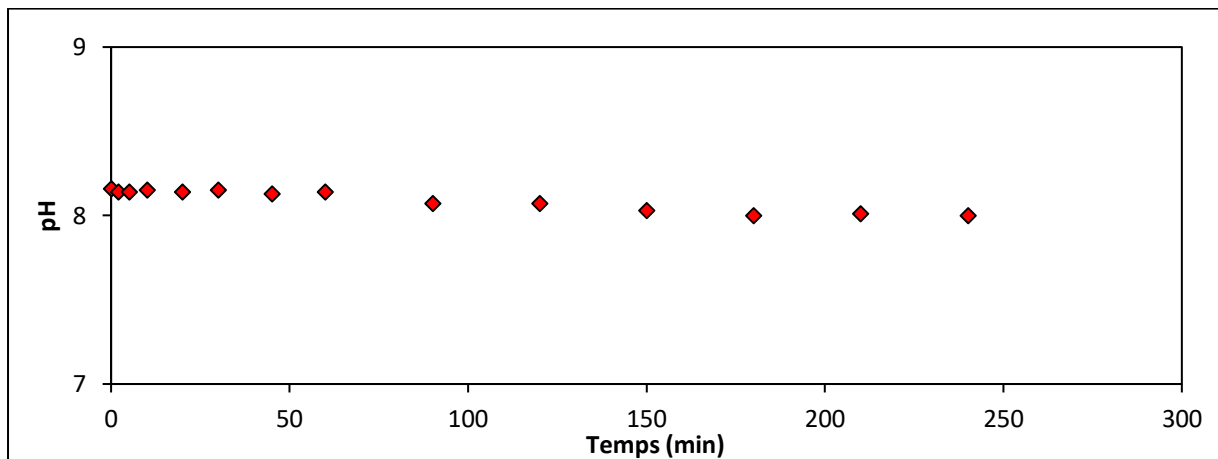


Figure III.8. Évolution du pH en fonction de temps de débit 10mL/min (0,63–0,8 mm)

Les résultats montrent que, pour tous les débits testés, le pH reste stable, avec des variations relativement faibles (inférieures à 0,2 unité), ce qui suggère que le procédé de filtration n'a pas d'impact significatif sur l'acidité ou l'alcalinité de l'eau. Cette stabilité du pH, proche de 8,00, reflète un processus de filtration neutre d'un point de vue chimique.

▪ Influence du débit d'alimentation sur la conductivité

Les figures (III.9), (III.10) et (III.11) montrent l'évolution de la conductivité en fonction du temps pour chaque débit appliqué. À chaque point de mesure à la sortie, une mesure à l'entrée est également prise, permettant ainsi de tracer deux courbes distinctes : l'une représentant la variation de la conductivité à l'entrée et l'autre à la sortie.

De manière générale, on observe une diminution de la conductivité en sortie du lit filtrant pour tous les débits testés, ce qui indique que l'argile expansée retient une partie des sels dissous.

Cette diminution est plus marquée pour des débits plus élevés, ce qui suggère une meilleure dynamique de filtration et un renouvellement plus efficace de la solution au sein du lit filtrant.

Débit de 6 mL/min (figure III.9) : La conductivité chute légèrement au début du traitement, atteignant un minimum aux alentours de 52,0 mS/cm, puis se stabilise, ce qui reflète une efficacité modérée.

Débit de 8 mL/min (figure III.10) : Une diminution plus importante de la conductivité est observée dans les premières minutes de filtration, atteignant un minimum de 51,5 mS/cm.

Débit de 10 mL/min (figure III.11) : La conductivité baisse encore plus, atteignant un minimum de 48,5 mS/cm. Ce résultat suggère que, malgré un temps de contact plus court, l'efficacité du système est renforcée, probablement en raison du renouvellement plus rapide de l'eau, favorisant la rétention des sels dissous.

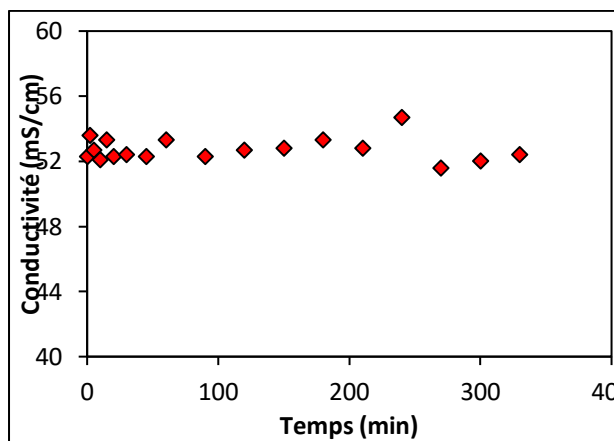


Figure III.9. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 6 mL/min (0,63–0,8 mm)

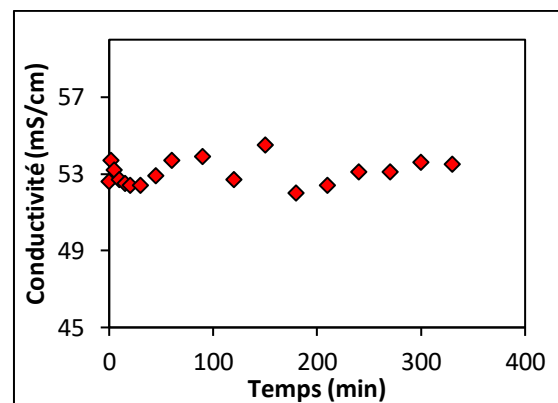


Figure III.10. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,63–0,8 mm)

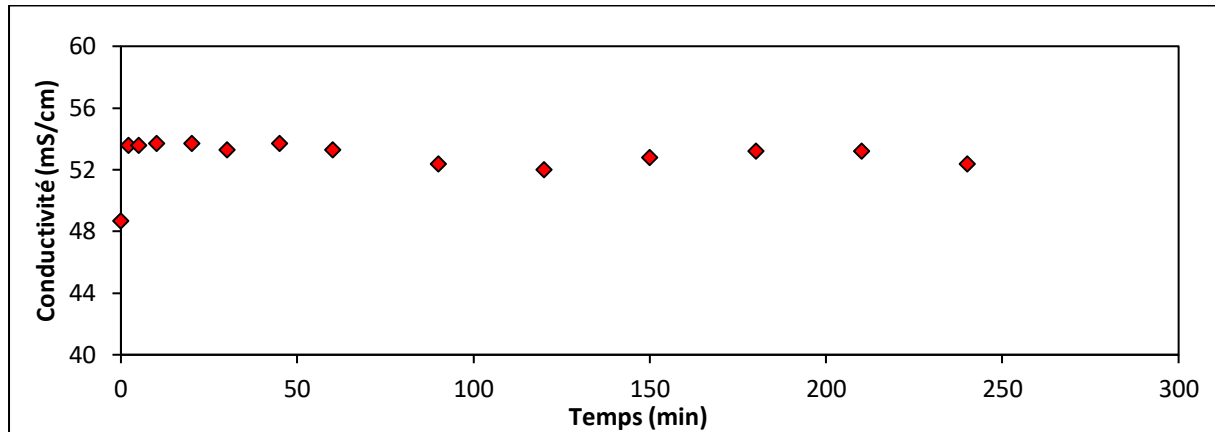


Figure III.11. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 10ml/min (0,63–0,8 mm)

III.2.2. Effet du débit d'alimentation : Cas des grains d'argile expansée (0,4-0,6 mm)

Pour le débit de 6 mL/min (figure III.12), la turbidité à la sortie diminue progressivement pour atteindre environ 30 NTU. Ce faible débit permet un temps de contact plus long, ce qui favorise une meilleure rétention des particules, mais l'efficacité reste modérée. Pour un débit de 8 mL/min (figure III.13), la réduction de la turbidité est plus marquée, atteignant environ 20 NTU. Ce débit semble être un compromis optimal entre un temps de contact suffisant et un renouvellement adéquat de l'eau, ce qui améliore l'efficacité de la filtration. Enfin, pour un débit de 10 mL/min (figure III.14), la turbidité en sortie varie davantage, bien que des valeurs relativement basses soient parfois atteintes. Ce débit réduit le temps de contact, entraînant une filtration moins stable et moins efficace.

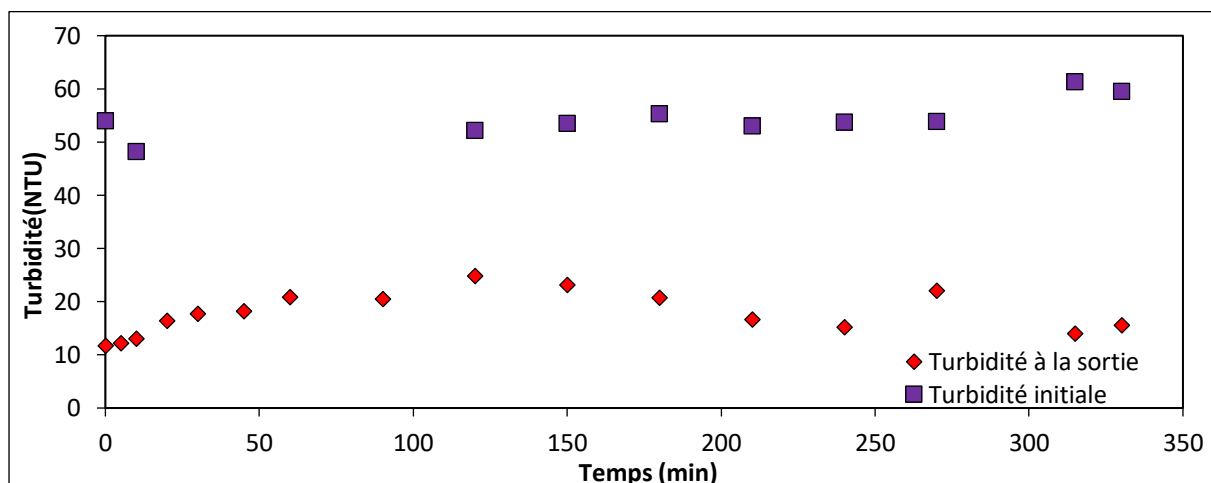


Figure III.12. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 6mL/min (0,4–0,6 mm)

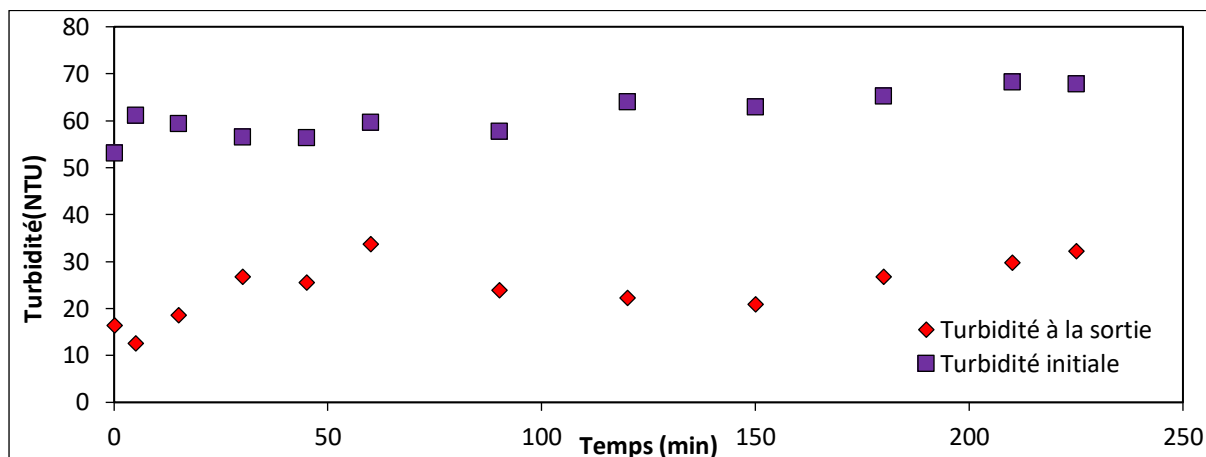


Figure III.13. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,4–0,6 mm)

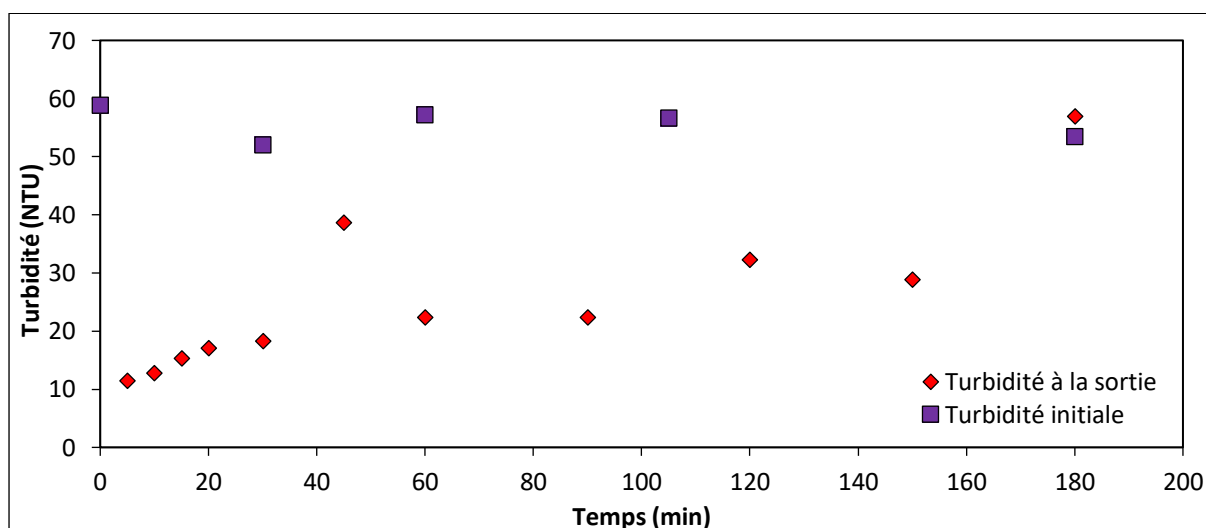


Figure III.14. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 10mL/min (0,4–0,6 mm)

III.2.3. Etude de l'effet de diamètre des grains de l'argile

L'importance de cette étude réside dans la possibilité d'améliorer les procédés de filtration en ajustant la granulométrie des matériaux filtrants. En comprenant comment la taille des particules affecte l'efficacité de la rétention des particules en suspension, cette étude ouvre la voie à l'optimisation des systèmes de filtration pour une meilleure qualité de l'eau traitée.

Le cœur de cette étude réside dans l'analyse de l'effet du diamètre des particules d'argile expansée sur l'efficacité de la filtration, notamment en termes de réduction de la turbidité et de conductivité de l'eau. Les résultats montrent que la granulométrie de l'argile a un impact significatif sur la performance de la filtration : les fractions fines (0,25–0,5 mm) offrent la meilleure réduction de la turbidité, tandis que les fractions plus grossières (0,63–0,8 mm) montrent une performance inférieure en raison de leur porosité plus élevée.

Ces observations permettent de conclure que l'optimisation de la taille des particules d'argile est cruciale pour maximiser l'efficacité de la clarification de l'eau.

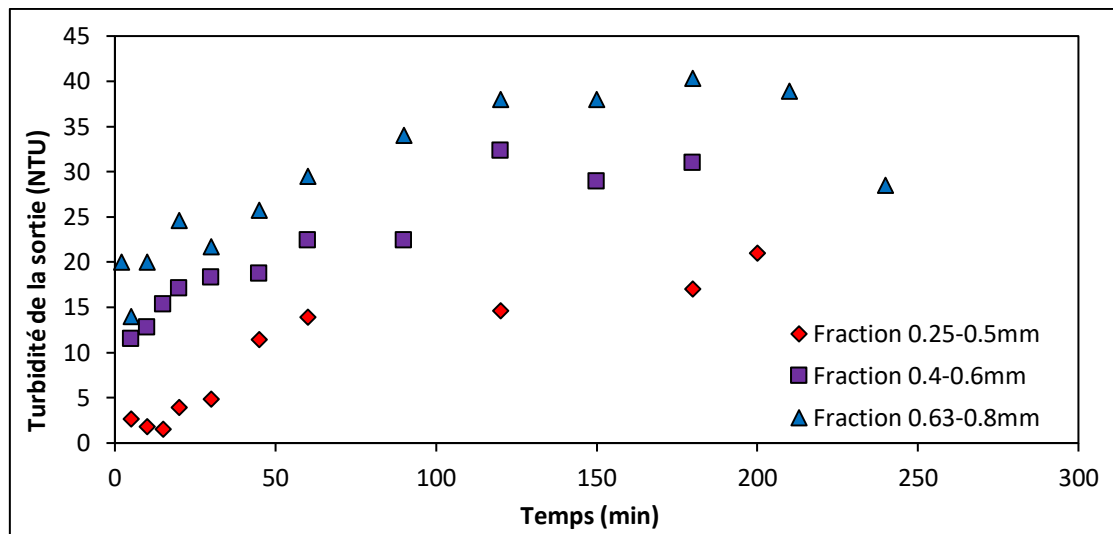


Figure III.15. Évolution de la turbidité en fonction de temps pour les trois fractions

III.2.4. Détermination et interprétation de la perte de charge de l'argile expansée

La perte de charge à travers un lit filtrant, tel que celui constitué d'argile expansée, peut être estimée à l'aide de la formule de Kozeny-Carman, qui prend en compte la viscosité du fluide, la porosité du lit, la surface spécifique des grains, ainsi que la vitesse de filtration. Cette approche permet d'évaluer la résistance hydraulique offerte par le matériau filtrant.

$$\frac{\Delta P}{H} = \mu \left[\frac{K(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right] (S_v)^2 V \quad (\text{éqIII.3})$$

Avec :

H: hauteur de couche considérée : (10 cm pour l'argile, 6 cm de hauteur pour le sable)

μ : viscosité dynamique de l'eau de mer = $1.07 \cdot 10^{-3}$ Pa.s

k : constante de Kozeny (environ 5)

ε : porosité du lit filtrant

V : vitesse de filtration (m/s)

S_v : surface spécifique par unité de volume des grains filtrants = $\rho \cdot \text{SSB}$ (cm⁻¹)

Dans cette étude, deux granulométries d'argile expansée (0,63–0,8 mm et 0,4–0,6 mm) ont été testées pour trois débits d'alimentation différents (6, 8 et 10 mL/min). Les pertes de charge calculées sont résumées dans le tableau III.4.

Tableau III.4. Perte de charge de l'argile expansée de diamètre (0,63–0,8 mm) et de diamètre (0,4–0,6 mm) pour les trois débits.

Débit (mL/min)	Perte de charge (bar)
diamètre (0,63–0,8 mm)	
6	$9,24 \cdot 10^{-2}$
8	$1,23 \cdot 10^{-1}$
10	$1,54 \cdot 10^{-1}$
diamètre (0,4–0,6 mm)	
6	$7,01 \cdot 10^{-1}$
8	$9,35 \cdot 10^{-1}$
10	1,17

L'analyse des résultats montre que la perte de charge augmente avec le débit, ce qui est cohérent avec la formule de Kozeny, où la perte de charge est proportionnelle à la vitesse de filtration. Par ailleurs, pour un même débit, la perte de charge est plus élevée avec des particules de plus petite taille, en raison de la réduction des espaces intergranulaires, qui accroît la résistance à l'écoulement. Ainsi, cette étude met en évidence un compromis à rechercher entre efficacité de filtration (meilleure avec des grains fins) et perte de charge (plus faible avec des grains grossiers), ce qui est essentiel pour concevoir un système de filtration performant et énergétiquement efficient.

III.3. Etude de l'effet des différents paramètres pour le sable

III.3.1. Effet du débit d'alimentation : Cas des grains de sable (0,63-0,8 mm)

Afin de comparer l'efficacité du sable comme matériau filtrant à celle de l'argile expansée, l'effet du débit d'alimentation a été étudié en utilisant trois valeurs : 6, 8 et 10 mL/min, avec un diamètre de grains de sable compris entre 0,63 et 0,8 mm. Les conditions expérimentales ont été maintenues constantes, notamment une hauteur de lit filtrant de 6 cm et une turbidité initiale de l'eau de mer de 53,6 NTU. Les figures (III.16), (III.17) et (III.18) montrent l'évolution de la turbidité au cours du temps pour chacun des débits. Pour un débit de 6 mL/min, la turbidité diminue de manière progressive et relativement stable, avec des valeurs de sortie allant de 29 à 39 NTU, traduisant une bonne efficacité de filtration. Lorsque le débit est augmenté à 8 mL/min, une réduction de la turbidité est toujours observée, mais elle devient moins marquée, avec des valeurs en sortie comprises entre 32 et 40 NTU. Enfin, à 10 mL/min, la performance du système diminue davantage : la turbidité à la sortie varie de 34 à 46 NTU, indiquant une filtration moins efficace et plus irrégulière.

Globalement, les résultats confirment que l'efficacité de la filtration est inversement proportionnelle au débit d'alimentation. Un débit plus faible permet un temps de contact plus

Chapitre III

Étude hydrodynamique et évaluation des performances du procédé de filtration

long entre l'eau et le matériau filtrant, ce qui favorise une meilleure rétention des particules. Le débit de 6 mL/min s'avère donc être le plus performant dans ce cas [9].

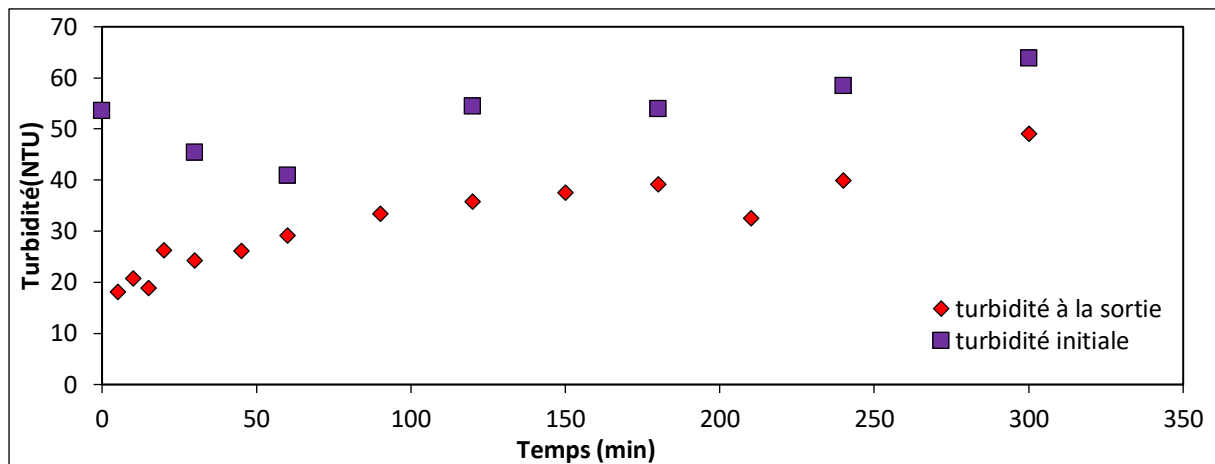


Figure III.16. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 6mL/min (0,63–0,8 mm)

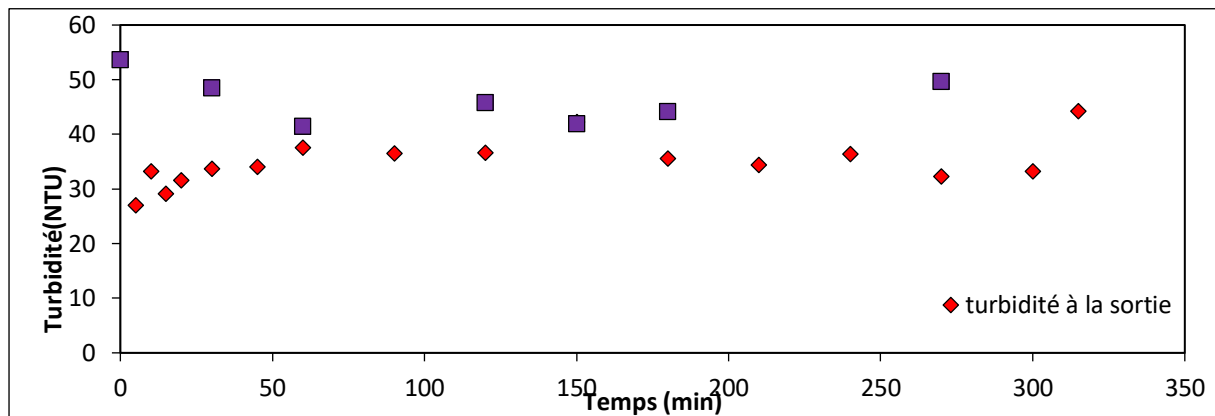


Figure III.17. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,63–0,8 mm)

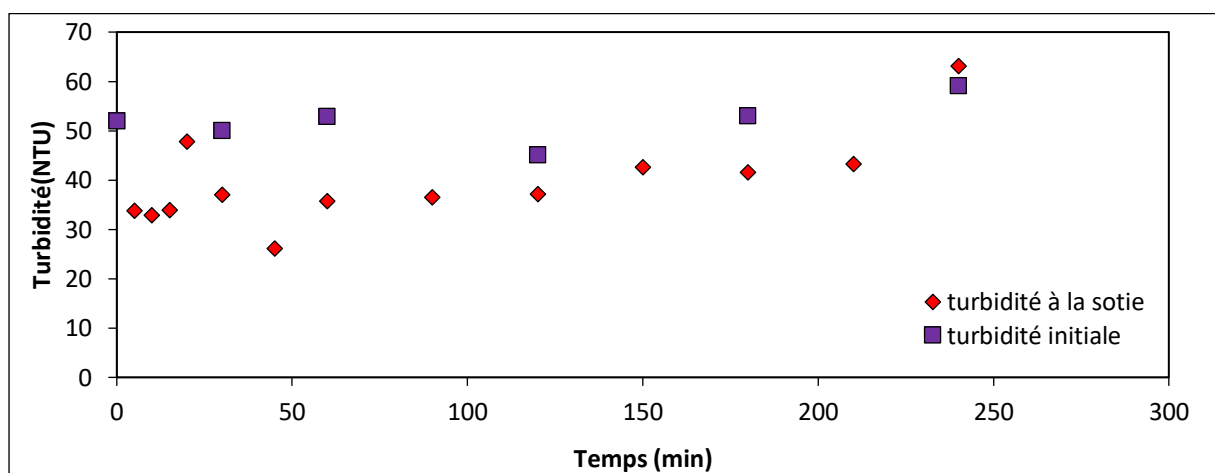


Figure III.18. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 10mL/min (0,63–0,8 mm)

Les figures (III.19) et (III.20) et (III.21) présentent l'évolution du pH en fonction du temps pour chaque débit appliqué. L'analyse de l'évolution du pH de l'eau de mer à l'entrée et à la sortie

Chapitre III

Étude hydrodynamique et évaluation des performances du procédé de filtration

du système de filtration au sable montre une stabilité remarquable, quel que soit le débit appliqué (6, 8 ou 10 mL/min). Les mesures indiquent que le procédé de filtration n'altère pas significativement l'alcalinité de l'eau, ce qui reflète une inertie chimique du sable vis-à-vis du pH. Ce comportement est particulièrement favorable, car il garantit la neutralité du traitement vis-à-vis de la qualité chimique de l'eau, évitant ainsi toute réaction secondaire indésirable.

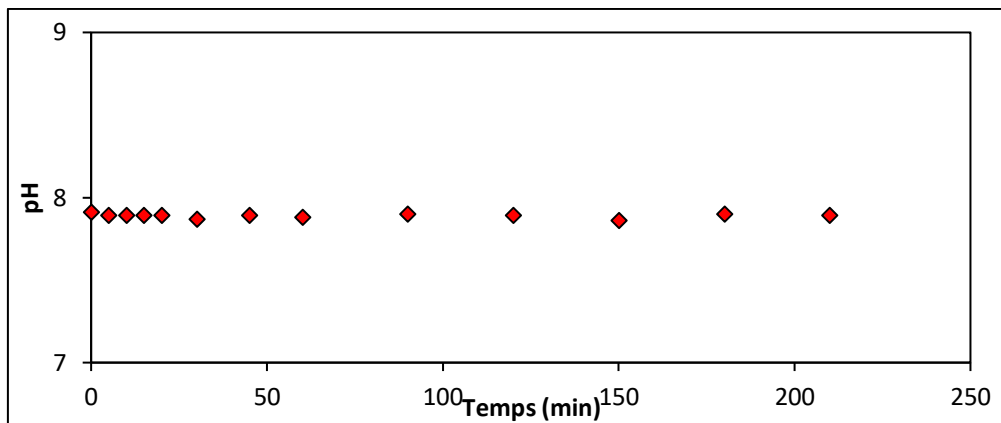


Figure III.19. Évolution du pH en fonction de temps de débit 10mL/min (0,63–0,8 mm)

Les figures (III.22), (III.23) et (III.24) illustrent l'évolution de la conductivité en fonction du temps pour chaque débit appliqué. L'évolution de la conductivité électrique de l'eau de mer, mesurée à l'entrée et à la sortie du système de filtration au sable pour différents débits (6, 8 et 10 mL/min), révèle une faible diminution après traitement. Cette légère baisse indique que le procédé est peu efficace pour éliminer les substances dissoutes, confirmant que la filtration physique au sable agit principalement sur les particules en suspension, sans impact notable sur la minéralisation de l'eau.

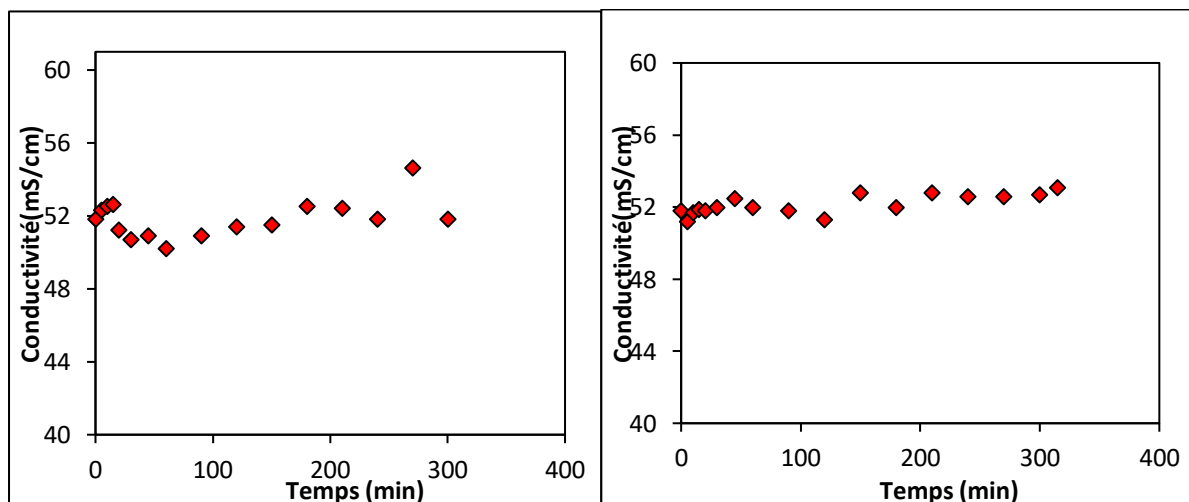


Figure III.20. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 6mL/min (0,63–0,8 mm)

Figure III.21. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,63–0,8 mm)

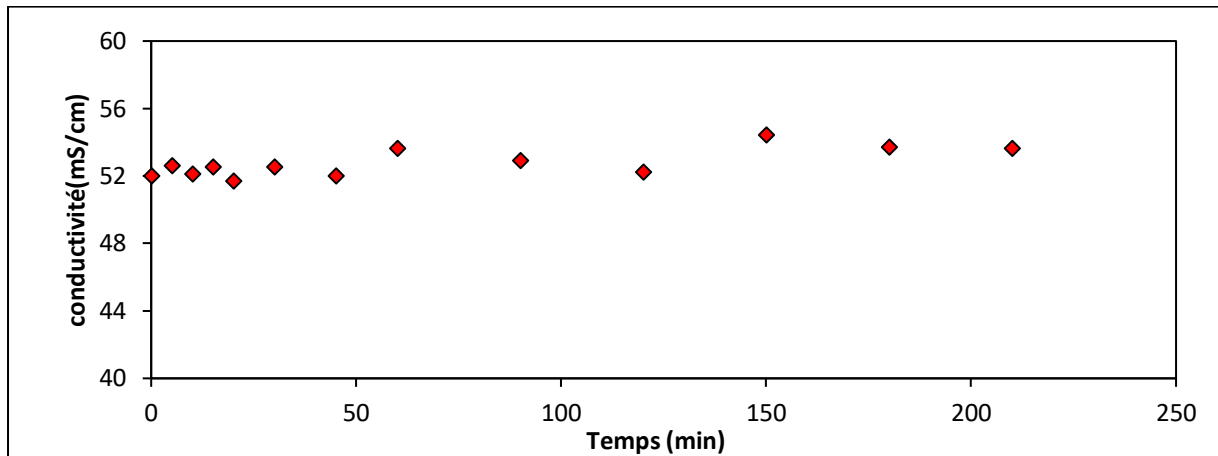


Figure III.22. Évolution de conductivité en fonction de temps de débit 10mL/min (0,63–0,8 mm)

III.3.3. Etude de l'effet de la hauteur du lit filtrant de sable

L'étude menée vise à comparer l'efficacité de filtration de deux lits de sable de hauteurs différentes (6 cm et 12 cm), tout en maintenant constants les paramètres suivants : un débit d'alimentation de 6 mL/min, un diamètre de grains compris entre 0,63 et 0,8 mm, et une turbidité initiale de l'eau de mer d'environ 54,6 NTU.

Les résultats, illustrés dans la figure (III.25), montrent que le lit de 12 cm présente une efficacité moyenne d'élimination de la turbidité de 45,74 %, contre 40,49 % pour le lit de 6 cm. Cet écart de plus de 5 points de pourcentage met en évidence l'intérêt d'une plus grande épaisseur du lit filtrant pour améliorer la rétention des particules.

Cette amélioration s'explique principalement par un temps de contact plus long entre l'eau et le média filtrant, ainsi qu'une capacité accrue de piégeage des matières en suspension. L'augmentation de la hauteur du lit offre également un meilleur volume de rétention des impuretés, retardant ainsi le phénomène de saturation. Sur la durée totale de l'expérience, le lit de 12 cm affiche une meilleure stabilité, malgré un pic de turbidité observé à 60 minutes. Passé ce point, les valeurs se stabilisent généralement en dessous de 30 NTU. En revanche, le lit de 6 cm connaît une hausse progressive et dépasse durablement les 30 NTU à partir de 90 minutes, traduisant une saturation plus rapide.

Cette étude comparative souligne l'impact déterminant de la hauteur du lit filtrant sur l'efficacité du traitement. Le lit de 12 cm offre non seulement une meilleure élimination moyenne de la turbidité, mais également une performance plus stable et durable dans le temps.

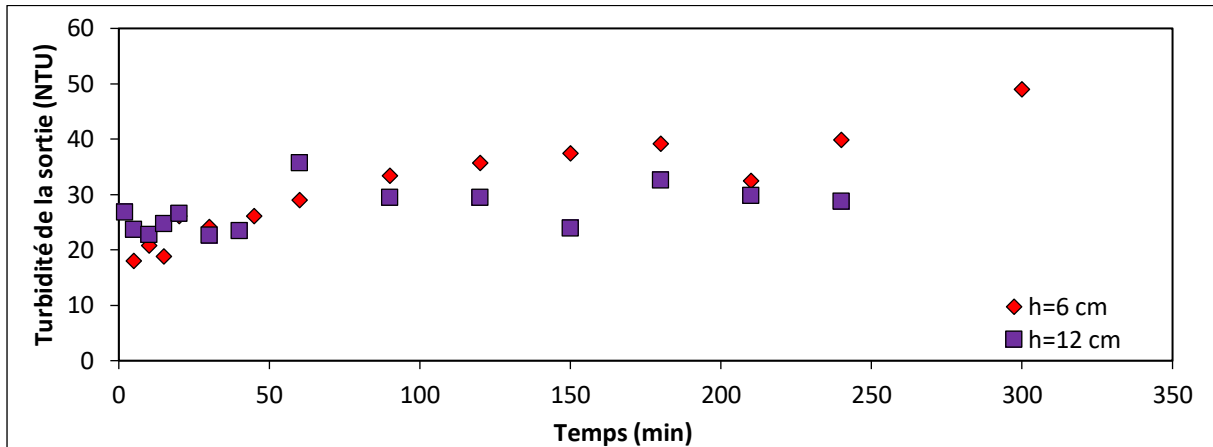


Figure III.23. Évolution de turbidité en fonction de temps de hauteur différente.

III.3.4. Influence de la turbidité initiale sur l'efficacité de la filtration sur sable

Dans cette expérience, la turbidité initiale de l'eau de mer a été réduite à 27,9 NTU, tandis que les autres paramètres ont été maintenus constants : débit d'alimentation fixé à 6 mL/min, hauteur du lit filtrant à 6 cm, et diamètre des particules de sable compris entre 0,63 et 0,8 mm. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure (III.26), qui présente l'évolution de la turbidité en sortie en fonction du temps sous l'effet d'une turbidité initiale plus faible.

En comparaison avec l'expérience précédente, réalisée dans les mêmes conditions mais avec une turbidité initiale plus élevée (53,6 NTU), il apparaît que cette dernière offre une réduction de la turbidité plus marquée et plus stable.

Cela démontre que le système de filtration lente sur sable est plus performant lorsque la turbidité initiale est élevée, à condition que le filtre ne soit pas saturé ou colmaté. Bien que la turbidité diminue dans les deux cas, l'expérience à forte turbidité atteint plus rapidement des valeurs plus faibles et les maintient plus longtemps. Ce comportement souligne l'influence notable de la qualité de l'eau brute sur l'efficacité globale du processus de filtration.

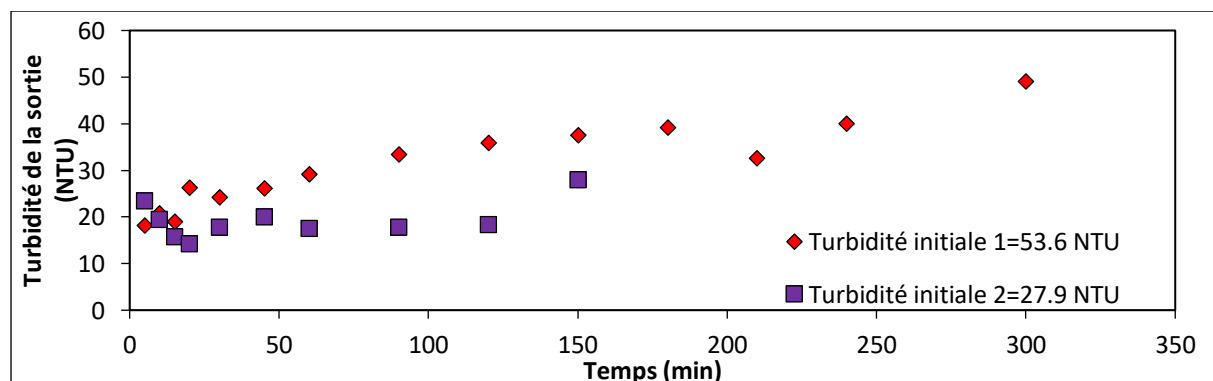


Figure III.24. Évolution de turbidité à la sortie en fonction de temps sous l'effet de la turbidité initiale

III.3.5. Effet du débit pour diamètre des particules (0,4-0,6 mm)

Dans cette étude, l'influence du débit d'alimentation a été examinée en utilisant des débits de 6,0 ; 8,0 et 10,0 mL/min, tout en maintenant constantes les autres conditions expérimentales. Seul le diamètre des particules de sable a été modifié, fixé cette fois-ci entre 0,4 et 0,6 mm.

Les figures (III.27), (III.28) et (III.29) présentent l'évolution de la turbidité en fonction du temps pour chacun des débits testés. À faible débit (6 mL/min), la filtration est initialement plus efficace, avec une turbidité faible à la sortie. Toutefois, une augmentation progressive est observée, probablement liée au colmatage du lit filtrant et à la remise en suspension des particules. À débit intermédiaire (8 mL/min), la turbidité en sortie est plus élevée dès le départ, avec une tendance à la diminution au fil du temps, suggérant une possible stabilisation du système.

À débit élevé (10 mL/min), la turbidité initiale en sortie est plus faible qu'à 8 mL/min, et reste relativement stable, ce qui pourrait traduire un compromis entre vitesse de filtration et limitation des effets de colmatage ou de remise en suspension. Ces résultats mettent en évidence le rôle crucial du débit dans la performance de filtration, en particulier en lien avec la dynamique du lit filtrant et le comportement des particules en suspension.

Bien que la granulométrie fine du sable (0,4–0,6 mm) soit favorable à une filtration rapide, le débit appliqué influence significativement l'efficacité globale du procédé, en agissant sur le temps de contact et les phénomènes physiques associés au colmatage.

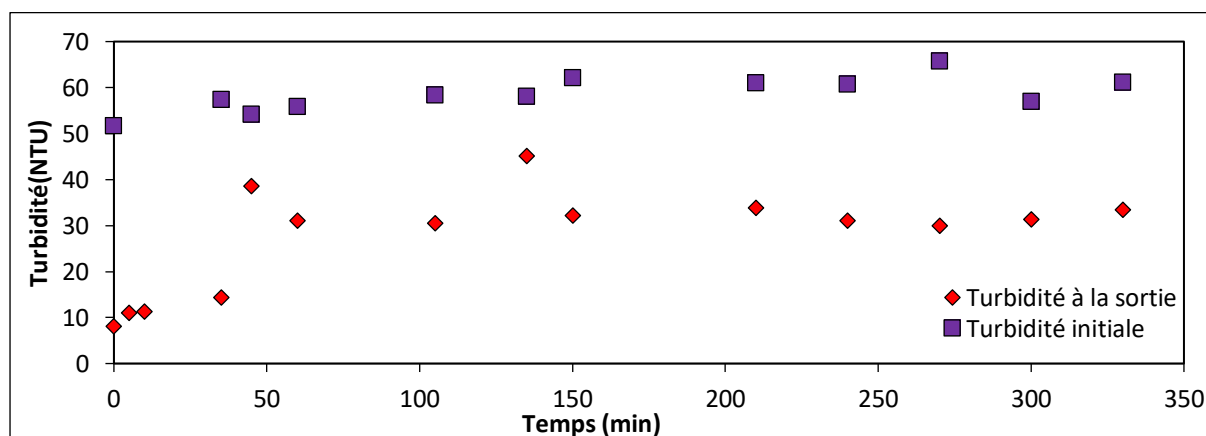


Figure III.25. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 6mL/min (0,4–0,6 mm)

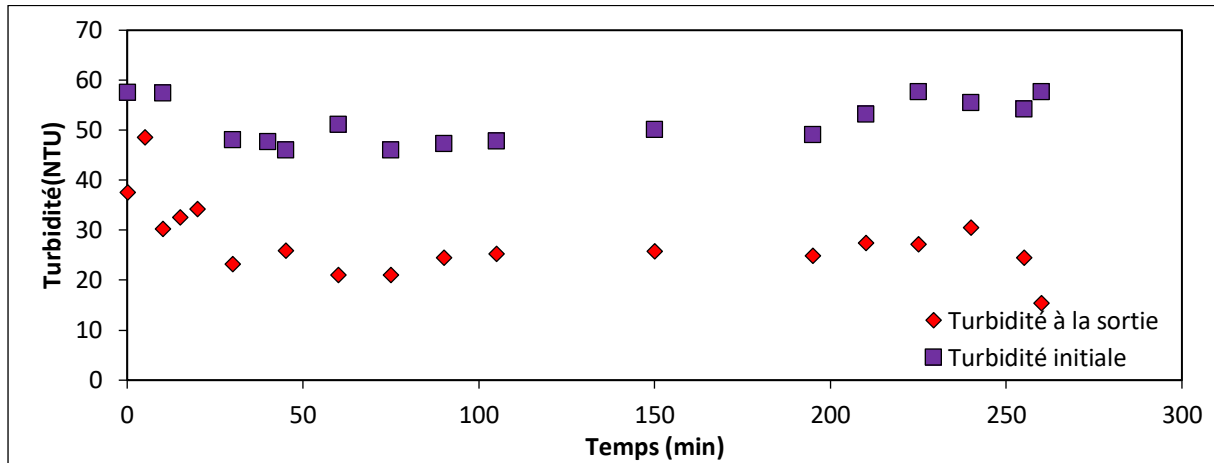


Figure III.26. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 8mL/min (0,4–0,6 mm)

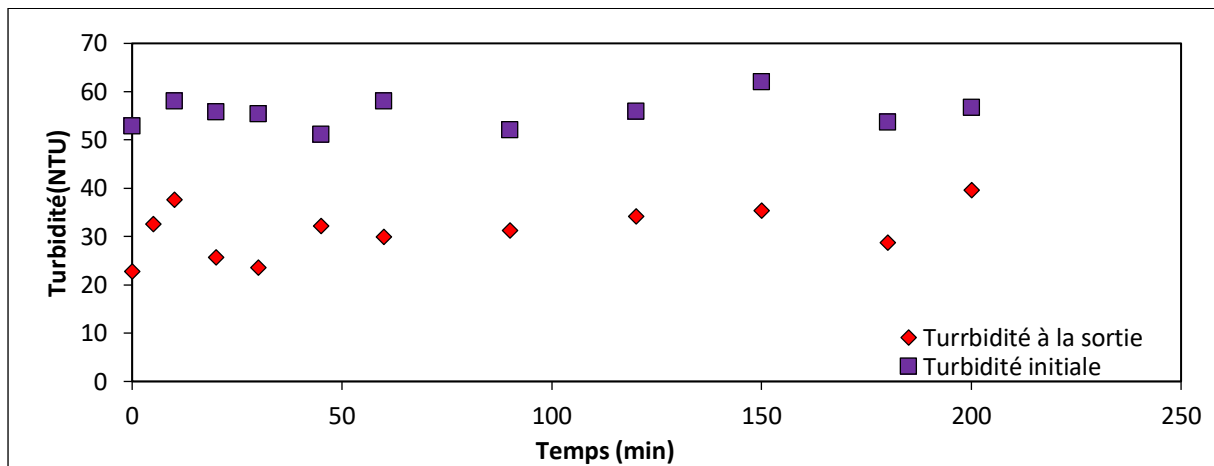


Figure III.27. Évolution de turbidité en fonction de temps de débit 10mL/min (0,4–0,6 mm)

III.3.6. Étude hydrodynamique de la filtration : l'évolution du débit à la sortie du lit filtrant

Les figures (III.30), (III.31) et (III.32) montrent l'évolution du débit de sortie pour des débits d'alimentation de 6, 8 et 10 mL/min.

À 6 mL/min, le faible débit favorise un écoulement plus lent, mais peut entraîner un colmatage progressif en surface, ce qui réduit progressivement le débit de sortie. Le faible cisaillement dans le lit permet une accumulation plus rapide des particules en suspension.

À 8 mL/min, le débit plus élevé génère un flux plus dynamique qui limite légèrement le colmatage en assurant un meilleur passage de l'eau à travers les interstices du sable. Cependant, des fluctuations du débit sont observées, traduisant un équilibre instable entre colmatage local et nettoyage partiel du lit.

Chapitre III

Étude hydrodynamique et évaluation des performances du procédé de filtration

À 10 mL/min, le débit élevé favorise un écoulement plus uniforme et une meilleure stabilité du débit de sortie. La force hydraulique accrue limite l'accumulation de particules, mais peut aussi réduire le temps de rétention, ce qui diminue l'efficacité d'élimination pour certaines impuretés fines. En résumé, l'augmentation du débit contribue à limiter le colmatage dans un lit de sable de granulométrie 0,4–0,6 mm, mais au détriment d'un temps de contact plus court. Il est donc essentiel de trouver un compromis entre vitesse d'écoulement et performance de filtration.

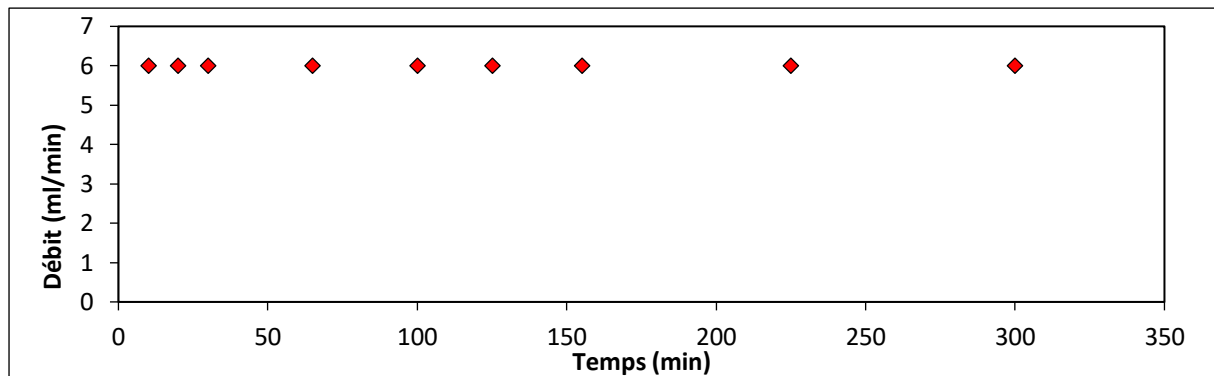


Figure III.28. Évolution du débit de sortie en fonction de temps de débit 6 mL/min (0,4–0,6 mm)

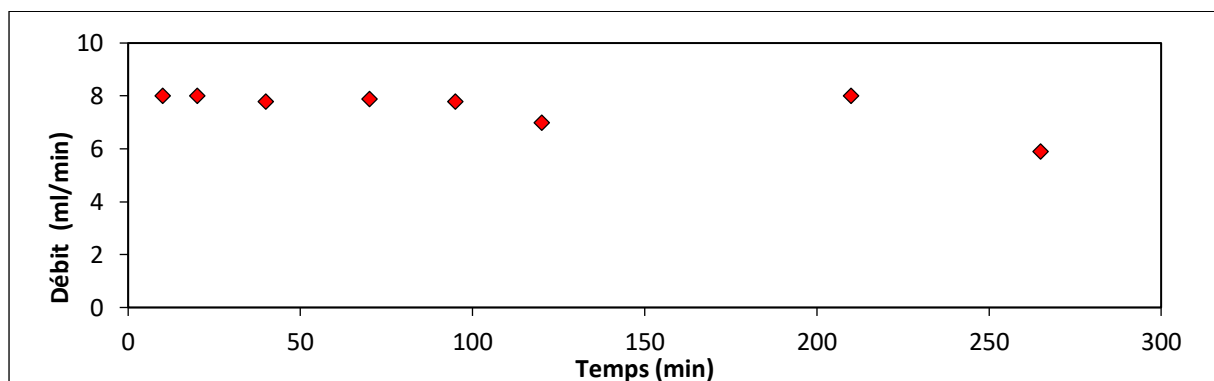


Figure III.29. Évolution du débit de sortie en fonction de temps de débit 8 mL/min (0,4–0,6 mm)

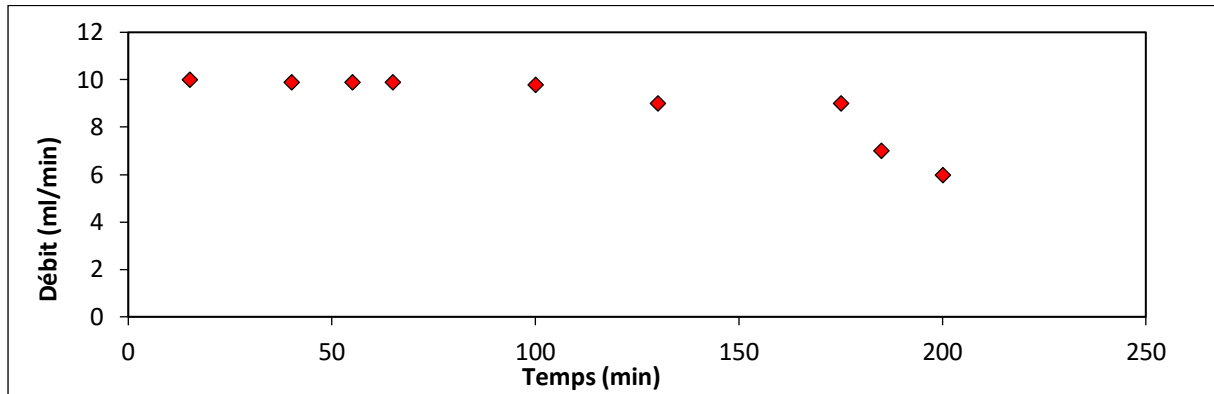


Figure III.30. Évolution du débit de sortie en fonction du temps de débit 10 mL/min (0,4–0,6 mm)

III.3.7. Détermination de la perte de charge

La perte de charge de sable a été déterminée à l'aide de la formule précédente de Kozeny-Carman.

Les résultats obtenus pour la perte de charge en fonction du débit pour deux types de sable (avec des tailles de grains différentes) sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau III.5. Perte de charge du sable de diamètre (0,63–0,8 mm) pour différents débits.

Débit (mL/min)	Perte de charge (bar)
Diamètre (mm) (0,63–0,8)	
6	$4,6 \cdot 10^{-2}$
8	$6,17 \cdot 10^{-2}$
10	$7,67 \cdot 10^{-2}$
Diamètre (mm) (0,4–0,6)	
6	$3,5 \cdot 10^{-1}$
8	$4,66 \cdot 10^{-1}$
10	$5,83 \cdot 10^{-1}$

A. Relation entre débit et perte de charge :

Une augmentation du débit entraîne une augmentation proportionnelle de la perte de charge, ce qui est logique, car un débit plus élevé génère un écoulement plus rapide de l'eau à travers le lit filtrant, créant une résistance accrue. Cette tendance est observée dans les deux tableaux, tant pour le sable de diamètre 0,63–0,8 mm que pour celui de diamètre 0,4–0,6 mm.

B. Effet de la taille des grains sur la perte de charge :

Le sable de diamètre plus petit (0,4–0,6 mm) génère une perte de charge plus élevée comparé au sable de diamètre plus grand (0,63–0,8 mm), pour les mêmes débits. Cela est dû à la plus grande surface spécifique et aux pores plus petits du sable plus fin. Ces caractéristiques

augmentent la résistance à l'écoulement du fluide, entraînant une perte de charge plus importante.

Par exemple, à un débit de 10 mL/min, la perte de charge est de $7,67 \cdot 10^{-2}$ bar pour le sable de diamètre 0,63–0,8 mm, tandis qu'elle atteint $5,83 \cdot 10^{-1}$ bar pour le sable de diamètre 0,4–0,6 mm. Cette différence montre clairement que la taille des grains joue un rôle déterminant dans la résistance au passage du fluide.

Les résultats soulignent deux points importants pour l'optimisation de la filtration :

Il est crucial de bien choisir la taille des grains du sable afin de minimiser la perte de charge tout en maintenant l'efficacité de la filtration. Un sable plus fin, bien que capable de filtrer plus efficacement, génère des pertes de charge plus importantes, ce qui peut rendre le système de filtration moins efficace à long terme si les pertes deviennent trop élevées.

C. Adaptation du débit :

Le débit doit également être pris en compte lors du dimensionnement du système de filtration. Un débit trop élevé peut entraîner des pertes de charge excessives, réduisant l'efficacité du processus. Il est donc essentiel de trouver un compromis entre débit, taille des grains et perte de charge pour optimiser le système de filtration.

III.4. Performance de la filtration bicouche

Dans cette expérience, une colonne a été remplie avec une couche inférieure d'argile expansée (hauteur 5 cm, diamètre des particules 0,4–0,6 mm) et une couche supérieure de sable (hauteur 3 cm, diamètre des particules 0,8–1 mm). Le flux appliqué est un flux descendant, c'est-à-dire que le liquide circule de la partie supérieure vers la partie inférieure de la colonne.

Un débit de 10 mL/min a été choisi pour tester une filtration rapide. Ce débit représente un compromis entre la durée de traitement et la performance de filtration rapide : bien qu'il ne fournisse pas les meilleurs résultats en filtration monocouche. Les résultats sont illustrés dans les figures suivantes :

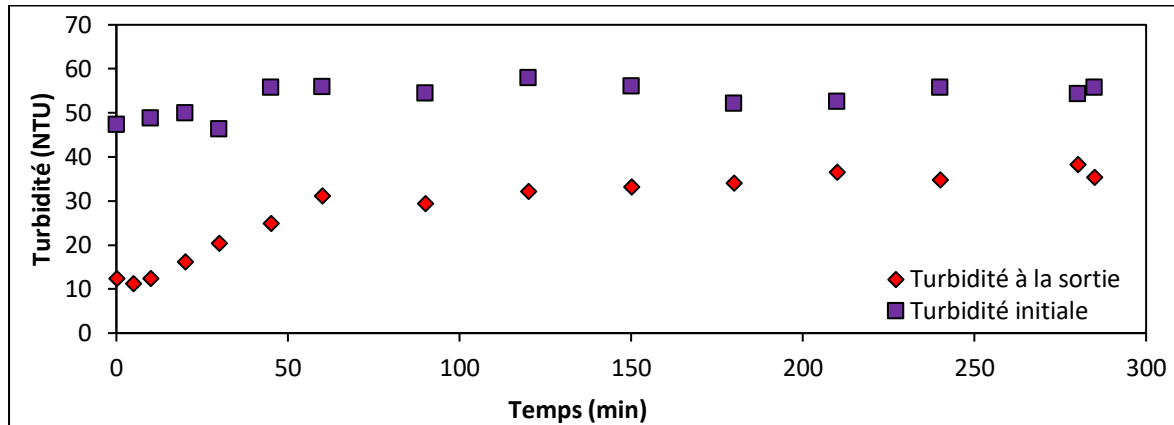


Figure III.31. Évolution de turbidité en fonction de temps de filtration bicouche

La turbidité initiale de l'eau de mer varie entre environ 46 et 58 NTU, ce qui indique une eau relativement chargée en particules en suspension. Dans le contexte du prétraitement de l'eau de mer pour les stations de dessalement par osmose inverse, la filtration bicouche composée d'une couche supérieure de sable (0,8–1 mm) et d'une couche inférieure d'argile expansée (0,4–0,6 mm) a montré une réduction significative de la turbidité dès le début de l'expérience (12,4 NTU), ce qui témoigne de son efficacité initiale à retenir les particules en suspension. Le débit de 10 mL/min a été volontairement choisi pour simuler une filtration rapide, souvent recherchée dans les stations de dessalement. Toutefois, ce débit élevé réduit le temps de séjour de l'eau de mer dans le lit filtrant, ce qui peut expliquer la croissance de la turbidité observée à 20 minutes (47,8 NTU), probablement liée à un phénomène de colmatage ou de relargage temporaire des particules fines.

La structure bicouche repose sur la porosité et de sélectivité : le sable, plus grossier et plus poreux, retient les particules grossières en surface, tandis que l'argile expansée, à porosité plus fine, capte les particules plus petites en profondeur. D'après ces résultats, on peut recommander une simulation de la granulométrie et de la vitesse de filtration pour optimiser les performances en amont de l'osmose inverse. Le système testé montre un potentiel intéressant pour la filtration rapide, mais nécessite une simulation (entretien du lit, hauteur des couches, optimisation du débit) afin de garantir une efficacité durable et adaptée aux exigences des membranes d'osmose inverse.

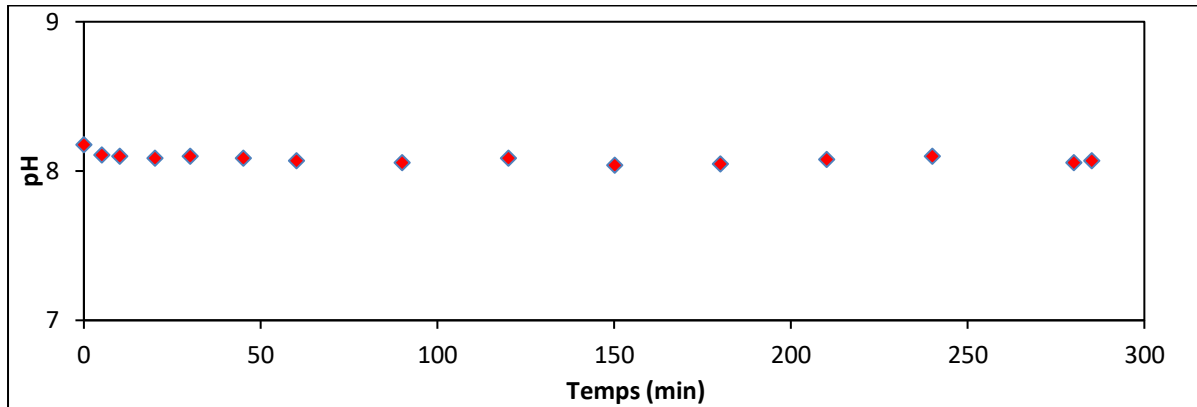


Figure III.32. Évolution de pH en fonction de temps de filtration bicouche

Le pH de l'eau de mer filtrée commence à 8,18 et varie légèrement entre 8,04 et 8,11 pendant toute l'expérience, sans chute brutale ni hausse significative. Une diminution légère (de 8,18 à 8,10 en 10 min) puis la stabilisation autour de 8,06–8,10 montrent que la filtration bicouche (sable + argile expansée) n'affecte pas fortement le pH de l'eau de mer. Cela indique que les matériaux utilisés n'induisent pas de réactions chimiques majeures avec l'eau.

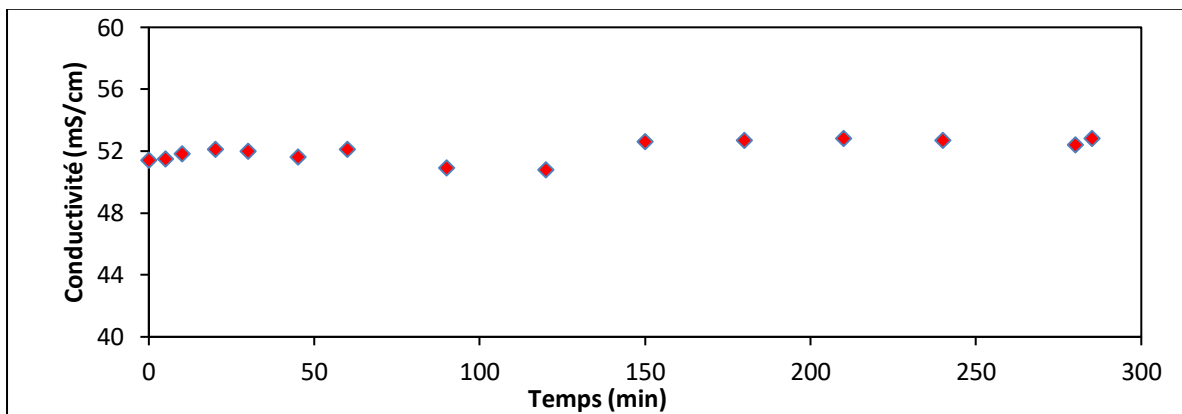


Figure III.33. Évolution de conductivité en fonction de temps de filtration bicouche

On observe que la conductivité de l'eau filtrée varie entre 51,7 et 54,4 mS/cm. La conductivité reste proche de celle de l'eau de mer initiale, ce qui indique que le filtre retient peu ou pas les ions dissous. Ces matériaux sont efficaces pour retenir les particules et matières en suspension, mais n'éliminent pas les ions responsables de la conductivité (sels dissous).

La filtration bicouche n'a pas d'impact notable sur la conductivité de l'eau de mer. Elle est adaptée à la clarification (retrait des particules), mais pas à la désalinisation.

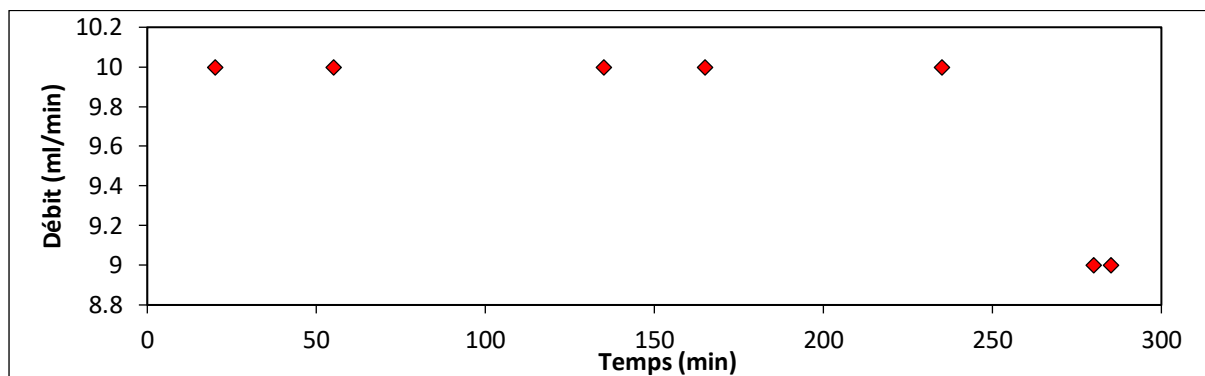


Figure III.34. Évolution du débit de sortie en fonction de temps de filtration bicouche

La stabilité initiale du débit pendant les premiers 235 minutes, montre que la combinaison argile expansée + sable assure une filtration efficace tout en maintenant un bon passage de l'eau. À partir de 280 minutes, le débit diminue légèrement à 9 mL/min et se maintient à ce niveau jusqu'à 285 minutes, ce qui suggère un début de colmatage partiel des couches filtrantes, réduisant la perméabilité du média. Ces résultats indiquent un bon comportement initial du filtre bicouche avec un débit stable, suivi d'un début d'encrassement modéré après plusieurs heures, ce qui est attendu dans ce type de filtration granulaire.

III.5. Conclusion

Cette étude expérimentale a permis d'analyser le comportement hydrodynamique de différents lits filtrants (sable, argile expansée, bicouche sable/argile) soumis à plusieurs débits. Les résultats ont mis en évidence l'influence notable du débit et de la granulométrie sur les performances de filtration rapide, la stabilité des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, turbidité) ainsi que sur la perte de charge. L'augmentation du débit entraîne une amélioration du renouvellement du fluide, mais aussi une perte de charge plus élevée. Par ailleurs, les matériaux à granulométrie plus fine (comme l'argile ou le sable 0,4–0,6 mm) présentent une résistance accrue à l'écoulement, se traduisant par des pertes de charge significativement plus importantes comparées à des matériaux plus grossiers.

La configuration bicouche a montré une dynamique particulière, où la disposition du sable au-dessus de l'argile influence les phénomènes de mise en suspension, notamment au démarrage. Cela suggère que l'organisation verticale des matériaux filtrants joue également un rôle dans la qualité de la filtration et la stabilité des paramètres mesurés.

En conclusion, pour optimiser un procédé de filtration, il est crucial de trouver un compromis entre l'efficacité d'élimination, perte de charge acceptable et sélectivité du lit filtrant, en tenant compte à la fois de la vitesse de filtration et de la taille des particules du média utilisé.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans un contexte de stress hydrique croissant, l'Algérie favorise de plus en plus le dessalement de l'eau de mer comme approche stratégique pour assurer un accès durable à l'eau potable. Le rendement optimal des installations de dessalement, surtout celles utilisant l'osmose inverse, est directement lié à la qualité du prétraitement de l'eau de mer. Ce travail s'est inscrit dans cette problématique en proposant d'évaluer, à l'échelle laboratoire, l'efficacité et la sélectivité de deux matériaux filtrants locaux : le sable siliceux et l'argile expansée, en vue de leur intégration potentielle comme alternatives aux médias filtrants importés comme l'antracite ou le Filtralite®, largement utilisés mais coûteux.

En complément du travail réalisé au laboratoire de l'université, nous avons également effectué un stage de courte durée au sein de l'entreprise ALGEXPAN, unique producteur national d'argile expansée, pour suivre sur le terrain les étapes industrielles du procédé de fabrication : extraction, broyage, malaxage, façonnage, cuisson et tri granulométrique. Cette immersion a permis de valider la faisabilité industrielle de l'utilisation de ce matériau en filtration, tout en comprenant les contraintes techniques et les conditions de production à grande échelle, renforçant la cohérence entre la recherche académique et les réalités du terrain.

Les expériences de prétraitement de l'eau de mer par filtration rapide ont été réalisées à l'échelle pilote au laboratoire, dans une colonne de filtration verticale conçue pour simuler un fonctionnement en continu. Le système fonctionne en flux ascendant, configuration couramment utilisée pour limiter le compactage du lit filtrant et améliorer la distribution du flux. Trois débits d'alimentation ont été appliqués : 6, 8 et 10 mL/min, représentant des vitesses d'écoulement croissantes. Le débit de 10 mL/min a été spécifiquement choisi pour reproduire les conditions d'une filtration rapide, typique des unités de dessalement à haut rendement, où le temps de contact entre l'eau et le média filtrant est réduit. Deux classes de granulométrie ont été étudiées pour chacun des matériaux (sable et argile expansée) : 0,63–0,8 mm et 0,4–0,6 mm, afin d'évaluer l'effet de la taille des grains sur les performances de filtration. L'analyse a porté sur plusieurs paramètres physico-chimiques : la turbidité, le pH, la conductivité, le débit de sortie et la perte de charge, afin d'apprécier l'efficacité, la stabilité hydraulique et la sélectivité des matériaux testés dans différentes conditions opératoires. Les résultats ont montré que le sable, principalement composé de quartz, se distingue par une bonne perméabilité, une faible perte de charge, et une stabilité chimique, notamment du pH. Cependant, sa capacité à retenir les particules fines reste modérée, surtout à forte vitesse de filtration. À l'inverse, l'argile

expansée, grâce à sa structure poreuse, sa surface spécifique élevée ($\sim 782 \text{ cm}^2/\text{g}$) et sa porosité interne, offre une meilleure rétention des particules fines et une sélectivité supérieure, mais au prix d'une perte de charge plus importante, en particulier avec les granulométries fines.

L'expérience de filtration bicouche, combinant une couche supérieure de sable (0,8–1 mm) et une couche inférieure d'argile expansée (0,4–0,6 mm), a permis de valoriser la complémentarité des deux matériaux. Cette configuration a démontré une réduction significative de la turbidité dès les premières minutes (jusqu'à 12,4 NTU), mais a également révélé des phénomènes de colmatage partiel ou de relargage, particulièrement à débit élevé, confirmant la nécessité d'un compromis entre efficacité de filtration et perte de charge.

Les essais ont également mis en évidence l'importance de la taille des grains sur la porosité, la perte de charge et la stabilité du filtre. Les granulométries plus fines offrent une meilleure clarification, mais présentent un risque accru de colmatage et de perte de perméabilité, tandis que les grains plus gros permettent une filtration plus fluide mais moins sélective.

En conclusion, les matériaux locaux testés à l'échelle laboratoire montrent un potentiel réel pour être intégrés dans des systèmes de filtration en amont de l'osmose inverse, notamment dans des régions soumises à de fortes turbidités saisonnières. Pour une application à l'échelle industrielle, des études complémentaires sont nécessaires : optimisation des hauteurs de lit, fréquence de lavage, modélisation hydrodynamique, et essais prolongés en conditions réelles. La valorisation de ressources locales telles que le sable et l'argile expansée constitue une voie prometteuse, durable et économique, pour renforcer la résilience des systèmes de dessalement algériens.

Références bibliographiques

- [1] Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 309, 197-207. doi.org/10.1016/j.desal.2012.10.015
- [2] Henthorne, L., Boysen, B., 2015. State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment. *Desalination* 356, 129–139. doi:10.1016/j.desal.2014.10.039.
- [3] Mara, J. L., & Horan, A. (2003). *Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. Academic Press.
- [4] AWWA (American Water Works Association), *Water Treatment: Principles and Design*, (3rd ed). MWH, 2012.
- [5] Mouchet, P., & Chazarenc, F. (2011). *Techniques et procédés de traitement des eaux*. Dunod, Paris.
- [6] Servais, P. (2015). *Traitement des eaux : Principes et procédés* (pp. 120-140). Paris : Dunod. La filtration et le lavage des milieux filtrants.
- [7] Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301-310. doi.org/10.1038/nature06599
- [8] Zhou, Q., Wang, Y., & Li, J. (2019). Effect of flow rate on turbidity removal efficiency in expanded clay filtration of seawater. *Journal of Environmental Engineering*, 145(7), 04019045. doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001567
- [9] Kumar, M., & Alappat, B. J. (2018). Effect of filtration rate on the removal efficiency of turbidity in rapid sand filters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(3), 3456-3464. doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.045
- [10] Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (3rd ed.). Wiley.

I.1. Composition de l'eau de mer

Le terme d'eau de mer regroupe l'eau salée des mers et des océans à la surface de la terre. Elles occupent un volume estimé à 1 340 millions de km³, ce qui représente 97 % de la capacité totale des grands réservoirs d'eau à la surface de la terre.

Tableau I.1. Composition de l'eau de mer méditerranée

constituants	Concentration (mg/L)
Dureté totale (mg/L)	4200
Mg ²⁺ (mg/L)	644
Ca ²⁺ (mg/L)	620
Cl ⁻ (mg/L)	20412
TA (mg/L)	24
TAC (mg/L)	90
Conductivité (mS/cm)	54.4
pH	8,15
Température (°C)	22