

**Titre:** Impact d'un prétraitement par démanganisation biologique « MANG'AZUR » sur la réduction du fer, du manganèse et de la matière organique des eaux à l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-Lac  
**Title:**

**Auteur:** Nadia Ben Tarjem  
**Author:**

**Date:** 2023

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Ben Tarjem, N. (2023). Impact d'un prétraitement par démanganisation biologique « MANG'AZUR » sur la réduction du fer, du manganèse et de la matière organique des eaux à l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-Lac [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.  
**Citation:** <https://publications.polymtl.ca/10840/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/10840/>  
**PolyPublie URL:**

**Directeurs de recherche:** Benoit Barbeau  
**Advisors:**

**Programme:** Génie civil  
**Program:**

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Impact d'un prétraitement par démanganisation biologique « MANG'AZUR »  
sur la réduction du fer, du manganèse et de la matière organique des eaux à  
l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-Lac**

**NADIA BEN TARJEM**

Département de génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie Civil

Mars 2023

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé:

**Impact d'un prétraitement par démanganisation biologique « MANG'AZUR »  
sur la réduction du fer, du manganèse et de la matière organique des eaux à  
l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-Lac**

présenté par **Nadia BEN TARJEM**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

**Dominique CLAVEAU-MALLET**, présidente

**Benoit BARBEAU**, membre et directeur de recherche

**Pierre BÉRUBÉ**, membre

## **DÉDICACE**

*A mes parents, mon frère et mon mari.*

## REMERCIEMENTS

D'abord, je souhaite remercier sincèrement mon directeur de recherche, Benoit Barbeau, de m'avoir acceptée à la maîtrise sous sa supervision. Je le remercie aussi pour son expertise, son aide et ses précieux conseils, ainsi que son soutien moral durant les moments difficiles rencontrés tout au long du projet.

Merci aux professeurs Dominique Claveau-Mallet et Pierre Bérubé d'avoir accepté de siéger sur le jury d'examen de ce mémoire de maîtrise.

Je voudrais prendre un instant aussi pour remercier toute l'équipe de la Chaire de recherche en traitement de l'eau potable. Votre aide m'a été très précieuse dans le cadre de ce projet. Merci au duo d'enfer, Tetiana Elyart et Yves Fontaine, pour votre support à monter le pilote, ainsi que pour toutes vos interventions pour fixer et réparer les multiples fuites et bris survenus tout au long de la période du roulement du pilote. Un merci spécial à Tetiana qui m'a aidée dans plusieurs manipulations sur le montage, réparer des pièces brisées et répondre à mes besoins tout au long du projet. Ta présence est une aide précieuse, surtout au début du projet quand on se sent le plus vulnérable.

Merci à Julie Philibert et Jacinthe Mailly d'avoir pris le temps de m'expliquer comment réaliser quelques manipulations, ainsi que pour votre assistance au laboratoire. Votre générosité et votre bonne humeur sont formidables.

Je veux aussi remercier les travailleurs de l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-Lac pour leur professionnalisme, disponibilité, et coopération à me faire parvenir les données nécessaires pour cette étude.

Je voudrais aussi saluer tous mes collègues de bureau.

Finalement, je voudrais souligner l'énorme soutien de mon cher mari, pour son encouragement inconditionnel sur le plan professionnel et surtout moral pendant ces deux dernières années. Sans toi, le parcours m'aurait paru beaucoup plus compliqué.

## RÉSUMÉ

La réduction du fer, du manganèse, ainsi que la matière organique de l'eau destinée à la consommation journalière est un enjeu primordial pour les municipalités et les usines de traitement des eaux potables qui captent des eaux souterraines chargées en fer et manganèse. Le traitement par des membranes de nanofiltration (NF) est une nouvelle technologie industrielle, qui permet de produire une eau potable de bonne qualité, bien que le colmatage des membranes soit encore un enjeu majeur pour ce type de procédé. Cependant, l'eau souterraine prélevée dans ce but peut subir une augmentation de la concentration des contaminants à n'importe quelle étape de traitement, ce qui pourrait affecter le rendement du système de filtration et le rendre inefficace. Pour cette raison, l'étape de prétraitement qui précède celle de la filtration membranaire, généralement effectuée à l'aide de cartouche filtrante, est primordiale dans le cycle de traitement des eaux.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact du traitement par démanganisation biologique « Mang'Azur » sur la performance des cartouches filtrantes à usage unique 5 microns, et ainsi sur les membranes de nanofiltration du pilote installé à l'usine de Sainte-Marthe-Sur-le-Lac, afin de limiter l'impact du fer, du manganèse et de la matière organique dans les eaux de distribution. Pour ce faire, un pilote a été installé à l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-Lac, constitué de deux trains parallèles. Le train 1 filtre l'eau brute de l'usine issue des 8 puits de captage, et le train 2 filtre l'eau de l'effluent des trois Mang'Azurs de l'usine. Le but étant d'étudier le comportement de filtration d'une cartouche de 5 microns et 10 pouces de longueur, ainsi qu'une membrane de nanofiltration NF90, avec module spiralé de 2,5 pouces de diamètre et 40 pouces de longueur (NF90, Dow *Filmtec*). Des essais ont été réalisés entre avril et août 2022 sur les différents points d'échantillonnage des deux trains du pilote, et des analyses de paramètres physico-chimiques ont été effectuées.

Les résultats de caractérisation des eaux démontrent l'évolution de la qualité de l'eau brute vs celle prétraitée par Mang'Azur. La faible teneur en Fe total (moyenne = 0,03 mg/L) et de Mn total (moyenne = 0,02 mg/L) sur le l'eau prétraitée par Mang'Azur, comparé à une teneur importante parallèlement sur l'eau brute, en Fe total (moyenne = 0,27 mg/L) et Mn total (moyenne = 0,26 mg/L), en plus d'une consommation remarquable en oxygène dissous sur le train de l'eau brute (moyenne = 5,4 mg/L) comparé à une plus faible activité biologique dans le train prétraitée par

Mang'Azur (moyenne = 7 mg/L), montre bien le rôle du Mang'Azur sur la réduction du fer, du Mn et l'enlèvement de la matière organique particulaire.

En plus de cela, la fréquence de changement des cartouches filtrantes 5microns est nettement plus importante sur le train alimenté à l'eau brute (durée de vie max de la cartouche = 4jours), que celui alimenté à l'eau prétraitée par Mang'Azur (durée de vie max de la cartouche = 38 jours). Aussi, le nombre de lavages chimiques effectués sur la membrane de NF de l'eau brute (2 lavages en deux mois) comparé à ceux effectués sur la membrane de NF de l'eau prétraitée par Mang'Azur (1 lavage en deux mois), donne bien une idée sur le degré de colmatage des deux membranes, et donc l'impact d'un prétraitement Mang'Azur sur l'obstruction des pores des membranes de NF. Ce qui valide l'objectif général de cette recherche.

## ABSTRACT

Reducing iron, manganese and organic matter in water intended for daily consumption is a key issue for municipalities and drinking water treatment plants that capture groundwater loaded with iron and manganese. Treatment with nanofiltration (NF) membranes is a new industrial technology, which makes it possible to produce good quality drinking water, although the clogging of the membranes is still a major issue for this type of process. However, groundwater abstracted for this purpose may experience an increase in the concentration of contaminants at any stage of treatment, which could affect the performance of the filtration system and render it ineffective. For this reason, the pre-treatment stage which precedes that of membrane filtration, generally carried out using a filter cartridge, is essential in the water treatment cycle.

The main objective of this study is to assess the impact of the "Mang'Azur" biological manganese removal treatment on the performance of single-use 5 microns filter cartridges, and thus on the nanofiltration membranes of the pilot plant installed at the plant of Sainte-Marthe-Sur-le-Lac, in order to limit the impact of iron, manganese and organic matter in the water supply. To do this, a pilot was installed at the Sainte-Marthe-sur-le-Lac plant, consisting of two parallel trains. Train 1 filters the plant's raw water from the 8 intake wells, and train 2 filters the water from the effluent of the plant's three Mang'Azurs. The goal is to study the filtration behavior of a cartridge of 5 microns and 10 inches in length, as well as an NF90 nanofiltration membrane, with a spiral module of 2,5 inches in diameter and 40 inches in length (NF90, Dow Filmtec). Tests were carried out between April and August 2022 on the various sampling points of the two pilot trains and analyzes of physico-chemical parameters were carried out.

The water characterization results show the evolution of the quality of raw water vs what pretreated by Mang'Azur. The low content of total Fe (average = 0,03 mg/L) and total Mn (average = 0,02 mg/L) in the water pretreated with Mang'Azur, compared to a high content in parallel in the raw water, in total Fe (average = 0,27 mg/L) and total Mn (average = 0,26 mg/L), in addition to a remarkable consumption of dissolved oxygen on the raw water train (average = 5,4 mg/L) compared to a lower biological activity in the train pretreated with Mang'Azur (average = 7 mg/L), clearly shows the role of Mang'Azur on the reduction of iron, Mn and the removal of particulate organic matter .

In addition to this, the frequency of changing the 5-micron filter cartridges is much higher on the train supplied with raw water (max lifespan of the cartridge = 4 days), than that supplied with water pretreated by Mang'Azur (duration cartridge life = 38 days). Also, the number of chemical washes performed on the NF membrane of raw water (2 washes in two months) compared to those performed on the NF membrane of water pretreated with Mang'Azur (1 wash in two months), gives an idea of the degree of clogging of the two membranes, and therefore the impact of a Mang'Azur pretreatment on the clogging of the pores of the NF membranes. This validates the main research objective.

## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                                                                   |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| DÉDICACE.....                                                                                                                     | III   |
| REMERCIEMENTS .....                                                                                                               | IV    |
| RÉSUMÉ.....                                                                                                                       | V     |
| ABSTRACT .....                                                                                                                    | VII   |
| TABLE DES MATIÈRES .....                                                                                                          | IX    |
| LISTE DES TABLEAUX.....                                                                                                           | XIII  |
| LISTE DES FIGURES.....                                                                                                            | XIV   |
| LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....                                                                                            | XVII  |
| LISTE DES ANNEXES.....                                                                                                            | XVIII |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....                                                                                                      | 1     |
| 1.1 Problématique.....                                                                                                            | 1     |
| 1.2 Description du site d'étude.....                                                                                              | 2     |
| 1.3 Objectifs du projet .....                                                                                                     | 4     |
| 1.4 Organisation du mémoire .....                                                                                                 | 4     |
| CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....                                                                                             | 5     |
| 2.1 Présentation de la filtration membranaire .....                                                                               | 5     |
| 2.2 Les membranes de nanofiltration .....                                                                                         | 6     |
| 2.2.1 Les types de modules .....                                                                                                  | 7     |
| 2.2.2 Perte de charges dans les modules spiralés et obstruction des canaux d'écoulement<br>tangentiels (espaceurs grossiers)..... | 10    |
| 2.3 Les différents traitements permettant le contrôle du manganèse/fer dans les eaux<br>potables.....                             | 11    |
| 2.3.1 Traitement par oxydation/filtration .....                                                                                   | 11    |

|            |                                                                   |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.2      | Traitement par démanganisation biologique .....                   | 12 |
| 2.4        | Colmatage des membranes .....                                     | 13 |
| 2.4.1      | Types de colmatage .....                                          | 13 |
| 2.4.2      | Facteurs influençant le colmatage .....                           | 16 |
| 2.5        | Gestion du colmatage par des prétraitements.....                  | 18 |
| 2.5.1      | Préfiltration par des cartouches de microfiltration jetables..... | 18 |
| 2.5.2      | Préfiltration par des filtres à lavage automatique.....           | 18 |
| 2.5.3      | Préfiltration par filtre granulaire .....                         | 19 |
| 2.5.4      | Injection de séquestrant .....                                    | 20 |
| 2.5.5      | Choix du taux de récupération/Flux d'opération.....               | 21 |
| 2.5.6      | Dé-oxygénation .....                                              | 21 |
| 2.6        | Gestion du colmatage de la NF par des lavages.....                | 22 |
| 2.6.1      | Lavage basique.....                                               | 22 |
| 2.6.2      | Lavage acide.....                                                 | 23 |
| 2.6.3      | Désinfectant non-oxydant .....                                    | 23 |
| CHAPITRE 3 | MATÉRIEL ET MÉTHODES .....                                        | 24 |
| 3.1        | Description du montage pilote de NF .....                         | 25 |
| 3.1.1      | Train 1 : Eau brute de l'usine .....                              | 25 |
| 3.1.2      | Train 2 : Eau traitée par démanganisation biologique.....         | 26 |
| 3.1.3      | Cartouche et membrane à l'étude.....                              | 27 |
| 3.1.4      | Points d'échantillonnage sur le pilote .....                      | 28 |
| 3.2        | Phases de déroulement des essais.....                             | 29 |
| 3.2.1      | Phase 1 : Mode d'opération avec préfiltres seulement.....         | 30 |
| 3.2.2      | Phase 2 : Mode d'opération avec NF .....                          | 30 |

|                                                     |                                                                                                                                    |    |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3                                                 | Paramètres suivis au cours de l'étude pilote .....                                                                                 | 31 |
| 3.4                                                 | Procédure de lavage des membranes NF.....                                                                                          | 32 |
| CHAPITRE 4 RÉSULTATS DES ESSAIS SUR LE PILOTE ..... |                                                                                                                                    | 35 |
| 4.1                                                 | Impact d'un prétraitement au Mang'Azur sur les caractéristiques des eaux alimentant la cartouche de 5 µm et la membrane de NF..... | 35 |
| 4.1.1                                               | Variation temporelle de la température.....                                                                                        | 35 |
| 4.1.2                                               | Variation temporelle du pH.....                                                                                                    | 36 |
| 4.1.3                                               | Variation temporelle de l'oxygène dissous .....                                                                                    | 38 |
| 4.1.4                                               | Variation temporelle de l'alcalinité et la dureté totale .....                                                                     | 39 |
| 4.1.5                                               | Variation temporelle de la turbidité .....                                                                                         | 40 |
| 4.1.6                                               | Variation temporelle du fer et du manganèse.....                                                                                   | 41 |
| 4.1.7                                               | Variation temporelle du COT et du COD .....                                                                                        | 43 |
| 4.2                                                 | Impact d'un prétraitement Mang'Azur sur le colmatage des cartouches.....                                                           | 46 |
| 4.2.1                                               | Impact du prétraitement sur les indices de colmatage (Silt Density Index).....                                                     | 46 |
| 4.2.2                                               | Impact du prétraitement sur la fréquence de remplacement des cartouches 5 microns                                                  | 50 |
| 4.3                                                 | Impact d'un prétraitement Mang'Azur sur le colmatage des membranes de nanofiltration .....                                         | 52 |
| 4.4                                                 | Impact du flux d'opération sur le colmatage des cartouches .....                                                                   | 55 |
| 4.5                                                 | Comparaison entre les critères d'opération du pilote avec les données de l'usine .....                                             | 59 |
| 4.5.1                                               | Taux de colmatage des préfiltres 5 microns.....                                                                                    | 59 |
| 4.5.2                                               | Perméabilité des membranes de NF à l'usine (normalisées à 20°C).....                                                               | 61 |
| 4.6                                                 | Identification des causes de colmatage .....                                                                                       | 63 |
| 4.6.1                                               | Caractérisation des agents colmatants des cartouches 5 microns .....                                                               | 63 |
| 4.6.2                                               | Caractérisation des eaux de lavages chimiques de la NF .....                                                                       | 66 |

|                 |                                                                                                                      |    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CHAPITRE 5      | DISCUSSION .....                                                                                                     | 69 |
| 5.1             | Impact du filtre Mang'Azur sur les caractéristiques des eaux alimentant la cartouche 5 µm et la membrane de NF ..... | 69 |
| 5.2             | Impact d'un prétraitement par Mang'Azur sur la réduction du colmatage des cartouches 5µm                             | 72 |
| 5.3             | Impact d'un prétraitement par Mang'Azur sur la réduction du colmatage des membranes de NF.....                       | 72 |
| 5.4             | Impact du flux d'opération sur le colmatage des cartouches 5µm.....                                                  | 74 |
| 5.5             | Les agents colmatants retenus sur les cartouches 5 µm et récupérés dans les eaux de lavage chimique de la NF.....    | 74 |
| CHAPITRE 6      | CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....                                                                                  | 76 |
| RÉFÉRENCES..... |                                                                                                                      | 78 |
| ANNEXES .....   |                                                                                                                      | 84 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 3.1 Paramètres et méthodes d’analyses suivis lors des essais in situ et au laboratoire ....                                             | 31 |
| Tableau 3.2 Paramètres d’opération de la procédure de lavage .....                                                                              | 34 |
| Tableau 4.1 Durées de cycle des cartouches filtrantes pour un débit unitaire d’opération de 2,4 gpm<br>par 10 po de longueur de cartouche ..... | 52 |
| Tableau 4.2 Dates et nombres de lavage effectués sur les membranes du pilote.....                                                               | 54 |
| Tableau 4.3 Durées de cycle de la cartouche du train 1 en fonction du flux d’opération .....                                                    | 57 |
| Tableau 4.4 Durées de cycle de la cartouche du train 2 en fonction du flux d’opération .....                                                    | 58 |
| Tableau 4.5 Données de changement des cartouches à l’usine.....                                                                                 | 60 |
| Tableau 4.6 Fréquence de lavage des membranes à l’usine de SMSL .....                                                                           | 63 |
| Tableau 4.7 Résultats des analyses des eaux des lavages chimiques réalisés sur les deux membranes<br>du pilote.....                             | 67 |
| Tableau A.1 Dimensions et caractéristiques du module spiralé NF90-2540 .....                                                                    | 84 |
| Tableau B.1 Conception de l’usine vs condition d’opération du pilote .....                                                                      | 85 |
| Tableau D.1 Récapitulatif des résultats d’accumulations in-out obtenus dans les deux cartouches et<br>les deux NF du pilote .....               | 89 |
| Tableau G.1 Résultats de caractérisation des agents colmatants des préfiltres 5 microns.....                                                    | 95 |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.1 Localisation de l'usine de Sainthe-Marthe-sur-le-Lac.....                                 | 3  |
| Figure 2.1 Tailles des matériaux qui sont enlevés par les procédés membranaires (Cardot, 1999) ..... | 6  |
| Figure 2.2 Modules à membrane tubulaire (Bouchard et al., 2000).....                                 | 7  |
| Figure 2.3 Modules à fibres creuses (Bouchard et al., 2000).....                                     | 8  |
| Figure 2.4 Modules spiralés (Maurel, 1993) .....                                                     | 9  |
| Figure 2.5 Obstruction interne des membranes (Cardot, 1999) .....                                    | 14 |
| Figure 2.6 Obstruction complète des membranes (Cardot, 1999).....                                    | 15 |
| Figure 2.7 Formation de gâteau sur les membranes (Cardot, 1999) .....                                | 15 |
| Figure 2.8 Coupe transversale d'un filtre biologique (water technologies and solutions, 2022)...20   |    |
| Figure 3.1 Filière de traitement à l'usine de SMSL .....                                             | 24 |
| Figure 3.2 Montage pilote de NF .....                                                                | 25 |
| Figure 3.3 Schéma fonctionnel du train 1 (Eau brute) .....                                           | 26 |
| Figure 3.4 Schéma fonctionnel du train 2 (Eau prétraitée de l'usine).....                            | 27 |
| Figure 3.5 Points d'échantillonnage sur le train 1 .....                                             | 28 |
| Figure 3.6 Points d'échantillonnage sur le train 2 .....                                             | 29 |
| Figure 3.7 Procédure de lavage des membranes NF .....                                                | 32 |
| Figure 4.1 Variation saisonnière de la température pour chaque point d'échantillonnage .....         | 36 |
| Figure 4.2 Variation saisonnière du pH pour chaque point d'échantillonnage .....                     | 37 |
| Figure 4.3 Variation saisonnière d'oxygène dissous pour chaque point d'échantillonnage .....         | 38 |
| Figure 4.4 Variation saisonnière de la turbidité pour chaque point d'échantillonnage.....            | 40 |
| Figure 4.5 Variation saisonnière du fer total pour les deux trains du pilote .....                   | 42 |
| Figure 4.6 Variation saisonnière du manganèse total pour les deux trains du pilote .....             | 43 |
| Figure 4.7 Variation saisonnière du COT pour chaque point d'échantillonnage.....                     | 44 |

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 4.8 Variation saisonnière du COD pour chaque point d'échantillonnage .....                                                                                                  | 45 |
| Figure 4.9 Variation saisonnière du SDI pour chaque point d'échantillonnage mesuré à 22°C ....                                                                                     | 47 |
| Figure 4.10 État de la membrane de SDI pour chaque point d'échantillonnage du train 1 (eau brute)<br>.....                                                                         | 47 |
| Figure 4.11 Corrélation SDI en fonction du temps d'opération de l'eau à la sortie du préfiltre 5 $\mu$ m<br>du train1 (eau brute) .....                                            | 48 |
| Figure 4.12 Différence entre l'état des filtres 0,45 $\mu$ m après un test SDI sur une cartouche neuve et<br>une cartouche colmatée du train 2 (eau prétraitée au Mang'Azur) ..... | 49 |
| Figure 4.13 Corrélation SDI en fonction du temps d'opération de l'eau à la sortie du préfiltre 5 $\mu$ m<br>du train2 (eau prétraitée au Mang'Azur) .....                          | 49 |
| Figure 4.14 Évolution de la perte de charge (psi) en fonction du temps sur les cartouches de<br>préfiltration de 5 microns .....                                                   | 50 |
| Figure 4.15 États des cartouches après changement .....                                                                                                                            | 51 |
| Figure 4.16 Pertes de charges linéaires sur les deux membranes du pilote .....                                                                                                     | 54 |
| Figure 4.17 Comparaison des profils des pressions en fonction du temps sur la cartouche du train<br>1 (alimenté à l'eau brute) .....                                               | 56 |
| Figure 4.18 Comparaison des profils des pressions en fonction du temps sur la cartouche du train<br>2 (alimenté à l'eau prétraitée).....                                           | 58 |
| Figure 4.19 Perméabilité normalisée à 20°C en fonction du temps de la NF à l'usine .....                                                                                           | 62 |
| Figure 4.20 Concentrations des contaminants extraits des cartouches 5 $\mu$ m alimentées à l'eau brute<br>.....                                                                    | 64 |
| Figure 4.21 Concentrations des contaminants extraits des cartouches 5 $\mu$ m alimentées à l'eau<br>prétraitée au Mang'Azur .....                                                  | 65 |
| Figure 4.22 Proportions des agents colmatants sur les deux membranes de NF .....                                                                                                   | 68 |
| Figure A.1 Dimensions externes du module spiralé (Filmtec, 2004).....                                                                                                              | 84 |
| Figure C.1 Variation saisonnière de l'alcalinité pour chaque point d'échantillonnage .....                                                                                         | 87 |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure C.2 Variation saisonnière de la dureté totale pour chaque point d'échantillonnage.....                                 | 88 |
| Figure E.1 Pression de changement des cartouches filtrantes 5µm sur le train 1 alimenté à l'eau brute.....                    | 92 |
| Figure E.2 Pression de changement des cartouches filtrantes 5µm sur le train 2 alimenté à l'eau prétraitée par Mangazur ..... | 92 |

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

|        |                                               |
|--------|-----------------------------------------------|
| COD    | Carbone Organique Dissous                     |
| COT    | Carbone Organique Total                       |
| COP    | Carbone Organique Particulaire                |
| EB     | Eau Brute                                     |
| EF     | Eau Filtrée                                   |
| EPS    | Exopolysaccharides                            |
| FeOB   | Bactéries ferro-oxydantes                     |
| MES    | Matière En Suspension                         |
| MON    | Matière Organique Naturelle                   |
| MnOB   | Bactéries mangano-oxydantes                   |
| NF     | Nanofiltration                                |
| OI     | Osmose Inverse                                |
| PCL    | Perte charge linéaire                         |
| PTM    | Perte charge transmembranaire                 |
| SDI    | Silt Density Index                            |
| SMSL   | Sainte-Marthe-Sur-le-Lac                      |
| UTE    | Usine de traitement des eaux                  |
| US EPA | United States Environmental Protection Agency |
| gpm    | gallons par minute                            |
| mg/l   | Milligramme par litre                         |
| ppm    | parties par million (= mg/l)                  |

## LISTE DES ANNEXES

|          |                                                                                                                                                                     |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Annexe A | Dimensions du module NF90-2540 .....                                                                                                                                | 84 |
| Annexe B | Comparaison de la conception de l'usine vs les conditions d'opération du pilote .....                                                                               | 85 |
| Annexe C | Variation temporelle de l'alcalinité et de la dureté totale .....                                                                                                   | 87 |
| Annexe D | Tableau récapitulatif des résultats d'accumulation in-out de Mn, Fe, COP, COD, O <sub>2</sub> dissous et pH dans les deux cartouches et les deux NF du pilote ..... | 89 |
| Annexe E | Durées des cycles des cartouches filtrantes 5 microns sur les deux trains à 50% du débit (8 L/min) .....                                                            | 92 |
| Annexe F | Protocole de caractérisation des filtres en Polypropylène .....                                                                                                     | 93 |
| Annexe G | Tableau de caractérisation des agents colmatants des préfiltres en Polypropylène .....                                                                              | 95 |

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

### 1.1 Problématique

Le fer et le manganèse sont des contaminants qu'on retrouve généralement dans les eaux souterraines, comme résultat de détérioration de minéraux et de roches métallifères. Même si leur présence est considérée principalement comme une nuisance organoleptique et opérationnelle, les eaux à teneur élevée en Mn peuvent également engendrer des effets néfastes sur la santé humaine (Civardi, 2015). En plus de cela, les gens se préoccupent aussi bien de l'apparence de l'eau qu'ils boivent. En effet, une eau chargée en fer et manganèse cause principalement des problèmes esthétiques tels que l'eau colorée (couleur rougeâtre à brunâtre), le goût et l'odeur métallique désagréable, la turbidité élevée et la coloration du linge et des conduites de plomberie (Civardi, 2015).

Pour cette raison, Santé Canada et l'US EPA ont recommandé des limites objectives esthétiques de 50 et 300 µg/L pour la concentration de Mn et Fe dans l'eau potable. Toutefois, les plaintes sont encore fréquentes lorsque les niveaux de Mn et Fe sont inférieurs à ces seuils (Dietrich, 2015). Ainsi, l'application des membranes de nanofiltration (NF) est une approche prometteuse pour traiter simultanément plusieurs problèmes de qualité de l'eau tels que les traces de métaux, la matière organique (MON) et l'élimination des agents néfastes (Patterson et al., 2012).

Au cours des 20 dernières années, la filtration membranaire a été de plus en plus mise en œuvre dans la purification de l'eau. Il s'agit d'un procédé de séparation physique dont il existe plusieurs types de filtres à différentes porosités (microfiltration, ultrafiltration, osmose inverse, nanofiltration) et différentes configurations des modules membranaires (spiralée, submergée, tubulaire, fibre creuse). Le choix de la porosité du filtre dépend essentiellement des objectifs de traitement souhaités (Howe. Hand. & Crittenden, 2012).

La NF représente une barrière physique aux microorganismes. Ce procédé permet en effet l'enlèvement de 80 à 95 % du COD et ne génère aucun sous-produit (Bouchard, 2000), en plus de sa simplicité d'opération. Toutefois, le colmatage des membranes est généralement considéré comme un élément limitant puisque cela tend à réduire la productivité des systèmes membranaires et à augmenter la consommation à la fois de produits nettoyants et d'énergie, et ceci peut mener à la réduction de la durée de vie des membranes.

Néanmoins, l'utilisation d'un prétraitement avant la nanofiltration, comme la démanganisation biologique dans le cas de l'usine de Sainte-Marthe, diminue le risque de colmatage, augmente la durée de vie des cartouches filtrantes et améliore la qualité de l'eau à la sortie des membranes.

La municipalité de Sainte-Marthe-Sur-le-Lac se procure de l'eau à partir du captage des eaux souterraines par un ensemble de huit puits, situés dans un massif filtrant localisé entre le lac Bon Sable et le lac Val des Sables. Cependant, depuis l'exploitation de ces eaux, nombreuses plaintes ont été reçues par des citoyens qui signalaient la présence de problèmes esthétiques, essentiellement en rapport avec la dureté de l'eau. Ce désagrément s'est accentué après l'événement d'incendie qui est survenu en automne 2013, qui a conduit à l'augmentation des vitesses d'écoulement dans les conduites, qui a engendré à son tour la suspension de dépôts dans le réseau de distribution. À la suite de cet événement, une eau noire, turbide et riche en oxyde de manganèse s'est retrouvée chez les citoyens (Barbeau, 2014). Ceci montre que les actions mises en place et la procédure de filtration des eaux à l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-lac n'ont pas permis d'atteindre les objectifs désirés pour le contrôle du manganèse, du fer et la dureté de l'eau.

## **1.2 Description du site d'étude**

Depuis décembre 2012, les résidences et les commerces de Sainte-Marthe-sur-le-Lac sont alimentés en eau potable par un système de captage de l'eau souterraine situé à l'extrémité ouest du territoire et au sud du chemin d'Oka.

L'eau de ces deux lacs est d'abord filtrée naturellement par le sable, puis elle est captée par les huit puits creusés dans une bande de sable située entre les deux lacs comme le montre la figure 1.1. Cette eau est ensuite traitée et distribuée à toutes les résidences et aux commerces du territoire.

En 2016, la Ville de Sainte-Marthe-sur-le-Lac a construit un bâtiment adjacent à la station de traitement d'eau afin d'y installer un système de nanofiltration. La figure 1.1 montre la localisation du bâtiment par rapport aux huit puits de captage.

Le traitement mis en place à l'usine de SMSL est un traitement fractionné. C'est une méthode de traitement de l'eau qui implique le fractionnement de l'eau brute en plusieurs flux, chacun étant traité différemment et spécifiquement pour éliminer différents types de contaminants. Cette approche de traitement de l'eau est souvent utilisée pour le traitement des eaux de surface et les eaux souterraines, qui contiennent généralement une grande variété de contaminants tels que des

matières organiques, des métaux lourds, des nutriments, etc. En utilisant le traitement fractionné, il est possible d'optimiser l'élimination de ces contaminants et de produire de l'eau potable de meilleure qualité (Zhang et al., 2019).

Cette approche est adaptée à la filière de traitement des eaux à l'usine de SMSL, qui permet de déminéraliser partiellement une fraction de l'eau par membrane haute pression alors que l'autre fraction est seulement traitée pour éliminer le fer et le manganèse. Une première fraction de l'eau est donc traitée par un procédé de cartouches jetables de porosité 5µm et de longueur 40 pouces, suivie par une nanofiltration sur des modules NF90-8040. La deuxième fraction est traitée par un filtre biologique de type « Mang'Azur ». Les eaux produites par les deux trains sont mélangées avant d'être chlorées afin de permettre l'inactivation de 4 log de virus, et enfin distribuées dans le réseau de distribution.

En raison d'un colmatage accéléré des cartouches de 5 microns, l'idée de ce projet était de valider si un prétraitement de l'ensemble de l'eau par un filtre Mang'Azur permettrait de réduire le colmatage des cartouches et également celui des membranes de NF. Le but du projet était donc d'étudier l'impact du filtre Mang'Azur sur l'optimisation de la durée de vie des cartouches filtrantes et des membranes de NF.

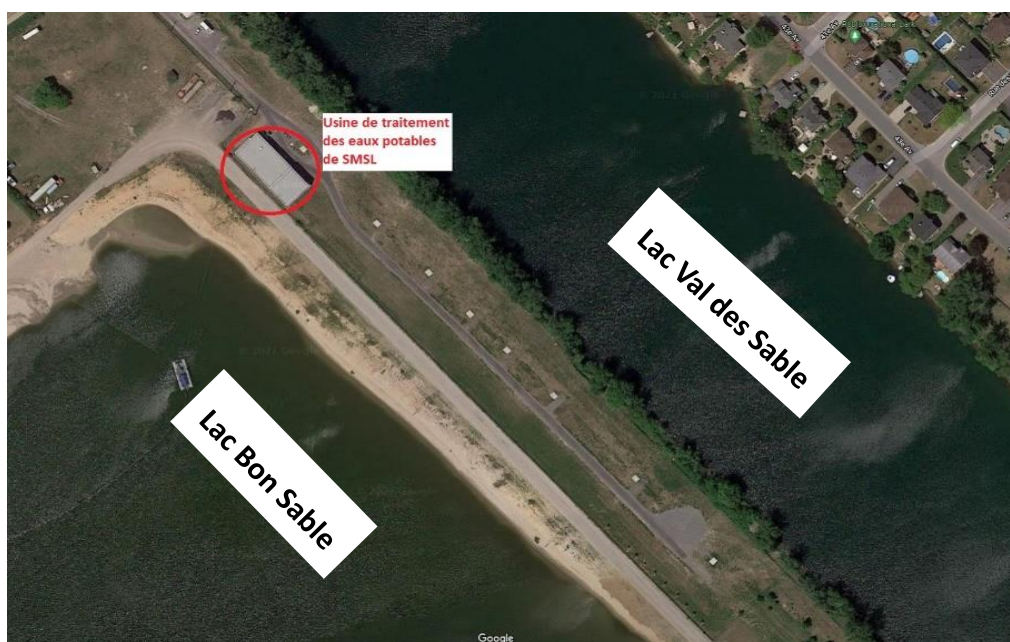


Figure 1.1 Localisation de l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-Lac

Source : Google Earth Pro

### 1.3 Objectifs du projet

L'objectif général de ce projet est d'évaluer l'impact du traitement par démanganisation biologique « Mang'Azur » sur la performance des cartouches filtrantes à usage unique, et ainsi sur les membranes de nanofiltration du pilote installé à l'usine de Sainte-Marthe-Sur-le-Lac, afin de limiter l'impact du fer, du manganèse et de la matière organique dans les eaux de distribution.

Ce projet de recherche se subdivise en cinq objectifs spécifiques :

1. Étudier l'impact d'un prétraitement au Mang'Azur sur les caractéristiques des eaux alimentant la cartouche 5  $\mu\text{m}$  et la membrane de NF ;
2. Mesurer la réduction du colmatage des cartouches 5 $\mu\text{m}$  et leur durée de vie avec/sans prétraitement de Mang'Azur ;
3. Mesurer la réduction du colmatage des membranes de NF avec/sans prétraitement de Mang'Azur ;
4. Évaluer l'impact du flux d'opération sur le taux de colmatage des cartouches filtrantes de 5 $\mu\text{m}$  ;
5. Caractériser les agents colmatants retrouvés sur les cartouches 5 microns et dans les eaux de lavage chimique de la NF ;

### 1.4 Organisation du mémoire

Ce mémoire est divisé en six chapitres. Le présent chapitre introduit le projet de recherche. Le chapitre 2 est dédié à la revue de littérature portant sur les différentes techniques de traitement des eaux et plus précisément celle de la nanofiltration, la préfiltration sur cartouches ainsi que le prétraitement par filtration granulaire. Le chapitre 3 étale la méthodologie expérimentale globale adoptée pour atteindre les objectifs de ce projet. Le chapitre 4 couvre à son tour les résultats des essais expérimentaux. Le chapitre 5 discute les résultats obtenus et présente les conclusions tirées du projet. Enfin, le chapitre 6 résume les principaux résultats sous forme de conclusion générale ainsi que les recommandations pour des travaux futurs.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente les différents concepts théoriques traités nécessaires à l'interprétation des résultats présentés dans ce mémoire.

### 2.1 Présentation de la filtration membranaire

Une membrane est une fine couche de matière capable de faire une séparation entre les molécules ou les particules et le liquide, lorsque celle-ci est soumise à un gradient de force qui la traverse. Cette force peut être engendrée par un gradient de pression, de concentration ou de potentiel électrique, de part et d'autre de la membrane (Mallevialle et al., 1996).

Pour des raisons pratiques et économiques, les matériaux employés dans le domaine de l'eau potable sont essentiellement des polymères et la force motrice utilisée pour pousser l'eau à travers la membrane est principalement un gradient de pression.

Selon la taille des pores, les procédés de filtration membranaire peuvent être classés en quatre types :

- La microfiltration : porosité inférieure à 1  $\mu\text{m}$  ;
- L'ultrafiltration : porosité inférieure à 0,1  $\mu\text{m}$  ;
- La nanofiltration : porosité inférieure à un 1 nm ;
- L'osmose inverse : porosité inférieure à 0,1 nm .

On peut considérer ces procédés comme des procédés de filtration en milieu liquide qui utilisent des membranes avec des diamètres de pores qui diminuent progressivement en passant de la microfiltration jusqu'à l'osmose inverse (Cardot, 1999).

Comme il est possible de l'observer sur la figure 2.1, les procédés de microfiltration retiennent les particules, les algues et les bactéries. L'ultrafiltration ajoute à cette liste une partie des colloïdes en plus des virus. Quant à la nanofiltration, avec son seuil de coupure encore plus faible, ne laisse traverser que des sels dissous, des ions métalliques et de très petites molécules organiques.

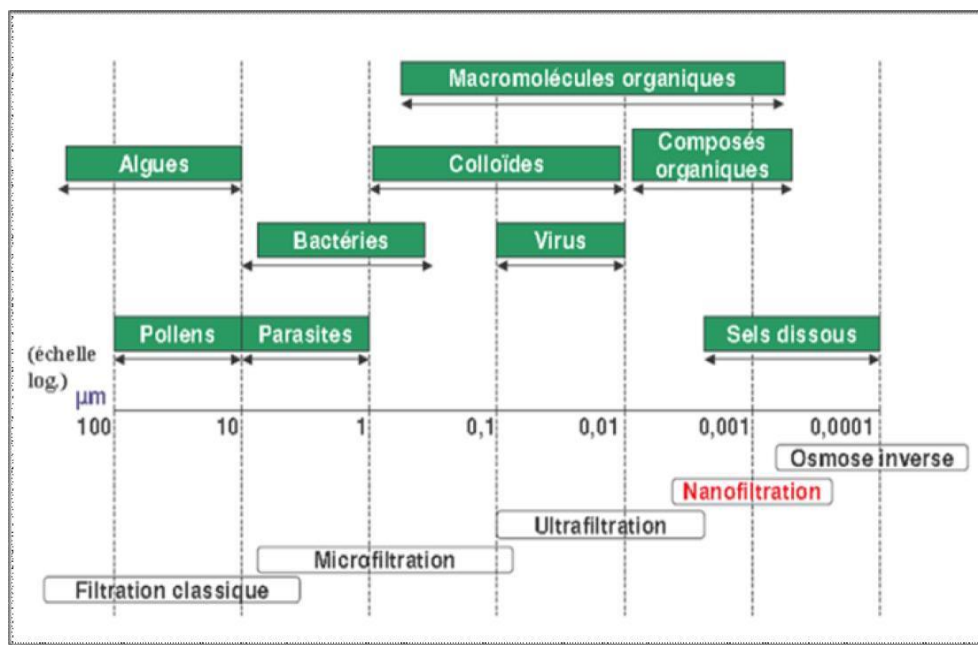


Figure 2.1 Tailles des matériaux qui sont enlevés par les procédés membranaires (Cardot, 1999)

## 2.2 Les membranes de nanofiltration

La nanofiltration est une technique de filtration qui se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration, et présente des capacités de rétention importantes pour le traitement de l'eau. C'est un procédé de filtration de l'eau qui utilise une membrane semi-perméable pour éliminer les impuretés et les substances indésirables de l'eau, telles que les sels dissous, les bactéries, les virus et les matières organiques (Howe et al., 2012).

Le procédé de nanofiltration implique l'utilisation d'une pression appliquée à l'eau à traiter pour forcer celle-ci à travers la membrane semi-perméable. Les molécules de l'eau traversent la membrane, tandis que les molécules plus grosses et celles chargées électriquement sont retenues par la membrane et rejetées dans le concentrat (Staff, 2007).

Les membranes de NF opèrent généralement à des pressions d'alimentation comprises entre 5 et 15 bars pour un flux typique situé entre 15 et 25 LMH (Schrotter & Bozkaya-Schrotter, 2010). Le seuil de coupure typique des NF ayant des pores d'environ 1 nm est de l'ordre de 300-500 Dalton (Mohammad et al., 2015). Dans le cadre de ce projet, les membranes à l'étude sont de type NF90 commercialisées par DOW. Leur seuil de coupure est de l'ordre de 90 Da.

Le procédé de nanofiltration nécessite une étape de prétraitement qui est minimalement constituée d'un filtre de 5  $\mu\text{m}$  lorsque l'eau brute est de bonne qualité (Staff, 2007).

## 2.2.1 Les types de modules

Les modules sont les appareils unitaires de séparation, mettant en œuvre des membranes. Leur conception est différente suivant la forme de la membrane et doit, à la fois, assurer une circulation suffisante à la surface de celle-ci et présenter une bonne compacité (Lachhabe, 2004). Les modules supportent les membranes, et les plus commercialisés sont présentés ci-après:

### 2.2.1.1 Les modules tubulaires

Les membranes sont placées à l'intérieur d'un tube support, poreux, et de diamètre variant de 10 à 40 mm. Ces tubes sont ensuite placés en parallèle (ou en série) dans un caisson cylindrique pour former le module unitaire.

L'hydrodynamique de l'écoulement est parfaitement défini, et des vitesses de circulation allant jusqu'à 6 m/s sont possibles si un régime de forte turbulence est nécessaire. Ces types de modules ne requièrent pas de préfiltration du liquide à traiter, et se nettoient facilement. Leur inconvénient majeur est leur faible compacité et leur prix considérablement élevé par  $\text{m}^2$  installé (Bouchard et al., 2000).

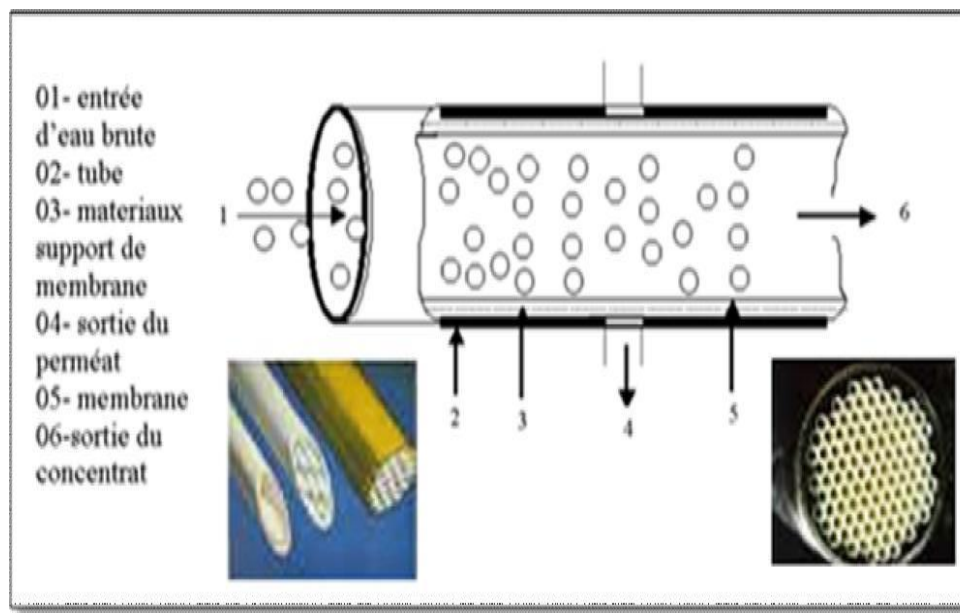


Figure 2.2 Modules à membrane tubulaire (Bouchard et al., 2000)

### 2.2.1.2 Les modules à fibres creuses

C'est un ensemble de fibres creuses de quelques centimètres à un mètre de longueur, et dont l'épaisseur est de l'ordre de 100 à 200  $\mu\text{m}$ , rassemblées en un faisceau de diamètre inférieur à 3mm. Ces fibres sont assemblées en parallèle suivant les deux configurations suivantes :

**Int-Ext :** la solution à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres. Il y a présence d'écoulement tangential dans ce cas de figure (Fig.2.3, schéma a).

**Ext- Int :** la solution circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres en mode frontal (Fig.2.3, schémas b et c) (Bouchard et al., 2000).

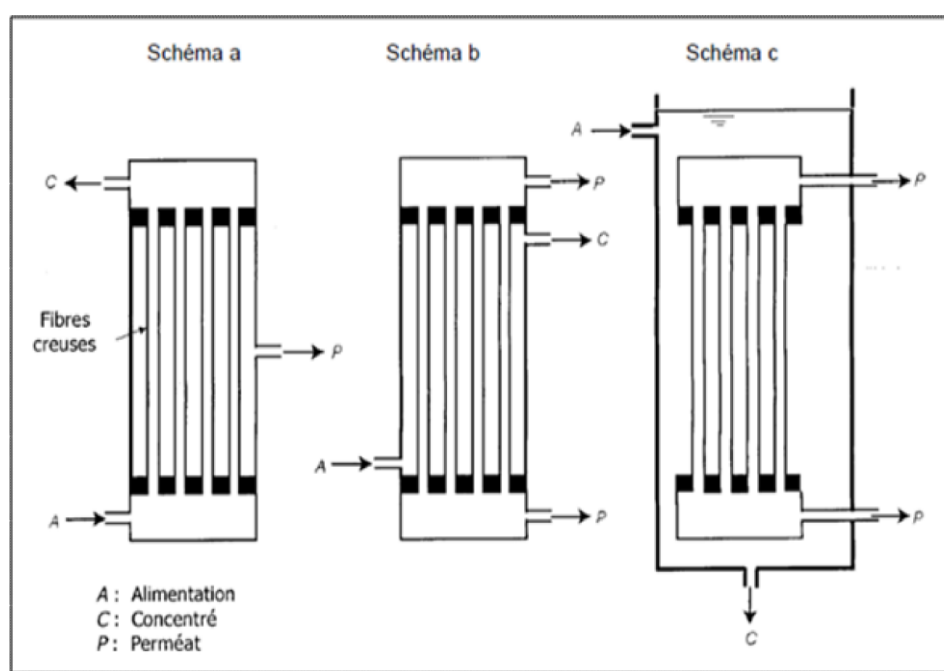


Figure 2.3 Modules à fibres creuses (Bouchard et al., 2000)

### 2.2.1.3 Les modules spiralés

Ces modules sont composés d'enveloppes membranaires planes, enroulées en spirale. L'espace entre chaque enveloppe membranaire constitue un canal d'écoulement tangential pour l'alimentation, et il est partiellement comblé par une autre grille d'espacement en plastique de 0,8 à 1,2 mm d'épaisseur appelée « espaceur grossier ». Les enveloppes et les espaceurs grossiers sont disposés en alternance et sont ensuite enroulés ensemble autour d'un tube creux et perforé destiné à collecter le perméat, qui circule à l'intérieur de la membrane jusqu'au centre du module puis est

récupéré à l'extrémité (Schrotter & Bozkaya-Schrotter, 2010). La fonction principale des espaceurs est de séparer les enveloppes les unes des autres, en plus de créer une turbulence dans la circulation du fluide, afin de minimiser le colmatage des membranes.

C'est ce type de module qui a été étudié dans le présent projet. Les modules spiralés s'insèrent dans des caissons pressurisés.

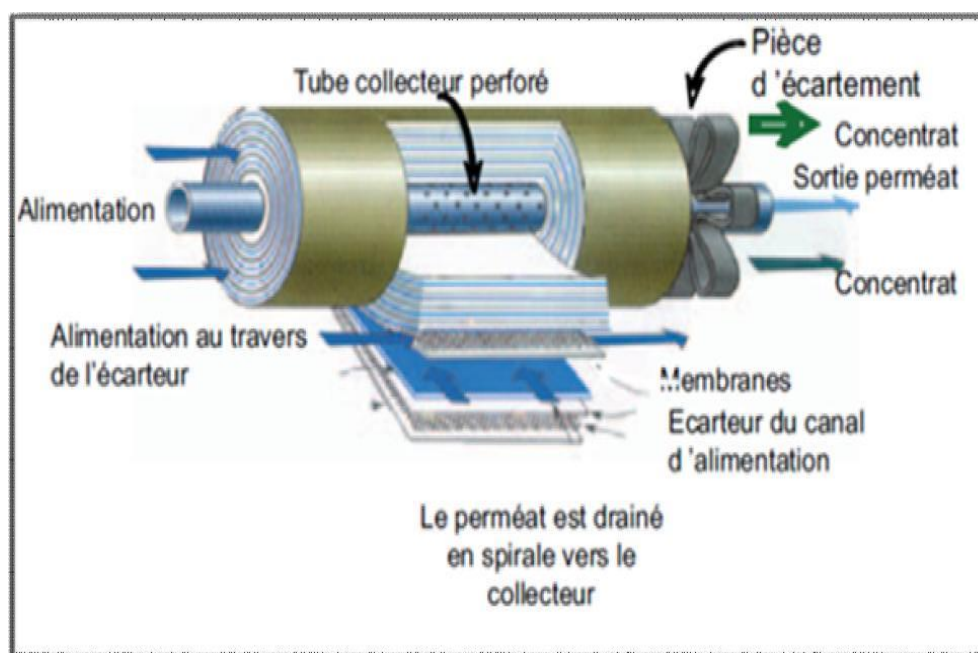


Figure 2.4 Modules spiralés (Maurel, 1993)

Les membranes spiralées dominent actuellement le marché des membranes de nanofiltration. Elles sont le plus souvent opérées avec un écoulement tangentiel faible qui correspond au débit d'alimentation, i.e. qu'aucune recirculation du concentrat n'est faite. Ces membranes sont modulables et peuvent être installées en série les unes à la suite des autres (au maximum 8 typiquement). Le nettoyage physique (hydraulique) n'est pas possible dans cette configuration. Cependant, elles sont soumises à des nettoyages chimiques périodiques pour limiter le colmatage, avec une fréquence dépendamment de la vitesse de colmatage observée (Maurel, 1993). Il est donc primordial d'éviter d'alimenter ces membranes avec des eaux trop chargées en matières en suspension (MES) en raison de l'impossibilité de les rétro-laver.

## **2.2.2 Perte de charges dans les modules spiralés et obstruction des canaux d'écoulement tangentiel (espaceurs grossiers)**

Dans les modules spiralés, deux types de pertes de charges peuvent être distingués : la perte de charge transmembranaire (PTM) et la perte de charge linéaire (PCL), qui est la perte de charge entre les conduites d'alimentation et le concentrat. La PTM est la pression différentielle entre les lignes d'alimentation et le perméat, causée par la résistance de frottement sur la membrane. Lorsque la PTM est augmentée par l'encrassement biologique, le flux membranaire est diminué (Characklis et Marshall, 1990).

Les espaceurs constituent une partie essentielle dans la conception d'un module spiralé. Les espaceurs du côté de l'alimentation assurent, non seulement l'espacement entre les membranes, mais aussi améliorent le mélange des aliments (Guillen et Hoek, 2009), et ont ainsi un impact majeur sur les performances de la membrane. Pareil que les membranes, les espaceurs grossiers du côté de l'alimentation peuvent se colmater, étant donné qu'ils ne créent pas seulement des points à turbulence élevée, mais aussi des points morts où des dépôts organiques et du biofilm vont éventuellement s'y former (Périn, 2004). L'encrassement de la membrane crée une couche barrière à la surface de la membrane et bloque les pores de la membrane, entraînant ainsi (i) une inhibition du flux d'eau, (ii) une augmentation de la chute de pression à travers la membrane, (iii) une réduction de la productivité du perméat (Mohammad et al, 2013). L'impact de l'encrassement de la membrane sur le développement de la perte de charge transmembranaire est insignifiant par rapport à la perte de charge transmembranaire due à l'encrassement des espaceurs (Vrouwenvelder et al., 2006).

Ce phénomène conduit à l'augmentation de la perte de charge entre l'entrée et la sortie du module, ainsi que la diminution du débit d'écoulement tangentiel. C'est pourquoi une préfiltration est toujours nécessaire pour minimiser ces dépôts. Dans son étude pilote de NF de l'eau de la rivière Saint-Charles, Marcil a remarqué que les lavages chimiques ne permettaient pas toujours d'éliminer le colmatage des espaceurs grossiers même si le nettoyage des membranes se faisait très bien (Marcil, 2003).

L'optimisation des performances des modules spiralés s'est concentrée sur l'optimisation de la conception des espaceurs du canal d'alimentation (Fimbres-Weihs et Wiley, 2010). Les travaux de recherche rapportés peuvent être classés en deux catégories : (i) les efforts pour améliorer la

conception des espaceurs en étudiant l'impact de l'orientation et de la géométrie des espaceurs (épaisseur de l'espaceur, diamètre du filament et longueur de maille) sur la performance du processus de traitement de l'eau; (ii) de nouvelles conceptions d'espaceurs d'alimentation qui peuvent surpasser les performances des espaceurs d'alimentation conventionnelles (Tan et al, 2017).

## **2.3 Les différents traitements permettant le contrôle du manganèse/fer dans les eaux potables**

La présence de fer et de manganèse est essentiellement reliée à des problèmes esthétiques, tels que le goût, l'odeur, la couleur, etc. (AWWA, 1990). De plus, la précipitation du fer et du manganèse accompagnée par un développement d'une masse gélatineuse, peut favoriser l'obstruction des canaux d'eau potable et provoquer une coloration rougeâtre (Benefield et al., 1982). Il existe différents traitements couramment utilisés dans le domaine municipal pour le traitement du manganèse et du fer. Parmi ces procédés, on retrouve l'oxydation/filtration et le traitement par démanganisation biologique.

### **2.3.1 Traitement par oxydation/filtration**

La majorité des travaux concernant l'oxydation du fer utilisaient l'oxygène de l'air comme agent oxydant. Stumm et Lee (1961), ont montré que le taux d'oxygénation des ions ferreux  $[\text{Fe}^{2+}]$  était proportionnel à la quantité initiale d'ion ferreux, et dépendait fortement de la concentration en ion hydroxyle  $[\text{OH}^-]$ . Ils ont déterminé que la réaction des ions ferreux avec l'oxygène pouvait mener à un oxyde ou un hydroxyde ferrique  $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ .

Contrairement au fer, l'oxydation du manganèse est généralement réalisée à l'aide de chlore libre, de dioxyde de chlore, d'ozone et de permanganate de potassium. Le chlore libre est souvent employé, car il est plus économique et facile à manipuler. Cependant, ce processus d'oxydation n'est pas efficace voire presque inexistant pour un  $\text{pH} < 9$  (Knocke et al., 1988). Toutefois, si le chlore est utilisé dans des eaux qui contiennent des niveaux élevés de MON, il y a dans ce cas risque de formation de sous-produits de désinfection.

Traditionnellement, les oxydants les plus souvent utilisés sont l'hypochlorite de sodium ( $\text{NaOCl}$ ) et le permanganate de potassium ( $\text{KMnO}_4$ ). Le premier est utilisé pour oxyder le fer lorsqu'il n'y

a pas de manganèse, ou bien lorsque la quantité de fer est importante. Tandis que le deuxième, plus puissant et plus cher, est beaucoup utilisé dans des installations de traitement des eaux pour oxyder à la fois le manganèse et le fer. La dose stœchiométrique pour l'oxydation du fer ( $\text{Fe}^{2+}$ ) et du manganèse ( $\text{Mn}^{2+}$ ) solubles est respectivement 0,94 et 1,92 (Knocke et al., 1991a). L'optimisation de la dose de permanganate dans l'eau est très importante, car un excès de cet oxydant produit une solution rose chez les habitants. En revanche, une dose insuffisante de permanganate ne permet pas une oxydation efficace du manganèse soluble.

L'élimination du Mn insoluble, à la suite du processus d'oxydation, est généralement réalisée par la filtration sur couches de média granulaire catalytiques. Le manganèse dissous peut alors être adsorbé sur le média (e.g. sable vert). Le média doit être régénéré en continu en maintenant des conditions redox favorables. Cet objectif est atteint lorsqu'il y a présence d'une concentration de chlore libre ou de  $\text{KMnO}_4$  résiduel en entrée du filtre. Le manganèse colloïdal est difficile à éliminer par une simple filtration granulaire (Knocke et al., 1991b. Carlson et al., 1997). Combiner une pré-oxydation au  $\text{KMnO}_4$  avec une filtration catalytique permet alors de rehausser la performance du procédé.

### **2.3.2 Traitement par démanganisation biologique**

La démanganisation biologique est un procédé qui a été développé pour traiter des eaux souterraines contenant du Mn. Il s'agit d'un processus de biofiltration dans lequel sont utilisés des bactéries qui viennent oxyder le Mn (Burger et al., 2008). En effet, sous conditions aérobies, ces bactéries vont venir précipiter le Mn sous forme d'une variété d'oxydes de manganèse (nommée  $\text{MnO}_x$ ). Cette technique est considérée peu coûteuse et s'est démontrée efficace pour l'élimination du Mn dissous ainsi que d'autres contaminants comme le fer et la matière organique (Han et al., 2013).

L'avantage avec la démanganisation biologique, c'est qu'elle peut éliminer le manganèse sans l'utilisation d'oxydants chimiques autre que l'oxygène (via une aération). Et dans des conditions de pH naturelles, l'élimination du manganèse peut atteindre plus de 95 % (Pacini et al., 2005). En plus, l'étape d'aération permet d'introduire de l'oxygène dans l'eau, qui à son tour peut servir à oxyder le fer. Aussi, l'aération permet de réduire la concentration en  $\text{CO}_2$ , ce qui provoque une

élévation du pH. Cette élévation permet ainsi d'accélérer l'oxydation du fer et du manganèse (Ellis, 1998).

Le traitement biologique a plusieurs autres avantages comparés aux méthodes chimiques et physiques. Comme mentionné plus haut, ce procédé n'utilise aucun produit chimique, et son débit de filtration est plus élevé et ses coûts d'entretien et d'utilisation sont plus faibles. Au Québec, le procédé Mang'Azur<sup>TM</sup> de SUEZ est le procédé de filtration biologique validé à l'échelle réelle.

## **2.4 Colmatage des membranes**

Le colmatage d'une membrane est défini par l'accumulation de matière à la surface ou à l'intérieur des pores. C'est un phénomène qui constitue une barrière importante dans l'application des procédés membranaires, car il vient diminuer la productivité des membranes.

D'abord, ce phénomène peut diminuer de façon irréversible (ou pas) la perméabilité des membranes. Cela implique alors une dépense importante d'énergie pour pouvoir produire une quantité de perméat constante. Aussi, plus le colmatage est important, plus il faudra dépenser du temps et de l'argent aux lavages chimiques, ce qui risque de réduire la durée de vie des membranes (Bonnelly, 2005). Les membranes de NF sont typiquement des membranes composites constituées d'une couche supérieure (la peau) qui a une épaisseur d'environ 200 nm et qui repose sur une couche de support plus épaisse (80 µm). Comme la partie mince est responsable du processus de séparation, toute usure prématurée peut entraîner don colmatage, et donc une baisse importante de la performance de la membrane (Bonnelly, 2005).

Ridgway (1998) a résumé les effets du colmatage biologique sur les performances de la membrane de NF : (i) diminution du flux membranaire, (ii) augmentation de la pression transmembranaire et différentielle et (iii) augmentation de la perméabilité des matières dissoutes (diminution rejet minéral). Les minéraux dissous peuvent s'accumuler dans la couche de biofilm, augmentant ainsi le phénomène de polarisation-concentration, et réduisant les propriétés du flux et du rejet membranaire.

### **2.4.1 Types de colmatage**

D'après Peng et al (2004), il existe deux principales catégories de colmatage : le colmatage microbiologique et le colmatage abiotique.

Le colmatage microbiologique est causé par des microorganismes qui viennent s'attacher, et croître à la surface des membranes, en produisant suffisamment des substances polymériques extracellulaires pour développer un biofilm à la surface des membranes (Ghayeni et al., 1998).

En plus des microorganismes, la présence d'autres éléments colmatants dans les eaux comme les colloïdes (des particules de très petites tailles) qui induisent une couleur et une turbidité à l'eau distribuée, les substances organiques dissoutes et les substances inorganiques peu solubles, favorisent ce type de colmatage.

Le colmatage abiotique est causé par la fraction humique de la MON qui, par sa nature hydrophobe contribue le plus au colmatage. Ceci peut se manifester de deux façons : par le dépôt de matière à l'intérieur des pores de la membrane et à la surface de celle-ci (Ghayeni et al., 1998). Il existe plusieurs scénarios de colmatage abiotique d'une membrane, dont :

**a) Obstruction interne des membranes:** il y a blocage partiel des pores par l'adsorption de fines particules à l'intérieur de celui-ci. Les molécules sont suffisamment petites pour entrer dans les pores de la membrane et s'y accumulent soit par déposition ou par adsorption. La déposition de ces petits colloïdes à l'intérieur des pores de la membrane provoque la réduction du diamètre de celle-ci (Cardot, 1999).

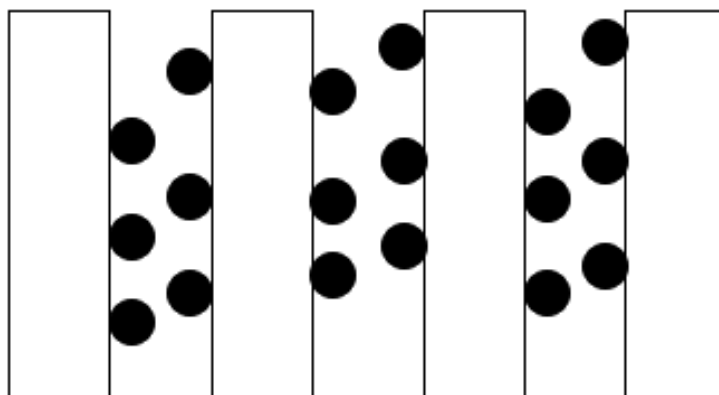


Figure 2.5 Obstruction interne des membranes (Cardot, 1999)

**b) Obstruction complète des membranes :** il y a blocage total des pores par rétention stérique d'une plus grosse particule. L'obstruction est modélisée en supposant que chacune des molécules

présentes en solution bloque un pore fonctionnel. Ce modèle ne prend pas en considération ni les accumulations ou les agglomérations (Cardot, 1999).

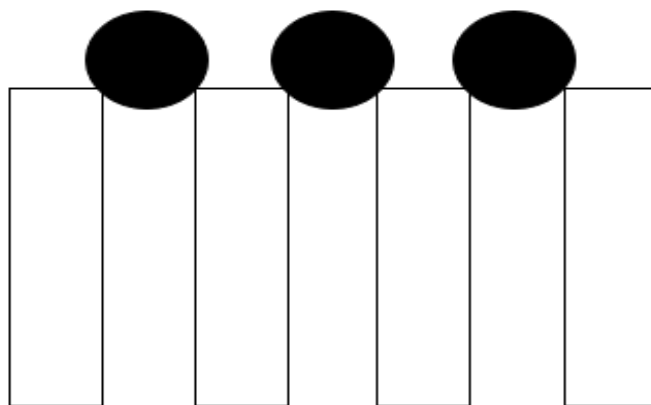


Figure 2.6 Obstruction complète des membranes (Cardot, 1999)

**c) Formation de gâteau sur les membranes:** il y a formation d'un dépôt de particules à la surface de la membrane appelé « gâteau ». C'est un phénomène qui augmente généralement dans le temps. La hausse de résistance observée provient non des pores bouchés, mais de la faible porosité de ce gâteau qui entraîne une réduction du flux. Le gâteau peut être assimilable à une deuxième membrane, car il génère une résistance hydraulique additionnelle à l'écoulement de l'eau à travers les pores de la membrane (Cardot, 1999).

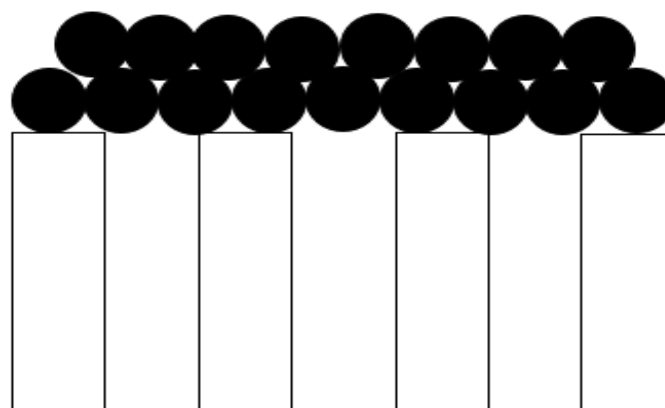


Figure 2.7 Formation de gâteau sur les membranes (Cardot, 1999)

Un autre type de colmatage, plus observé dans ce projet est le colmatage biochimique. C'est un résultat de l'oxydation du fer et du manganèse. Il s'agit de l'accumulation de dépôts induits par les processus biochimiques de précipitation d'oxydes de fer. Ce sont des bactéries qui viennent consommer l'oxygène qu'elles utilisent comme accepteur d'électrons, et tirent leur énergie en oxydant d'un côté le fer réduit ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en fer ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ), conduisant à la formation d'hydroxydes de fer  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Et d'un autre côté, ces bactéries viennent précipiter le Mn sous forme d'une variété d'oxydes de manganèse ( $\text{MnO}_x$ ), formant ainsi un biofilm autour du filtre (Burté et al., 2018).

L'entartrage est aussi considéré comme un type de colmatage très important et très répandu dans le traitement des eaux. C'est le résultat de dépôt de particules sur la membrane, causant ainsi son obstruction. Si certaines solutions inhibitrices de tartre ne sont pas utilisées, les membranes de NF se colmateront à cause de la précipitation de certains sels, comme le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), le sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ), le sulfate de baryum ( $\text{BaSO}_4$ ) et du sulfate de strontium ( $\text{SrSO}_4$ ) (Messaoudène, 1992) .

Économiquement, il est préférable d'empêcher la formation de tartre, même s'il existe des nettoyeurs efficaces. Le tartre provoque souvent un colmatage des éléments d'un système de nanofiltration, rendant ainsi le nettoyage très difficile et relativement long. En ajoutant également le risque que l'entartrage endommage la surface des membranes.

Il existe trois méthodes communément employées pour inhiber l'entartrage:

- L'acidification ;
- L'adoucissement par échange d'ions ;
- L'injection d'antitartre.

## **2.4.2 Facteurs influençant le colmatage**

Afin de développer des stratégies visant à minimiser le colmatage, et ainsi réduire les coûts d'opération et augmenter la durée de vie des membranes, il est important de bien connaître les facteurs qui influencent ce phénomène. Ces facteurs sont principalement : les caractéristiques de l'eau à traiter, les caractéristiques de la membrane et les conditions d'opération du procédé membranaire (Shaalán, 2002).

Le colmatage dépend de la qualité de l'eau à traiter ainsi que la concentration de ses principaux composants. Généralement, plus une eau est chargée en particules, plus elle aura tendance à

colmater davantage les membranes. Le pouvoir colmatant des particules en suspension d'une eau s'exprime en termes de « Silt Density Index » (SDI). Le test de SDI consiste à filtrer l'eau sur un filtre de 0,45 µm et à mesurer la baisse de vitesse de perméation associée au colmatage. Les fabricants de modules spiralés conseillent de ne pas dépasser un SDI de 5 (Bouchard et al., 2000). Par conséquent, l'utilisation d'un prétraitement adéquat est un facteur très important pour la NF, afin que les colloïdes et les particules ne colmatent pas les canaux d'écoulement (espaceurs). Malgré l'absence de particules, une eau contenant beaucoup de matière organique favorisera le colmatage des membranes par la croissance de biofilms. En effet, plus une eau est chargée en MON, plus elle aura tendance à colmater une membrane de NF plus rapidement.

Le seuil de coupure de la membrane, sa charge de surface et son hydrophobicité, comptent aussi parmi les caractéristiques influençant le colmatage membranaire. Cela dit, plus le seuil de coupure d'une membrane est petit, plus la séparation effectuée risque d'être importante. En conséquence, s'il n'y a pas de prétraitement approprié, le colmatage de cette membrane risque d'être plus important (Shaan, 2002). Dans le cas de la NF, la rétention de sels à la surface de la membrane peut causer un dépassement des seuils de solubilité ce qui conduit à un phénomène d'entartrage.

Pour ce qui est de la charge de la membrane, si celle-ci a le même signe que la charge des particules, il y aura alors répulsion entre la membrane et les particules et donc moins de risques de colmatage. C'est pourquoi on utilise des membranes chargées négativement aux pH usuels de traitement (6-8), sachant que les colloïdes et les particules sont chargées négativement dans les eaux naturelles.

Pour ce qui est de l'hydrophobicité, les fabricants cherchent à rendre leurs membranes plus hydrophiles et donc moins susceptibles d'être colmatées par les substances hydrophobes présentes dans les eaux naturelles (Bouchard et al., 2000). Une fraction importante de la MON est composée de particules hydrophobes qui vont s'adsorber sur les membranes malgré la répulsion électrostatique. La MON possède une affinité importante avec le fer qu'on retrouve fréquemment dans les eaux à traiter. L'adsorption de MON sur la membrane favorisera donc également l'accumulation de fer qui contribuera au colmatage (Tamas, 2004).

La présence de fer et de manganèse en grandes concentrations dans l'eau et en présence de conditions favorable peut influencer le colmatage biochimique, qui impacte la perméabilité de la membrane. Son action se traduit de façon générale par l'accumulation de dépôts sur les parois

pleines, ainsi que sur les surfaces internes (réduction progressive du diamètre interne) et externes de la membrane.

En milieu neutrophile (où le pH est proche de la neutralité) et microaérophile (où la concentration en Oxygène est inférieure à la concentration atmosphérique), et en présence d'ions fer ( $\text{Fe}^{2+}$ ) et manganèse ( $\text{Mn}^{2+}$ ), des bactéries (FeOB = Bactéries ferro-oxydantes, MnOB = Bactéries manganooxydantes) peuvent activer les processus d'oxydation du fer et du manganèse et participer à la production de dépôts colmatants riches en exopolysaccharides (EPS) qui colmatent ensuite rapidement les filtres (Burté et al., 2018).

## **2.5 Gestion du colmatage par des prétraitements**

Il existe plusieurs façons de prévenir le colmatage des membranes et l'obstruction des canaux d'écoulement des modules membranaires. La première stratégie à recommander est un enlèvement préalable des matières colmatantes, soit par une préfiltration soit par un traitement conventionnel. La préfiltration peut s'effectuer par une autre étape de filtration membranaire de porosité plus grossière. Pour les modules spiralés de NF, le seuil de coupure de la préfiltration varie généralement de 1 à  $25\mu\text{m}$  (MDDEQ, 2002). L'adoption du type de prétraitement conventionnel doit alors être ajusté selon la qualité de l'eau à traiter afin de garantir une meilleure qualité à l'entrée des membranes de NF.

### **2.5.1 Préfiltration par des cartouches de microfiltration jetables**

L'étape importante du prétraitement conventionnel qui précède la nanofiltration est la filtration sur des cartouches à usage unique en polypropylène, avec une porosité nominale de 5 à  $10\mu\text{m}$ . Ces cartouches sont placées en amont de la NF pour protéger les membranes et éliminer les matières en suspension avant le passage sur la NF. Ce type de cartouches n'est pas approprié pour gérer des concentrations de MES, même modérées, car la fréquence de remplacement rend cette solution coûteuse.

### **2.5.2 Préfiltration par des filtres à lavage automatique**

Afin de pallier les limitations des filtres à usage unique, il est possible d'utiliser des filtres utilisant diverses formes de micro-tamis qui ont l'avantage d'être rétro-lavables. Ce type de technologies

peut atteindre des seuils de coupures de 2-20  $\mu\text{m}$  (e.g. Amiad AMF Series). Esquivel et al. (2008) a cependant montré qu'une filtration de 2  $\mu\text{m}$  était insuffisante pour réduire le colmatage de la NF270. Cette stratégie peut cependant réduire la fréquence de remplacement des cartouches à usage unique, au prix d'une perte en eau qui dépendra de la charge surfacique en MES à filtrer ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ ).

### 2.5.3 Préfiltration par filtre granulaire

La filtration granulaire est un procédé de traitement largement utilisé dans le domaine du traitement des eaux. Le principe de ce type de filtration serait d'utiliser un milieu granulaire comme le sable, le gravier, le charbon, ou l'anhracite à travers lequel l'eau circule, et qui permettra d'intercepter les matières colloïdales et de retenir la matière en suspension.

Le procédé de démanganisation biologique, commercialisée sous le nom de Mang'Azur par la compagnie Degremont, est un procédé de filtration biologique conçu pour l'abatement du manganèse présent dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines. Il consiste à développer au sein d'un filtre granulaire les conditions écologiques adéquates à la croissance des bactéries, en adaptant le manganèse soluble dans leur métabolisme.

En conditions aérobies, la présence naturelle de certaines bactéries dites autotrophes va précipiter le manganèse et, par conséquent, tirer de l'énergie de cette réaction (Barbeau, 2014).

Ces bactéries se fixent sur le support de filtre Biolite conçu spécialement pour le traitement biologique des métaux (Fig.2.8). Ce filtre agit comme support pour les bactéries, et permet une filtration intensive des eaux (30 m/h à SMSL). La rétention prolongée des métaux sur le support Biolite permet de diminuer le niveau de colmatage des filtres et, ainsi, leur assurer une plus longue utilisation.

L'avantage avec ce filtre Mang'Azur, c'est qu'il ne nécessite pas de remplacement ou de régénération périodique. Le manganèse accumulé doit finalement être éliminé du filtre via des rétrolavages réguliers, en utilisant simultanément des injections d'eau et d'air (water technologies and solutions, 2022).

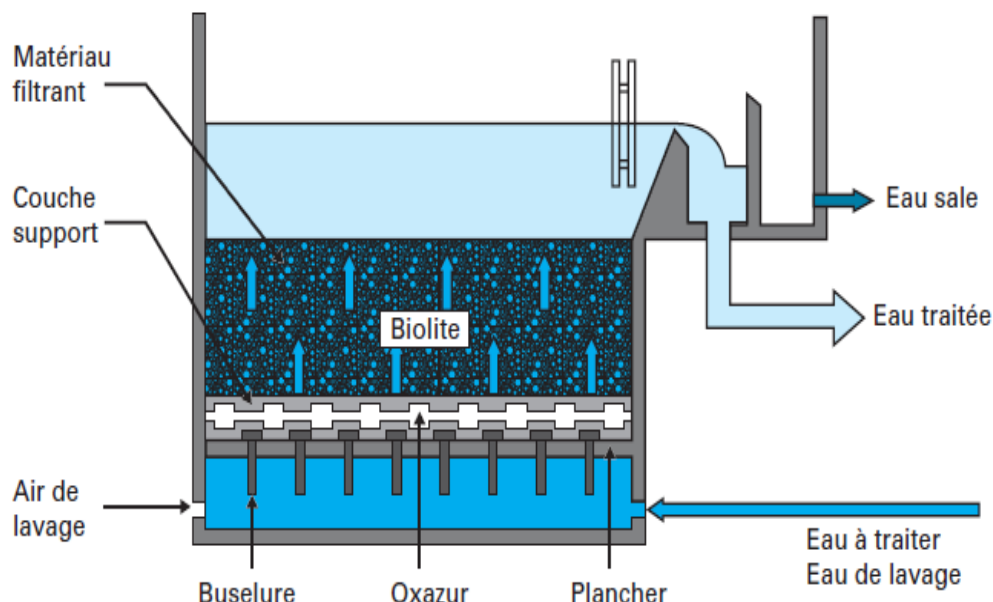


Figure 2.8 Coupe transversale d'un filtre biologique (water technologies and solutions, 2022).

## 2.5.4 Injection de séquestrant

Le dosage d'un séquestrant à l'entrée d'une unité de nanofiltration est l'un des prétraitements préventifs pour éviter ou contrôler le colmatage. Les séquestrants sont des produits chimiques synthétiques sous forme de polymères, ou à base de phosphates (Elkaout, 2005). Grâce aux différentes propriétés qu'ils peuvent présenter, ces produits sont qualifiés de meilleurs protecteurs contre l'encrassement biologique des membranes.

Il s'agit d'une substance chimique inhibitrice de dépôts, injectée en amont des unités de nanofiltration ou d'osmose inverse, pour éviter l'encrassement des membranes. En pratique, l'antitartre et l'acide minéral sont les produits généralement utilisés pour éviter l'encrassement des membranes par le sulfate de baryum ou les carbonates respectivement.

La concentration du séquestrant dans l'eau d'alimentation pour une installation, dépend du type de l'eau, du taux de conversion, du taux de rejet des membranes et de la température de l'eau. D'une manière générale, la dose de séquestrant varie entre 1 et 6 mg/L. Néanmoins, une concentration supérieure à 35 mg/L peut être appliquée (Vrouwenvelder et al., 2000).

### **2.5.5 Choix du taux de récupération/Flux d'opération**

Différents paramètres impactent la vitesse du colmatage, toutefois ils sont tous interreliés. Un des plus importants est la qualité de l'eau, une eau trop chargée entrainerait un colmatage et réduirait la perméabilité (Zularisam et al., 2007).

Le taux de récupération affecte aussi la qualité et l'efficacité du traitement. Ce taux représente la quantité d'eau récupérée en tant que perméat. Le taux de récupération du système est affecté par plusieurs facteurs comme la qualité de l'eau d'alimentation, le nombre et la disposition des modules. Plus le système de filtration est à faible nombre d'éléments membranaires, plus le taux de récupération est généralement faible. Et vice versa, plus le nombre d'éléments membranaires est élevé et le processus de traitement est long, plus le taux de récupération réel du système est généralement supérieure à 75% et peut atteindre 90% dans certains cas (Sodoyer, 2019). Toutefois, plus le taux de récupération est élevé, moins il y a d'évaluation d'eau sous forme de concentrat, et donc plus de production de perméat. Mais, si le pourcentage de récupération est trop élevé pour la conception du système de nanofiltration, ceci peut provoquer des problèmes plus graves en raison de l'entartrage et l'encrassement des membranes (Sodoyer, 2019).

Les conditions d'opérations influencent également le colmatage. Ainsi les variations de flux d'opération peuvent engendrer des effets inverses à ceux prévus. Augmenter la vitesse de cross-flow a conduit à une faible amélioration pour Keucken et al. (2016), tout en dégradant la qualité de l'eau au perméat. À l'inverse, diminuer sensiblement la vitesse de cross-flow peut également nuire à la qualité de l'eau traitée.

### **2.5.6 Dé-oxygénation**

L'oxygène dissous dans l'eau présente un risque élevé de corrosion. En effet, au contact avec le fer, l'oxygène dissous peut générer une couche de corrosion et se manifeste par l'apparition de rouilles sur les conduites et les filtres (Romaine, 2014).

Cette réduction de la teneur en oxygène dissous est souvent réalisée par des réactifs chimiques tels que les sulfites. L'emploi du sulfite de sodium ou du bisulfite d'ammonium est de mise en œuvre simple et possède un effet tampon plus large, même s'il présente un coût élevé. En effet, le sulfite de sodium est le premier réducteur chimique d'oxygène généralement utilisé dans les

prétraitements pour limiter le risque de corrosion dans les circuits d'eau. Il réagit avec l'oxygène pour former le sulfate, et éviter la précipitation du fer et du manganèse contenus dans l'eau souterraine (MELCC, 2019).

En réduisant les concentrations d'oxygène, le sulfite de sodium contrôle la croissance bactérienne aérobie et réduit efficacement le potentiel d'encrassement des membranes. Cependant, l'application du sulfite de sodium est limitée à une eau relativement propre, car elle est inefficace contre les biofilms existants et l'eau à fort potentiel d'encrassement (Redondo & Lomax, 2001 ).

## **2.6 Gestion du colmatage de la NF par des lavages**

Le nettoyage des membranes a pour objectif de limiter le colmatage irréversible et à prolonger la durée de vie des membranes. La technique de nettoyage des membranes de NF se fait par un nettoyage chimique (trempage et / ou circulation nettoyante) (Berland et al., 2002).

Les membranes de NF ne sont pas rétro-lavables. Mais, elles doivent être décolmatées régulièrement en les faisant tremper dans une solution chimique nettoyante. Un système membranaire est toujours plus efficacement lavé à l'eau chaude (typiquement 35°C).

Il y a trois types de lavage à effectuer sur un système membranaire fonctionnant en eau souterraine :

- Lavage basique pour laver la matière organique/biologique
- Lavage acide pour laver les matières inorganiques
- Désinfection des membranes

### **2.6.1 Lavage basique**

L'encrassement de la membrane est la plupart du temps lié aux bactéries (biofilms) ou aux composés inorganiques (origine minérale). Pour un encrassement biologique, un lavage basique et/ou désinfection est recommandé. Lorsqu'on doit combiner plusieurs types de lavages parce qu'on soupçonne différents types d'encrassements, le choix de la séquence de lavage doit être faite judicieusement. Si l'eau à traiter contient beaucoup de matière organique, limon., argile. etc., le lavage basique doit se faire en premier et parfois même il n'est pas nécessaire de faire un lavage acide après (Tang et al., 2011).

Ce type de lavage est effectué avec un pH 10,5-12 et à une température de 35°C en utilisant de la soude caustique. Puis la solution est recirculée dans le train NF colmaté environ 60 minutes

dépendamment du niveau de colmatage des membranes. Une période de trempage sans recirculation est également communément utilisée.

### **2.6.2 Lavage acide**

Le lavage basique à pH plus élevé que 9 cause une dilatation des pores de la membrane causant ainsi une augmentation de la perméabilité de près de 40 % et une baisse de la séparation. Cet effet est temporaire mais peut durer jusqu'à 72 heures. À l'inverse, le lavage acide à pH plus bas que 4 cause un rétrécissement des pores de la membrane. Cela peut se remarquer par une baisse de la perméabilité et une augmentation de la séparation. Pour contrer ces phénomènes, il est possible d'effectuer un lavage basique suivi d'un lavage acide. L'effet de l'acide vient neutraliser l'effet de la base ce qui permet de retrouver la perméabilité initiale de la membrane rapidement (Tang et al., 2011).

Ce type de lavage est effectué avec un pH 2-3 à une température de 35°C, puis la solution est recirculée dans le train NF colmaté environ 60 minutes dépendamment du niveau de colmatage des membranes. Chaque changement de solution est précédé d'un rinçage à l'eau généralement géré par temporisation (environ 10 min). Les lavages acides sont habituellement effectués avec de l'acide chlorhydrique ou de l'acide phosphorique.

### **2.6.3 Désinfectant non-oxydant**

Le rôle d'un désinfectant est de fissurer les bactéries, virus et champignons, ce qui a pour effet d'enlever leur substance vitale. Cependant, le désinfectant non-oxydant n'est pas efficace contre les déchets organiques (algues). Il faut lui ajouter du peroxyde d'hydrogène pour compléter la désinfection.

Le 2,2-dibromo-3-nitrilopropionamide (DBNPA) est un amide halogéné et a été documenté comme un biocide non-oxydant efficace (Da-Silva-Correa, 2022). Dans l'industrie, le DBNPA est largement utilisé dans le traitement de l'eau, les pâtes et papiers, mais principalement dans l'industrie pétrolière pour traiter l'eau utilisée pour préparer les fluides de fracturation afin de contrôler la corrosion des conduites induite par des microbes (Da-Silva-Correa, 2022).

### CHAPITRE 3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

La ville de Sainte-Marthe-sur-le-Lac s’approvisionne en eau souterraine par le biais de huit puits, rechargés en partie par les eaux de deux lacs à proximité qui sont le lac Bon Sable et le lac Val des Sables (Barbeau, 2014). Les eaux brutes sont donc un mélange d’enjeux de traitement d’eau de surface (COD, algues) et de défis liés aux eaux souterraines (fer, manganèse, dureté). Le traitement en place, illustré à la figure 3.1, consiste en un traitement dit fractionné. Une fraction de l’eau est traitée par un procédé de cartouches jetables suivie par une nanofiltration. La deuxième fraction est traitée par un procédé de cartouches jetables suivie par une nanofiltration. Les eaux produites par les deux trains sont mélangées avant d’être chlorées et distribuées dans le réseau de distribution.

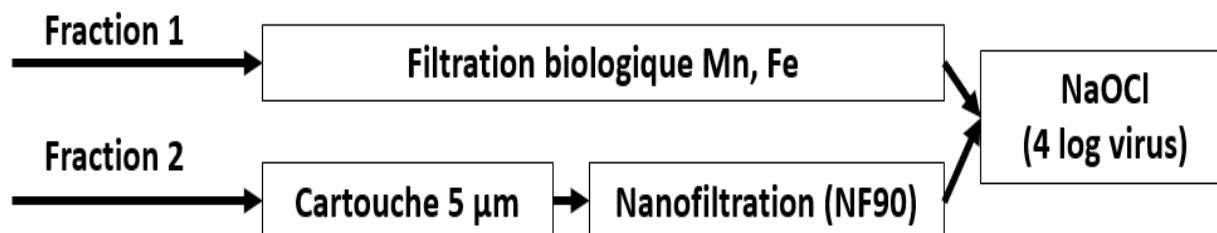


Figure 3.1 Filière de traitement à l’usine de SMSL

Cette étude pilote traite principalement de l’influence du traitement par procédé de démanganisation biologique sur la performance des cartouches filtrantes et ainsi que sur les membranes de nanofiltration. Nous avons posé comme hypothèse de recherche que la réduction du fer, du manganèse et du COD attendu dans un filtre Mang’Azur permettrait de réduire la fréquence de remplacement des cartouches à usage unique en plus d’atténuer le colmatage des membranes de NF.

Pour commencer, une description du montage avec la source d’eau utilisée lors des essais pilote est présentée à la section 3.1. Ensuite, il y a une description des phases du déroulement des essais pilote à la section 3.2 et une présentation des protocoles expérimentaux des essais réalisés en laboratoire et à l’usine à la section 3.3. Finalement, la section 3.4 décrit les étapes de lavages des membranes NF.

### 3.1 Description du montage pilote de NF

Le montage pilote installé au sein de l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-Lac est illustré dans la figure 3.2. Ce montage est constitué de deux trains parallèles. Le train 1 filtre l'eau brute, et le train 2 filtre l'eau de l'usine préalablement traitée par démantanisation biologique « Mang'Azur ». C'est un pilote entièrement manuel y compris les lavages chimiques, et qui permet d'étudier le comportement de filtration d'une cartouche de 5µm et 10 pouces de longueur ainsi qu'un module spiralé de 2,5 pouces de diamètre et 40 pouces de longueur (NF90, Dow *Filmtec*).



Figure 3.2 Montage pilote de NF

#### 3.1.1 Train 1 : Eau brute de l'usine

La figure 3.3 présente le schéma fonctionnel du montage du train alimenté par l'eau brute (Train 1). Le deuxième train est identique mais est alimentée par l'effluent du Mang'Azur, un filtre biologique conçu pour réduire la concentration de fer et de manganèse.

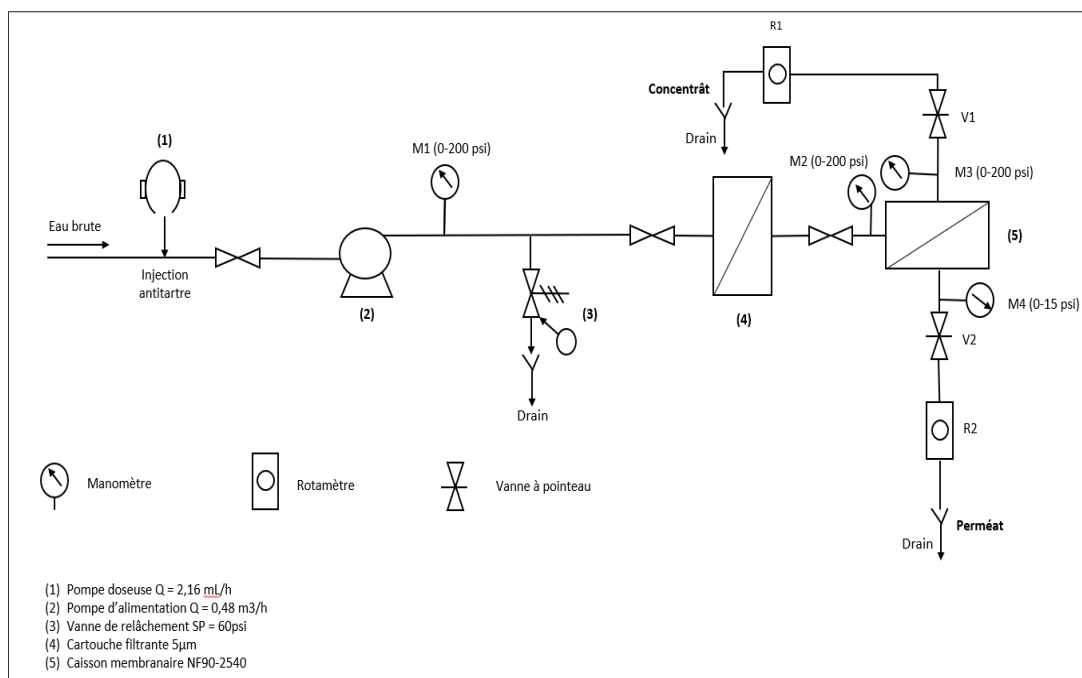


Figure 3.3 Schéma fonctionnel du train 1 (Eau brute)

Une pompe doseuse (1) est installée à l'entrée du circuit pour le dosage d'antitartre afin de réduire les dépôts minéraux sur la membrane. Une pompe d'alimentation (2) fournit ensuite la pression nécessaire pour filtrer l'eau travers la cartouche 5 microns (4). Une vanne de relâchement (3) réglée à 60psi, est installée en amont de la cartouche pour assurer une dépression si nécessaire. A la sortie du préfiltre, l'eau subit ensuite une filtration membranaire sous pression à travers une membrane de nanofiltration spiralée NF90 (5).

### 3.1.2 Train 2 : Eau traitée par démanganisation biologique

Dans ce circuit, l'eau à traiter provient de la sortie commune de trois filtres biologiques. Ce type de filtre conçu pour la démanganisation biologique est connu sur le marché sous le procédé de MANG'AZUR™, commercialisé au Québec par la compagnie SUEZ. Le schéma fonctionnel du montage et les éléments importants du procédé sont illustrés à la figure 3.4.

Le train 2 a le même principe de fonctionnement que celui du train 1. Cependant, l'eau qui provient de la sortie des trois filtres biologiques est acheminée gravitairement avec un débit de 21L/min, et ensuite stockée dans un réservoir de transfert de 200L (1) un temps de séjour de 10 min. Ce réservoir est muni d'un trop plein, pour déverser l'eau en excès dans les drains avec un débit de 4,33 L/min.

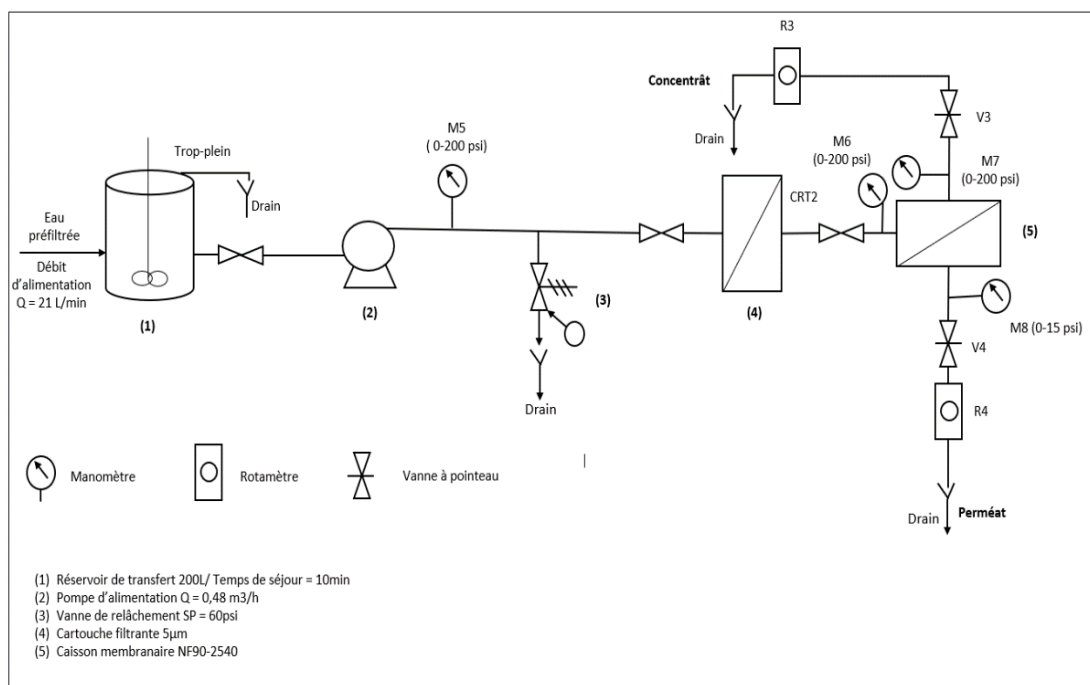


Figure 3.4 Schéma fonctionnel du train 2 (Eau prétraitée de l'usine)

### 3.1.3 Cartouche et membrane à l'étude

La cartouche filtrante utilisée dans cette étude est de longueur 10 pouces et de porosité de filtration nominale 5 microns. Elle est fabriquée en microfibres de polypropylène aggloméré par action thermique sans aucun additif, et sa qualité convient pour filtrer les eaux froides ou chaudes jusqu'à 65°C. Elle est capable d'éliminer les particules de sable, de saleté, de limon, de rouille et de tartre extra fines (Filmtec, 2004).

La membrane NF90 utilisée dans le cadre de cette étude est de type « Polyamide Thin-Film Composite », et est conçue et fabriquée par la compagnie Filmtec. Sa couche active est faite en polyamide et une sous-couche en polysulfone est aussi présente pour lui conférer une résistance mécanique. Le fabricant mentionne que la membrane NF90 peut travailler à une pression maximale de 4,14 MPa et à une température maximale de 45°C. Elle tolère très peu le chlore libre puisque la concentration maximale admise est de 0,1ppm. Elle peut tolérer une gamme de pH de 2 à 11 en opération continue et de 1 à 12 pour des périodes de courte durée (<30 minutes) (Filmtec, 2004).

Le module NF90-2540 utilisé pour cette étude est un module spiralé. Il a environ 64 mm de diamètre (2,5 pouces) et 1m de long (40 pouces). La surface active nominale de la membrane

enroulée dans le module est de 2,6 m<sup>2</sup>. Ce module peut être alimenté par un débit maximal de 2,6 m<sup>3</sup>/j. Pour minimiser l'obstruction des canaux d'écoulement, un SDI maximal de 5 est recommandé par le fournisseur (Filmtec, 2004). Les dimensions détaillées de la membrane contenue dans le module, et ses caractéristiques sont présentées à l'Annexe A.

Les principales différences entre les critères d'opération de l'usine et celles du pilote sont présentées à l'Annexe B.

### 3.1.4 Points d'échantillonnage sur le pilote

Afin de répondre aux objectifs de l'étude, une campagne de mesure détaillée a été conçue pour évaluer les dynamiques à différents endroits clés du pilote. La fréquence d'échantillonnage adaptée pendant le projet est de une fois par semaine.

Pour le train 1 de l'eau brute, quatre points d'échantillonnage, comme le montre la figure 3.5, ont été installés pour réaliser les mesures et effectuer les différentes analyses.

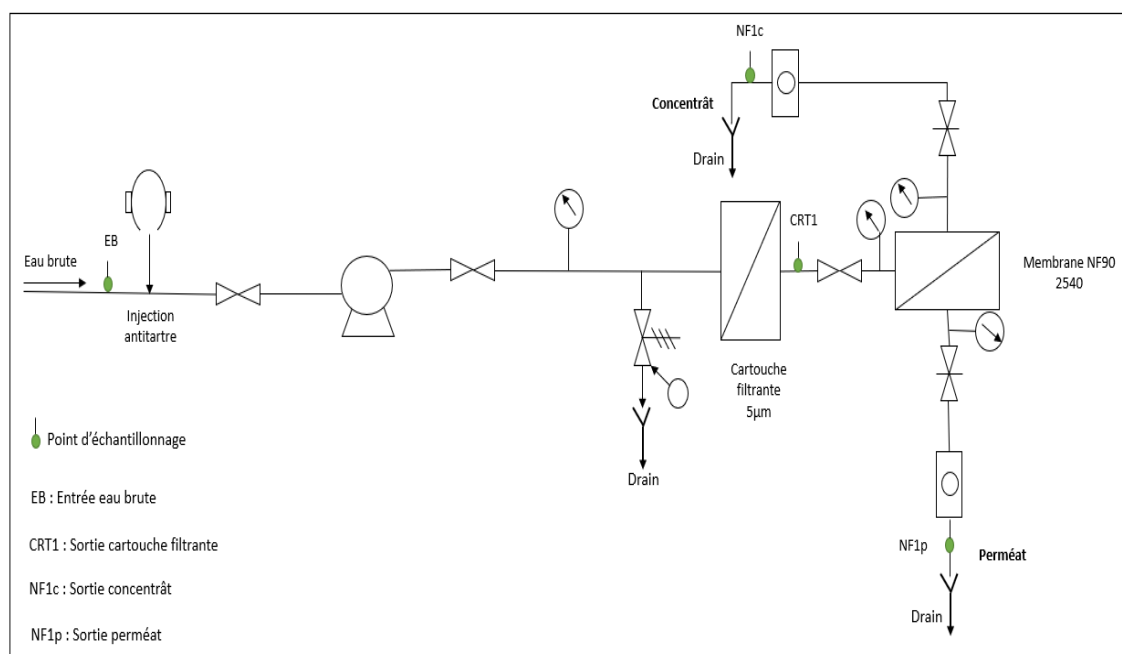


Figure 3.5 Points d'échantillonnage sur le train 1

Les échantillons analysés sont :

- EB : Eau brute
- CRT1 : Effluent de la cartouche 1

- NF1c : Effluent concentrat 1
- NF1p : Effluent perméat 1

Pour le train 2 de l'eau prétraitée, cinq points d'échantillonnage, comme le montre la figure 3.6, ont été installés pour réaliser les mesures et effectuer les différentes analyses.

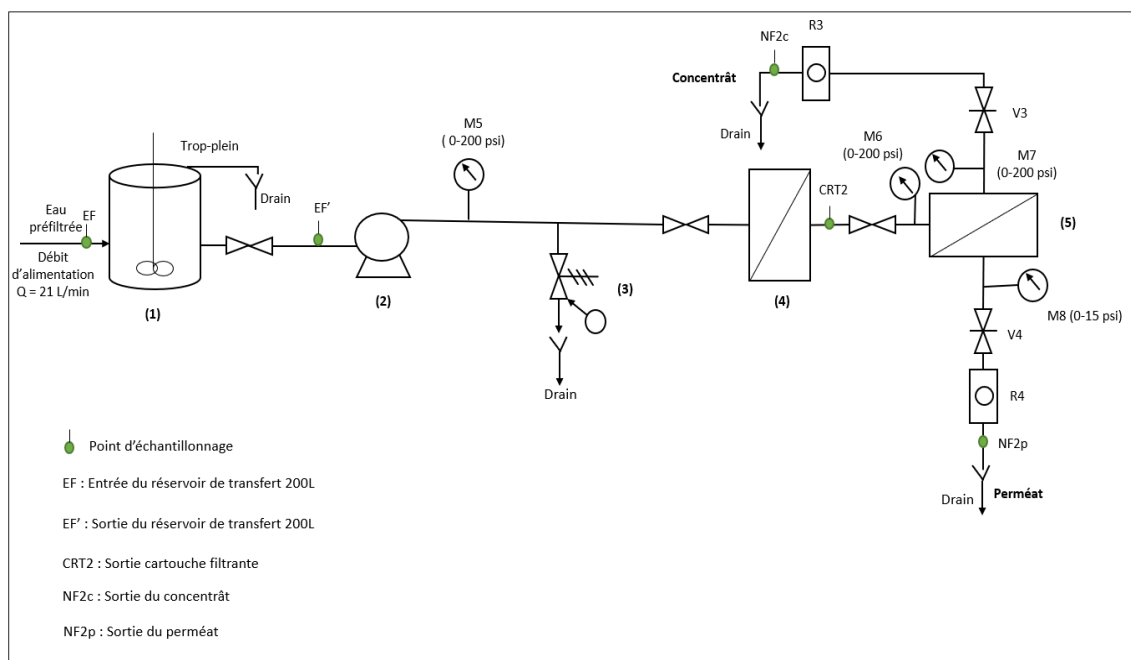


Figure 3.6 Points d'échantillonnage sur le train 2

Les échantillons analysés sont :

- EF : Affluent réservoir de transfert
- EF' : Effluent réservoir de transfert
- CRT2 : Effluent de la cartouche 2
- NF2c : Effluent du concentrat 2
- NF2p : Effluent du perméat 2

### 3.2 Phases de déroulement des essais

Les essais pilotes réalisés durant ce projet ont été répartis sur deux phases.

### **3.2.1 Phase 1 : Mode d'opération avec préfiltres seulement**

La première phase du suivi du pilote consiste à évaluer le comportement des préfiltres par rapport à la qualité d'eau reçue, leur degré de colmatage et leur fréquence de remplacement en fonction de la perte de charge dans la cartouche. En effet, lorsque le différentiel de pression maximal est atteint (en moyenne 30 psi), le remplacement de la cartouche est nécessaire.

Ce mode d'opération sur les préfiltres a duré au total 11 semaines (du 31/03/2022 au 23/06/2022), dont une semaine de fonctionnement (semaine du 20/06/2022) avec un débit d'opération maximal de 16 L/min. Au début, il avait été prévu d'opérer le pilote à un débit de 16 L/min mais il s'est avéré impossible de le faire en raison de la vitesse élevée de colmatage des préfiltres, une opération a donc été faite majoritairement à un débit de 50%, soit 8 L/min.

Des tests de caractérisation des eaux ont été réalisés en amont et en aval des cartouches pour vérifier l'efficacité de celles-ci. Ces tests sont des mesures de température, pH et oxygène dissous effectués sur site et des analyses de dureté totale, alcalinité, turbidité, SDI, Mn et Fe réalisés au laboratoire.

### **3.2.2 Phase 2 : Mode d'opération avec NF**

Après installation des membranes de NF, la deuxième phase d'opération consiste à évaluer la qualité de l'eau du concentrat à la sortie des membranes. Les membranes de NF ont été opérées sans perméation. En effet, une étude hollandaise effectuée sur l'encrassement biologique des membranes de nanofiltration, menée par Vrouwenvelder J.S et al (2010), a démontré que même si la perméation soit un processus important dans la nanofiltration, il n'est pas nécessaire de l'étudier pour comprendre le colmatage de la membrane. Pour étudier le colmatage de la membrane de NF en premier étage, il est important de surveiller la perte de pression et la qualité de l'eau produite. En revanche, la perméation n'est pas directement liée à l'étude du colmatage de la membrane.

Il était prévu de valider cette affirmation durant ce projet, mais un problème d'intégrité relié aux modules nous a amené à abandonner cet objectif.

Cette phase a duré 10 semaines (du 27/06/2022 au 29/08/2022), durant laquelle des tests physiques et chimiques ont été réalisés sur l'effluent des membranes. Les tests physiques consistent à mesurer la pression à l'entrée et à la sortie du concentrat et évaluer les pertes de charges après la mise en place des filtres. Aussi, les tests chimiques ont poursuivi durant cette phase d'opération en amont et en aval de la membrane NF. Ces tests sont des mesures de température, pH et oxygène dissous

effectués sur site et des analyses de dureté totale, alcalinité, turbidité, SDI, Mn et Fe, COD/COT réalisés au laboratoire.

### 3.3 Paramètres suivis au cours de l'étude pilote

Pour évaluer l'efficacité du traitement par démanganisation biologique sur la qualité de l'eau, plusieurs paramètres physico-chimiques ont été suivis lors des essais sur site et au laboratoire. En effet, les qualités des eaux d'alimentation des deux trains, ainsi qu'aux sorties des cartouches, du perméat et du concentrat ont été analysées tout au long des essais réalisés à l'UTE de SMSL. Tel que mentionné précédemment, l'accent a été mis sur l'enlèvement du manganèse et du fer ainsi que la réduction de la dureté. Une fréquence d'échantillonnage d'une fois/semaine a été fixée pour les analyses au début des essais. Le Tableau 3.1 présente les paramètres de qualité de l'eau ainsi que les méthodes d'analyses suivies lors des essais sur site et au laboratoire. Les analyses physico-chimiques ont été réalisées au laboratoire de traitement des eaux et au CREDEAU du Département des génies civil, géologique et des mines de l'Ecole polytechnique de Montréal.

Tableau 3.1 Paramètres et méthodes d'analyses suivis lors des essais in situ et au laboratoire

| Mode d'analyse<br>(au laboratoire /<br>sur site) | Paramètre d'analyse                           | Méthode d'analyse                                  | Référence                                                |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Au laboratoire                                   | Manganèse ( $Mn^{2+}$ )/<br>Fer ( $Fe^{2+}$ ) | Spectrophotomètre<br>d'absorption<br>atomique 3110 | No. 3500-Mn;<br>No. 3500- Fe de<br>SMEWWW <sup>(1)</sup> |
|                                                  | Turbidité                                     | Turbidimètre                                       | No. 2130 de<br>SMEWWW                                    |
|                                                  | Alcalinité                                    | Titration avec l'acide<br>sulfurique N/50          | No. 2320 de<br>SMEWWW                                    |
|                                                  | Dureté totale                                 | Titration au réactif<br>complexant EDTA            | No. 2340 de<br>SMEWWW                                    |
|                                                  | COT/COD                                       | Analyseurs COT<br>Sievers M5310 C                  | No. 5310 de<br>SMEWWW                                    |
|                                                  | SDI                                           | Filtration sur<br>membrane 0,45µm                  | No.113.03 de<br>TSB <sup>(2)</sup>                       |
| Sur site                                         | pH                                            | Sonde pH                                           |                                                          |
|                                                  | Température                                   | Thermomètre                                        |                                                          |
|                                                  | Oxygène dissous                               | Sonde à oxygène                                    |                                                          |

(1) SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22<sup>nd</sup> edition

(2) TSB : Technical Service Bulletin, October 2013

### 3.4 Procédure de lavage des membranes NF

Afin que la membrane retrouve sa perméabilité initiale et que le module spiralé retrouve son obstruction initiale, une procédure de lavage chimique, illustré à la figure 3.6 ci-dessous, est requise lorsque la pression transmembranaire (pression d'alimentation moins pression du concentrat) aura augmentée de 10 à 15 %. Les solutions acide et basique utilisées sont respectivement le Lavasol 6 et le Lavasol 7.

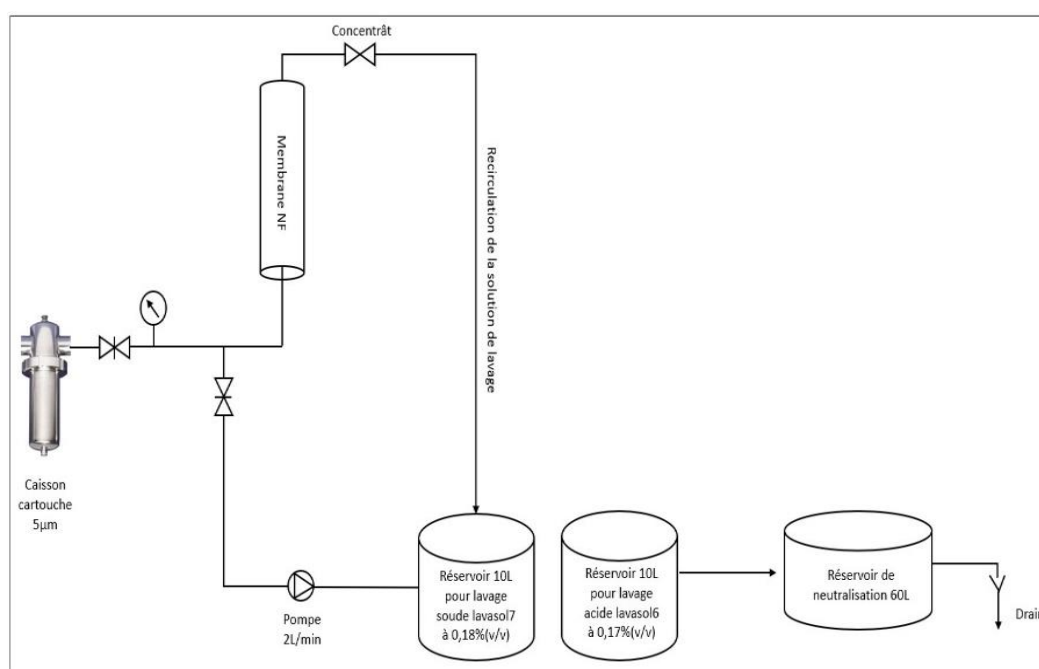


Figure 3.7 Procédure de lavage des membranes NF

La procédure de lavage acide/basique est constituée de trois étapes :

- **Préparation des solutions de lavage diluées de soude/acide**
  - Chauffer 5L d'eau Milli-Q dans un réservoir de 10L jusqu'à atteindre une température de 35°C;
  - Plonger une sonde pH dans le premier réservoir de 10L et doser un volume de 9mL (0,18 (v/v)) de solution concentrée de soude lavasol 7 à l'aide d'une pipette, pour atteindre un pH 12 ;

- De même, plonger une sonde pH dans le deuxième réservoir de 10L et doser un volume de 8,5mL (0,17% (v/v)) de solution concentrée d'acide lavasol 6, pour avoir un pH 2.
- **Mise en circulation des solutions de lavage**
  - Pomper 5L de la solution soude/acide à travers la membrane et faire recirculer la solution en boucle fermé pendant 30min ;
  - Mesurer le pH en continu lors de la recirculation de la solution de lavage pendant 30min. Si le pH augmente de plus de 0,5 unité pendant le nettoyage à l'acide, il faut ajouter plus d'acide. Si le pH diminue de plus de 0,5 unité pendant le lavage basique, plus de soude doit être ajouté ;
  - Lorsque la solution d'acide/soude diluée se stabilise à un pH 2 et pH 12, on arrête le dosage et on note le volume (mL) de solution de soude/acide pipetée ainsi que le volume de l'effluent collecté dans le réservoir 10L ;
  - Laisser tromper la solution de lavage soude/acide dans la membrane pendant 60min ;
  - Rincer à l'eau Milli-Q.
- **Collecte et neutralisation de l'effluent**
  - Après chaque étape de lavage acide/basique, collecter l'effluent dans un réservoir de 20L
  - Mélanger la solution et échantillonner l'eau de lavage;
  - Verser l'effluent acide/basique dans le réservoir de neutralisation 60L, dédié pour la collecte de l'effluent total (acide + base + eau de rinçage) ;
  - Évacuer l'effluent collecté dans le réservoir de 60L dans le drain d'évacuation après neutralisation.

Le tableau 3.2 ci-après récapitule les principaux paramètres d'opération de la procédure de lavage des membranes NF.

Tableau 3.2 Paramètres d'opération de la procédure de lavage

|                                                                      |             |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Débit de pompage de la solution de lavage (soude/acide)</b>       | 2 L/min     |
| <b>Température de la solution de lavage (soude/acide)</b>            | 35°C        |
| <b>Concentration de solution Lavasol 6 (acide)</b>                   | 0,17% (v/v) |
| <b>Concentration de solution Lavasol 7 (base)</b>                    | 0,18% (v/v) |
| <b>pH solution diluée (acide/soude)</b>                              | 2-12        |
| <b>Temps de recirculation de la solution de lavage (soude/acide)</b> | 30 min      |
| <b>Temps de trempage de la solution de lavage (soude/acide)</b>      | 60 min      |

## **CHAPITRE 4      RÉSULTATS DES ESSAIS SUR LE PILOTE**

En premier lieu, les résultats des essais de caractérisation des eaux brutes et traitées seront présentés à la section 4.1 afin de documenter l'impact d'un prétraitement Mang'Azur sur les caractéristiques des eaux alimentant les cartouches 5 µm ainsi que la performance intrinsèque de ses cartouches pour réduire les agents colmatants. Par la suite, la section 4.2 présente les résultats des essais sur les préfiltres et les membranes de NF, afin de mettre en évidence l'importance du prétraitement par Mang'Azur sur le taux de colmatage des cartouches (section 4.2) et des membranes de NF (section 4.3). Par la suite, la section 4.4 présentera l'impact du flux d'opération du pilote qui a montré une grande importance sur le taux de colmatage des cartouches. Ensuite, une comparaison entre les critères d'opération du pilote avec ceux de l'usine est présentée à la section 4.5. Enfin, la nature des agents colmatants est identifiée à la section 4.6 grâce à la caractérisation des préfiltres et des eaux de lavages des membranes de nanofiltration.

### **4.1 Impact d'un prétraitement au Mang'Azur sur les caractéristiques des eaux alimentant la cartouche de 5 µm et la membrane de NF**

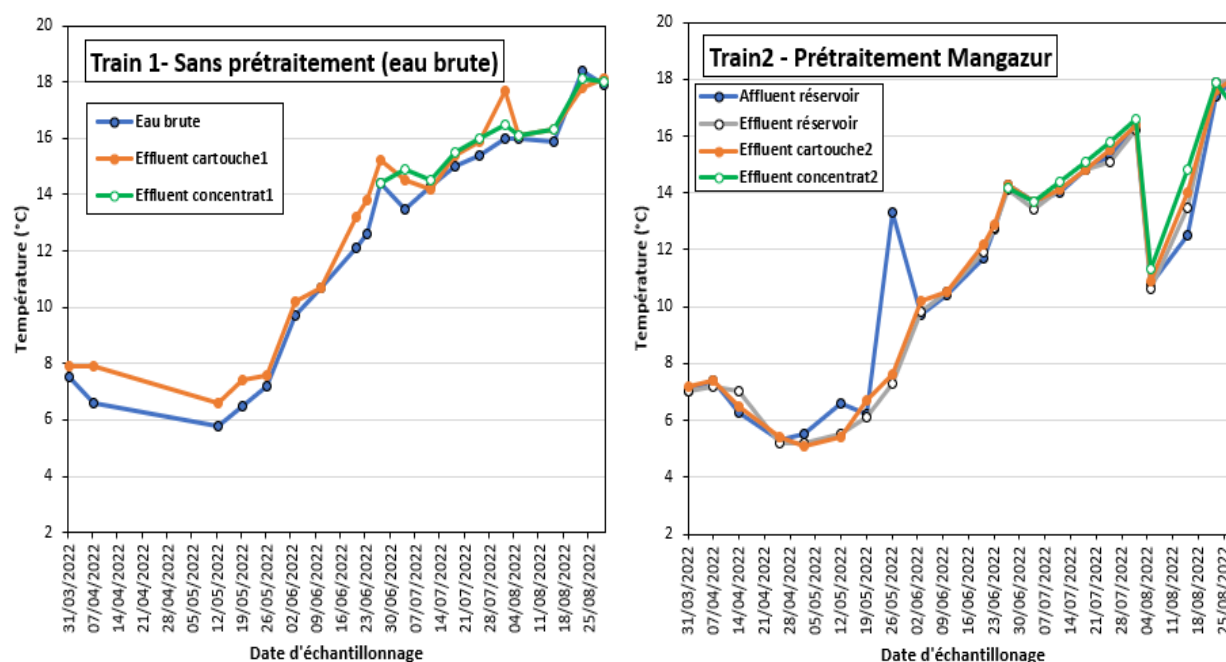
Un suivi hebdomadaire des caractéristiques des eaux des deux trains du pilote a été effectué du mois d'avril jusqu'à août 2022. Ce suivi inclut 10 paramètres physico-chimiques, dont des mesures de température, pH et oxygène dissous effectuées sur site et des mesures d'alcalinité, de dureté totale, de turbidité, Silt Density Index (SDI), de manganèse, de fer, et de Carbone Organique Total/Dissous (COT/COD). Cette section s'attardera à présenter les variations temporelles de ces paramètres aux différentes étapes de traitement et une analyse comparative entre les deux trains d'opération.

#### **4.1.1 Variation temporelle de la température**

La figure 4.1 illustre la variation de la température pour chaque point d'échantillonnage sur les deux trains au cours de la période expérimentale. Les variations de température observées sur les deux figures 4.1a et 4.1b se situent dans la même fourchette, allant de 6°C à 18°C suivant la saison de la prise d'échantillon entre les mois d'avril et août. Cette variation de température joue un rôle important dans la croissance des biofilms dans les canalisations et les préfiltres. En effet, plus la température de l'eau est froide (inférieure à 10°C), plus l'activité microbienne est faible.

La température est un des facteurs dominant parmi l'ensemble des facteurs physicochimiques et biologiques qui interviennent dans la variabilité de l'oxygène. Elle influence en effet à la fois la solubilité de l'oxygène dans l'eau et l'activité biologique (Villeneuve et al., 2004). Cet effet sera observé de plus près à la section 4.1.3.

Quant à date du 05/08/2022, une baisse de la température sur le train 2 survient pour des raisons inexpliquées, mais garde en parallèle des valeurs normales sur le train 1.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique : 22/08/2022

Lavage chimique 2 : 26/08/2022

a) Train1 : Sans prétraitement (eau brute)

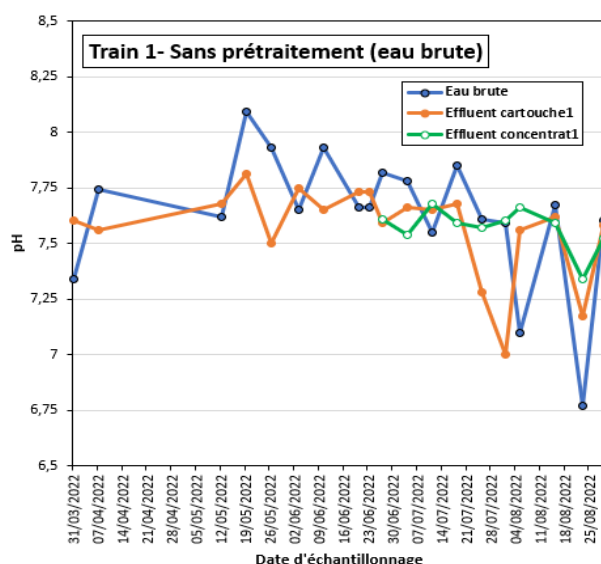
b) Train 2 : Prétraitement Mang'Azur

Figure 4.1 Variation saisonnière de la température pour chaque point d'échantillonnage

## 4.1.2 Variation temporelle du pH

La figure 4.2 illustre la variation du pH pour chaque point d'échantillonnage sur les deux trains au cours de la période expérimentale. Les valeurs de pH sur le train 1 (Fig.4.2a) varient entre 6,77 à 8,09 sur l'eau brute (moyenne = 7,63). Ces valeurs de pH baissent cependant en moyenne après le passage de l'eau à travers la cartouche filtrante et varient alors entre 7,00 et 7,81 (moyenne = 7,56). De même, le pH sur le train 2 (Fig.4.2b) varie 7,1 à 7,8 à l'affluent du réservoir (moyenne = 7,58).

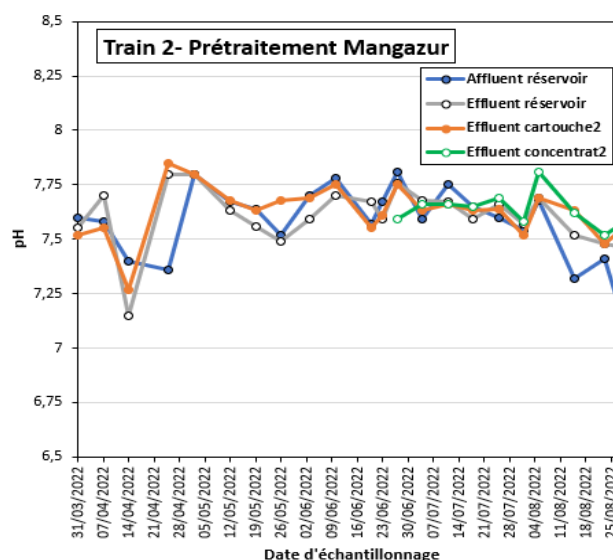
Globalement, on note un pH plus stable sur le train alimenté avec l'eau du Mang'Azur, probablement parce que ce procédé inclut une étape d'aération qui permet de dégazer en partie du gaz carbonique à l'origine des variations de pH. Par ailleurs, on observe une légère tendance à la baisse du pH des eaux brutes vers la fin de l'été, ce qui est probablement le reflet d'une activité microbiologique accrue dans le massif filtrant. En effet, l'activité microbiologique de dégradation du carbone libère du  $\text{CO}_2$  qui abaisse le pH des eaux. Martínez-Huitl et Brillas (2015), ont justement démontré dans leur étude que l'activité microbiologique dans l'eau peut avoir un impact significatif sur la variation du pH. En effet, les micro-organismes sont capables de dégrader la matière organique dans l'eau en utilisant l'oxygène dissous dans l'eau, et cette dégradation peut produire du  $\text{CO}_2$  qui peut abaisser le pH de l'eau. Le  $\text{CO}_2$  dissous réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) qui se dissocie en ions hydrogène ( $\text{H}^+$ ) et ions bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ). La production d'ions  $\text{H}^+$  peut abaisser le pH de l'eau et la rendre plus acide. Pour conclure, plus la quantité de matière organique présente dans l'eau est importante, plus la production de  $\text{CO}_2$  et la baisse de pH peuvent être significatives.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique 2 : 26/08/2022

a) Train1 : Sans prétraitement (eau brute)



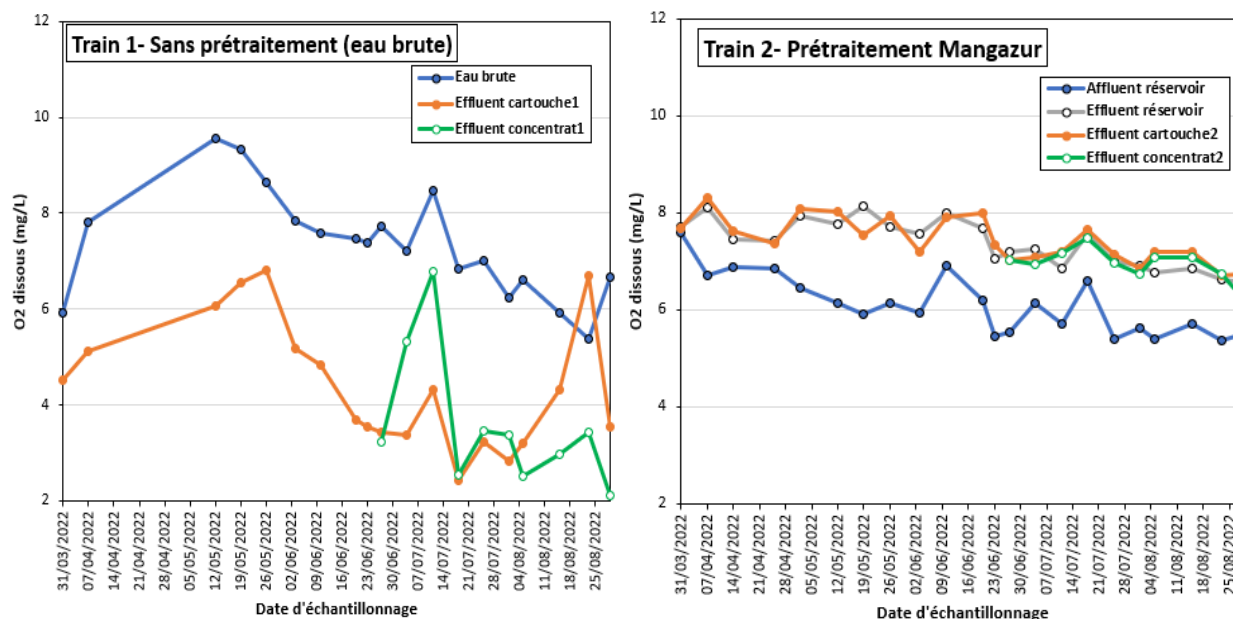
Lavage chimique : 22/08/2022

b) Train 2 : Prétraitement Mang'Azur

Figure 4.2 Variation saisonnière du pH pour chaque point d'échantillonnage

### 4.1.3 Variation temporelle de l'oxygène dissous

La figure 4.3 illustre la variation de l'oxygène dissous pour chaque point d'échantillonnage sur les deux trains au cours de la période expérimentale.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique : 22/08/2022

Lavage chimique 2 : 26/08/2022

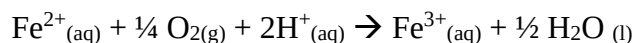
a) Train1 : Sans prétraitement (eau brute)

b) Train 2 : Prétraitement Mang'Azur

Figure 4.3 Variation saisonnière d'oxygène dissous pour chaque point d'échantillonnage

**Pour ce qui est du train 1 (Fig.4.3a),** l'oxygène dissous est considérablement réduit de 3 mg O<sub>2</sub>/L après passage de l'eau à travers la cartouche filtrante, mais heureusement encore présent en concentration suffisante pour éviter le relargage de fer dissous en concentrations problématiques. peut être expliqué par deux phénomènes : (i) la présence d'une grande activité biologique dans le filtre, probablement en raison de la rétention de matière organique particulaire (probablement des algues microscopiques retenues dans la cartouche). La présence de ces particules cause l'obstruction des espaceurs ce qui accélère la vitesse du colmatage chimique de la cartouche.

(ii) la re-dissolution du fer oxydé en ions Fe<sup>2+</sup>. Les ions ferreux peuvent ensuite être ré-oxydé en ions Fe<sup>3+</sup> par réaction avec l'oxygène dissous dans l'eau. Le fer dissous est en effet facilement oxydable par l'oxygène, contrairement au manganèse, en suivant la réaction suivante :



Cette réaction peut se produire spontanément en présence d'oxygène dissous dans l'eau et d'ions hydrogène  $\text{H}^{+}$  (Reardon et Wang, 2003).

L'augmentation de la température pendant l'été a aussi joué un rôle important dans la solubilité de l'oxygène, ce qui a induit une diminution de sa concentration.

Quant à l'effluent du concentrat, il y a un relargage d' $\text{O}_2$  en début de la mise en fonctionnement de la membrane NF (origine non identifiée), et ce jusqu'au 18/07/2022 où une consommation significative d' $\text{O}_2$  est alors observée. En plus d'autres facteurs, cette chute d' $\text{O}_2$  dissous à l'effluent de la membrane de NF signale la présence d'une activité biologique (bactéries) dans le module, ce qui justifie le premier lavage chimique de la membrane réalisé le 25/07/2022. Malgré un nettoyage chimique, il a été impossible d'éliminer le colmatage ainsi constitué ce qui a empêché le rétablissement de la consommation d' $\text{O}_2$  à son taux initial.

**Pour ce qui est du train 2 à la figure 4.3b**, l'effet du Mang'Azur est nettement visible puisqu'on n'observe aucune consommation significative d'oxygène dans les préfiltres 5  $\mu\text{m}$ . Ceci suggère que le Mang'Azur enlève bien la matière organique particulaire et le fer soluble. En effet, les bactéries aérobies présentent dans le processus de Mang'Azur vont se fixer sur le média filtrant et forment un biofilm, qui servira de support pour la croissance de celles-ci et leur activité métabolique. La filtration lente de l'eau à travers le filtre permet alors aux bactéries de décomposer la matière organique particulaire présente dans l'eau et réduire le fer dissous (Wang, MHS & Wang, LK, 2022)

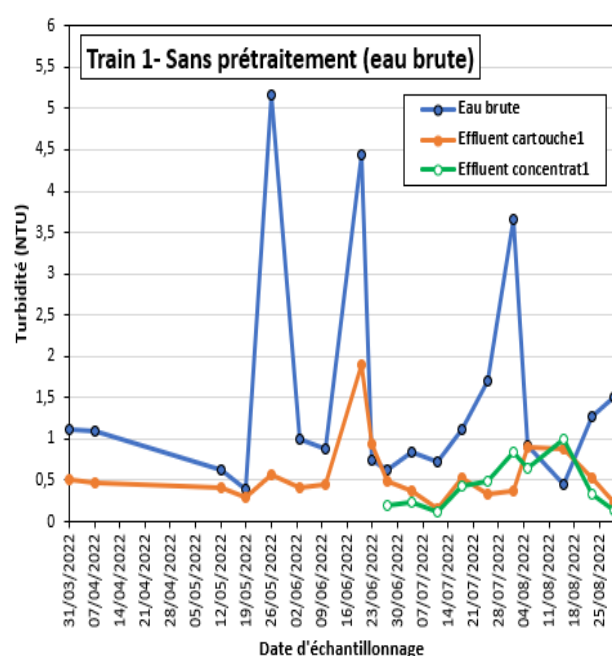
Dans le cas de la membrane de NF, il n'a pas été observé de consommation significative d'oxygène à l'intérieur du module, contrairement au module traitant de l'eau brute. Cette observation est indicatrice d'une plus faible activité biologique dans la membrane de NF prétraitée avec un Mang'Azur, un effet souhaitable pour minimiser le colmatage.

#### 4.1.4 Variation temporelle de l'alcalinité et la dureté totale

Les valeurs d'alcalinité sont presque similaires sur les deux trains du pilote avec une moyenne de 150 mg/L  $\text{CaCO}_3$ . De même, les variations de la dureté sont minimales sur les deux trains avec une moyenne de 200 mg/L  $\text{CaCO}_3$ . Les figures sont présentées en détails à l'annexe C.

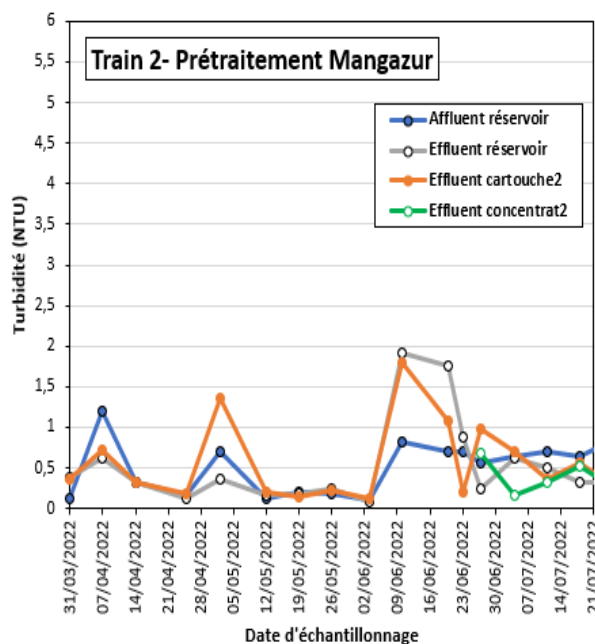
### 4.1.5 Variation temporelle de la turbidité

La figure 4.4a présente des variations importantes des turbidités dans l'eau brute qui dépasse parfois les 5 UTN. Comme les mesures de turbidité n'ont pas été faites directement sur site et qu'on retrouve du fer dans les eaux brutes, on peut anticiper que les mesures de turbidité en laboratoire sont peut-être surestimées par rapport à des mesures sur site. Il est également possible que ces pointes ponctuelles de turbidité soient dues aux variations de qualité provenant des différents puits. En effet, certains des puits de la Ville démontre des concentrations très différentes en ce qui a trait au fer.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique 2 : 26/08/2022



Lavage chimique : 22/08/2022

a) Train1 : Sans prétraitement (eau brute)

b) Train 2 : Prétraitement Mang'Azur

Figure 4.4 Variation saisonnière de la turbidité pour chaque point d'échantillonnage

La turbidité a baissé considérablement avec la présence de la cartouche filtrante pour atteindre une moyenne de 1 UTN. L'effet du préfiltre est donc important quant à la diminution de la turbidité de l'eau brute.

Le train de l'eau prétraitée par Mang'Azur à la figure 4.4b présente des variations de turbidité beaucoup moins importantes et se situent plutôt dans une fourchette de 0,1 à 1,5 UTN selon la

période d'échantillonnage. On remarque que l'échantillon du 10/06/2022 présente une turbidité élevée à l'effluent du réservoir comparé à l'affluent, mais cette turbidité a repris sa valeur habituelle après le nettoyage du réservoir de transfert effectué le 21/06/2022.

Aux dates du 02/05/2022 et 10/06/2022, l'effluent de la cartouche 2 présente une turbidité supérieure à celle de son affluent (Effluent du réservoir de transfert). Ceci est dû au colmatage du préfiltre ( $\Delta P = 17$  psi).

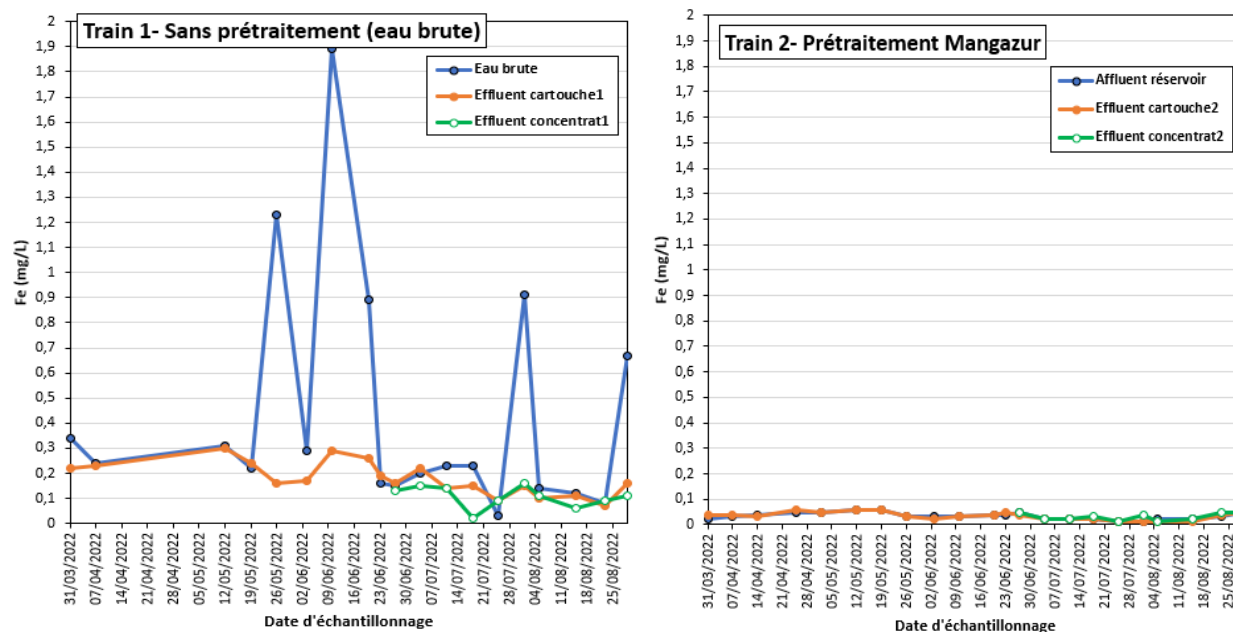
#### **4.1.6 Variation temporelle du fer et du manganèse**

Les figures 4.5 et 4.6 présentent les variations de qualité observées entre les différents points d'échantillonnage des deux trains en ce qui concerne le fer total et le manganèse total. On remarque d'abord que le fer est présent en plus grande concentration ( $\text{max} = 1,9 \text{ mg/L}$ ) dans l'eau brute que le manganèse ( $\text{max} = 0,4 \text{ mg/L}$ ) (Fig.4.5a vs 4.6a). Il y a également de la variabilité au niveau du fer laquelle est attribuée aux différences de qualité entre les huit puits de la ville qui ne présentent pas tous la même concentration de fer. Les pointes de turbidité sont cohérentes avec des pointes des concentrations de fer.

Les concentrations de fer de l'eau brute sont réduites par le passage de l'eau à travers la cartouche filtrante de 5 microns alors qu'on observe une baisse à moins de  $0,2 \text{ mg Fe/L}$  (Fig.4.5a). Les pics de concentration de fer sont donc causés par du fer particulaire qui est facilement retenu dans la cartouche de  $5 \mu\text{m}$ , mais au prix d'un colmatage biochimique rapide des cartouches. Les bactéries présentes dans la cartouche filtrante vont consommer l'oxygène qu'elles utilisent comme accepteur d'électrons, et tirent leur énergie en oxydant le fer réduit ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en fer ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ), conduisant à la formation d'hydroxydes de fer  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , formant ainsi un biofilm autour du filtre.

Les concentrations de fer mesurées corroborent les observations visuelles de l'état de la cartouche de l'eau brute au moment du changement. Quant au train 2 alimenté par le Mang'Azur, la teneur en fer est faible ( $\text{max} = 0,06 \text{ mg/L}$ ), ce qui démontre une bonne efficacité du Mang'Azur pour l'élimination du fer total dans l'eau, grâce à l'étape d'aération qui permet d'introduire de l'oxygène dans l'eau, et servir à oxyder le fer. Le fer ferrique  $\text{Fe}(\text{III})$  est essentiellement du fer ferreux qui a été oxydé par l'oxygène. Lorsque le  $\text{CO}_2$  est dégazé dans l'eau par les bactéries aérobies, l'oxygène se combine avec le fer pour former des ions ferriques ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Ces particules oxydées sont des solides en suspension insolubles, entraînant la formation de colloïdes qui seront en grande partie retenus

par le filtre (Wang, MHS & Wang, LK, 2022). La cartouche de 5 microns n'est donc pas très sollicitée pour éliminer du fer ce qui permet, comme nous le verrons plus loin une réduction du colmatage.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique : 22/08/2022

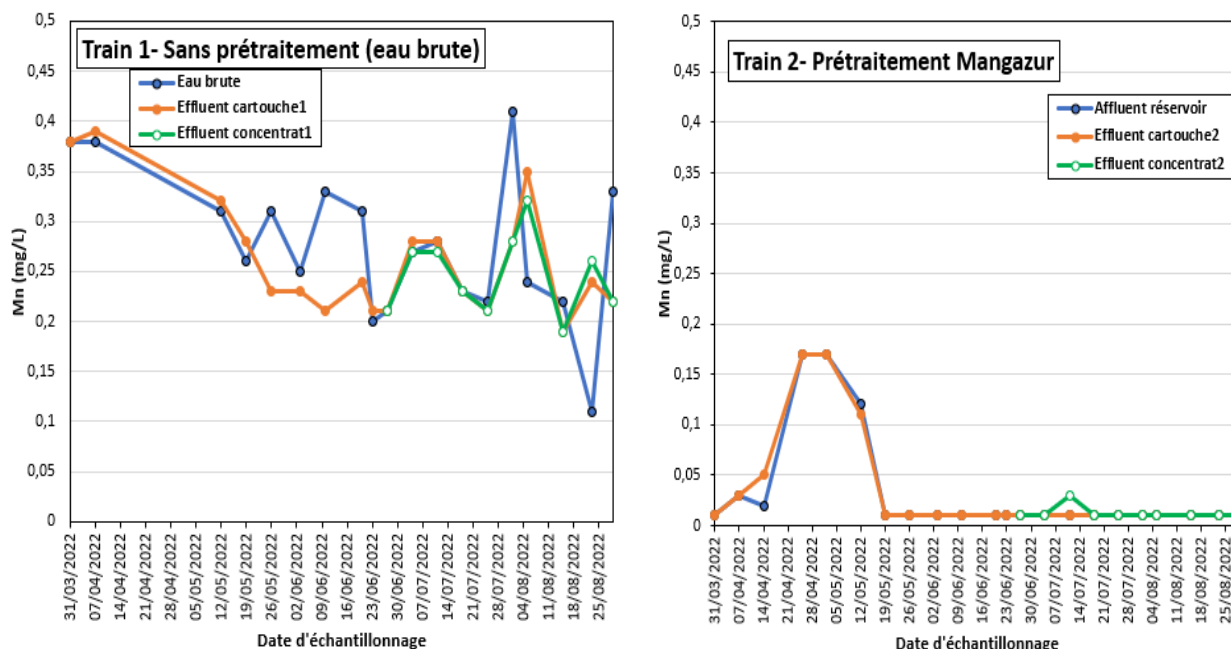
Lavage chimique 2 : 26/08/2022

a) Train1: Sans prétraitement (eau brute)

b) Train 2: Prétraitement Mang'Azur

Figure 4.5 Variation saisonnière du fer total pour les deux trains du pilote

En ce qui concerne le manganèse, les concentrations à l'eau brute ont progressivement décliné de 0,4 mg/L en avril vers 0,2-0,3 mg/L vers la fin du mois d'août (Fig.4.6a), en lien avec la hausse de la température de l'eau.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique : 22/08/2022

Lavage chimique 2 : 26/08/2022

a) Train1 -Mn: Sans prétraitement (eau brute)    b) Train 2 -Mn : Prétraitement Mang'Azur

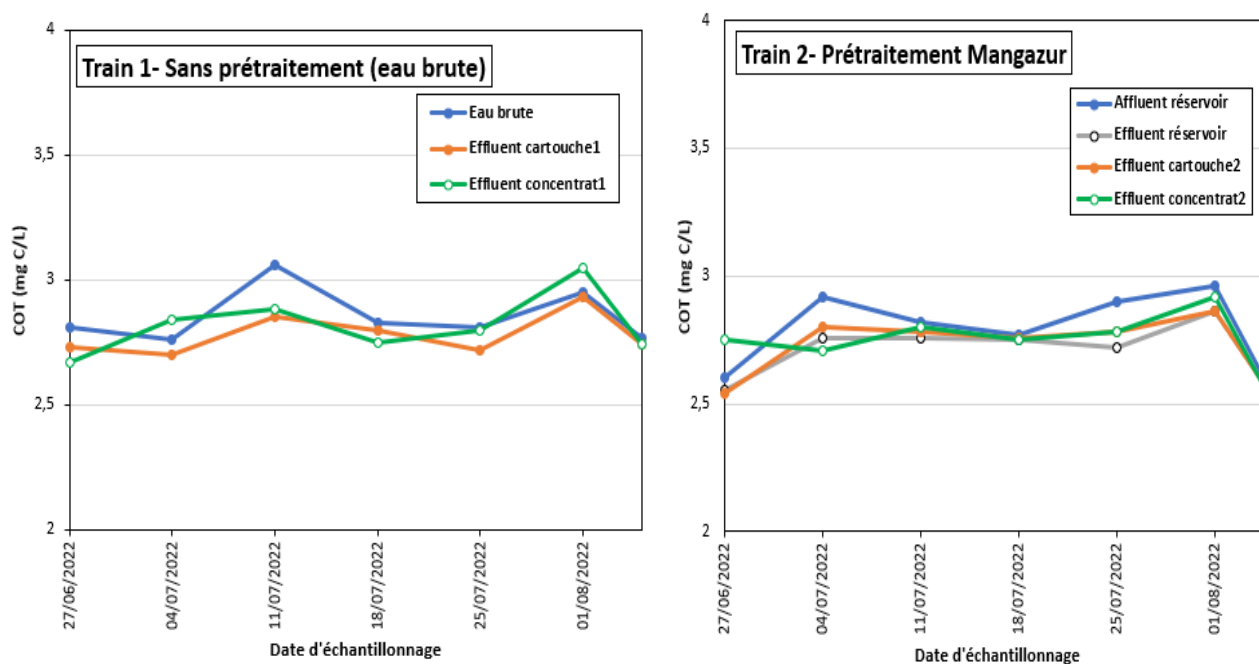
Figure 4.6 Variation saisonnière du manganèse total pour les deux trains du pilote

Le colmatage de la cartouche n'est donc pas causé par le manganèse. Dans le cas du train 2 alimenté par le Mang'Azur (Fig.4.6b), la concentration de Mn était généralement sous la limite de détection, sauf en avril et mai 2022. Les plus grandes concentrations de manganèse enregistrées sont celles du mois d'avril, avec un maximum de 170  $\mu\text{g/L}$ . A partir du mois de mai, le taux de manganèse chute considérablement sur tous les points d'échantillonnage pour enregistrer une concentration de 10  $\mu\text{g/L}$ . Cette baisse survient après un entretien annuel des trois Mang'Azurs de l'usine effectué le 09/05/2022 et le 11/05/2022. Ceci démontre l'effet important d'un prétraitement par Mang'Azur sur la réduction du taux de manganèse dans l'eau.

#### 4.1.7 Variation temporelle du COT et du COD

Le carbone organique est le substrat qui permet aux bactéries hétérotrophes de survivre. Selon la température de l'eau, elles consomment plus ou moins activement le carbone organique en utilisant l'oxygène présent dans les eaux de recharge et en produisant en retour du gaz carbonique qui acidifie l'eau. La perte d'oxygène dissous produit alors des conditions réductrices et plus acides,

favorables à la dissolution du manganèse. Le carbone organique à l'origine de ce phénomène se présente sous deux formes dans les eaux, soit une forme dite totale (COT) et une fraction de celle-ci dite dissoute (COD) (Barbeau, 2014). Les concentrations en COT enregistrées en eau brute (Fig.4.7a) varient en moyenne de 2,76 à 3,06 mg C/L (moyenne = 2,85 mg C/L). À la suite du passage de l'eau à travers la cartouche filtrante de 5 microns, les concentrations ont été abaissées légèrement à des valeurs de 2,70 à 2,93 mg C/L (moyenne = 2,78 mg C/L). Les concentrations en COT enregistrées en eau prétraitée par le Mang'Azur (Fig.4.7b) varient en moyenne de 2,55 à 2,96 mg C/L à l'entrée du réservoir (moyenne = 2,78 mg C/L). Ces concentrations baissent cependant à l'effluent du réservoir et varient de 2,48 à 2,80 mg C/L, ce qui est cohérent avec les faibles accumulations de sédiment observés dans le réservoir de transfert. La différence entre le COT de l'eau brute et de l'eau filtrée par le Mang'Azur est d'en moyenne 0,3 mg C/L pour les cycles de filtration présentés.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique : 22/08/2022

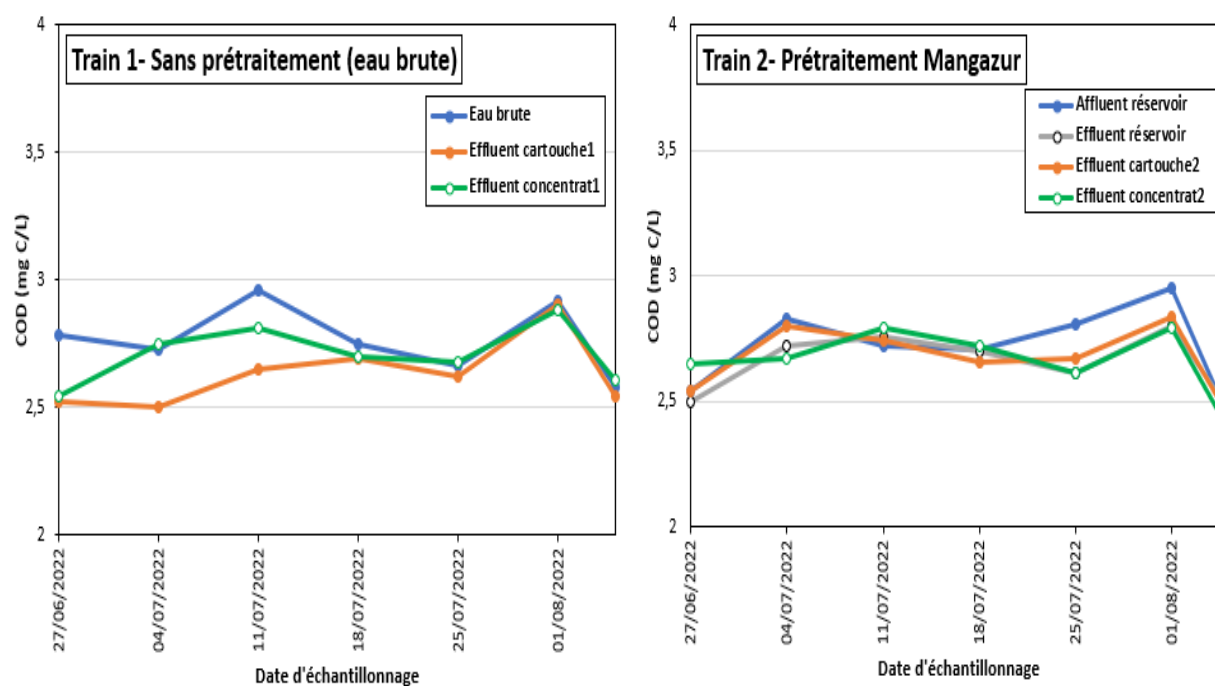
Lavage chimique 2 : 26/08/2022

a) Train1 : Sans prétraitement (eau brute)

b) Train 2 : Prétraitement Mang'Azur

Figure 4.7 Variation saisonnière du COT pour chaque point d'échantillonnage

Le COD représente la matière organique restante après filtration de l'échantillon sur des membranes de 0,45  $\mu\text{m}$ . Il représente environ 90% du COT, ce qui indique que la MON est essentiellement présente sous forme dissoute et sous forme colloïdale. En effet, les concentrations en COD enregistrées en eau brute (Fig.4.8a) varient en moyenne de 2,5 à 3,0 mg C/L. Cette variation est la même pour l'eau prétraitée par Mang'Azur (Fig.4.8b). La réduction du COD, aussi bien pour le train 1 que pour le train 2 après passage de l'eau à travers la Mang'Azur, a causé une baisse de l' $\text{O}_2$  dissous. Mais, la consommation d'oxygène est plus importante et plus distinguée sur le train de l'eau brute. Il est à noter que le fer possède également de bonnes capacités d'adsorption du COD. Cependant, l'adsorption de COD par du fer oxydé ne mène pas directement à une consommation d'oxygène. Les variations de COD sont donc probablement plutôt d'origine biotique, et ceci corrobore avec l'odeur septique des cartouches épuisées. Nous notons cependant que les abattements de COT mesurés dans la cartouche alimentée par l'eau brute sont faibles (moyenne = 2,78 mg C/L) par rapport aux consommations d'oxygène (moyenne = 4,4 mg/L) ce qui suggère que la réduction de l'oxygène n'est pas seulement causée par de la biodégradation.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique : 22/08/2022

Lavage chimique 2 : 26/08/2022

a) Train1 : Sans prétraitement (eau brute)

b) Train 2 : Prétraitement Mang'Azur

Figure 4.8 Variation saisonnière du COD pour chaque point d'échantillonnage

Un récapitulatif des principaux résultats d'accumulation d'entrée et sortie de Mn, Fe, COP, COD, O<sub>2</sub> dissous et pH dans les deux cartouches et les deux NF sont présentés dans un tableau à l'Annexe D.

## **4.2 Impact d'un prétraitement Mang'Azur sur le colmatage des cartouches**

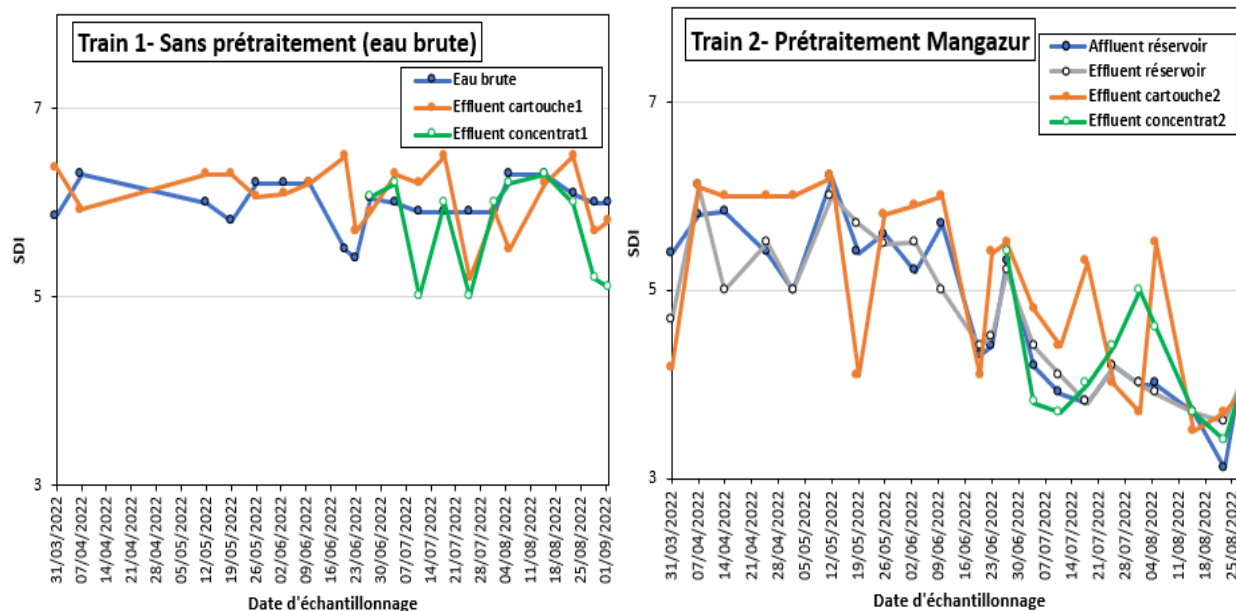
Cette section s'intéressera dans un premier temps à l'impact des prétraitements sur la réduction du SDI, un indice de colmatage. Par la suite, nous étudierons l'impact de prétraitement au Mang'Azur et du débit d'opération sur les vitesses de colmatages.

### **4.2.1 Impact du prétraitement sur les indices de colmatage (Silt Density Index)**

La figure 4.9 présente le pouvoir colmatant des particules en suspension d'une eau qui s'exprime en termes de « Silt Density Index » (SDI), sur chaque point d'échantillonnage sur les deux trains pendant la période expérimentale. Tous ces résultats sont obtenus à température ambiante (22°C).

Dans un premier temps, on notera que le colmatage sur le train de l'eau brute (Fig.4.9a) est beaucoup plus important que celui de l'eau prétraîtée avec le Mang'Azur. En effet, le train 1 présente des valeurs de SDI > 5 sur tous les points d'échantillonnage bien que la cartouche filtrante de 5 microns fût remplacée 2 fois par semaine. Rappelons qu'un SDI de moins de 5 est recommandé par *Filmtec* pour l'application de la NF90.

Les indices de colmatage furent les plus faibles sur le train 2 mais également beaucoup plus variables (Fig.4.9b). Les valeurs de SDI ont diminué à la sortie du Mang'Azur durant l'été. Cependant, la cause de cette baisse n'a pas pu être identifiée et n'est pas liée à la hausse des températures car les essais de SDI ont tous été faits avec de l'eau stabilisés à la température du laboratoire (20-22°C). Par ailleurs, il a été noté que le SDI dépendait du degré de colmatage du préfiltre. On a remarqué que même si on peut laisser les cartouches pendant près de 40 jours sur le train alimenté avec l'eau filtrée du Mang'Azur, la qualité de l'eau filtrée produite par la cartouche 5 µm se dégrade avant que la consigne de pression maximale (30 psi) ne soit atteinte. Le SDI semble donc bon quand la cartouche est neuve mais se dégrade au bout de deux semaines si la cartouche n'est pas changée.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique : 22/08/2022

Lavage chimique 2 : 26/08/2022

a) Train1 : Sans prétraitement (eau brute)

b) Train 2 : Prétraitement Mang'Azur

Figure 4.9 Variation saisonnière du SDI pour chaque point d'échantillonnage mesuré à 22°C

La figure 4.10 ci-dessous montre l'état des filtres 0,45  $\mu\text{m}$  après les tests SDI à chaque point d'échantillonnage du train 1.

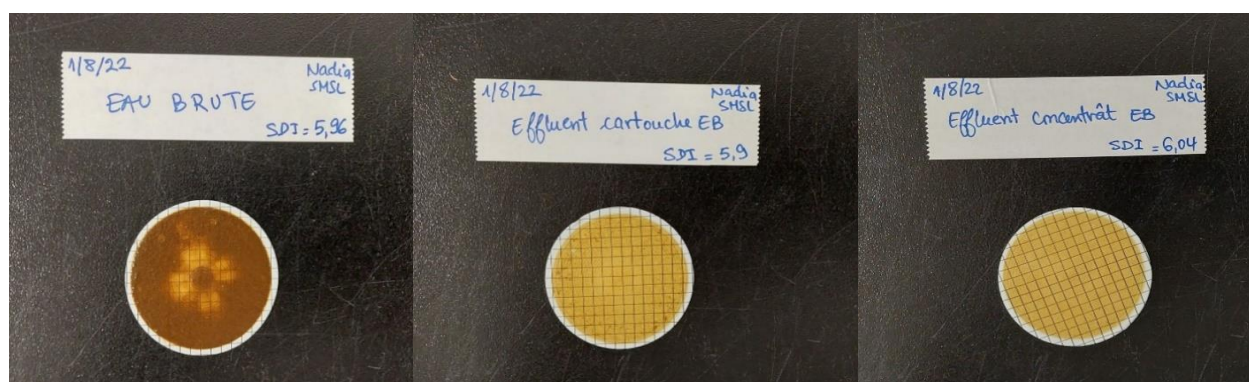


Figure 4.10 État de la membrane de SDI pour chaque point d'échantillonnage du train 1 (eau brute)

La couleur brune à l'eau brute et la matière gluante à la surface de la membrane de filtration reflète la présence probable de fer (couleur orangé) et de la matière organique (caractéristique gluante). Même après passage de l'eau à travers la cartouche filtrante de 5  $\mu\text{m}$ , la couleur de la membrane

de SDI demeure jaune foncé avec un SDI > 5, ce qui indique que des particules de moins de 5 µm sont encore présentes après la préfiltration.

La figure 4.11 présente la corrélation entre le SDI et la durée d'opération du préfiltre 5 microns du train 1 alimenté à l'eau brute, pour un débit d'opération de 8 L/min (2,4 gpm par 10 po de longueur de cartouche). On remarque que l'indice de colmatage est > 5 (moyenne =5,9) après seulement un jour d'opération de la cartouche, et augmente jusqu'à 6,3 après 4 jours d'opération. Ceci est dû au colmatage rapide et important du préfiltre 5µm. Il est donc important d'effectuer le changement de la cartouche aux 3 jours.

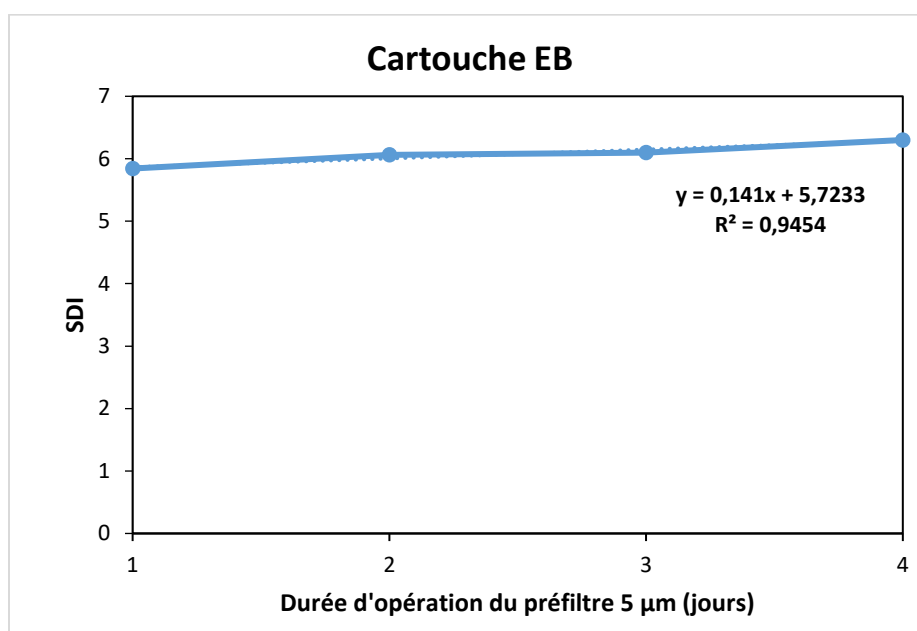


Figure 4.11 Corrélation SDI en fonction du temps d'opération de l'eau à la sortie du préfiltre 5µm du train1 (eau brute)

La figure 4.12 ci-après expose l'état des filtres 0,45µm après un test SDI sur une cartouche neuve et une cartouche colmatée du train alimenté au Mang'Azur. D'après la figure, on peut très bien remarquer la différence entre le degré de colmatage d'une cartouche nouvellement installée (04/07/2022), où la membrane filtrante du test SDI réalisé sur le filtrat de la cartouche est incolore, et l'état de la membrane pour une mesure de SDI après un mois de fonctionnement de la cartouche (05/08/2022) qui présente une couleur jaunâtre. Il y aurait donc lieu d'identifier une durée optimale de remplacement des cartouches qui ne dépend pas seulement de la pression mais également de la qualité des eaux produites par les préfiltres.

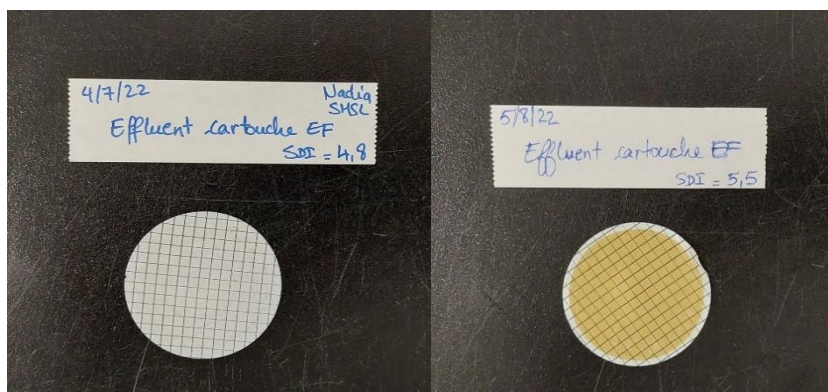


Figure 4.12 Différence entre l'état des filtres 0,45µm après un test SDI sur une cartouche neuve et une cartouche colmatée du train 2 (eau prétraitée au Mang'Azur)

La figure 4.13 présente la corrélation entre le SDI et la durée d'opération du préfiltre 5 microns du train 2 alimenté à l'eau prétraitée par Mang'Azur, pour un débit d'opération de 8 L/min (2,4 gpm par 10 po de longueur de cartouche).

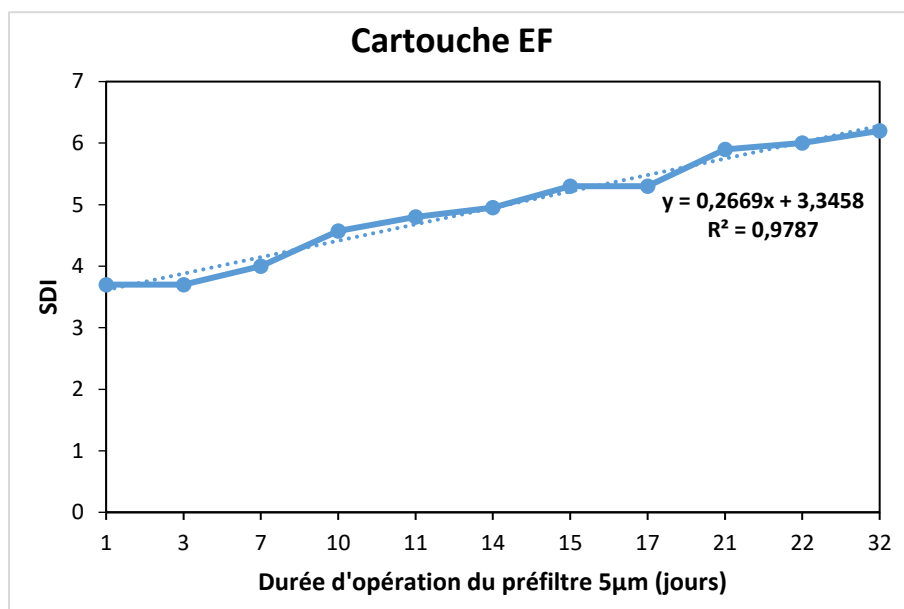


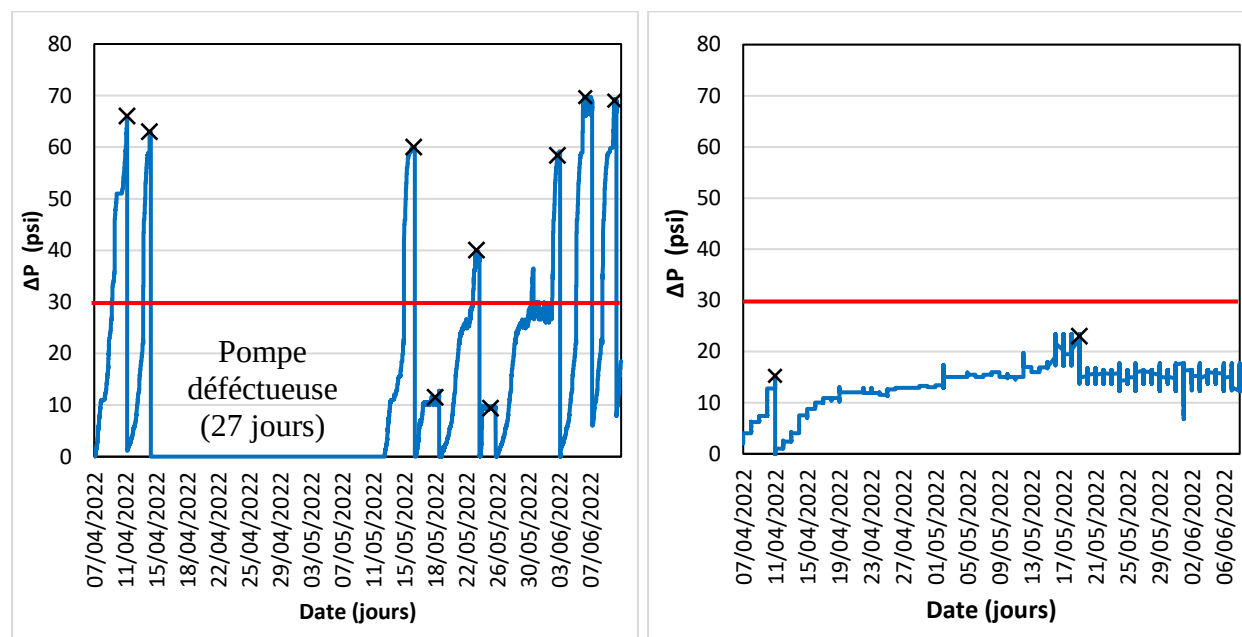
Figure 4.13 Corrélation SDI en fonction du temps d'opération de l'eau à la sortie du préfiltre 5µm du train2 (eau prétraitée au Mang'Azur)

On remarque que plus la durée de fonctionnement de la cartouche augmente dans le temps, plus l'indice de colmatage devient plus important. Il commence à une valeur de SDI = 3,7 après un jour d'opération pour atteindre SDI = 6 au bout de 32 jours d'opération. Ceci indique le colmatage graduel du préfiltre 5µm. Alors, même si la durée de vie de la cartouche du train 2 alimentée par

l'eau prétraitée par Mang'Azur peut aller jusqu'à 32 jours, il est préférable de la remplacer après 14 jours de fonctionnement, pour garder un SDI de moins de 5.

#### 4.2.2 Impact du prétraitement sur la fréquence de remplacement des cartouches 5 microns

Les tests effectués sur les préfiltres durant la première phase des essais pilotes, ont permis d'évaluer l'impact du prétraitement de filtration Mang'Azur sur l'opération des cartouches de préfiltration 5 microns pour un débit unitaire d'opération de 8 L/min (2,4 gpm par 10 po de longueur de cartouche). Il a été observé qu'un prétraitement sur Mang'Azur a un impact majeur sur les pertes de charges et, par conséquent, la fréquence de remplacement des cartouches de préfiltration. Les résultats des pressions enregistrées en fonction du temps sont illustrés à la figure 4.14 ci-dessous.



comportement des cartouches des deux trains. En effet, la fréquence de remplacement des cartouches du train 1 alimenté en eau brute était de seulement 42h pour atteindre 30psi (N=9 cycles avec min/max=10-72h). Pour ce qui est du train 2 alimenté avec de l'eau prétraitée par les filtres Mang'Azur, les cartouches n'atteignent jamais la valeur cible de 30psi. La durée du cycle pour une cartouche était donc de plus d'un mois (max 38 jours) avec 22,6psi comme perte de charge finale lors des remplacements que nous avons effectués. Les figures détaillées avec le nombre de cycles pour chaque train sont disponibles à l'Annexe E.

L'état des cartouches filtrantes des deux trains, après changement, sont présentés à la figure 4.15 ci-après. Visuellement, il était possible de constater moins d'accumulation sur le préfiltre 2, une observation qui sera validée quantitativement à la section 4.6.



a) Cartouche eau brute



b) Cartouche eau préfiltrée par Mang'Azur

Figure 4.15 États des cartouches après changement

Rappelons que la pression de changement des cartouches devrait être de 30 psi. Cependant, les remplacements avaient lieu lors des visites au pilote. Comme des accumulations de plus 30 psi ont été obtenues, une durée de cycle a été calculée pour  $P = 30\text{psi}$ .

Une récapitulation des durées des cycles des cartouches des deux trains est présentée au tableau 4.1.

Tableau 4.1 Durées de cycle des cartouches filtrantes pour un débit unitaire d'opération de 2,4 gpm par 10 po de longueur de cartouche

| N° train                                              | Nombre de cycle | Durée totale de cycle (jours) | Durée pour atteindre P = 30psi | Période de cycle         | Pression au changement (psi) |
|-------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| <b>Train 1 :<br/>eau brute</b>                        | Cycle 1         | 4                             | 52 heures                      | 07/04/2022 au 11/04/2022 | 67                           |
|                                                       | Cycle 2         | 3                             | 48 heures                      | 11/04/2022 au 14/04/2022 | 64,5                         |
|                                                       | Cycle 3         | 4                             | 62 heures                      | 12/05/2022 au 16/05/2022 | 60                           |
|                                                       | Cycle 4         | 3                             | –                              | 16/05/2022 au 19/05/2022 | 13                           |
|                                                       | Cycle 5         | 5                             | 99 heures                      | 19/05/2022 au 24/05/2022 | 40                           |
|                                                       | Cycle 6         | 2                             | –                              | 24/05/2022 au 26/05/2022 | 10                           |
|                                                       | Cycle 7         | 7                             | 120 heures                     | 26/05/2022 au 03/06/2022 | 60                           |
|                                                       | Cycle 8         | 4                             | 24 heures                      | 03/06/2022 au 07/06/2022 | 70                           |
|                                                       | Cycle 9         | 3                             | 30 heures                      | 07/06/2022 au 10/06/2022 | 70                           |
| <b>Train 2 :<br/>eau prétraitée<br/>par Mang'Azur</b> | Cycle 1         | 11                            | –                              | 31/03/2022 au 11/04/2022 | 14                           |
|                                                       | Cycle 2         | 38                            | –                              | 11/04/2022 au 19/05/2022 | 22,6                         |
|                                                       | Cycle 3         | 32                            | –                              | 19/05/2022 au 20/06/2022 | 19                           |

### 4.3 Impact d'un prétraitement Mang'Azur sur le colmatage des membranes de nanofiltration

Similairement au cas des cartouches de préfiltration, le prétraitement par Mang'Azur a joué un rôle important sur la réduction du colmatage des membranes de nanofiltration. Cette conclusion a été tirée en monitorant la fréquence des lavages chimiques effectués sur chaque membrane. La durée

de fonctionnement des membranes NF du pilote a été de deux mois, du 27/06/2022 au 29/08/2022. Pendant cette période, un premier lavage chimique a été réalisé sur la membrane du train 1 alimenté à l'eau brute après un mois de fonctionnement, soit à la fin du mois de juillet. Pour ce qui est de la membrane du train 2 alimenté de l'eau prétraitée par les filtres Mang'Azur, aucun lavage n'a été requis pour cette même période. Le premier lavage chimique sur la membrane du train 2 a donc été réalisé après deux mois de fonctionnement, soit à la fin du mois d'août, alors qu'un deuxième lavage de la membrane 1 était requis au même moment.

La figure 4.16 présente la variation des pertes de charges linéaires sur les deux membranes du pilote en fonction du temps. La membrane du train 1 (eau brute) montre des valeurs de pressions linéaires importantes (12 psi à 15 psi) et ce dès le démarrage du module de NF. Une perte de charge linéaire de 15psi pour une série de 4-8 membranes est plus habituelle. Cependant, on s'attend sur un caisson à plein échelle que le premier module soit celui le plus impacté par le colmatage linéaire. Bien que les valeurs de pression chutes après le lavage chimique de la membrane, elles ré-augmentent brusquement et rapidement pour reprendre les valeurs de départ, ce qui indique le colmatage important et rapide de la membrane alimentée à l'eau brute. Ce comportement est probablement dû aux particules de moins de 5 microns qui sont abondantes à la sortie du prétraitement par cartouches, tel qu'observé sur les filtres de SDI (cf Fig.4.9a). Malgré les lavages chimiques, un colmatage irréversible se manifeste de façon progressive sur la membrane.

La différence entre la valeur de perte de charge entre le début de la mise en opération de la membrane 1 du train de l'eau brute (12 psi) et les valeurs retrouvées après les deux lavages chimiques de la membrane (2 psi et 3 psi) est dû au fait que la mesure initiale a été faite après 2 heures d'opération de la membrane.

En comparaison avec le train 2 alimenté par l'eau prétraitée par le Mang'Azur et la cartouche, la perte de charge initiale est beaucoup plus faible, soit environ 3 psi (Fig.4.16). Il y a augmentation progressive de la pression à travers la membrane qui commence à 2 psi au début de la mise en marche de la NF, soit le 27/06/2022 pour atteindre 14psi après deux mois de fonctionnement, soit le 22/08/2022. Mais la perte de charge baisse considérablement après le lavage chimique et revient à 1 psi. Le tableau à l'Annexe B expose les débits traités si on avait opéré à 85% et 75% de recouvrement sur la NF.

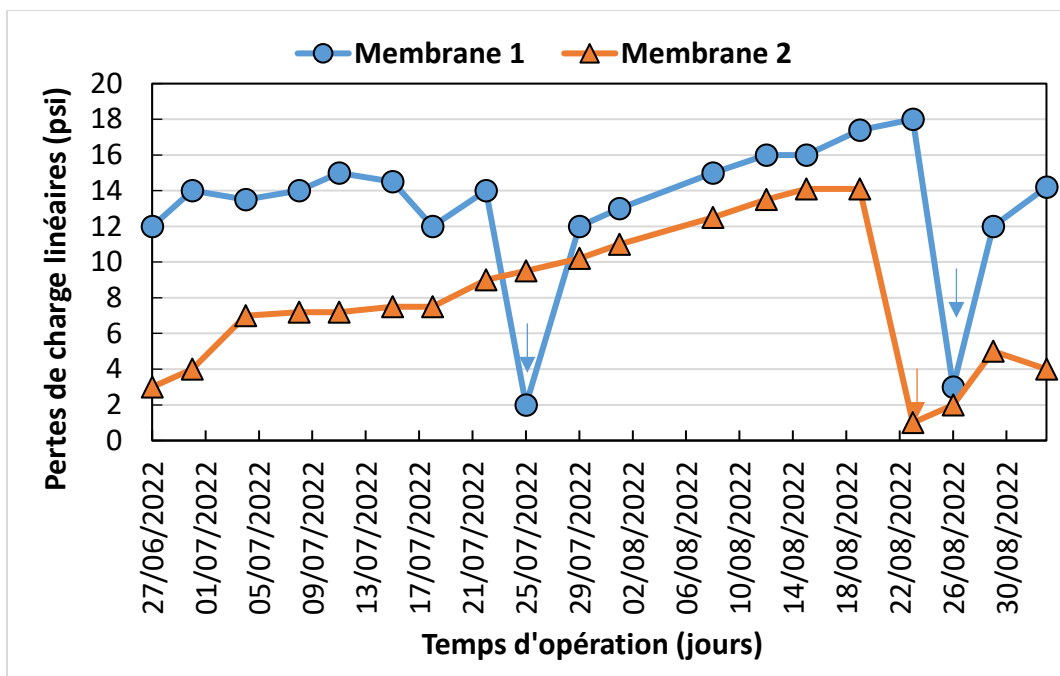


Figure 4.16 Pertes de charges linéaires sur les deux membranes du pilote

Membrane 1 : Alimentée par eau brute + cartouche / Membrane 2 : Alimentée par Mang'Azur + cartouche

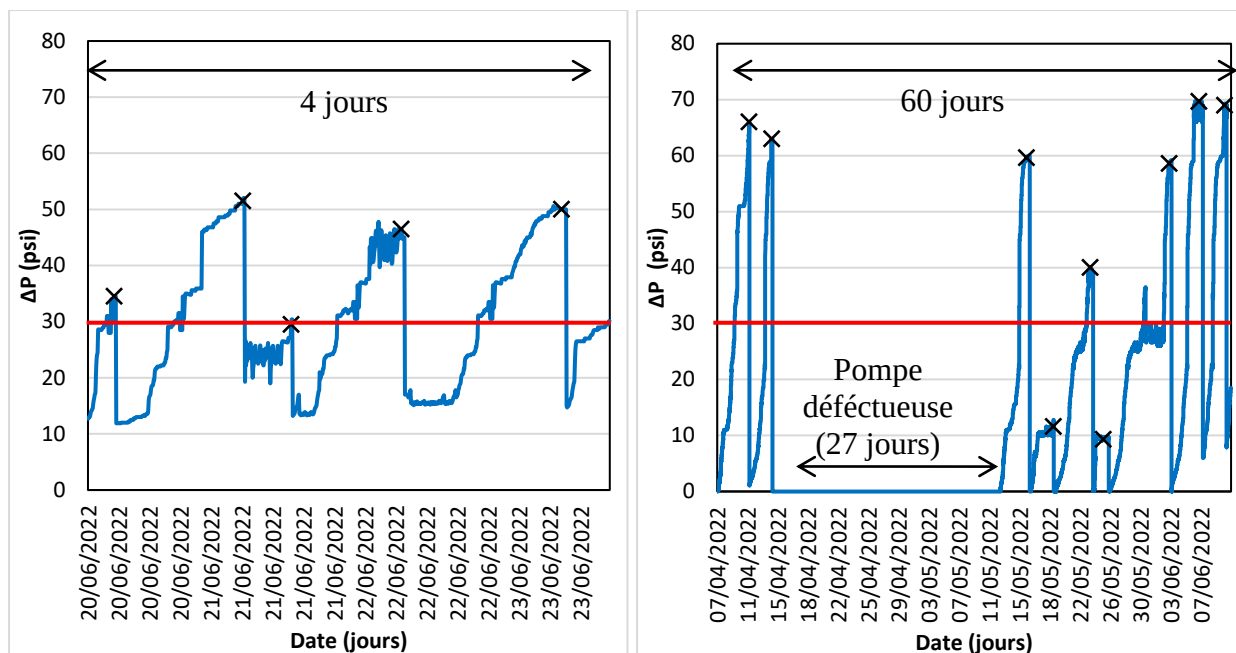
Tableau 4.2 Dates et nombres de lavage effectués sur les membranes du pilote

|                                                             | Membrane 1 (eau brute) |              | Membrane 2 (eau prétraitée par Mang'Azur) |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|-------------------------------------------|
| <b>Date de mise en marche de la membrane NF</b>             | 27/06/2022             |              | 27/06/2022                                |
| <b>Nombre de lavage effectué</b>                            | 2                      |              | 1                                         |
| <b>Date du lavage chimique</b>                              | 25/07/2022             | 26/08/2022   | 22/08/2022                                |
| <b>Perte de charge linéaire avant/après lavage chimique</b> | 14psi / 2psi           | 18psi / 3psi | 14,1psi / 1psi                            |

#### **4.4 Impact du flux d'opération sur le colmatage des cartouches**

D'après les tests effectués sur le montage pilote durant la première phase des essais, il a été démontré qu'en plus de l'impact du prétraitement par Mang'Azur, le flux d'opération joue un rôle très important sur le taux de colmatage et la fréquence de chargement des préfiltres 5 microns. Initialement, la conception des cartouches sur le pilote avait été prévue pour reproduire le débit unitaire de conception sur l'installation à pleine échelle, soit 4,8gpm/10po de longueur de cartouche, équivalent à un débit de 16 L/min. Dès le démarrage du montage, il a été observé un colmatage extrêmement rapide des cartouches alimentées par l'eau brute, lesquelles auraient nécessité des changements en moins de 24 h. Par conséquent, le débit d'alimentation des préfiltres a été réduit de moitié, soit à 8 L/min. Cependant, durant une période de 4 jours, un essai a été dédié à comparer une opération à 8 vs 16 L/min.

La figure 4.17b ci-dessous montre que la fréquence de remplacement de la cartouche du train 1 alimenté en eau brute était de seulement 42 h pour atteindre 30 psi à un débit de 8 L/min. Cependant, l'essai à court terme effectué pendant 4 jours sur le préfiltre en opérant à 100% du débit de conception, soit 16 L/min (Fig.4.17a), montre clairement que le flux d'opération a un large impact sur le taux de colmatage de la cartouche. En effet, sur une journée d'opération (exemple du 20/06/2022), la durée de vie de la cartouche du train 1 alimenté en eau brute était de seulement 3h pour atteindre 30 psi. Ceci indique que l'étape de préfiltration utilisée à pleine échelle est sous-dimensionnée. En parallèle, pour la même période d'essai, la durée de vie des cartouches en usine est estimée à une moyenne de 7 jours, soit un changement de préfiltre une fois par semaine pour un débit unitaire d'opération de 15 gpm par 10 po de longueur de cartouche.



× : changement de la cartouche 5 microns

a) Profil de pression à débit d'opération  
100% (16 L/min)

b) Profil de pression à débit d'opération  
50% (8 L/min)

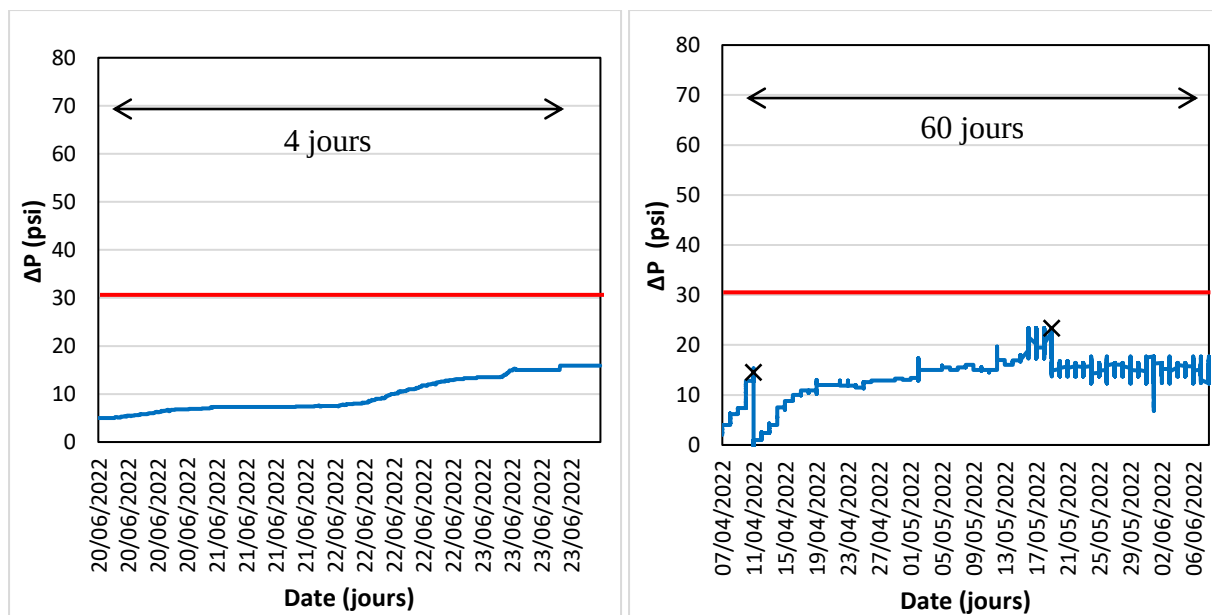
Figure 4.17 Comparaison des profils des pressions en fonction du temps sur la cartouche du train 1 (alimenté à l'eau brute)

Ces résultats dévoilent alors une différence significative entre les pressions atteintes sur la cartouche du train 1 alimenté à l'eau brute en fonction du temps dépendamment du flux d'opération. Une comparaison sur la fréquence de changement des cartouches et la pression atteinte, dépendamment du débit d'opération est résumé dans le tableau 4.3 ci-après.

Tableau 4.3 Durées de cycle de la cartouche du train 1 en fonction du flux d'opération

| Débit d'opération |                |                              |                              |                 |                |                              |                              |
|-------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------------------|------------------------------|
| 100% = 16 LPM     |                |                              |                              | 50% = 8 LPM     |                |                              |                              |
| Nombre de cycle   | Durée de cycle | Durée pour atteindre P=30psi | Pression de changement (psi) | Nombre de cycle | Durée de cycle | Durée pour atteindre P=30psi | Pression de changement (psi) |
| Cycle 1           | 4 heures       | 3 heures                     | 34,5                         | Cycle 1         | 4 jours        | 52 heures                    | 67                           |
| Cycle 2           | 19 heures      | 9 heures                     | 52                           | Cycle 2         | 3 jours        | 48 heures                    | 64.5                         |
| Cycle 3           | 7 heures       | 6 heures                     | 30,4                         | Cycle 3         | 4 jours        | 62 heures                    | 60                           |
| Cycle 4           | 17 heures      | 7 heures                     | 45                           | Cycle 4         | 3 jours        | –                            | 13                           |
| Cycle 5           | 24 heures      | 11 heures                    | 50                           | Cycle 5         | 5 jours        | 99 heures                    | 40                           |
|                   |                |                              |                              | Cycle 6         | 2 jours        | –                            | 10                           |
|                   |                |                              |                              | Cycle 7         | 7 jours        | 120 heures                   | 60                           |
|                   |                |                              |                              | Cycle 8         | 4 jours        | 24 heures                    | 70                           |
|                   |                |                              |                              | Cycle 9         | 3 jours        | 30 heures                    | 70                           |

Un essai de variation du débit d'alimentation a également été mené à court terme sur la cartouche alimentée par le Mang'Azur. La figure 4.18 démontre que la hausse du débit d'opération à 100% (16 L/min) n'a pas mené à des hausses rapides de la pression. Il est à noter que, pour garder les mêmes conditions de travail pour les deux trains du pilote, le débit d'opération a été baissé à 50% (8 L/min) pour le reste des essais.



× : changement de la cartouche 5 microns

a) Profil de pression à débit d'opération  
100% (16 L/min)

b) Profil de pression à débit d'opération  
50% (8 L/min)

Figure 4.18 Comparaison des profils des pressions en fonction du temps sur la cartouche du train 2 (alimenté à l'eau prétraitée)

Une comparaison sur la fréquence de changement des cartouches et la pression atteinte, dépendamment du débit d'opération est résumée dans le tableau 4.4 ci-après.

Tableau 4.4 Durées de cycle de la cartouche du train 2 en fonction du flux d'opération

| Débit d'opération |                |                              |                 |                |                              |
|-------------------|----------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------------------|
| 100% = 16 LPM     |                |                              | 50% = 8LPM      |                |                              |
| Nombre de cycle   | Durée de cycle | Pression au changement (psi) | Nombre de cycle | Durée de cycle | Pression au changement (psi) |
| Cycle 1           | 4 jours        | 15,9                         | Cycle 1         | 11 jours       | 14                           |
|                   |                |                              | Cycle 2         | 38 jours       | 22,6                         |
|                   |                |                              | Cycle 3         | 32 jours       | 19                           |

## 4.5 Comparaison entre les critères d'opération du pilote avec les données de l'usine

### 4.5.1 Taux de colmatage des préfiltres 5 microns

La fréquence de changement des cartouches à l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-Lac est variable et dépend du flux d'opération à chaque mois. L'usine possède 3 boîtiers de filtre à cartouches avec 32 cartouches chacun, d'où un total de 96 cartouches de 40 po de longueur, l'équivalent de 384 cartouches de 10 po de longueur. Si on prend le débit de conception de la NF qui est de 6200 m<sup>3</sup>/d et un taux de récupération de R= 75%, les cartouches doivent traiter 8266 m<sup>3</sup>/d. Cela donne un débit unitaire de 15 L/min pour une cartouche de 10 po.

Le tableau 4.5 présente les données de changement des cartouches à l'usine en fonction des flux unitaires. En comparant les durées de cycle des préfiltres à l'usine avec celles des cartouches du train 2 alimentées à l'eau prétraitée par Mang'Azur (tableau 4.1 à la section 4.2.2), on remarque que le taux de colmatage des cartouches à l'usine est plus important que celui de la cartouche du train 2 du pilote. Effectivement, pour atteindre 30psi comme perte de charge, la durée de vie des cartouches à l'usine (min= 2 jours, max= 46 jours) est plus courte que celle des cartouches du train 2 du pilote, alimentées avec de l'eau prétraitée par les filtres Mang'Azur, (min= 11 jours, max= 38 jours), mais celles-ci n'atteignent jamais les 30psi.

Cependant, en faisant la même comparaison des durées de cycle des préfiltres à l'usine mais, cette fois avec les cartouches du train 1 alimentées à l'eau brute (tableau 4.1 à la section 4.2.2), on remarque que le taux de colmatage des cartouches du pilote (train 1) est nettement plus important que celui des cartouches de l'usine. En effet, la durée de vie des cartouches du train 1 du pilote alimenté à l'eau brute (min= 2 jours, max= 7 jours (mais atteignent les 30 psi au bout de 120 heures maximum), est plus courte que celle des cartouches de l'usine (min= 2 jours, max= 46 jours).



#### 4.5.2 Perméabilité des membranes de NF à l'usine (normalisées à 20°C)

Le système de nanofiltration de l'usine de Sainte-Marthe-sur-le-Lac est constitué de trois trains parallèles. Chaque train est muni de 17 caissons à 6 modules chacun. Ce qui donne ainsi un nombre total de  $3 \times 102 = 306$  membranes de NF90-8040 avec une surface unitaire de 37,1 m<sup>2</sup>.

La figure 4.19 présente la perméabilité normalisée à 20°C de la NF à l'usine en fonction du temps, depuis le mois d'avril jusqu'à août 2022.

**Sur le train 1 :** la perméabilité des modules débute à 2,75 LMH/bar le 01/04/2022, puis augmente pour atteindre 13,6 LMH/bar le 11/04/2022 (récupération de 109% après lavage chimique de la membrane), et ensuite reprendre à 5,45 LMH/bar le 18/04/2022 et décline jusqu'à 2,17 LMH/bar à la fin du mois. La perméabilité augmente graduellement au débit du mois de mai jusqu'à 11,2 LMH/bar, où la perméabilité est en partie retrouvée. Durant le mois de juin, on remarque une baisse importante de la perméabilité du module jusqu'au 19/06/2022 (8,8 LMH/bar), puis une reprise après un lavage chimique le 20/06/2022 (33 LMH/bar) pour une récupération de perméabilité de 110%. Durant le mois de juillet, la perméabilité est faible pendant la première semaine puis reprend à 33 LMH/bar le 06/07/2022 (100% de récupération après lavage chimique), mais baisse rapidement au bout de 4 jours pour atteindre 11 LMH/bar vers la fin du mois. Cette perméabilité poursuit son déclin pour la première semaine du mois d'août, et ce jusqu'au 12/08/2022 après un lavage chimique, pour reprendre une perméabilité de 14,5 LMH/bar (récupération de 18%), puis baisse graduellement pour le reste du mois jusqu'à atteindre 5,19 LMH/bar.

**Sur le train 2 :** la perméabilité des modules est moins importante que celle enregistrée sur les modules du train 1. Elle débute à 3,22 LMH/bar le 01/04/2022, ensuite augmente légèrement jusqu'à 13,6 LMH/bar le 12/04/2022 avec la fin du cycle de lavage chimique effectué. Cette variation minime de la perméabilité indique un colmatage sévère des modules. Ceci a nécessité un deuxième cycle de lavage sur le train 2 survenu le même mois, soit le 22/04/2022, mais la perméabilité initiale n'était pas récupérée et a gardé une valeur de 7,3 LMH/bar. Durant le mois de mai, un seul cycle de lavage est effectué le 17/05/2022, ce qui a permis de garder la perméabilité à 4,9 LMH/bar.

**Sur le train 3 :** la perméabilité des modules est supérieure à celle enregistré sur le train 2. Elle commence à 2,48 LMH/bar le 01/04/2022, ensuite diminue progressivement jusqu'à atteindre 2,31 LMH/bar. Après le lavage chimique du train 3 survenu le 19/04/2022, une hausse significative de

la perméabilité est enregistrée, qui reprend sa valeur de 21 LMH/bar. Le même cycle est observé pour le mois de mai. Cependant, à partir du mois de juin (un seul lavage chimique au débit du mois 01/06/2022), la perméabilité est en déclin durant tout le mois de juin et juillet (aucun lavage chimique). Malgré les actions de lavages apportées sur ce train au mois d'août, effectuées le 02/08/2022 et le 24/08/2022, les modules n'ont pas pu rétablir leur perméabilité, et les valeurs de récupération observées sont très faibles (10 LMH/bar et 14 LMH/bar).

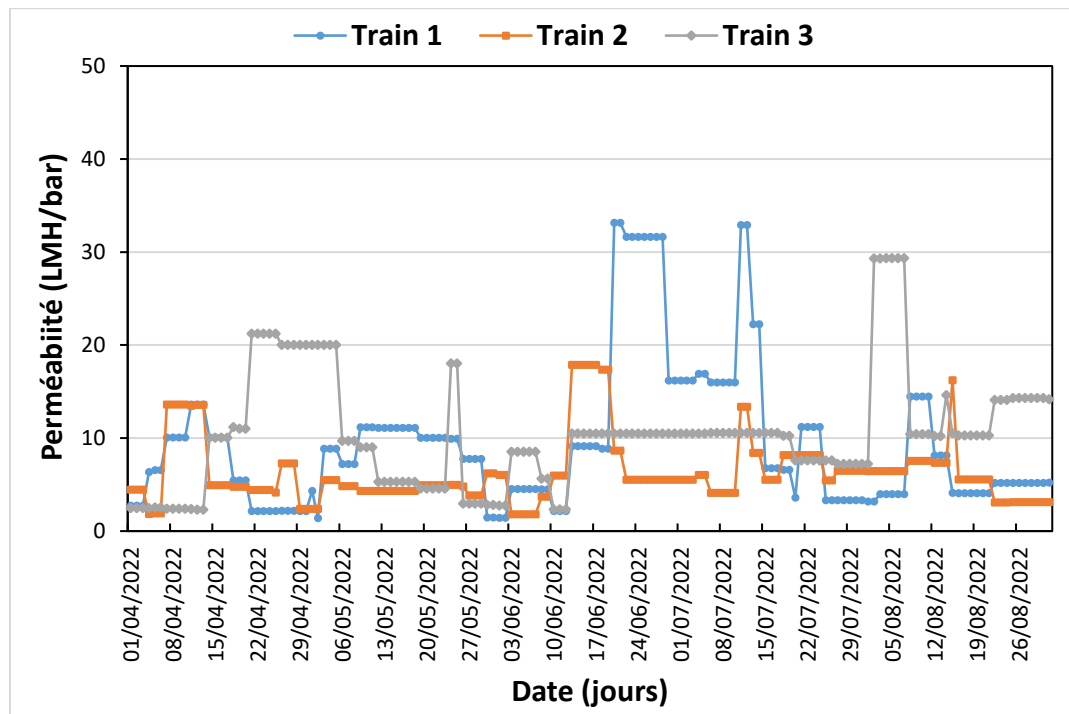


Figure 4.19 Perméabilité normalisée à 20°C en fonction du temps de la NF à l'usine

D'après ces résultats, est remarquable de voir que la perméabilité des membranes de NF chute au fur et à mesure que ces dernières se colmatent. Cependant, après la récupération partielle de la perméabilité, il est possible de valider la performance d'un lavage chimique effectué sur les membranes de nanofiltration, en comparant la perméabilité initiale de la membrane à celle retrouvée après un lavage.

Toutefois, en comparant la fréquence de lavage des membranes à l'usine (tableau 4.6) avec celle de la membrane du train 2 alimentée à l'eau prétraitée par Mang'Azur discuté à la section 4.3, on remarque que pour la période de fonctionnement de la NF du pilote (du 27/06/2022 au 29/08/2022), le taux de colmatage des membranes à l'usine est plus important que celui de la membrane du train 2 du pilote. En effet, en deux mois d'opération, un seul lavage chimique a été effectué sur la

membrane du train 2 du pilote a été réalisé et qui a permis de ramener la perte de charge initiale à 1 psi, tandis que pour la même période, au moins deux lavages chimiques sont effectués sur chaque train à l'usine.

Tableau 4.6 Fréquence de lavage des membranes à l'usine de SMSL

| Mois           | N° train de NF | Nombre de lavage chimique effectué | Date du lavage chimique |
|----------------|----------------|------------------------------------|-------------------------|
| <b>Avril</b>   | Train 1        | 1 fois                             | 15/04/2022              |
|                | Train 2        | 2 fois                             | 12/04/2022              |
|                |                |                                    | 22/04/2022              |
|                | Train 3        | 1 fois                             | 19/04/2022              |
| <b>Mai</b>     | Train 1        | 1 fois                             | 26/05/2022              |
|                | Train 2        | 1 fois                             | 17/05/2022              |
|                | Train 3        | —                                  | —                       |
| <b>Juin</b>    | Train 1        | 1 fois                             | 20/06/2022              |
|                | Train 2        | 1 fois                             | —                       |
|                | Train 3        | 2 fois                             | 01/06/2022              |
|                |                |                                    | 13/06/2022              |
| <b>Juillet</b> | Train 1        | 1 fois                             | 06/07/2022              |
|                | Train 2        | 1 fois                             | 08/07/2022              |
|                | Train 3        | —                                  | —                       |
| <b>Août</b>    | Train 1        | 1 fois                             | 12/08/2022              |
|                | Train 2        | 1 fois                             | 05/08/2022              |
|                | Train 3        | 2 fois                             | 02/08/2022              |
|                |                |                                    | 24/08/2022              |

## 4.6 Identification des causes de colmatage

### 4.6.1 Caractérisation des agents colmatants des cartouches 5 microns

Afin de caractériser les agents colmatants des préfiltres 5 microns en Polypropylène, on a sélectionné des cartouches sur les deux trains (eau brute et prétraitée au Mang'Azur), avec différentes périodes d'opération et ayant été changé à des pressions différentes. Etant donné que les cartouches n'étaient pas homogènes, on a coupé des coupons de 2cm<sup>2</sup> à des endroits distincts sur chaque cartouche 5 microns (25, 50 et 75% de la longueur de la cartouche). En suivant le protocole présenté à l'annexe F, on a pu faire l'analyse des métaux (Mn, Fe, Ca, Mg) et le COD

extraits de chaque cartouche. Les résultats obtenus sont illustrés par des histogrammes sur les figures 4.20 et 4.21 ci-après. La masse de contaminants récupérés (en mg) a été normalisée par la masse du coupon analysé (g). Le poids sec moyen du coupon étant de 1,7 g.

La figure 4.20 ci-dessous présente les concentrations des agents colmatants extraits des cartouches 5µm alimentées à l'eau brute à débit d'opération de 16 L/min vs 8 L/min.

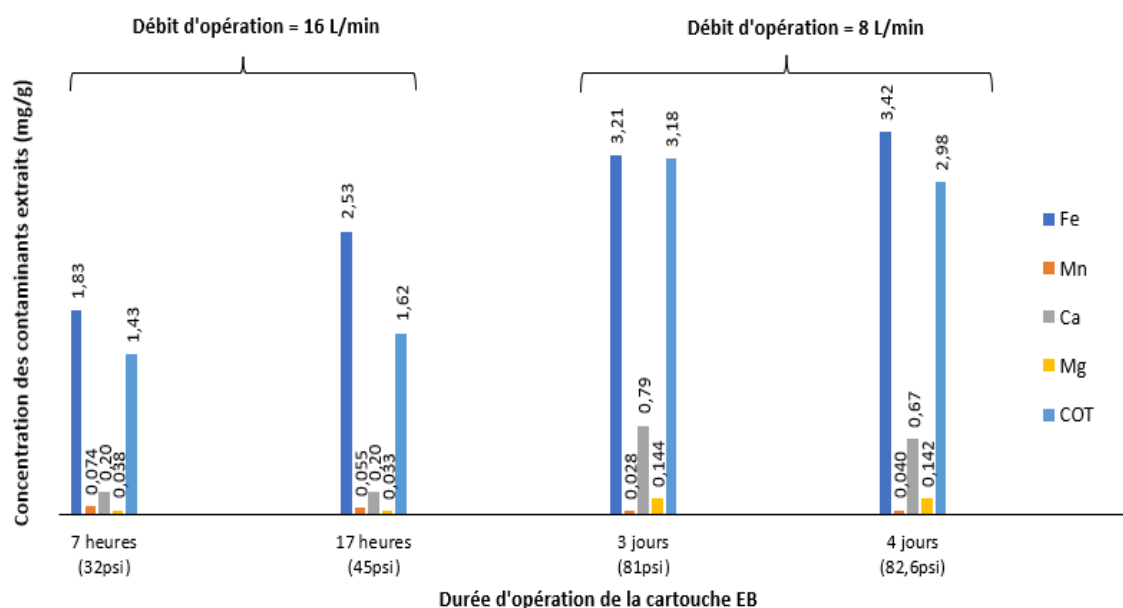


Figure 4.20 Concentrations des contaminants extraits des cartouches 5µm alimentées à l'eau brute

L'analyse des histogrammes démontre que le colmatage des cartouches 5microns alimentées à l'eau brute est possiblement causé par le fer et la matière organique, et ceci corrobore l'odeur septique et la couleur brun foncé des cartouches observées à la Fig.4.14a de la section 4.2.2. Les concentrations élevées de Fe (moyenne = 2,18 mg/g) retenues par les cartouches, opérées à un débit de 16 L/min, sur des courtes durées d'opérations (7 h et 17 h), combiné avec la présence importante de concentration de COT (moyenne = 1,52 mg/g) confirme que les cartouches retiennent du carbone particulaire (probablement des algues). L'adsorption de la matière organique sur la cartouche filtrante a donc favorisé l'accumulation de fer qui a contribué au colmatage rapide des cartouches.

Aussi, la quantité de fer élevée 2,18 mg/g retenue sur la cartouche 5µm explique l'abatement des concentrations de fer par le passage de l'eau à travers celle-ci (observé à la Fig.4.5a dans la section

4.1.6). En ce qui concerne le manganèse, les faibles concentrations 0,173 mg/g retenues par la cartouche 5 $\mu$ m (moyenne = 0,03 mg/g) affirment que le colmatage de celle-ci n'est pas causé par le manganèse. Pour ce qui est des concentrations de Ca (moyenne = 0,7 mg/g) et Mg (moyenne = 0,14 mg/g) retenus par la cartouche, elles ne représentent pas un effet significatif vu que la variation de la dureté totale de l'eau entre l'entrée et la sortie de la cartouche 5 $\mu$ m (Fig.C.2a à l'annexe C) n'est pas représentative.

Une étude menée par Li et Zhang (2019), a montré que la rétention du fer et de la matière organique dans les cartouches filtrantes peut avoir un impact sur la capacité de filtration, la pression différentielle, la croissance de micro-organismes et la qualité de l'eau produite. Le fer peut provoquer la formation de dépôts et de biofilms à l'intérieur des cartouches, ce qui favorise la croissance de bactéries et d'autres micro-organismes. Cependant, il est important de noter que plusieurs autres facteurs peuvent également influencer la performance des cartouches filtrantes, tels que le type de cartouche, la qualité de l'eau d'entrée, la durée d'utilisation, etc.

La figure 4.21 ci-dessous présente les concentrations des contaminants extraits des cartouches 5 $\mu$ m alimentées à l'eau prétraitée au Mang'Azur à débit d'opération 8L/min soit 2,4gpm/10po de longueur de cartouche.

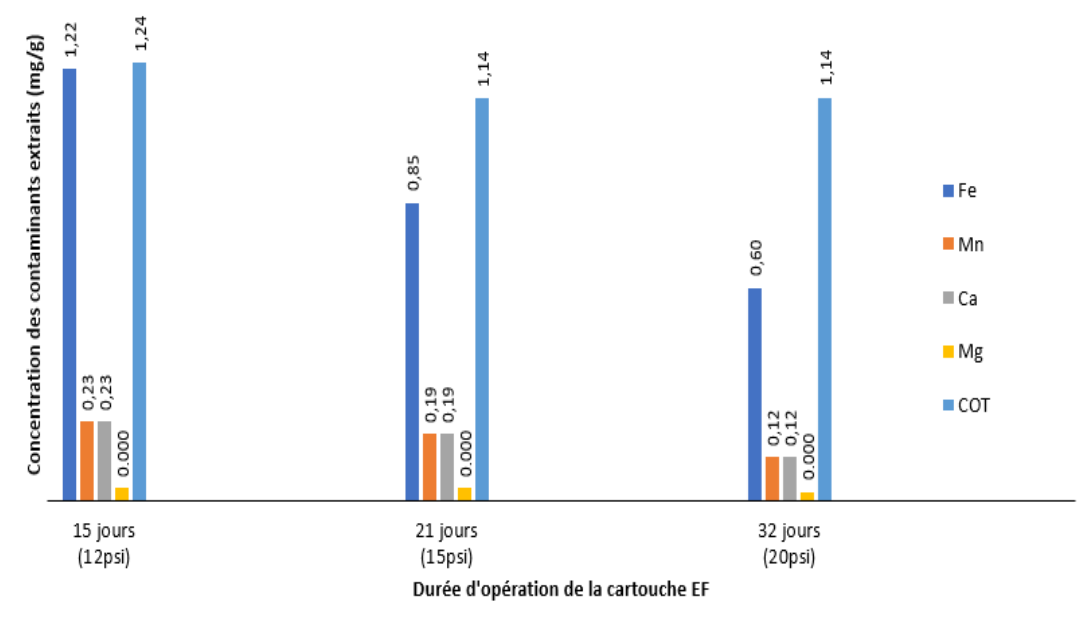


Figure 4.21 Concentrations des contaminants extraits des cartouches 5 $\mu$ m alimentées à l'eau prétraitée au Mang'Azur

Aussi bien pour les cartouches alimentées à l'eau prétraitée au Mang'Azur, on note que le fer et le COT sont les contaminants présents en concentrations importantes. Mais, à l'inverse des cartouches alimentées à l'eau brute, celles traitées par Mang'Azur accumulent plus de manganèse vu qu'elles opèrent plus longtemps, mais reste à des faibles concentrations. Cependant, en comparant les concentrations des métaux retenus sur les trois cartouches 5 microns analysées, on remarque que le fer diminue au fur et à mesure que la durée d'opération de la cartouche augmente. En effet, pour 15 jours d'opération (moyenne Fe= 1,22 mg/g) > 21 jours d'opération (moyenne Fe= 0,84 mg/g) > 32 jours d'opération (moyenne Fe= 0,6 mg/g).

Cette diminution de la concentration retenue par la cartouche explique le colmatage de celle-ci, et le début de relargage qui se traduit par dissolution du fer dans l'effluent. Ceci appuie la qualité de l'eau qui se dégrade à la sortie de la cartouche 5µm après 14 jours d'opérations d'après les résultats de SDI expliqués à la section 4.2.1, ainsi que la couleur jaunâtre de la membrane 0,45µm après un mois fonctionnement de la cartouche (Fig.4.12).

Finalement, afin de minimiser l'impact de la rétention du fer et de la matière organique dans les cartouches filtrantes, il est important de maintenir les cartouches propres et donc de les remplacer fréquemment. Il est également recommandé de surveiller régulièrement la qualité de l'eau produite pour détecter tout problème potentiel et prendre les mesures nécessaires pour le résoudre.

Les pourcentages de récupération des métaux sur les cartouches analysées sont présentés plus en détails à l'Annexe G.

#### **4.6.2 Caractérisation des eaux de lavages chimiques de la NF**

En fonction de l'évolution de la pression transmembranaire, comme discuté à la section 4.4, un lavage basique suivi d'un lavage acide ont été réalisés selon la procédure décrite à la section 3.4 dans le but de rétablir la perméabilité initiale de la membrane. Vu la qualité de l'eau brute, il était évident de prévoir qu'un lavage chimique de la membrane du train 1 allait survenir plus tôt. Effectivement, après un mois de mise en marche de la membrane NF du train 1, le premier lavage chimique a été réalisé le 25/07/2022 après avoir enregistré une perte de charge de 18 psi. Cette même membrane a subi un deuxième lavage chimique le 26/08/2022. Rappelons que la perte de charge linéaire requise pour déclencher le lavage chimique des membranes NF avait été fixée à P =15 psi. La membrane du train 2 a pour sa part subi un seul lavage.

Les eaux des lavages ont été récupérées après chaque type de lavage (acide/basique), et des analyses chimiques ont été réalisées. Parmi celle-ci, on retrouve des mesures de métaux et sels communs (Fe, Mn, Ca, Mg), des MES et la composition organique. Les résultats sont présentés au tableau 4.7 ci-après. La masse de contaminants récupérés (en mg) a été normalisée par la surface de la membrane NF90-2540 (2,6 m<sup>2</sup>).

Tableau 4.7 Résultats des analyses des eaux des lavages chimiques réalisés sur les deux membranes du pilote

| Paramètres               | Membrane 1                      |              |                |                                  |              |                |                       | Membrane 2                      |              |       |
|--------------------------|---------------------------------|--------------|----------------|----------------------------------|--------------|----------------|-----------------------|---------------------------------|--------------|-------|
|                          | 1 <sup>er</sup> lavage chimique |              |                | 2 <sup>ème</sup> lavage chimique |              |                | Total<br>(lavage 1+2) | 1 <sup>er</sup> lavage chimique |              |       |
|                          | Lavage basique                  | Lavage acide | Total lavage 1 | Lavage basique                   | Lavage acide | Total lavage 2 |                       | Lavage basique                  | Lavage acide | Total |
| Mn (mg/m <sup>2</sup> )  | 0,19                            | 4,04         | 4,23           | 0,19                             | 3,35         | 3,54           | 7,77                  | 0,19                            | 1,62         | 1,81  |
| Fe (mg/m <sup>2</sup> )  | 3,85                            | 1,73         | 5,58           | 0,38                             | 0,46         | 0,85           | 6,42                  | 0,38                            | 0,69         | 1,08  |
| Ca (mg/m <sup>2</sup> )  | 30,4                            | 82,3         | 113            | 32,3                             | 101          | 134            | 246                   | 32,3                            | 11,3         | 43,6  |
| Mg (mg/m <sup>2</sup> )  | 6,92                            | 12,5         | 19,4           | 8,65                             | 19,8         | 28,5           | 47,9                  | 8,65                            | 4,62         | 13,3  |
| MES (mg/m <sup>2</sup> ) | 15,4                            | <0,5(mg/L)   | 15,4           | 15,4                             | <0,5(mg/L)   | 24,6           | 40                    | 15,4                            | 27,7         | 43,1  |
| COT (mg/m <sup>2</sup> ) | 263                             | 106          | 370            | 223                              | 52,5         | 276            | 645                   | 223                             | 152          | 375   |
| COD (mg/m <sup>2</sup> ) | 254                             | 105          | 359            | 215                              | 42,7         | 258            | 617                   | 215                             | 150          | 365   |
| COP (mg/m <sup>2</sup> ) | 10                              | 1            | 11             | 8                                | 10           | 18             | 28                    | 8                               | 3            | 10    |

À partir des analyses de ces paramètres de qualité, on remarque que ces deux types de lavage (basique/acide) sont interdépendants. Le lavage basique a tendance à enlever le dépôt colmatant organique sur la membrane NF, et ceci est observé en suivant les taux de COT (COD + COP) et COD enregistrés. Le lavage acide vient pour compléter le lavage alcalin et fermer les pores de la membrane pour augmenter la résistance de la membrane NF. La figure 4.22 ci-dessous présente les proportions des agents colmatants sur les deux membranes de NF en termes de pourcentage.

En comparant les deux lavages effectués sur la membrane 1, on remarque que la teneur des eaux en métaux dans les deux types de lavage est semblable, et que les pourcentages en Mn, et en Fe sont négligeables (<1%). La concentration de Ca (moyenne = 123 mg/m<sup>2</sup>) soit un pourcentage total

de 25% sur la NF1, et de Mg ( $50 \text{ mg/m}^2$ ) avec 5%, sont beaucoup plus élevés et indiquent du colmatage par précipitation. En ce qui concerne les MES (moyenne =  $20 \text{ mg/m}^2$ ). Il est à noter que ces MES peuvent inclure des éléments susmentionnés (Ca, Fe, Mg, Mn).

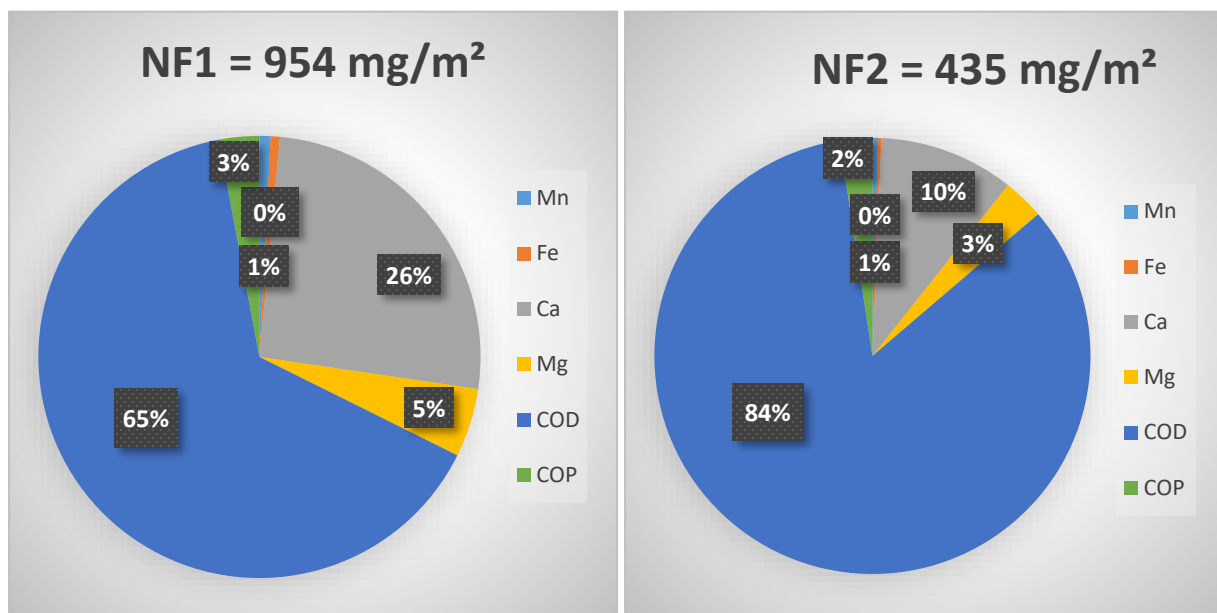


Figure 4.22 Proportions des agents colmatants sur les deux membranes de NF

Le premier lavage chimique de la membrane NF2 prétraitée avec le Mang'Azur est survenu après deux mois de son début de fonctionnement, soit le 22/08/2022. Les proportions des agents colmatants était similaires à ce qui a été observé sur la membrane NF1 ( $\text{COT} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Fe} \approx \text{Mn}$ ). La plus grande différence était donc plutôt au niveau des accumulations totales d'agents colmatants. Par exemple, en comparant les résultats de la membrane NF2 avec la somme des concentrations mesurées sur la NF1 (lavage 1 + lavage 2), on peut calculer que les concentrations de Fe, Ca, Mg, Mn, COT et MES étaient respectivement réduits d'un facteur 8,4 (Fe), 5,5 (Ca), 3,4 (Mg), 5,9 (Mn), 1,3 (MES) et 1,6 (COT). Suite à ces résultats, il est recommandé de :

1. Analyser les eaux de lavage sur les trains en usine afin de comparer les résultats avec ceux obtenus en pilote
2. Analyser plus en détails la composition du COD qui a été récupérée.

La présence dominante de COT dans les eaux de lavage suggère que le colmatage dans les modules de NF est d'origine biologique mais amplifié par la présence de fer/manganèse et de dureté.

## **CHAPITRE 5      DISCUSSION**

L'objectif principal de ce projet de recherche était d'étudier l'impact du filtre Mang'Azur sur l'optimisation de la durée de vie des cartouches 5 microns et celle des membranes de NF. Nous avons cependant posé comme hypothèse de recherche que la réduction du fer, du manganèse et du COD prévu dans un filtre Mang'Azur permettrait de réduire la fréquence de remplacement des cartouches 5µm à usage unique, en plus d'atténuer le colmatage des membranes de NF. Pour répondre à ces objectifs, l'influence du filtre Mang'Azur sur les caractéristiques des eaux alimentant (i) la cartouche 5µm et (ii) la membrane de NF a été étudiée dans un premier temps. Ceci s'est effectué dans le cadre d'essais pilotes qui se sont déroulés d'avril à août 2022, en évaluant plusieurs paramètres physico-chimiques sur différents points d'échantillonnages. Dans un second temps, un suivi des pertes de charge en amont/aval des cartouches 5µm et des membranes de NF a été réalisé sur les trains avec/sans prétraitement par Mang'Azur, pour identifier la période idéale de changement de la cartouche filtrante et celle du lavage chimique de la membrane de NF. Dans un troisième temps, les vitesses de colmatage des cartouches filtrantes ont été comparées pour deux modes de débit de fonctionnement (8 L/min vs 16 L/min). Finalement, les agents colmatants retenus sur les cartouches et dans les eaux de lavage chimiques de la NF ont été caractérisés afin d'identifier l'origine de colmatage de celles-ci.

Ce chapitre permet de discuter des résultats obtenus et les positionner par rapport à des travaux antérieurs, et fait ressortir les limites de l'étude.

### **5.1 Impact du filtre Mang'Azur sur les caractéristiques des eaux alimentant la cartouche 5 µm et la membrane de NF**

L'efficacité du filtre Mang'Azur est prononcée quant à la qualité des eaux observées pour alimenter le train 2 du pilote:

(1) Le processus d'aération qui se produit dans le filtre a conduit à une stabilité du pH sur tous les points d'échantillonnage ,avec une moyenne = 7,5. Cet équilibre est idéal pour rendre l'eau traitée par le Mang'Azur moins corrosive pour les canalisations et les équipements ultérieurs (Ramesh, & Elango, 2015). Une publication publiée par Wang, MHS et Wang, LK (2022) a montré qu'en présence de fer et de manganèse dans une eau traitée par Mang'Azur, le pH doit, au minimum, être

supérieur à 7,0 et inférieur à 8,5 afin de ne pas produire du fer colloïdal et pour assurer une précipitation complète du Fe/Mn. Les performances de la présente étude rencontrent ces critères.

(2) Les concentrations d'oxygène dissous mesurées sur le train 2 du pilote n'ont montré aucune consommation significative dans les préfiltres 5  $\mu\text{m}$ , comparativement à une consommation significative d' $\text{O}_2$  sur les cartouches filtrantes du train 1. Le manganèse et le fer insolubles récupérés dans les filtres Mang'Azur se lient aux composés organiques présents dans l'eau, et forment une matière colloïdale de plus grande taille. Une partie importante de cette matière colloïdale va être interceptée par le filtre Manga'Azur, tandis que les particules de plus petites tailles vont passer à travers le filtre pour ensuite être captées par les cartouches filtrantes. Il aurait été intéressant de caractériser la taille des colloïdes afin d'évaluer si une cartouche de moins de 5 microns installée à la sortie d'un Mang'Azur serait une stratégie pertinente. Nous avons en effet observé lors des test SDI que les filtrats des cartouches 5 microns contenait encore des colloïdes récupérables sur une membrane de 0.45 micron.

L'injection de sulfite de sodium dans l'eau brute à l'usine pourrait constituer une solution intéressante comme prétraitement et réducteur chimique des concentrations d'oxygène. Le sulfite de sodium contrôle la croissance bactérienne aérobie et réduit efficacement le potentiel de colmatage chimique des membranes. Il réagit avec l'oxygène pour former des sulfates, et réduire la précipitation du fer et du manganèse contenus dans l'eau souterraine (Redondo & Lomax, 2001).

(3) La présence du prétraitement au Mang'Azur a permis d'avoir un meilleur abattement de la turbidité à l'effluent de la cartouche sur le train 2 du pilote à des valeurs  $\leq 0,5$  UTN, sauf sur quelques points où les causes des pics de turbidité ont été identifiées. La turbidité est en effet influencée par le fer insoluble présent dans l'eau qui se transforme en colloïdes et particules, passe ensuite en partie à travers le filtre Mang'Azur et augmente ainsi le colmatage des cartouches. Par ailleurs, une analyse de distribution des tailles des colloïdes serait à recommander sur les échantillons afin de voir de plus près les composés colloïdaux. D'après la littérature, l'ajout d'une étape de floculation à l'entrée du train 1 traitant l'eau brute, aurait permis de réduire encore plus la turbidité à l'eau filtrée (Cleasby, J. L. et al., 1992). Cependant, injecter un coagulant en amont des Mang'Azur peut perturber le fonctionnement du biofiltre pour la rétention du Mn en plus de réduire drastiquement les durées de cycle en raison de l'excédent de solides à filtrer.

(4) L'étape d'aération qui se produit en amont d'un filtre Mang'Azur a permis d'introduire de l'oxygène dans l'eau et oxyder le fer, ce qui explique les faibles concentrations de fer total enregistrées sur le train 2 (moyenne = 0,03 mg Fe/L), comparativement à des teneurs de plus que 1,9 mg Fe/L dans l'eau brute qui baissent significativement après passage à travers la cartouche 5µm. De plus, les concentrations de Mn étaient généralement sous la limite de détection sur le train 2 (moyenne = 0,01 mg Mn/L), mais relativement élevées sur le train de l'eau brute avec une moyenne de 0,35 mg Mn/L. Ceci démontre l'efficacité du Mang'Azur sur l'abattement du fer/manganèse totaux, étant donné que les concentrations de fer et de manganèse sont toutes deux significativement inférieures aux recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada de 0,3 mg/L pour le fer et 0,05 mg/L pour le manganèse (Santé Canada, 2019).

Une étude (Williams, 2002) a étudié l'abattement du fer et du manganèse respectivement après filtration sur Fer'Azur et Mang'Azur. Ces filtres ont traité avec succès de l'eau brute contenant du fer soluble jusqu'à 1,71 mg/L et du manganèse soluble jusqu'à 1,00 mg/L, respectivement, et leurs effluents présentaient 0,03 mg/L Fe et 0,05 mg/L Mn. Ces résultats sont en accord avec les valeurs obtenues dans cette étude, et justifie même que la présence uniquement d'un filtre Mang'Azur est capable de réduire les concentrations du fer et du manganèse contenus dans ces eaux souterraines.

(5) La réduction du COD, aussi bien pour le train 1 que pour le train 2 après passage de l'eau à travers la Mang'Azur, a causé une baisse de l'O<sub>2</sub> dissous. Mais la consommation d'oxygène est plus importante et plus distinguée sur le train de l'eau brute. Il est à noter que le fer possède également de bonnes capacités d'adsorption du COD. L'adsorption du COD par du fer oxydé peut aider à éliminer la matière organique de l'eau en le retenant sur le filtre, mais elle ne conduit pas directement à une consommation d'oxygène. La consommation d'oxygène ne se produit qu'après que la matière organique a été oxydée (Reardon et Wang, 2003). Comme les consommations d'oxygène mesurées dans les préfiltres excèdent largement les consommations induites par la biodégradation de carbone mesurée dans les préfiltres, on suppose que des phénomènes abiotiques sont également consommateurs d'oxygène. Par exemple, la dissolution du fer particulaire rendue possible par les conditions anaérobiques dans les dépôts pourrait avoir mené à une dissolution du fer particulaire en fer dissous, lequel peut réagir avec l'oxygène lors de son transport vers une zone aérobie du préfiltre. Les odeurs septiques détectées lors de changements du préfiltre indiquent en effet que le préfiltre n'est pas entièrement aérobie même si l'affluent et l'effluent le sont.

## **5.2 Impact d'un prétraitement par Mang'Azur sur la réduction du colmatage des cartouches 5µm**

Le SDI est le paramètre le plus important caractérisant la quantité de polluants d'entrée s'écoulant dans le système de filtration membranaire (Alhadidi et al., 2011). Fayaz et al. (2019) ont étudié dans leur recherche la corrélation entre le SDI et la turbidité pour un système de dessalement des eaux de mer par OI. Selon le système de prétraitement, la turbidité de l'eau après passage dans les filtres à sable sous pression atteint moins de 1 NTU en raison de l'élimination des colloïdes en suspension. Cependant, des particules submicroniques de polluants organiques et biologiques sont restées en suspension dans l'eau brute, déterminant les valeurs de SDI. Ils ont constaté qu'en plus des matières organiques en suspension, les matières inorganiques en suspension jouaient aussi un rôle essentiel dans la détermination des valeurs SDI. Ces observations sont en accord avec les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire i.e. les pics de turbidité observés sur l'effluent de la cartouche 5 µm du train 2 (turbidité = 1,5 UTN) concordent avec des valeurs de SDI > 5. Cela dit, les particules colloïdales non interceptées par le filtre Mang'Azur vont finir dans le préfiltre et forment un dépôt qui peut être relargué avec le temps ce qui est corroboré par l'augmentation de la turbidité à l'effluent. Ceci explique les valeurs de SDI= 3,5 observés pour une cartouche 5µm neuve lesquelles augmentent jusqu'à 6 au bout de 32 jours d'opération de la cartouche. Il serait donc préférable de remplacer la cartouche 5 µm alimentée au Mang'Azur après 14 jours de fonctionnement, même si la pression de changement de 30 psi n'est pas encore atteinte, pour garder un SDI < 5. En revanche, sur le train alimenté à l'eau brute, l'absence de prétraitement a causé une déposition rapide des colloïdes en suspension de plus grande taille à la surface de la cartouche 5µm, causant ainsi son colmatage au bout de 48 heures de fonctionnement, et des valeurs de SDI > 5 sur tous les points d'échantillonnage bien que la cartouche fût remplacée 2 fois par semaine.

## **5.3 Impact d'un prétraitement par Mang'Azur sur la réduction du colmatage des membranes de NF**

Le monitoring de la fréquence des lavages chimiques effectués sur les membranes de NF du pilote, ayant la même durée d'opération, nous a confirmé que le colmatage est moins sévère sur la membrane du train 2 prétraitée par le Mang'Azur. L'encrassement biologique est le type de

colmatage majeur des membranes de NF et OI alimentées en eau largement prétraitée, causé par la formation de biofilm dans les éléments membranaires (Ridgway & Flemming, 1996).

L'évolution rapide des pertes de charges linéaires enregistrées sur la membrane alimentée à l'eau brute (12 psi à 15psi) dès le démarrage du module de NF, comparé à une perte de charge initiale de 3 psi sur la membrane alimentée à l'eau prétraitée au Mang'Azur, prouve le colmatage sévère de la membrane 1.

En étudiant l'approche intégrée pour le contrôle de l'encrassement biologique, Vrouwenvelder et al (2009) ont constatés que le comportement des membranes de NF et OI alimentées par des eaux préalablement traitées par un filtre biologique, était identique face au colmatage biologique. L'augmentation des pertes de charges linéaires a été observé sur les deux membranes soit en opérant avec ou sans perméation. Donc, indépendamment qu'un flux de perméation ait été appliqué ou non, la concentration du biofilm a augmenté. Cette observation est partiellement confirmée dans cette étude, vu que les membranes ont été opérées sans perméation. Cela dit, le colmatage des membranes de NF corrélait avec l'augmentation des pertes de charges linéaires, ce qui a justifié les cycles de lavages chimiques effectués sur chaque membrane.

La littérature scientifique portant sur des études d'autopsie sur des modules membranaires, a montré que la biomasse causant l'encrassement biologique était localisée à l'entrée de la membrane. En outre, le colmatage biologique des modules spiralés est principalement causé par l'encrassement des espaceurs grossiers (Vrouwenvelder et al, 2009). Ce colmatage peut être affecté par un certain nombre de paramètres telles que l'épaisseur des espaceurs, la géométrie, la structure, le matériau et le revêtement des membranes (Bartels et al., 2008). Le test d'autopsie n'a pas été traité dans ce travail mais serait recommandé dans des études antérieures pour voir de plus près les causes exactes de l'encrassement membranaire.

Les nettoyages chimiques appliqués inactivent, généralement, mais ne retirent pas la totalité de la biomasse accumulée sur module membranaire. Cette biomasse restante sert de nourriture aux bactéries survivantes dans l'eau d'alimentation, provoquant à nouveau une croissance rapide dans les modules de membrane nettoyés (Vrouwenvelder & Van der Kooij, 2001). C'est d'ailleurs ce qui a été observé, les pertes de charges ré-augmentent brusquement et rapidement pour reprendre les valeurs de départ, ce qui indique le colmatage important et rapide de la membrane alimentée à l'eau brute. Ce comportement est probablement dû aux particules de moins de 5 microns qui sont

abondantes à la sortie du prétraitement par cartouches. Malgré les lavages chimiques, un colmatage irréversible se manifeste de façon progressive sur la membrane.

#### **5.4 Impact du flux d'opération sur le colmatage des cartouches 5µm**

L'impact du flux a été évalué sur le comportement des préfiltres 5 microns sur les deux trains du pilote. L'essai effectué pendant 4 jours à flux optimal (16L/min) a montré que le colmatage des cartouches alimentées par l'eau brute était extrêmement rapide, lesquelles auraient nécessité des changements en moins de 24 h, avec seulement 3 h pour atteindre 30psi. La résistance du colmatage démontre qu'effectivement le colmatage est plus sévère pour un flux supérieur. Cependant, l'opération avec débit maximal n'a pas mené à des hausses rapides de la pression sur la cartouche alimentée au Mang'Azur.

Le colmatage des cartouches filtrantes 5 microns est donc directement lié à la qualité de l'eau traitée et à la vitesse de traitement. Le flux d'opération joue un rôle important dans le colmatage des cartouches car il détermine la quantité d'eau qui traverse la cartouche dans un temps donné. Plus le débit est élevé, plus la quantité de matière en suspension et de particules colloïdales présentes dans l'eau est importante, ce qui peut entraîner un colmatage plus rapide de la cartouche.

Le choix du débit d'opération dépend de plusieurs facteurs tels que la taille de la cartouche, la qualité de l'eau à traiter, les exigences de qualité de sortie, les caractéristiques de la pompe et les paramètres de l'installation de traitement (Wang et al., 2019). Il est donc important de sélectionner le débit d'opération approprié pour éviter un colmatage prématuré des cartouches filtrantes. Un débit trop élevé peut également causer des problèmes tels que la perte de pression, la diminution de l'efficacité de la filtration et une durée de vie plus courte de la cartouche.

#### **5.5 Les agents colmatants retenus sur les cartouches 5 µm et récupérés dans les eaux de lavage chimique de la NF**

L'évaluation du colmatage des cartouches 5 µm s'est faite par la méthode du bilan de masse sur les agents colmatants retenus sur les préfiltres. La rétention du COT (moyenne=1,52 mg/g) sur les cartouches alimentées à l'eau brute, a augmenté la charge organique de celle-ci, ce qui confirme que la cartouche retient du carbone organique particulaire (probablement des algues qui proviennent des eaux des lacs). L'adsorption de la matière organique sur la cartouche filtrante a

donc favorisé l'accumulation de fer (moyenne= 2,18 mg/g) qui a contribué à un colmatage plus rapide des cartouches. Ces agents colmatants vont se déposer sur la surface du préfiltre, formant ainsi des particules colloïdales insolubles, qui peuvent se multiplier et former une couche de biofilm qui obstrue les pores. Si la cartouche filtrante atteint alors sa capacité de rétention, ces contaminants (COT, Fe, MES) vont être libérés dans l'eau traitée ce qui peut dégrader la qualité de l'effluent. Le même comportement de pourcentage de contaminants a été observé sur la cartouche alimentée au Mang'Azur, mais à des concentrations moins importantes, étant donné qu'une grande partie du carbone organique et du fer a été enlevé par les Mang'Azurs. Ceci a favorisé la capacité de filtration de la cartouche et lui a permis une durée de vie plus longue.

Les récupérations obtenues par les lavages chimiques des membranes de NF sont faibles pour le fer et manganèse (<1%). La majorité des colmatants se retrouvent sous forme organique (60%<COD< 80%), ce qui explique que le colmatage des membranes est fortement lié à un encrassement biologique. Ce type de colmatage est favorisé par la croissance de microorganismes (bactéries, algues, etc.) sur la surface membranaire. Celles-ci peuvent se nourrir des nutriments organiques présents dans l'eau, formant ainsi des colonies qui obstruent les pores de la membrane (Vrouwenvelder & Van der Kooij, 2001). La présence de ces contaminants dans les eaux de lavages des membranes de NF est en partie le résultat d'un relargage de ces agents colmatants par les cartouches 5µm, une fois la surface filtrante de celle-ci est saturée. La diminution des concentrations de COT observée lors de la caractérisation des préfiltres, explique la présence du carbone organique en pourcentage significatif dans les eaux de lavage (≈ 80%).

## CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La réalisation des essais sur le pilote installé à l'usine de Sainte-Marthe-Sur-le-Lac, ont permis d'atteindre l'objectif général du projet qui était l'évaluation de l'impact d'un traitement par Mang'Azur sur la performance des cartouches filtrantes 5µm à usage unique, et ainsi sur les membranes de nanofiltration afin de limiter l'impact du fer, du manganèse et de la matière organique dans les eaux de distribution. Cette étude a permis de conclure que :

1. La présence d'un prétraitement par Mang'Azur a un impact majeur sur les caractéristiques des eaux alimentant le préfiltre 5µm et la membrane de NF. Ce procédé de filtration biologique assure :
  - La stabilité de l'oxygène dissous (7 mg/L) à la sortie de la cartouche filtrante
  - La réduction de la turbidité (0,8 UTN)
  - La stabilité du pH (7,6)
  - La réduction du fer et du manganèse (30 µg/L et 10 µg/L)
  - La réduction du COD (2,5 mg C/L) à la sortie de la cartouche filtrante
2. Le colmatage des cartouches 5µm est moins important sur le train alimenté par le Mang'Azur. La durée de vie de la cartouche 5µm du train alimenté à l'eau prétraitée par Mang'Azur est plus longue (max = 38 jours) et n'a jamais atteint jamais la pression de changement de 30 psi.
3. Le prétraitement par Mang'Azur réduit le taux de colmatage des membranes de NF. En effet, les pertes de charge linéaires observées sur la membrane de NF alimentée par l'eau du Mang'Azur sont moins importantes ( $P_{max} = 15$  psi après 2 mois de fonctionnement) par rapport à celles sur la membrane de NF alimentée à l'eau brute ( $P_{max} = 14$  psi après un mois). Un résultat cohérent avec la concentration de MES/m<sup>2</sup> (1610 vs 843 mg/m<sup>2</sup>).
4. Le flux d'opération joue un rôle très important sur le taux de colmatage et la fréquence de changement des préfiltres 5µm (42 h pour atteindre 30psi à un débit de 8 L/min vs 3 h pour atteindre 30 psi à un débit de 16 L/min).
5. Le colmatage des cartouches 5 microns est fortement lié aux concentrations élevées de fer et de COD retenus.

La concentration importante de COD dans les eaux de lavage chimiques de la NF suggère que le colmatage dans les modules est d'origine biologique mais amplifié par la présence de fer/manganèse et de dureté. Il faut également considérer la présence de COP (même en quantité réduite) qui provient principalement de la croissance d'algues planctoniques.

### **Recommandations et perspectives**

À la suite de ce projet et à la lumière des résultats obtenus, voici quelques recommandations émises pour la suite des travaux qui pourraient en découler :

- Si possible, remplacer les cartouches 5 microns alimentées à l'eau brute suite à des mesures de dégradation de la qualité en sortie pour éviter le relargage des métaux et la matière organique dans l'eau de sortie, et ainsi diminuer le colmatage de la membrane de NF et sa fréquence de lavage. Cette recommandation est cependant potentiellement irréaliste du point de vue économique en raison de la fréquence trop élevée de remplacement ;
- Évaluer un essai pilote à pleine échelle à l'usine de SMSL pour valider la performance du Mang'Azur comme prétraitement ;
- Valider la mesure du fer et/ou turbidité à l'effluent des cartouches comme indicateur du moment pour remplacer les cartouches en plus du critère de pression ;
- Analyser les agents colmatants des cartouches 5microns de l'usine afin de comparer les résultats avec ceux obtenus sur le pilote ;
- Utiliser un processus de coagulation/floculation pour précipiter le fer et la matière organique dans l'eau avant son passage dans la cartouche filtrante afin d'appuyer (ou non) l'hypothèse que le colmatage de celle-ci est causé principalement par le fer et la matière organique ;
- Analyser plus en détails la composition du COD qui a été récupérée durant les lavages des membranes de NF ;
- Analyser les eaux de lavage sur les trains en usine afin de comparer les résultats avec ceux obtenus en pilote.

## RÉFÉRENCES

- Alhadidi, A., Kemperman, A.J.B., Schurer, R., Schippers, J.C., Wessling, M., van der Meer, W.G.J., (2011). « Using SDI, SDI and MFI to evaluate fouling in a UF/RO desalination pilot plant ». *Desalination* 285, 153e162. Accessible à: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.049>
- American Water Works Association (AWWA). (1990). « Water Quality and Treatment », McGraw-Hill, New York, 1194p.
- Barbeau, B. (2014). « Évaluation des alternatives de traitement pour limiter les impacts de la dureté, du fer et du manganèse dans les eaux traitées de Ste-Marthe-sur-le-Lac ». 72 pages.
- Bartels, C., Hirose, M. & Fujioka, H. (2008). « Performance advancement in the spiral wound RO/NF element design ». *Desalination* 221(1–3), 207–214.
- Benefield, L.D., Judkins, J.F., Weand, B.L. (1982). « Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment », Prentice-Hall, New-Jersey, 510p.
- Berland, J.M., Juery, C. (2002). « Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau ». 71 pages.
- Bonnely, M. (2005). « Étude pilote d'affinage par nanofiltration pour la production d'eau potable », Mémoire de maîtrise, Université Laval, 207p.
- Bouchard, C., Kouadio, P., Ellis, D., Rahni, M., Lebrun, R. (2000). « Les procédés à membranes et leurs applications en production d'eau potable », *Vecteur Environnement* Vol.33 no.4, pp.28-38.
- Burger, M.S., Krentz, C.A., Mercer, S.S., Gagnon, G.A., (2008). « Manganese removal and occurrence of manganese oxidizing bacteria in full-scale biofilters ». *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* 57, 351–359.
- Burté Luc, Baranger Catherine, Aquilina Luc, Le Borgne Tanguy, Farasin Julien, Gérard Marie-Françoise, Quentin Courtois, Tristan Babey, Sancier Gérald. (2018). « Etude des risques de colmatage et optimisation des processus de traitement des doublets géothermiques ». 72 pages.
- Cardot, C. (1999). « Les traitements de l'eau 'Procédés physico-chimiques et biologiques » 32, rue Bague 75740, Paris France.
- Carlson, K.H., Knocke, W.R., Gertig, K.R. (1997). « Optimisation du traitement par fractionnement Fe et Mn » . *Journal Awwa*.
- Characklis, W. G. & Marshall, K. C. (1990). *Biofilms*. John Wiley & Sons, New York.
- Civardi, J., Tompeck, M. (2015). « Iron and Manganese removal handbook » (second edition). *American Water Works Association*.

- Cleasby, J. L., Sindt, G. L., Watson, D. A., Baumann, E. R., University, I. S., & Bolton & Menk, I. (1992). « Design and operation guidelines for optimization of the high-rate filtration process: Plant demonstration studies » American Water Works Association Research Foundation.
- Da-Silva-Correa, L.H., Smith, H., Thibodeau, M.C., Welsh, B., Buckley, H.L. (2022). « The application of non-oxidizing biocides to prevent biofouling in reverse osmosis polyamide membrane systems ». *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 71 (2): 261–292. Accessible à: <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.118>
- Dietrich, A.M. (2015). « Niveaux maximaux de contaminants secondaires Epa : une stratégie pour la qualité de l'eau potable et l'acceptabilité par les consommateurs » Agence de protection de l'environnement des États-Unis. Rapport technique.
- Elkaout, I. (2005). « Étude comparative de la qualité des séquestrants utilisés dans le prétraitement des eaux de mer », *Projet de fin d'études*, 53p.
- Ellis, D. (1998). « Enlèvement du fer et du manganèse de l'eau souterraine par oxydation et par microfiltration », *Mémoire de maîtrise*, Université Laval, 210p.
- Esquivel Perez, A.G. (2008). « Bench-scale assessment of membrane pre-treatment and seasonal fouling variations », *Mémoire de maîtrise*, Université de Montréal, 136p.
- Fayaz, S.M.H., Mafigholami, R., Razavian, F., Ghasemipanah, K. (2019). « Correlations between silt density index, turbidity and oxidation-reduction potential parameters in seawater reverse osmosis desalination », *Water Science and Engineering*, 12(2): 115e120.
- Filmtec/Dow Chemical. (2004). « NF Elements Available for Pilot Testing », accessible à: <https://fr.pureaqua.com/membrane-dow-filmtec-nf90-2540/>
- Fimbres-Weihs, G.A., Wiley, D.E. (2010). « Examen de la modélisation CFD 3D du débit et du transfert de masse dans des canaux étroits remplis d'espaces dans des modules à membrane » *Chim. Ing. Processus. Processus Intensif.*, 49, p. 759 - 78, accessible à: [10.1016/j.cep.2010.01.007](https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.01.007)
- Ghayeni, S.B., Beatson, P.J., Schneider, R.P., Fane, A.G. (1998). « Water reclamation from municipal wastewater using combined microfiltration-reverse osmosis (ME-RO): preliminary performance data and microbiological aspects of system operation », *Desalination*, 116, pp 65-80.
- Guillen, G., Hoek, E.M.V. (2009). « Modélisation des impacts de la géométrie des entretoises d'alimentation sur les procédés d'osmose inverse et de nanofiltration » *Chim. Ing. J.*, 149. Accessible à: p. 221 - 231, [10.1016/j.cej.2008.10.030](https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.10.030)
- Howe, K. J., Hand, D. W., & Crittenden, J. C. (2012). *Principles of Water Treatment*. Somerset, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Keucken, A., Kohler, S.J., Lavonen, E., Shmitt-Kopplin, P., Spanjer, T., Persson, K. (2000).

- « Upgrading coagulation with hollow fibre nanofiltration for improved organic matter removal during surface water treatment ». *Water Research* Vol.89 no.4, pp.232-240.
- Knocke, W.R., Ramon, J.R., Thompson, C.P. (1988). « Soluble manganese removal on oxide-coated filter media ». *Journal of American Water Works Association*. 65–70.
- Knocke, W.R., Reckhow, D.A., Kearney, M.J., Parcs, C.A., (1991). « Oxydation du fer et du manganèse par l'ozone », *Le Journal de l'Association internationale de l'ozone, Tome 13*. Pages 675-695.
- Lachhabe A. (2004) : « Comparaison entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration pour le dessalement de l'eau de faibles concentrations en sel ».
- Li, Y., Li, G., & Zhang, Y. (2019). « Effect of ferric hydroxide retention on the hydraulic properties of granular filter media ». *Water research*, 157, 534-543.
- Lin, C. L., & Tsai, Y. P. (2011). « Effects of organic matter on manganese removal by biological contact oxidation process ». *Journal of hazardous materials*, 188(1-3), 204-210.
- Mallevialle, J., Odendaal, P. E., Foundation, A. R., Wiesner, M. R., eaux-Dumez, L. d., & Commission, S. A. W. R. (1996). *Water Treatment Membrane Processes*: McGraw-Hill.
- Marcil, É. (2003). « Étude pilote de nanofiltration de l'eau de la rivière Saint-Charles », Mémoire de maîtrise, Université Laval, 247 p.
- Maurel, A. (1993). « Techniques séparatives à membranes Considérations théoriques »  
Ingénieur ENSIGC (École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Génie Chimique de Toulouse)
- Messaoudène, N. (1992). « Planification d'expériences : application à la mise au point d'un traitement d'inhibiteur de dépôts de Sulfate de Baryum successible de se former en récupération assistée du pétrole par injection d'eau », revue de l'IFP, Volume 47, Numéro 5, Page 671-683
- Ministère de du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec. (2002). « Guide de conception des installations de production d'eau potable, Volume 2, Chapitre 9 », Québec, accessible à : [http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/vol2\\_chap9.pdf](http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/vol2_chap9.pdf)
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. (2019). « Guide de conception des installations de production d'eau potable, Volume 2, Chapitre 10 », Québec, accessible à : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/index.htm>
- Mohammad, A.W., Ng, L.Y., Leo, C.P., Hilal, N. (2013). « Membranes polymères incorporées à des nanoparticules métal/oxyde métallique : une revue complète » *Dessalement*, 308, accessible à : [p. 15 - 33, 10.1016/j.desal.2010.11.033](https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.033)
- Mohammad, A. W., Teow, Y. H., Ang, W. L., Chung, Y. T., Oatley-Radcliffe, D. L., & Hilal, N. (2015). *Nanofiltration membranes review: Recent advances and futures prospects*.

*Desalination*, 356(0), 226-254. Accessible à :  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.043>

- Patterson, C., Anderson, A., Sinha, R., Muhammad, N., Pearson, D. (2012). « Membranes de nanofiltration pour l'élimination de la couleur et des agents pathogènes dans les petites sources d'eau potable publiques » *J. Environ. Ing.*, 138 (1), p. 48 – 57.
- Périn, G. (2004). « Étude en laboratoire de la nanofiltration de l'eau de la rivière Saint-Charles », Séminaire de maîtrise, Département de génie civil, Université Laval, 159 pages.
- Ramesh, ST & Elango, L. (2015). « Impact de l'élimination du fer et du manganèse sur le pH des eaux souterraines et les concentrations de fer ». *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 64(3), 330-339.
- Reardon, EJ., Wang, Z. (2003). « Oxydation du fer ferreux à pH neutre ». *Science et technologie de l'environnement*, 37(14), 3097-3103.
- Redondo, JA. & Lomax, I. (2001). Y2K generation FILMTEC RO membranes combined with new pretreatment techniques to treat raw water with high fouling potential: summary of experience, *Desalination*, Vol. 136, pp. 287-306, ISSN 0011-9164.
- Ridgway, H. F. (1997). « Membrane biofouling: An International Workshop ». *National water Research Institute* occasional paper number NWRI-97-3. Sydney, Australia: 75–79.
- Ridgway, H. F. (1998). « Microbial adhesion and biofouling of reverse osmosis membranes ». In: Parekh, B. S. (ed.) *Reverse Osmosis Technology*. Marcel Dekker, New York, pp. 429–481.
- Romaine, A. (2014). « Rôle des espèces sulfures dans la corrosion des aciers non alliés : Hétérogénéités de la couche de produits de corrosion et couplages galvaniques », Université de La Rochelle.
- Sabadell, J., Litière, MI, & Cassano, AE (2012). Encrassement par nanofiltration : modélisation, simulations et résultats expérimentaux. *Journal of Membrane Science*, 389, 499-511.
- Santé Canada. (2019). « Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique-la dureté », accessible à :  
<https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/recommandations-pour-qualite-eau-potable-canada-document-technique-durete.html>
- Schrotter, J.-C., & Bozkaya-Schrotter, B. (2010). Current and Emerging Membrane Processes for Water Treatment. Dans *Membrane Technology* (p. 53-91): Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Shalan, H.F. (2002). « Development of fouling control strategies pertinent to nanofiltration membranes », *Desalination* 153, pp 125-131.
- Sodoyer, L. (2019). « Influence des concentrations élevées de matière organique naturelle sur la

- performance de filières de traitement des eaux potables ». Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, 108p.
- Staff, A. (2007). *AWWA Manual, Volume 46: Reverse Osmosis and Nanofiltration (2nd Edition)*. Denver, CO, USA: American Water Works Assoc.
- Stumm, W., & Lee, G.F. (1961). « Oxygenation of ferrous iron », *Industrial and engineering chemistry*; Vol 53, pp 143-146.
- Tamas, A. P. (2004). « Étude comparée du colmatage en nanofiltration et en ultrafiltration d'eau de surface », Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences et de Génie, Université LAVAL QUÉBEC.
- Tan, WS., Suwarno, SR., An, J., Chua, CK., Fane, AG., Chong, TH. (2017). « Comparaison des formes solides, liquides et en poudre des techniques d'impression 3D dans la fabrication d'entretoises à membrane » *Journal Membre Science*, 537, accessible à : [p. 283 - 296 ,10.1016/j.memsci.2017.05.037](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.05.037)
- Tang, C. Y., Chong, T. H., & Fane, A. G. (2011). « Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes » A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 164(1), 126-143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.10.007>
- Villeneuve, V., Légaré, S., Painchaud, J., & Vincent, W. (2004). « Dynamique et modélisation de l'oxygène dissous en rivière », *Revue des Sciences de l'Eau* 19(4) (2006) 259-274.
- Vrouwenvelder, J. S., S. A. Manolarakis, H. R. Veenendaal, D. Van der Kooij. (2000). « Biofouling potential of chemicals used for scale control in RO and NF membranes », *Desalination*, 132, 1-10.
- Vrouwenvelder, J. S. & Van der Kooij, D. (2001). « Diagnosis, prediction, and prevention of biofouling of NF and RO membranes ». *Desalination* 139, 65–71.
- Vrouwenvelder, J. S., Hinrichs, C., Van der Meer, W. G. J., Van Loosdrecht, M. C. M. & Kruithof, J. C. (2009). « Pressure drop increase by biofilm accumulation in spiral wound RO and NF membrane systems: Role of substrate concentration, flow velocity, substrate load and flow direction ». *Biofouling* 25, 543–555.
- Vrouwenvelder, JS., van Paassen, JAM., Wessels, LP., van Dam, AF., Bakker, SM. (2006). « Le simulateur d'encrassement des membranes : un outil pratique pour la prédiction et le contrôle de l'encrassement » *Journal Membre Science* , 281, p. 316 – 324, accessible à : [10.1016/j.memsci.2006.03.046](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.03.046)
- Wang, J., Gao, X., Ji, G., Gu, X. (2019). « Simulation CFD de modules membranaires en Zéolithe NaA supportés par des fibres creuses ». *Technologie de séparation et de purification*, tome 213, pages 1-10.
- Wang, MHS and Wang, LK (2022). « State-of-the-art technologies and terminologies for iron and manganese control in Environmental Science, Technology, Engineering and Mathematics (STEM) », vol2022-num12a- 80 pages. Lenox Institute Press, Massachusetts, USA. Accessible à :

<https://doi.org/10.17613/576t-r212>

Water technologies and solutions. (2022). Accessible à:

<https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/procedes-biologiques/procedes-a-cultures-fixees/filtres-biologiques>

Zhang, W., et al. (2019). « Traitement par fractionnement de l'eau de rivière pour la production d'eau potable » : un bilan. *Journal des sciences de l'environnement*, 84, 1-12. Accessible à :

<https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.04.024>

Zularisam, A. W., Ismail, A. F., Salim, M. R., Sakinah, M., & Ozaki, H. (2007). « The effects of natural organic matter (NOM) fractions on fouling characteristics and flux recovery of ultrafiltration membranes ». *Desalination*, 212(1), 191-208: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.010>

## ANNEXE A DIMENSIONS DU MODULE NF90-2540

Le module qui a été étudié lors de ce projet de recherche est le module spiralé NF90-2540 de la compagnie *Filmtec/Dow Chemical*. Il est de forme cylindrique. Ses dimensions externes sont représentées à la figure A.1.

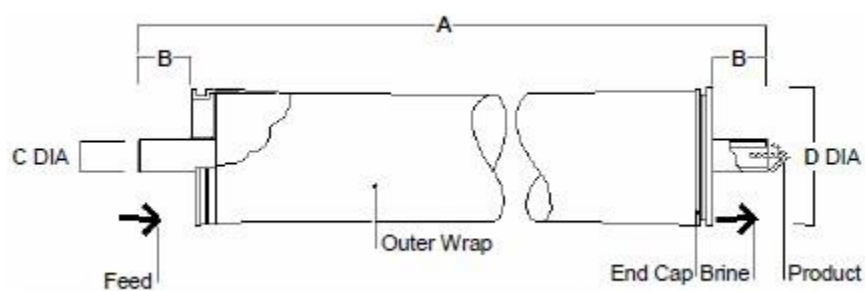


Figure A.1 Dimensions externes du module spiralé (Filmtec, 2004)

Le tableau A.1 fait la synthèse des dimensions et des caractéristiques du module NF90-2540

Tableau A.1 Dimensions et caractéristiques du module spiralé NF90-2540

| Paramètre                                          | Symbole          | Valeur | Unité             |
|----------------------------------------------------|------------------|--------|-------------------|
| Longueur du module                                 | A                | 1,02   | mm                |
| Longueur d'un embout de tube collecteur de perméat | B                | 30     | mm                |
| Diamètre d'un embout de tube collecteur de perméat | C                | 19     | mm                |
| Diamètre du module                                 | D                | 61     | mm                |
| Surface active du module                           | S                | 2,6    | m <sup>2</sup>    |
| Pression appliquée                                 | P                | 4,8    | bar               |
| Pression d'opération maximale                      | P <sub>max</sub> | 41     | bar               |
| Débit de perméat                                   | Q <sub>p</sub>   | 2,6    | m <sup>3</sup> /d |
| Débit d'alimentation maximal                       | Q <sub>max</sub> | 1,4    | m <sup>3</sup> /h |

## ANNEXE B COMPARAISON DE LA CONCEPTION DE L'USINE VS LES CONDITIONS D'OPÉRATION DU PILOTE

Tableau B.1 Conception de l'usine vs condition d'opération du pilote

| Description                                                    | Valeur                             |                                   | Unité             |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
|                                                                | Condition de conception de l'usine | Condition de conception du pilote |                   |
| Capacité du système NF                                         | 6200                               | 1,2                               | m <sup>3</sup> /j |
| <b>Configuration des filtres à cartouches</b>                  |                                    |                                   |                   |
| <i><b>Design des cartouches</b></i>                            |                                    |                                   |                   |
| Nombre de boîtier de filtre à cartouches                       | 3x33%                              | 1x100%                            |                   |
| Cartouche filtrante par boîtier                                | 32                                 | 1                                 |                   |
| Longueur des cartouches filtrantes                             | 40                                 | 10                                | pouces            |
|                                                                | 1,2                                | 3                                 | m                 |
| Diamètre nominal des cartouches filtrantes                     | 2,5                                | 2,5                               | pouces            |
|                                                                | 0,075                              | 0,075                             | m                 |
| Nombre total de cartouches                                     | 96                                 | 1                                 |                   |
| Porosité de filtration nominal                                 | 5                                  | 5                                 | µm                |
| <i><b>Opération des cartouches</b></i>                         |                                    |                                   |                   |
| Débit d'opération à 85% de recouvrement NF                     | 3,2                                | 0,79                              | m <sup>3</sup> /h |
| Flux de filtration des cartouches à 85% de recouvrement sur NF | 3,47                               | 3,47                              | gpm/10"           |
| Flux de filtration des cartouches à 75% de recouvrement sur NF | 4,01                               | 4,01                              | gpm/10"           |
| <b>Configuration des trains de NF</b>                          |                                    |                                   |                   |
| <i><b>Caractéristiques des membranes</b></i>                   |                                    |                                   |                   |
| Type de membranes                                              | NF90                               | NF90                              |                   |
| Diamètre nominal des modules de NF                             | 8                                  | 2,5                               | pouces            |
| Longueur des modules de NF                                     | 40                                 | 40                                | pouces            |
| Surface d'un module                                            | 37,1                               | 2,6                               | m <sup>2</sup>    |

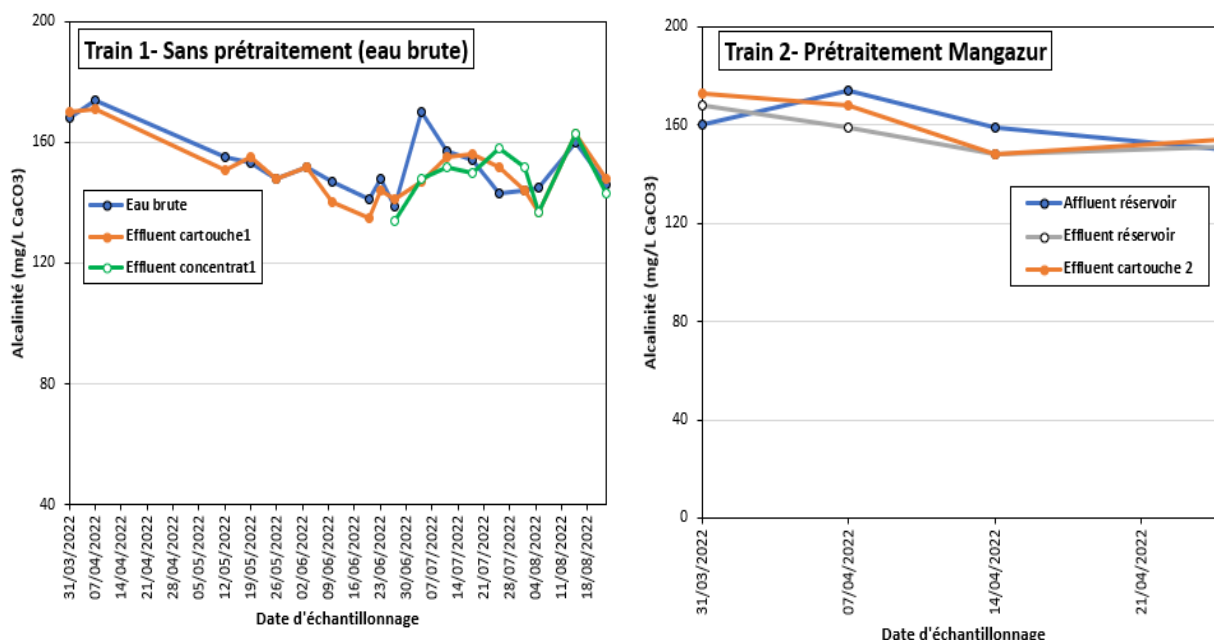
Tableau B.1 Conception de l'usine vs condition d'opération du pilote (suite)

| Description                                                                   | Valeur                             |                                   | Unité     |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------|
|                                                                               | Condition de conception de l'usine | Condition de conception du pilote |           |
| Conception de la NF                                                           |                                    |                                   |           |
| Nombre de trains de NF                                                        | 3x33%                              | 1x100%                            |           |
| Taux de recouvrement                                                          | 75-85%                             | 75-85%                            | %         |
| Nombre d'éléments membranaire de NF installés total                           | 306                                | 1                                 | Parallèle |
| Nombre d'éléments membranaire de NF installés par train                       | 102                                | 1                                 | Parallèle |
| Nombre de caissons/train                                                      | 17                                 | 1                                 |           |
| Nombre de modules/caisson                                                     | 6                                  | 1                                 |           |
| Arrangement des modules                                                       | 12:5                               | 1:0                               |           |
| Nombre de modules membranaires de NF installés dans le 1er étage du 1er train | 72                                 | 1                                 |           |
| Flux membranaire moyen                                                        | 23,10                              | 18,46                             | LMH       |
| Recouvrement moyen/module 1er étage à 85%                                     | 10%                                | 10%                               |           |
| Recouvrement moyen/module 1er étage à 75%                                     | 8,8%                               | 8,8%                              |           |
| Conditions d'opération de la NF                                               |                                    |                                   |           |
| Débit d'eau brute par train à 85% de recouvrement                             | 103                                | 0,48                              | m3/h      |
| Débit d'eau brute par train à 75% de recouvrement                             | 117                                | 0,54                              | m3/h      |
| Débit de perméat - 1 module                                                   | 0,86                               | 0,05                              | m3/h      |
| Pression entrée du module                                                     | 155                                | 155                               | psig      |
|                                                                               | 1067,95                            | 1067,95                           | kPa       |
| Pression perméat                                                              | 4                                  | 4                                 | psig      |
|                                                                               | 27,56                              | 27,56                             | kPa       |
| Pression concentrât                                                           | 123                                | 150                               | psig      |
|                                                                               | 847,47                             | 1033,5                            | kPa       |

## ANNEXE C VARIATION TEMPORELLE DE L'ALCALINITÉ ET DE LA DURETÉ TOTALE

### Variation temporelle de l'alcalinité

La figure C.1 ci-dessous illustre la variation de l'alcalinité sur chaque point d'échantillonnage sur les deux trains au cours de la période expérimentale.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique : 22/08/2022

Lavage chimique 2 : 26/08/2022

a) Train1 : Sans prétraitement (eau brute)

b) Train 2 : Prétraitement Mang'Azur

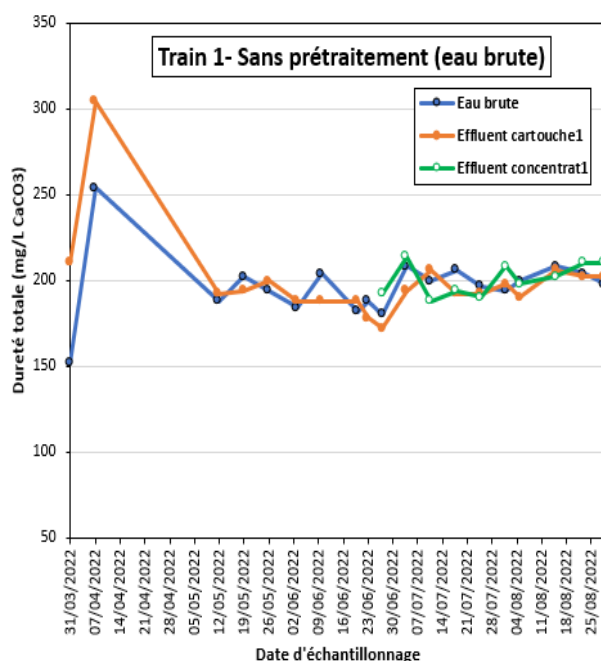
Figure C.1 Variation saisonnière de l'alcalinité pour chaque point d'échantillonnage

En comparant les deux figures de l'eau brute (Fig.C.1a) et celle de l'eau traitée (Fig.C.1b), on remarque que l'alcalinité est presque la même sur les deux trains, et varie entre 130 et 170 mg/L CaCO<sub>3</sub>. L'alcalinité est le principal facteur de contrôle de l'agressivité de l'eau et de son pouvoir incrustant. Il n'était pas attendu que l'alcalinité soit modifiée durant ces essais, ce qui est confirmée par les résultats obtenus. Rappelons par ailleurs que le procédé de NF était opéré sans perméation, ce qui explique qu'aucun échantillon ne fut prélevé au perméat, ce qui aurait démontré un abattement significatif de l'alcalinité.

## Variation temporelle de la dureté totale

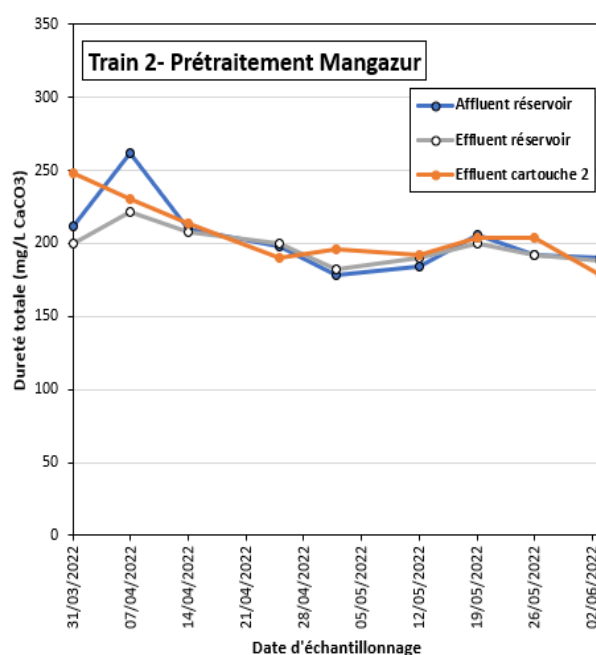
La figure C.2 ci-dessous illustre la variation de la dureté pour chaque point d'échantillonnage sur les deux trains. Les duretés totales (Mg et Ca) mesurées aux différents points d'échantillonnages sur les deux trains sont un peu variables comparativement à l'alcalinité. Ainsi, les concentrations moyennes varient d'un minimum de 150 mg/L  $\text{CaCO}_3$  à un maximum de 304 mg/L  $\text{CaCO}_3$  pour le train 1 (Fig.C.2a), et d'un minimum de 180 mg/L  $\text{CaCO}_3$  à un maximum de 260 mg/L  $\text{CaCO}_3$  pour le train 2 (Fig.C.2b).

Bien qu'aucune norme n'existe au Québec sur le taux de calcium et magnésium requis dans l'eau potable, mais les recommandations de Santé Canada suggèrent une fourchette souhaitée de 80-100 mg/L  $\text{CaCO}_3$ , en prévenant qu'une valeur supérieure à 500 mg/L  $\text{CaCO}_3$  est inacceptable (Santé Canada, 1995). En pratique, la dureté est normalement éliminée par la NF dans le procédé à échelle réelle.



Lavage chimique 1 : 25/07/2022

Lavage chimique 2 : 26/08/2022



Lavage chimique : 22/08/2022

a) Train1 : Sans prétraitement (eau brute)

b) Train 2 : Prétraitement Mang'Azur

Figure C.2 Variation saisonnière de la dureté totale pour chaque point d'échantillonnage

**ANNEXE D TABLEAU RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS  
D'ACCUMULATION IN-OUT DE MN, FE, COP, COD, O2 DISSOUS ET  
PH DANS LES DEUX CARTOUCHES ET LES DEUX NF DU PILOTE**

Tableau D.1 Récapitulatif des résultats d'accumulation in-out obtenus dans les deux cartouches et  
les deux NF du pilote

|            |                   | Cartouche EB |      | Membrane EB |      | Cartouche EF |      | Membrane EF |      |
|------------|-------------------|--------------|------|-------------|------|--------------|------|-------------|------|
| Date       | Paramètres        | Amont        | Aval | Amont       | Aval | Amont        | Aval | Amont       | Aval |
| 27/06/2022 | Mn (mg/L)         | 0,21         | 0,21 | 0,21        | 0,21 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | Fe (mg/L)         | 0,15         | 0,16 | 0,16        | 0,13 | 0,05         | 0,04 | 0,04        | 0,05 |
|            | COP (mg/L)        | 0,03         | 0,21 | 0,21        | 0,13 | 0,05         | 0    | 0           | 0,1  |
|            | COD (mg/L)        | 2,78         | 2,52 | 2,52        | 2,54 | 2,5          | 2,54 | 2,54        | 2,65 |
|            | O2 dissous (mg/L) | 7,73         | 3,42 | 3,42        | 3,23 | 7,2          | 7,02 | 7,02        | 7,03 |
|            | pH                | 7,82         | 7,59 | 7,59        | 7,61 | 7,76         | 7,75 | 7,75        | 7,59 |
| 04/07/2022 | Mn (mg/L)         | 0,27         | 0,28 | 0,28        | 0,27 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | Fe (mg/L)         | 0,2          | 0,22 | 0,22        | 0,15 | 0,02         | 0,02 | 0,02        | 0,02 |
|            | COP (mg/L)        | 0,03         | 0,2  | 0,2         | 0,09 | 0,04         | 0    | 0           | 0,04 |
|            | COD (mg/L)        | 2,73         | 2,5  | 2,5         | 2,84 | 2,72         | 2,8  | 2,8         | 2,67 |
|            | O2 dissous (mg/L) | 7,22         | 3,37 | 3,37        | 5,31 | 7,26         | 7,08 | 7,08        | 6,95 |
|            | pH                | 7,78         | 7,66 | 7,66        | 7,54 | 7,68         | 7,63 | 7,63        | 7,66 |
| 11/07/2022 | Mn (mg/L)         | 0,28         | 0,28 | 0,28        | 0,27 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,03 |
|            | Fe (mg/L)         | 0,23         | 0,14 | 0,14        | 0,14 | 0,02         | 0,02 | 0,02        | 0,02 |
|            | COP (mg/L)        | 0,1          | 0,2  | 0,2         | 0,07 | 0            | 0,04 | 0,04        | 0,01 |
|            | COD (mg/L)        | 2,96         | 2,65 | 2,65        | 2,81 | 2,76         | 2,74 | 2,74        | 2,79 |
|            | O2 dissous (mg/L) | 8,48         | 4,33 | 4,33        | 6,77 | 6,85         | 7,21 | 7,21        | 7,16 |
|            | pH                | 7,55         | 7,65 | 7,65        | 7,68 | 7,67         | 7,66 | 7,66        | 7,66 |
| 18/07/2022 | Mn (mg/L)         | 0,23         | 0,23 | 0,23        | 0,23 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | Fe (mg/L)         | 0,23         | 0,15 | 0,15        | 0,02 | 0,02         | 0,02 | 0,02        | 0,03 |
|            | COP (mg/L)        | 0,08         | 0,11 | 0,11        | 0,05 | 0,05         | 0,1  | 0,1         | 0,03 |

Tableau D.1 Récapitulatif des résultats d'accumulation in-out obtenus dans les deux cartouches et les deux NF du pilote (suite)

| Date       | Paramètres        | Cartouche EB |      | Membrane EB |      | Cartouche EF |      | Membrane EF |      |
|------------|-------------------|--------------|------|-------------|------|--------------|------|-------------|------|
|            |                   | Amont        | Aval | Amont       | Aval | Amont        | Aval | Amont       | Aval |
|            | COD (mg/L)        | 2,75         | 2,69 | 2,69        | 2,7  | 2,7          | 2,66 | 2,66        | 2,72 |
|            | O2 dissous (mg/L) | 6,83         | 2,43 | 2,43        | 2,53 | 7,57         | 7,64 | 7,64        | 7,48 |
|            | pH                | 7,85         | 7,68 | 7,68        | 7,59 | 7,59         | 7,63 | 7,63        | 7,65 |
| 25/07/2022 | Mn (mg/L)         | 0,22         | 0,21 | 0,21        | 0,21 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | Fe (mg/L)         | 0,03         | 0,09 | 0,09        | 0,09 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | COP (mg/L)        | 0,15         | 0,1  | 0,1         | 0,12 | 0,11         | 0,11 | 0,11        | 0,17 |
|            | COD (mg/L)        | 2,66         | 2,62 | 2,62        | 2,68 | 2,61         | 2,67 | 0,67        | 2,61 |
|            | O2 dissous (mg/L) | 7,02         | 3,23 | 3,23        | 3,45 | 7            | 7,13 | 7,13        | 6,98 |
|            | pH                | 7,61         | 7,28 | 7,28        | 7,57 | 7,66         | 7,64 | 7,64        | 7,69 |
| 01/08/2022 | Mn (mg/L)         | 0,41         | 0,28 | 0,28        | 0,28 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | Fe (mg/L)         | 0,91         | 0,15 | 0,15        | 0,16 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,04 |
|            | COP (mg/L)        | 0,03         | 0,03 | 0,03        | 0,17 | 0,06         | 0,02 | 0,02        | 0,13 |
|            | COD (mg/L)        | 2,92         | 2,9  | 2,9         | 2,88 | 2,8          | 2,84 | 2,84        | 2,79 |
|            | O2 dissous (mg/L) | 6,25         | 2,82 | 2,82        | 3,38 | 6,92         | 6,86 | 6,86        | 6,73 |
|            | pH                | 7,59         | 7    | 7           | 7,6  | 7,57         | 7,52 | 7,52        | 7,58 |
| 05/08/2022 | Mn (mg/L)         | 0,24         | 0,35 | 0,35        | 0,32 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | Fe (mg/L)         | 0,14         | 0,1  | 0,1         | 0,11 | 0,02         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | COP (mg/L)        | 0,19         | 0,2  | 0,2         | 0,13 | 0,06         | 0,09 | 0,09        | 0,12 |
|            | COD (mg/L)        | 2,58         | 2,54 | 2,54        | 2,61 | 2,48         | 2,45 | 2,45        | 2,4  |
|            | O2 dissous (mg/L) | 6,62         | 3,19 | 3,19        | 2,51 | 6,78         | 7,19 | 7,19        | 7,09 |
|            | pH                | 7,1          | 7,56 | 7,56        | 7,66 | 7,69         | 7,69 | 7,69        | 7,81 |
| 15/08/2022 | Mn (mg/L)         | 0,22         | 0,19 | 0,19        | 0,19 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | Fe (mg/L)         | 0,12         | 0,11 | 0,11        | 0,06 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,02 |
|            | COP (mg/L)        | 0,15         | 0,1  | 0,1         | 0,12 | 0,11         | 0,11 | 0,11        | 0,17 |

Tableau D.1 Récapitulatif des résultats d'accumulation in-out obtenus dans les deux cartouches et les deux NF du pilote (suite)

| Date       | Paramètres        | Cartouche EB |      | Membrane EB |      | Cartouche EF |      | Membrane EF |      |
|------------|-------------------|--------------|------|-------------|------|--------------|------|-------------|------|
|            |                   | Amont        | Aval | Amont       | Aval | Amont        | Aval | Amont       | Aval |
|            | COD (mg/L)        | 2,55         | 2,50 | 2,50        | 2,56 | 2,45         | 2,45 | 2,45        | 2,4  |
|            | O2 dissous (mg/L) | 5,91         | 4,33 | 4,33        | 2,98 | 6,86         | 7,2  | 7,2         | 7,07 |
|            | pH                | 7,67         | 7,62 | 7,62        | 7,59 | 7,52         | 7,63 | 7,63        | 7,62 |
| 23/08/2022 | Mn (mg/L)         | 0,11         | 0,24 | 0,24        | 0,26 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | Fe (mg/L)         | 0,08         | 0,07 | 0,07        | 0,09 | 0,03         | 0,04 | 0,04        | 0,05 |
|            | COP (mg/L)        | 0,15         | 0,1  | 0,1         | 0,12 | 0,11         | 0,11 | 0,11        | 0,17 |
|            | COD (mg/L)        | 2,66         | 2,62 | 2,62        | 2,68 | 2,61         | 2,67 | 0,67        | 2,61 |
|            | O2 dissous (mg/L) | 5,39         | 6,7  | 6,7         | 3,43 | 6,62         | 6,71 | 6,71        | 6,74 |
|            | pH                | 6,77         | 7,17 | 7,17        | 7,34 | 7,48         | 7,48 | 7,48        | 7,52 |
| 29/08/2022 | Mn (mg/L)         | 0,33         | 0,22 | 0,22        | 0,22 | 0,01         | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
|            | Fe (mg/L)         | 0,67         | 0,16 | 0,16        | 0,11 | 0,05         | 0,05 | 0,05        | 0,05 |
|            | COP (mg/L)        | 0,03         | 0,2  | 0,2         | 0,09 | 0,04         | 0    | 0           | 0,04 |
|            | COD (mg/L)        | 2,73         | 2,5  | 2,5         | 2,84 | 2,72         | 2,8  | 2,8         | 2,67 |
|            | O2 dissous (mg/L) | 6,67         | 3,54 | 3,54        | 2,12 | 6,58         | 6,74 | 6,74        | 6,21 |
|            | pH                | 7,6          | 7,58 | 7,58        | 7,52 | 7,46         | 7,56 | 7,56        | 7,58 |

## ANNEXE E DURÉES DES CYCLES DES CARTOUCHES FILTRANTES 5 MICRONS SUR LES DEUX TRAINS A 50% DU DÉBIT (8 L/MIN)

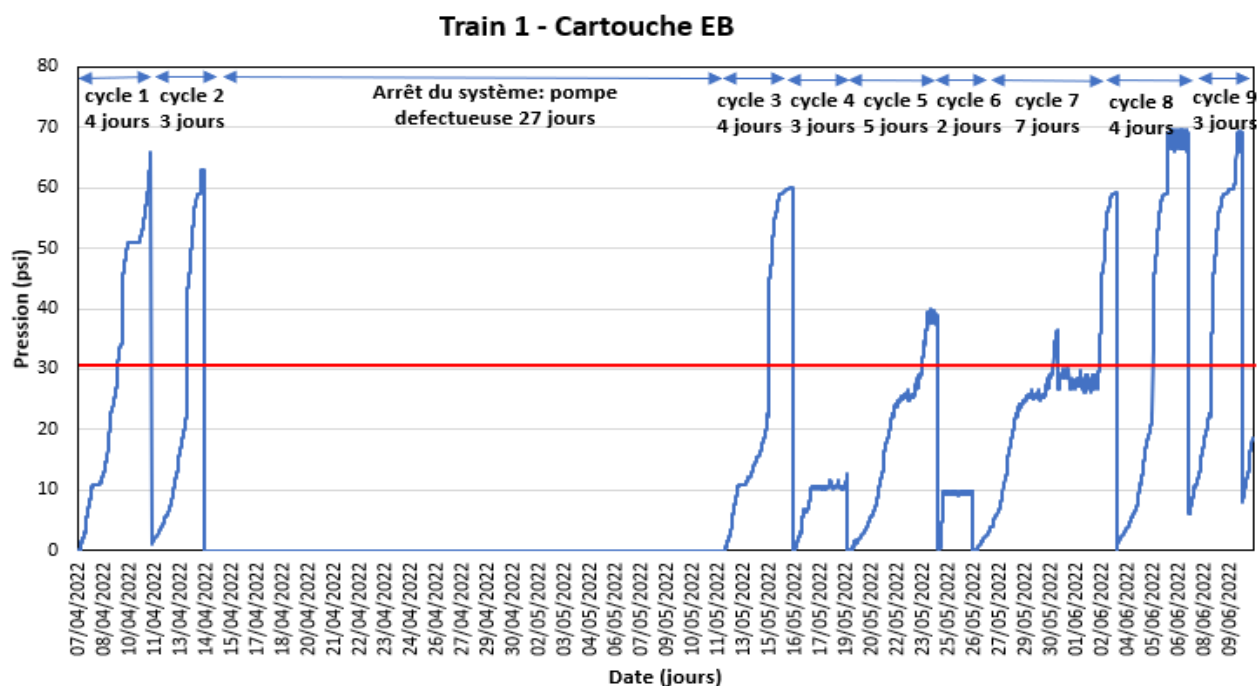


Figure E.1 Pression de changement des cartouches filtrantes 5 $\mu$ m sur le train 1 alimenté à l'eau brute

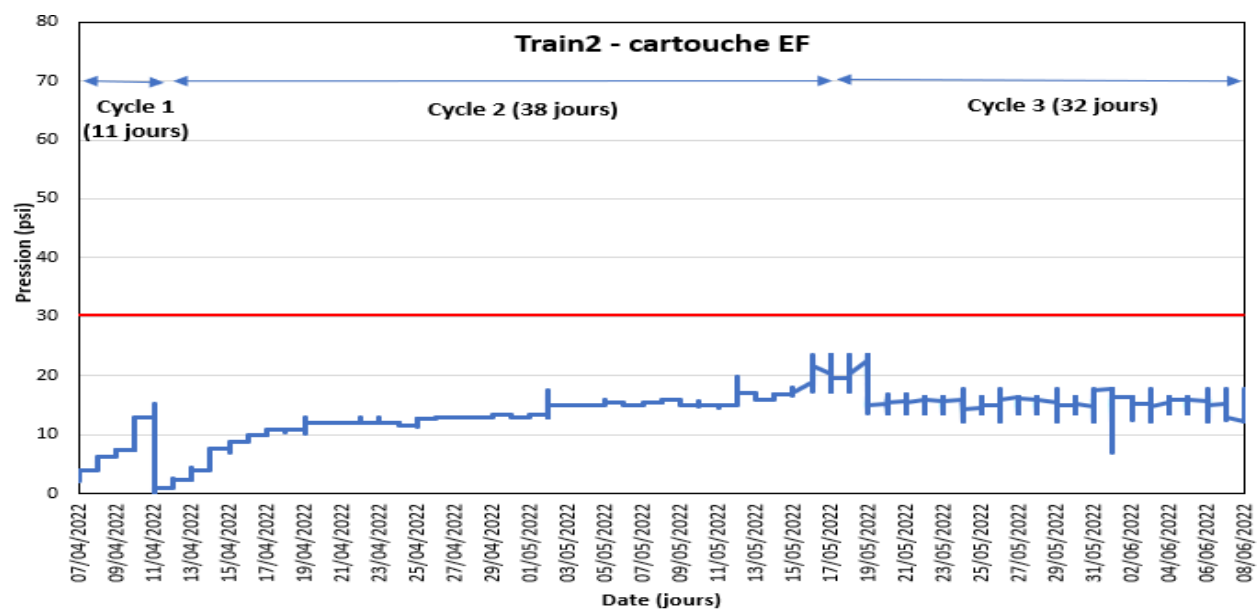


Figure E.2 Pression de changement des cartouches filtrantes 5 $\mu$ m sur le train 2 alimenté à l'eau prétraitée par Mang'Azur

## **ANNEXE F PROTOCOLE DE CARACTÉRISATION DES FILTRES EN POLYPROPYLENE**

### **Protocole de digestion :**

1. Sécher les cartouches au four à 60°C.
2. Couper des coupons de 2 cm<sup>2</sup> à différents endroits de la cartouche.
3. Peser un tube de digestion metal-free et son bouchon, et noter la masse.
4. Ajouter le coupon et noter la masse.
5. Insérer un piston coupé de façon qu'il arrive à 1 cm du bord du tube (le piston permettra au coupon de demeurer dans le HCl)
6. Dans les tubes de digestion, ajouter 20 mL HCl concentré et laisser tremper une nuit.
7. Passer dans le bain à Ultrason pour 30 minutes.
8. Digestion sur chauffe-bloc pendant 4h à 95°C avec verre de montre.
9. Passage dans le bain à Ultrason pour 30 minutes.
10. Laisser refroidir une nuit.

### **Protocole de filtration après la digestion :**

Préparation de la verrerie, base et cône : rincer avec du HCl 50% v/v, suivi de 6 rinçages avec de l'eau Milli-Q.

Préparation des filtres (PVDF, 0.45µm, 47mm) : filtration de 1L d'eau Milli-Q. Faire sécher dans une coupelle en aluminium au four à 105°C une nuit. Refroidir au dessiccateur, peser et noter la masse.

1. Rincer et enlever le piston
2. Ajouter de l'eau Milli-Q jusqu'au trait du 40 mL et brasser.
3. Filtrer tout le tube (coupon et acide)
4. Rincer le tube de digestion avec exactement 10 mL de Milli-Q et filtrer.
5. Récupérer le filtrat dans un tube metal-free et noter le volume, pour analyse des métaux.

6. Rincer le filtre et le coupon avec 2 L d'eau Milli-Q pour enlever tout le HCl. Jeter l'eau de rinçage.
7. Remettre le filtre et le coupon dans la coupelle d'aluminium, rincer le cône avec un peu d'eau Milli-Q au-dessus de la coupelle (récupération des particules à la base du cône).
8. Mettre au four à 60°C.
9. Peser coupelle et coupon après chauffage.

ANNEXE G TABLEAU DE CARACTÉRISATION DES AGENTS COLMATANTS DES PRÉFILTRES EN POLYPROPYLENE

Tableau G.1 Résultats de caractérisation des agents colmatants des préfiltres 5 microns

| Cartouche                  | Date de change ment | Durée d'opéra tion | Volume filtré par la cartouche (L) | Pression de changeme nt (psi) | Poids cartouche sèche (g) | Position du coupon | Poids tube vide + boucho n (g) | Poids coupon + tube + boucho n (g) | Poids du coupo n (g) | Moye nne des poids du coupo n (g) | Poids coupe lle + filtre (g) | Volu me récup éré après filtrat ion (mL) | Poids coupe lle + filtre + coupo n sec (g) | Poids coupo n après digest ion (g) | Masse digérée (g) | Masse non digérée (g) | Concen tration Fe (mg/L) | Concen tration Mn (mg/L) | Concentr ation Ca (mg/L) | Concentr ation Mg (mg/L) | Masse récupér ée Fe (mg) | Concen tration Fe (mg/g) | % récupér ation Fe par coupon | Masse récupér ée Mn (mg) | Concen tration Mn (mg/g) | % récupér ation Mn par coupon | Masse récupér ée Ca (mg) | Concen tration Ca (mg/g) | % récupér ation Ca par coupon | Masse récupér ée Mg (mg) | Concen tration Mg (mg/g) | % récupér ation Mg par coupon |
|----------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Cartouche témoin           | –                   | –                  | –                                  | –                             | 160                       | 25%                | 11,8                           | 13,5                               | 1,76                 | 1,6                               | 1,91                         | 43                                       | 3,68                                       | 1,77                               | -0,005            | 0,167                 | 7,20                     | 0,09                     | 1,05                     | 0,20                     | 0,310                    | 0,18                     | 103%                          | 0,004                    | 0,002                    | 103%                          | 0,045                    | 0,03                     | 103%                          | 0,009                    | 0,005                    | 103%                          |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 50%                | 11,8                           | 13,7                               | 1,87                 |                                   | 1,93                         | 42,5                                     | 3,80                                       | 1,87                               | 0,000             | 0,272                 | 4,48                     | 0,06                     | 0,86                     | 0,19                     | 0,190                    | 0,10                     | 100%                          | 0,002                    | 0,001                    | 100%                          | 0,036                    | 0,02                     | 100%                          | 0,008                    | 0,004                    | 100%                          |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 75%                | 11,9                           | 13,4                               | 1,47                 |                                   | 1,93                         | 44                                       | 3,40                                       | 1,47                               | 0,000             | -0,128                | 5,08                     | 0,06                     | 0,75                     | 0,16                     | 0,223                    | 0,15                     | 100%                          | 0,003                    | 0,002                    | 100%                          | 0,033                    | 0,02                     | 100%                          | 0,007                    | 0,005                    | 100%                          |
| Cartouche eau brute 1      | 22/06/2022          | 7 h                | 6720                               | 32                            | 162                       | 25%                | 11,9                           | 13,9                               | 1,98                 | 1,94                              | 1,90                         | 42                                       | 3,87                                       | 1,96                               | 0,014             | 0,364                 | 97,0                     | 4,70                     | 3,61                     | 0,60                     | 4,075                    | 2,06                     | 97%                           | 0,197                    | 0,10                     | 96%                           | 0,151                    | 0,08                     | 96%                           | 0,025                    | 0,01                     | 96%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 50%                | 11,8                           | 13,6                               | 1,79                 |                                   | 1,91                         | 44                                       | 3,68                                       | 1,78                               | 0,014             | 0,178                 | 74,5                     | 2,89                     | 12,3                     | 2,42                     | 3,278                    | 1,83                     | 95%                           | 0,127                    | 0,07                     | 93%                           | 0,539                    | 0,30                     | 93%                           | 0,107                    | 0,06                     | 93%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 75%                | 11,8                           | 13,8                               | 2,05                 |                                   | 1,93                         | 39                                       | 3,99                                       | 2,06                               | -0,010            | 0,460                 | 83,9                     | 2,63                     | 10,9                     | 2,15                     | 3,271                    | 1,60                     | 103%                          | 0,103                    | 0,05                     | 102%                          | 0,427                    | 0,21                     | 102%                          | 0,084                    | 0,04                     | 102%                          |
| Cartouche eau brute 2      | 23/06/2022          | 17 h               | 16320                              | 45                            | 165                       | 25%                | 11,9                           | 13,6                               | 1,77                 | 1,72                              | 1,93                         | 42,5                                     | 3,68                                       | 1,76                               | 0,011             | 0,156                 | 109,5                    | 2,15                     | 5,46                     | 0,74                     | 4,652                    | 2,63                     | 96%                           | 0,091                    | 0,05                     | 94%                           | 0,232                    | 0,13                     | 94%                           | 0,031                    | 0,02                     | 93%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 50%                | 11,8                           | 13,5                               | 1,63                 |                                   | 1,90                         | 43                                       | 3,51                                       | 1,61                               | 0,016             | 0,009                 | 105,2                    | 2,53                     | 4,36                     | 0,54                     | 4,522                    | 2,78                     | 54%                           | 0,109                    | 0,07                     | 36%                           | 0,188                    | 0,12                     | 36%                           | 0,023                    | 0,01                     | 36%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 75%                | 11,8                           | 13,5                               | 1,77                 |                                   | 1,94                         | 43                                       | 3,69                                       | 1,75                               | 0,016             | 0,150                 | 89,6                     | 1,96                     | 14,2                     | 2,79                     | 3,852                    | 2,18                     | 93%                           | 0,084                    | 0,05                     | 91%                           | 0,611                    | 0,35                     | 91%                           | 0,120                    | 0,07                     | 91%                           |
| Cartouche eau brute 3      | 26/08/2022          | 3 j                | 34560                              | 81                            | 184                       | 25%                | 11,8                           | 13,7                               | 1,86                 | 1,66                              | 1,90                         | 42,5                                     | 3,71                                       | 1,81                               | 0,053             | 0,209                 | 123,0                    | 0,88                     | 26,4                     | 3,73                     | 5,226                    | 2,81                     | 82%                           | 0,037                    | 0,02                     | 80%                           | 1,122                    | 0,60                     | 80%                           | 0,158                    | 0,09                     | 80%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 50%                | 11,9                           | 13,6                               | 1,74                 |                                   | 1,96                         | 44                                       | 3,66                                       | 1,70                               | 0,039             | 0,100                 | 124,1                    | 1,13                     | 25,3                     | 3,63                     | 5,462                    | 3,14                     | 76%                           | 0,050                    | 0,03                     | 72%                           | 1,115                    | 0,64                     | 73%                           | 0,160                    | 0,09                     | 72%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 75%                | 11,7                           | 13,0                               | 1,38                 |                                   | 1,91                         | 44                                       | 3,26                                       | 1,35                               | 0,035             | -0,253                | 115,6                    | 1,13                     | 35,8                     | 8,02                     | 5,086                    | 3,68                     | 114%                          | 0,050                    | 0,04                     | 116%                          | 1,575                    | 1,14                     | 115%                          | 0,353                    | 0,26                     | 116%                          |
| Cartouche eau brute 4      | 02/09/2022          | 4 j                | 46080                              | 82,6                          | 185                       | 25%                | 11,8                           | 13,7                               | 1,91                 | 1,89                              | 1,94                         | 42,5                                     | 3,82                                       | 1,88                               | 0,033             | 0,282                 | 151,1                    | 1,52                     | 21,0                     | 2,71                     | 6,420                    | 3,35                     | 92%                           | 0,065                    | 0,03                     | 90%                           | 0,893                    | 0,47                     | 90%                           | 0,115                    | 0,06                     | 90%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 50%                | 11,8                           | 13,6                               | 1,85                 |                                   | 1,97                         | 43                                       | 3,79                                       | 1,82                               | 0,026             | 0,219                 | 144,9                    | 1,77                     | 21,1                     | 3,16                     | 6,232                    | 3,38                     | 92%                           | 0,076                    | 0,04                     | 89%                           | 0,906                    | 0,49                     | 90%                           | 0,136                    | 0,07                     | 89%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 75%                | 11,9                           | 13,8                               | 1,90                 |                                   | 1,91                         | 44                                       | 3,77                                       | 1,86                               | 0,038             | 0,260                 | 152,1                    | 1,89                     | 45,6                     | 12,6                     | 6,693                    | 3,53                     | 89%                           | 0,083                    | 0,04                     | 87%                           | 2,007                    | 1,06                     | 88%                           | 0,555                    | 0,29                     | 87%                           |
| Cartouche eau prétraitée 1 | 20/06/2022          | 15 j               | 172800                             | 12                            | 163                       | 25%                | 11,8                           | 13,7                               | 1,87                 | 1,87                              | 1,90                         | 42,5                                     | 3,76                                       | 1,86                               | 0,015             | 0,259                 | 53,8                     | 43,9                     | 12,0                     | 2,23                     | 2,287                    | 1,22                     | 95%                           | 1,864                    | 0,99                     | 95%                           | 0,511                    | 0,27                     | 95%                           | 0,095                    | 0,05                     | 95%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 50%                | 11,7                           | 13,7                               | 2,00                 |                                   | 1,94                         | 40                                       | 3,92                                       | 1,98                               | 0,014             | 0,381                 | 57,5                     | 52,6                     | 9,94                     | 1,45                     | 2,299                    | 1,15                     | 97%                           | 2,106                    | 1,06                     | 97%                           | 0,398                    | 0,20                     | 97%                           | 0,058                    | 0,03                     | 96%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 75%                | 11,9                           | 13,6                               | 1,73                 |                                   | 1,94                         | 43                                       | 3,66                                       | 1,72                               | 0,011             | 0,119                 | 52,3                     | 44,2                     | 8,32                     | 1,18                     | 2,250                    | 1,30                     | 93%                           | 1,901                    | 1,10                     | 93%                           | 0,358                    | 0,21                     | 92%                           | 0,051                    | 0,03                     | 91%                           |
| Cartouche eau prétraitée 2 | 22/07/2022          | 21 j               | 241920                             | 15                            | 164                       | 25%                | 11,7                           | 13,4                               | 1,72                 | 1,76                              | 1,89                         | 43                                       | 3,61                                       | 1,71                               | 0,012             | 0,113                 | 35,3                     | 14,4                     | 11,6                     | 2,63                     | 1,517                    | 0,88                     | 92%                           | 0,620                    | 0,36                     | 91%                           | 0,499                    | 0,29                     | 91%                           | 0,113                    | 0,07                     | 91%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 50%                | 11,8                           | 13,6                               | 1,75                 |                                   | 1,91                         | 42,5                                     | 3,66                                       | 1,75                               | 0,007             | 0,146                 | 33,2                     | 13,0                     | 5,87                     | 1,04                     | 1,410                    | 0,80                     | 96%                           | 0,553                    | 0,32                     | 96%                           | 0,249                    | 0,14                     | 96%                           | 0,044                    | 0,03                     | 95%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 75%                | 11,8                           | 13,6                               | 1,79                 |                                   | 1,93                         | 44                                       | 3,72                                       | 1,79                               | 0,004             | 0,187                 | 34,8                     | 13,7                     | 5,58                     | 0,96                     | 1,531                    | 0,85                     | 98%                           | 0,603                    | 0,34                     | 98%                           | 0,246                    | 0,14                     | 98%                           | 0,042                    | 0,02                     | 98%                           |
| Cartouche eau prétraitée 3 | 12/08/2022          | 32 j               | 368640                             | 20                            | 191                       | 25%                | 11,8                           | 13,6                               | 1,81                 | 1,82                              | 1,94                         | 40                                       | 3,73                                       | 1,79                               | 0,022             | 0,188                 | 28,3                     | 13,4                     | 5,49                     | 1,12                     | 1,134                    | 0,63                     | 90%                           | 0,536                    | 0,30                     | 90%                           | 0,220                    | 0,12                     | 89%                           | 0,045                    | 0,02                     | 89%                           |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 50%                | 11,7                           | 13,7                               | 1,97                 |                                   | 1,92                         | 42                                       | 3,90                                       | 1,98                               | -0,006            | 0,378                 | 28,9                     | 13,5                     | 6,44                     | 1,40                     | 1,213                    | 0,62                     | 102%                          | 0,566                    | 0,29                     | 102%                          | 0,270                    | 0,14                     | 102%                          | 0,059                    | 0,03                     | 102%                          |
|                            |                     |                    |                                    |                               |                           | 75%                | 11,7                           | 13,4                               | 1,69                 |                                   | 1,88                         | 43,7                                     | 3,57                                       | 1,69                               | 0,001             | 0,085                 | 22,1                     | 10,2                     | 4,29                     | 0,90                     | 0,967                    | 0,57                     | 100%                          | 0,444                    | 0,26                     | 99%                           | 0,187                    | 0,11                     | 99%                           | 0,039                    | 0,02                     | 98%                           |