



## **SOLUTION DURABLE POUR LES ÉCONOMIES D'EAU ET D'ÉNERGIE GRÂCE À LA RÉUTILISATION DES EAUX DE REJET DES TOURS DE REFROIDISSEMENT**

**Auteurs** : J. Aumatell Colom, D. Gutiérrez Estepa, P. Infante Romero, J.I. Ramos Grande, Agustín Pérez, J. C. Benjumea Reyes, O. Villanueva Chapa, S. Coma Calafell, N. Adroer Martori, E. Cortada Cluet, M. C. RoyoReverter

**ADQUIMICA S.A.**

### **Résumé** :

L'étude évalue les gains de performance, les économies d'eau et d'énergie, les réductions des coûts d'exploitation et des émissions de CO<sub>2</sub> qui ont résulté de l'utilisation d'un antitartre biodégradable sans phosphore spécialement conçu et d'un nettoyant ne contenant ni EDTA ni phosphore dans sa formulation dans une véritable installation d'osmose inverse traitant l'eau de purge de la tour de refroidissement en vue de sa réutilisation.

Avant l'intervention d'ADQUIMICA, l'installation d'osmose inverse était affectée par un encrassement important dû au biofilm et les membranes devaient être nettoyées fréquemment, ce qui entraînait une baisse drastique des performances. En outre, l'usine fonctionnait à un taux de conversion inférieur à celui prévu, en raison du pouvoir d'encrassement élevé de l'eau et de l'utilisation d'un agent antitartre non spécifique à large spectre formulé avec du phosphore organique.

Le traitement avec un antitartre spécifique et biodégradable, formulé à partir d'un mélange synergique d'ingrédients actifs sans phosphore, et l'utilisation d'un nettoyant respectueux de l'environnement ont permis une gestion durable de l'installation d'osmose inverse, avec une augmentation de l'utilisation d'eau réutilisée, des économies sur la consommation d'eau et une réduction des rejets. Des économies d'énergie ont été réalisées et les émissions de CO ont été réduites. Les coûts liés au remplacement des membranes, à l'immobilisation de l'usine pour le nettoyage et à la consommation de produits chimiques ont également été réduits.



## 1 INTRODUCTION

La pénurie d'eau résultant de la croissance démographique constitue une menace pour la croissance économique, la sécurité de l'eau et la santé des écosystèmes. L'industrie consomme de grandes quantités d'eau et produit des quantités importantes d'eaux usées. Si ces eaux usées ne sont pas traitées de manière adéquate, leur rejet entraîne une pollution de l'environnement, ce qui nuit aux écosystèmes aquatiques et à la santé publique. L'exploitation accrue des ressources en eau en raison de l'augmentation de la demande, les problèmes liés au changement climatique tels que les sécheresses, la pollution des milieux aquatiques, les réglementations plus strictes et l'augmentation du prix de l'eau font de la réutilisation de l'eau une nécessité croissante pour garantir la quantité et la qualité de l'eau. La réutilisation de l'eau minimise le volume et le risque environnemental des eaux usées rejetées et réduit également la pression exercée sur les écosystèmes par le captage de l'eau.

Dans de nombreuses installations industrielles telles que l'industrie chimique, les centrales électriques ou l'industrie pétrolière, les systèmes de refroidissement sont responsables d'une grande partie de la consommation d'eau. Dans les tours de refroidissement, l'eau se perd par évaporation, entraînement et par des purges. La réutilisation de la purge est une source alternative d'eau qui peut être utilisée pour alimenter les tours de refroidissement ou les chaudières. Les propriétés de l'eau de purge dépendent de la qualité de l'eau d'alimentation de la tour de refroidissement, du nombre de cycles de concentration qui augmentent la salinité et les espèces d'encrassement dans l'eau, du degré de contamination microbiologique et des produits chimiques dosés par le traitement antitartre, anticorrosion et biocide de la tour (Ahmed *et al.*, 2020). L'osmose inverse est l'une des technologies les plus utilisées pour la réutilisation des purges des tours de refroidissement, car elle est efficace dans la plage de salinité des purges, et un taux de récupération élevé est obtenu avec une eau traitée de haute qualité. Il est nécessaire de concevoir un prétraitement par osmose inverse approprié, en fonction de la qualité de l'eau de purge. Lorsque l'eau perméable provenant de l'osmose inverse est réutilisée pour alimenter les tours de refroidissement, elle est mélangée à l'eau d'alimentation, ce qui permet de réduire la consommation, d'améliorer la qualité de l'eau d'alimentation, de faire fonctionner la tour à un plus grand nombre de cycles de concentration et de réduire les rejets.

Outre le coût énergétique de l'exploitation des installations d'osmose inverse, le coût de remplacement des membranes est également important. Le remplacement des membranes dépend de leur durée de vie. Les membranes sont remplacées lorsque les performances souhaitées ne sont pas atteintes, c'est-à-dire lorsqu'elles ne produisent pas un flux de perméat suffisant ou que le rejet de sel est réduit, ce qui se traduit par une eau à forte conductivité. Deux types de facteurs réduisent les performances des membranes et, par conséquent, leur durée de vie utile, ce qui entraîne une augmentation de la consommation d'énergie, des coûts d'exploitation et de l'impact sur l'environnement. D'une part, il y a les facteurs inhérents à la membrane et à l'installation, à savoir le vieillissement de la membrane et la configuration de l'installation. Lorsqu'une membrane est installée, ses performances diminuent progressivement en raison de la température, de la pression et de la durée de fonctionnement. D'autre part, il existe des facteurs qui peuvent être minimisés pour prolonger la durée de vie de la membrane, à savoir les effets de l'encrassement, la fréquence et l'efficacité du nettoyage chimique de la membrane. L'encrassement des membranes est un problème persistant dans tous les systèmes d'osmose inverse. La perte de performance de la membrane est principalement causée par quatre types d'encrassement : l'encrassement métallique, causés par la précipitation de sels inorganiques peu solubles et d'oxydes/hydroxydes métalliques dans le rejet ; l'adsorption de matières organiques ; la formation de biofilms à la surface de la membrane due à l'activité de micro-organismes ; et le colmatage de la surface de la membrane dû au dépôt de matières colloïdales et particulaires (Weinrich *et al.*, 2013 et Goh *et al.*, 2018). Afin de maximiser la récupération des systèmes d'osmose inverse, de prévenir l'encrassement et d'obtenir une réutilisation maximale des purges des systèmes de refroidissement, il est nécessaire de concevoir un traitement approprié et adapté à chaque usine.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'augmentation des performances, les économies d'eau et d'énergie, la réduction des coûts d'exploitation et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> résultant de l'utilisation d'un antitartre biodégradable sans phosphore spécialement conçu, et d'un nettoyant ne contenant ni EDTA ni

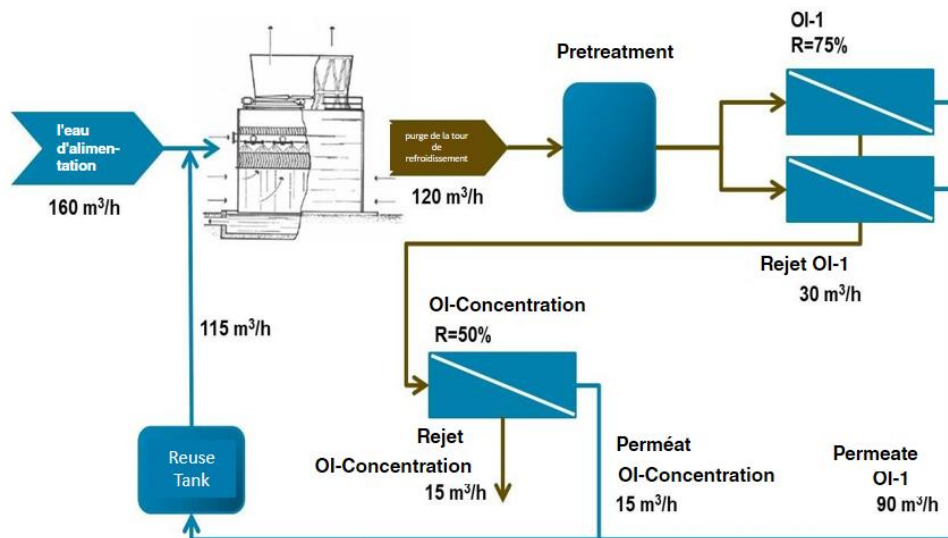


phosphore dans sa formulation dans une véritable installation d'osmose inverse traitant l'eau de purge de la tour de refroidissement en vue de sa réutilisation.

## 2 ÉTUDE DE CAS D'UNE INSTALLATION D'OSMOSE INVERSE TRAITANT L'EAU DEPURGE D'UNE TOUR DE REFROIDISSEMENT EN VUE DE SA RÉUTILISATION

### 2.1 Description de l'usine avant l'intervention d'ADIQUIMICA

La figure 1 montre le diagramme de processus pour la réutilisation de la purge de la tour de refroidissement de l'usine de l'étude de cas réelle.



**Figure 1.** Organigramme du processus de réutilisation de la purge de la tour de refroidissement.

En raison du processus de concentration qui a lieu dans les tours de refroidissement, la purge contient une forte concentration de sels. Le débit de purge de 120 m³/h est traité pour réutilisation par deux lignes égales d'osmose inverse avec prétraitement. Chaque ligne d'osmose inverse se compose de deux étapes, fonctionnant à une conversion de 75 %. Un débit de perméat total de 90 m³/h est obtenu et réutilisé pour alimenter les tours de refroidissement.

Afin d'augmenter le débit réutilisé en entrée des tours de refroidissement, le débit de rejet de 30 m³/h provenant des lignes d'osmose inverse qui traitent les purges alimente une osmose inverse pour la récupération des rejets. Cette eau présente une forte concentration de sels. En raison du processus de concentration de la salinité qui a lieu à l'intérieur des membranes d'osmose inverse, il est possible que des composés inorganiques insolubles dépassent la limite de solubilité et précipitent à la surface des membranes. Le rejet est l'endroit où le risque de précipitation est le plus élevé, en raison de la forte concentration de composants salins insolubles. Le débit de perméat provenant de l'installation de récupération des rejets est également réutilisé pour alimenter les tours de refroidissement. L'installation de récupération des rejets par osmose inverse se compose de deux étages avec une configuration de trois tubes de pression dans le premier étage et de deux tubes dans le deuxième étage. Chaque tube contient 6 membranes 8040 HYDRANAUTICS ESPA2-LD.

Avant l'intervention d'ADIQUIMICA, pour prévenir la formation de tartre sur les membranes d'osmose inverse, un traitement conventionnel était effectué avec le dosage d'un anti-tartre non spécifique à large spectre formulé à base de phosphore organique. Les performances de l'osmose inverse pour la récupération des rejets étaient limitées par le potentiel d'entartrage élevé du sulfate de calcium dans les rejets. La formation de tartre à base de sulfate de calcium se produit lorsque les espèces

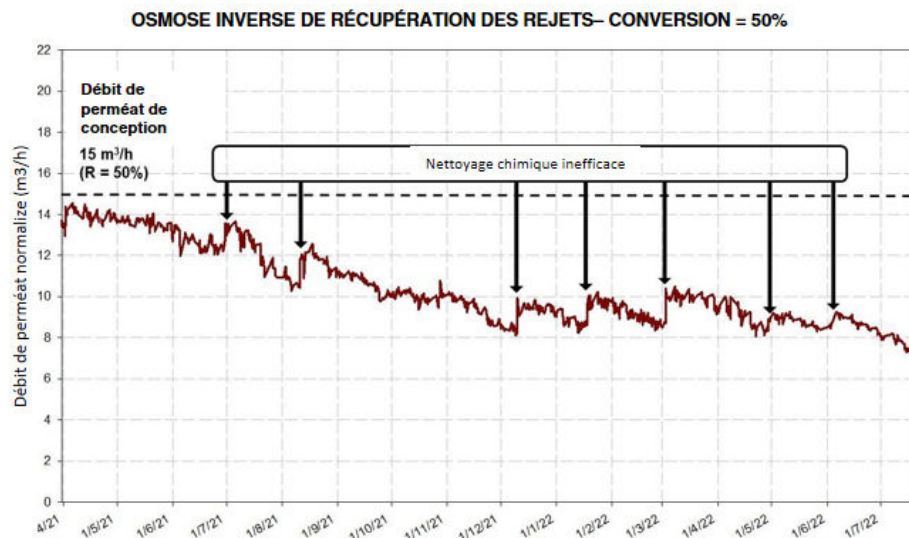


ioniques individuelles de sulfate et de calcium atteignent une concentration qui dépasse les limites de solubilité. La sursaturation du sulfate de calcium entraîne la formation de tartre. Le sulfate de calcium est un sel cristallin qui précipite sous forme d'aiguilles formant des rosettes ou des étoiles très stables, qui se développent sous forme de tartre très difficile à éliminer. La solubilité du sulfate de calcium en fonction de la température est similaire à celle du carbonate de calcium, c'est-à-dire que la solubilité diminue avec l'augmentation de la température. Cependant, alors que la précipitation du carbonate de calcium peut être minimisée en diminuant le pH par un dosage d'acide, la solubilité du sulfate de calcium dépend très peu du pH. Il n'est donc pas possible d'empêcher la précipitation du sulfate de calcium en abaissant le pH de l'alimentation et, par conséquent, il n'est pas possible d'éliminer le tartre en utilisant des agents de nettoyage acides. L'encrassement par le sulfate de calcium entraîne une diminution du débit du perméat, une augmentation de la pression d'alimentation, une augmentation du Delta P et une augmentation du passage des sels. Cet effet est plus important pour les membranes situées dans les dernières positions de l'installation.

Le taux de conversion prévu pour la récupération des rejets par osmose inverse était de 65 %. Cependant, en raison du fort potentiel d'encrassement par le sulfate de calcium de l'eau contenue dans le concentrat, le dosage de l'antitartre à large spectre n'a pas permis d'empêcher la précipitation de ce sulfate. Afin de protéger les membranes contre l'encrassement par le sulfate de calcium, la conversion a été abaissée à 50 %. En opérant à une conversion inférieure à celle prévue, les potentiels d'encrassement du sulfate de calcium et d'autres espèces insolubles ont été réduits. Le pouvoir d'encrassement de l'eau à une conversion de 50 % se situait dans les limites d'efficacité de l'antitartre à large spectre. Cependant, le débit de perméat à réutiliser a été réduit à 15 m<sup>3</sup>/h. Par conséquent, la réutilisation totale des purges des tours de refroidissement était de 87,5 %, ce qui correspondait à la somme du débit de perméat des deux lignes d'osmose inverse traitant les purges (90 m<sup>3</sup>/h) et du débit de perméat de l'osmose inverse de récupération des rejets (15 m<sup>3</sup>/h). Le rejet total du système de réutilisation était de 15 m<sup>3</sup>/h.<sup>3</sup>

D'autre part, l'installation de récupération des rejets présentait des symptômes d'encrassement grave, qui nécessitaient un nettoyage chimique fréquent. La figure 2 montre l'évolution du débit de perméat normalisé. Les paramètres normalisés sont les meilleurs indicateurs de l'encrassement des membranes. La normalisation des données d'exploitation a été réalisée conformément à la norme *ASTM D 4516 Standard Practice for Standardizing Reverse Osmosis Performance Data* (American Society for Testing Materials, 2010). La performance d'une installation d'osmose inverse est influencée par la composition de l'eau d'alimentation, la pression d'alimentation, la température et la conversion. Toute variation de l'une de ces variables entraîne une variation de la productivité et de la qualité de l'eau perméable. La normalisation permet de distinguer si la perte de performance est due à la variation de ces variables ou si elle est due à l'encrassement. Le débit de perméat normalisé est calculé à partir du débit de perméat de l'installation, corrigé des variables de composition, de température et de pression au moment de la mesure du débit, et comparé à une valeur de référence. Par conséquent, une perte de performance dans les paramètres normalisés est attribuée uniquement aux processus d'encrassement.

Les données normalisées indiquent que, pendant la période étudiée, le débit de perméat normalisé a diminué progressivement de 46 %, passant de 14 à 7,5 m<sup>3</sup>/h. Sept nettoyages chimiques ont été effectués sur une période d'un an. La fréquence élevée des nettoyages et les protocoles de nettoyage appliqués se sont révélés inefficaces et n'ont pas permis de rétablir le débit de perméat normalisé.



**Figure 2** : Débit de perméat normalisé de l'OI de récupération des rejets. Débit de conception fonctionnant à une conversion de 50 % et à une fréquence de nettoyage chimique.

### 3 ACTIONS D'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DE L'USINE D'OSMOSE INVERSE POUR LA RÉCUPÉRATION DES REJETS

Afin d'augmenter les performances de la récupération des rejets par osmose inverse, ADIQUIMICA a mis en place deux actions d'amélioration :

1. Augmenter la conversion de l'usine et minimiser le volume de rejet en dosant un antitartre spécifique pour inhiber la précipitation du sulfate de calcium, formulé à partir d'un mélange synergique d'ingrédients actifs biodégradables et exempts de phosphore.
2. Mettre en œuvre un protocole de nettoyage efficace pour restaurer les performances de la membrane et établir un programme préventif pour minimiser l'encrassement et la fréquence des nettoyages.

#### 3.1 Stratégie pour augmenter la conversion de l'osmose inverse de récupération des rejets

##### 3.1.1 Agent antitartre biodégradable, sans phosphore, spécifiquement destiné à inhiber la formation d'encrassements par le sulfate de calcium.

Afin d'augmenter la conversion de la récupération des rejets par osmose inverse à la valeur nominale de 65%, l'antitartre spécifique ADIC RO-64 AdicGreen a été développé avec une grande efficacité pour inhiber la formation de tartre de sulfate de calcium dans les systèmes membranaires. Il est également efficace contre la formation d'autres dépôts inorganiques tels que le carbonate de calcium, le sulfate de baryum, le sulfate de strontium, le fluorure de calcium et le phosphate de calcium, ainsi que contre la formation de dépôts de fer, d'aluminium, de silice et de manganèse.

Les antitartres contenant du phosphore dans leur formulation sont largement utilisés pour le contrôle du tartre dans les systèmes d'osmose inverse. Toutefois, leur faible biodégradabilité et leur teneur en phosphore sont parmi les raisons qui suscitent des inquiétudes quant à l'impact environnemental du rejet de



ces composés. Lorsque des produits antitartre contenant du phosphore sont rejetés, ils peuvent constituer une source de nutriments pour les algues et les bactéries et provoquer une eutrophisation (Fritzmann *et al.*, 2007). Par conséquent, les réglementations environnementales et les exigences de qualité des rejets des installations d'osmose inverse deviennent de plus en plus restrictives en ce qui concerne le rejet des produits chimiques utilisés dans le traitement de l'eau. Dans ce contexte, l'anti-tartre développé est formulé à partir d'un mélange synergique d'ingrédients actifs qui ne contiennent pas de phosphore dans leur composition. De plus, il s'agit d'un produit biodégradable selon la méthode standard pour l'évaluation de la biodégradabilité OCDE 302 B (OCDE, 1992). Les tests de biodégradabilité déterminent la susceptibilité de l'antitartre à la dégradation microbienne dans des conditions ambiantes, de sorte que son innocuité puisse être établie lorsqu'il est rejeté. Dans les tests expérimentaux, le processus de biodégradation est contrôlé en déterminant la DCO (demande chimique en oxygène) de différents mélanges contenant l'antitartre développé, des nutriments et des boues actives sur une période de 28 jours.

### **3.1.2 Logiciel pour la conception de traitements antitartre, la modélisation des équilibres ioniques de l'eau et la prédiction des potentiels d'encrassement**

Afin de concevoir le traitement antitartre optimal fonctionnant à la conversion nominale de 65%, il est essentiel, d'une part, de modéliser avec précision la composition et le comportement de l'eau à l'intérieur des membranes, et de prédire très précisément la formation de tartre. D'autre part, il est également essentiel de disposer d'un modèle de dosage de l'antitartre. L'application ADICRO est un logiciel entièrement développé par ADIQUIMICA (Adroer *et al.*, 2001), qui depuis plus de 30 ans répond à ces objectifs en fournissant des connaissances et un traitement efficace des installations d'osmose inverse avec une minimisation des coûts d'exploitation et de l'impact sur l'environnement. Il s'agit d'un programme en constante amélioration et innovation, basé sur les connaissances acquises en laboratoire et dans les installations pilotes, sur l'expérience acquise dans les installations réelles et sur la bibliographie scientifique la plus récente. Le logiciel ADICRO permet de déterminer très précisément les potentiels d'encrassement et de calculer le dosage minimum d'antitartre pour assurer une protection complète des membranes.

### **3.1.3 Conception d'un traitement antitartre pour un système de récupération des rejets par osmose inverse**

L'objectif de l'étude était de déterminer le dosage optimal de l'antitartre spécifique pour fonctionner à la conversion nominale de 65% sans risque d'entartrage par le sulfate de calcium. Une étude de simulation a été réalisée à l'aide du logiciel ADICRO sur la base de la composition de l'eau d'alimentation de l'installation de récupération des rejets par osmose inverse, avec une concentration élevée de sulfate (3368 mg/L  $\text{SO}_4$ ) et de calcium (1316 mg/L Ca). Le tableau 1 montre la composition de l'eau d'alimentation et de l'eau de rejet à 65 % de conversion.

Le logiciel ADICRO a été utilisé pour calculer le pouvoir d'encrassement de l'eau de rejet fonctionnant à une conversion de 65 % et le dosage optimal de l'antitartre spécifique pour prévenir l'encrassement. Le logiciel ADICRO calcule les potentiels d'encrassement, ce qui permet de déterminer le risque d'encrassement dans le rejet. Le potentiel d'encrassement est exprimé en pourcentage de la limite maximale admissible pour les différents taux de sursaturation et d'encrassement. Un potentiel d'encrassement supérieur à 100 % signifie que l'indice de sursaturation correspondant est supérieur à la limite maximale admissible pour cet indice et que le composé insoluble peut précipiter. Les résultats de la simulation ont indiqué que les potentiels d'encrassement sans traitement antitartre du carbonate de calcium, du sulfate de calcium, du fluorure de calcium, du phosphate de calcium, du sulfate de strontium, du fer et de la silice dépassaient la valeur de 100

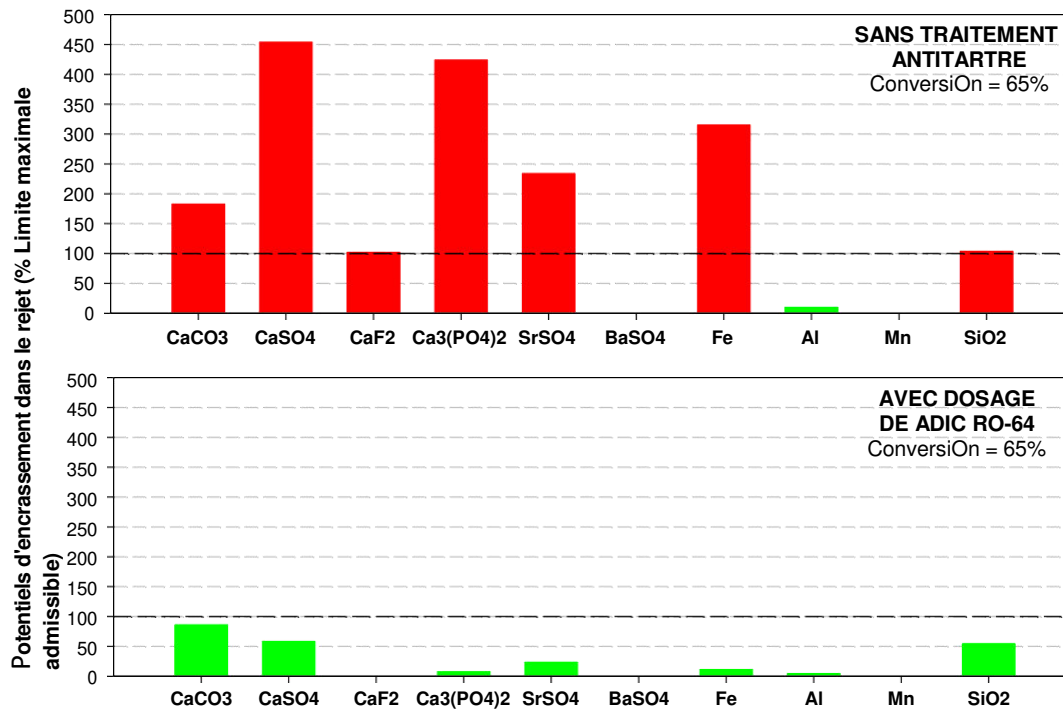
%, indiquant qu'il y avait un risque d'encrassement de la membrane par ces composés. Avec le dosage de l'antitartre spécifique, les potentiels d'encrassement pour ces composés insolubles ont diminué pour atteindre des valeurs inférieures à 100 %.



**Tableau 1.** Composition de l'eau d'alimentation de l'osmose inverse de récupération des rejets et de l'eau du concentré à 65 % de conversion

<b>Paramètres</b>	<b>Approvisionnement en eau</b>	<b>Rejeter l'eau (Conversion=65%) simulé (logiciel ADICRO)</b>
pH	7.50	7.78
Calcium	1316 mg/L Ca	3730 mg/L Ca
Magnésium	353 mg/L Mg	1001 mg/L Mg
Sodium	1185 mg/L Na	3361 mg/L Na
Potassium	95 mg/L K	269 mg/L K
Strontium	10,2 mg/L Sr	28,9 mg/L Sr
Le fer	0,12 mg/L Fe	0,33 mg/L Fe
Aluminium	0,04 mg/L Al	0,12 mg/L Al
Sulfate	3368 mg/L SO <sub>4</sub>	9546 mg/L SO <sub>4</sub>
Chlorure	2563 mg/L Cl	7264 mg/L Cl
Fluorure	0,39 mg/L F	2,52 mg/L F
Bicarbonate	255,2 mg/L HCO <sub>3</sub>	583,9 mg/L HCO <sub>3</sub>
Carbonates	3,3 mg/L de CO <sub>3</sub>	21,9 mg/L CO <sub>3</sub>
LE CO <sub>2</sub>	13,3 mg/L H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	13,3 mg/L H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Nitrate	103 mg/L NO <sub>3</sub>	292 mg/L NO <sub>3</sub>
Silice	45 mg/L SiO <sub>2</sub>	128 mg/L SiO <sub>2</sub>
Phosphate	0,17 mg/L PO <sub>4</sub>	0,49 mg/L PO <sub>4</sub>
Force ionique	0.173	0.436

La figure 3 montre les résultats simulés de la réduction des potentiels d'entartrage de l'eau de rejet avec le dosage de l'agent antitartre spécifique. On peut conclure qu'avec le dosage de l'antitartre spécifique et le fonctionnement à la conversion nominale de 65 %, le système est parfaitement protégé contre l'encrassement et la formation de tartre, y compris le sulfate de calcium.



**Figure 3** : Potentiels d'encrassement dans le rejet pour chaque espèce insoluble sans traitement antitartre et avec dosage de l'antitartre spécifique fonctionnant à 65% de conversion.

## 3.2 Stratégie de contrôle et de prévention de l'encrassement des membranes d'osmose inverse

### 3.2.1 Caractérisation de l'encrassement des membranes

L'installation de récupération des rejets présentait des symptômes d'encrassement sévère, qui nécessitaient un nettoyage chimique fréquent. Afin de caractériser l'encrassement affectant les membranes, une autopsie d'un élément HYDRANAUTICS ESPA2-LD de la première position du premier étage de l'installation de récupération des rejets a été réalisée.

Les résultats de l'autopsie ont indiqué que la surface de la membrane était contaminée par une couche abondante de dépôts (Figure 4) correspondant principalement à un biofilm (Vrouwenvelder *et al.*, 2010 et Matin *et al.*, 2011).



**Figure 4** : Aspect de la surface de la membrane et de l'espaceur en plastique pour le rejet des aliments, fortement contaminés par le biofilm.





### **3.2.2 Protocole de nettoyage efficace et programme préventif de lutte contre l'encrassement**

Les nombreux nettoyages chimiques effectués avant l'intervention d'ADIQUIMICA n'ont pas été efficaces. C'est pourquoi, après avoir déterminé la composition et le mécanisme d'encrassement des membranes par autopsie, des essais de nettoyage ont été réalisés dans une installation pilote d'osmose inverse en utilisant des échantillons de la membrane autopsiée. L'objectif des tests de nettoyage était de concevoir le protocole de nettoyage le plus efficace pour l'élimination du biofilm en tenant compte des critères environnementaux et économiques.

#### **3.2.2.1 Produit de nettoyage respectueux de l'environnement, sans phosphore ni EDTA**

Les produits et les protocoles de nettoyage jouent un rôle clé dans le rétablissement des performances des membranes. Les protocoles de nettoyage standard utilisant des produits chimiques génériques sont souvent inefficaces et n'éliminent pas l'encrassement. Si les produits de nettoyage ne sont pas appropriés, l'efficacité souhaitée peut ne pas être atteinte ou la membrane peut être endommagée. L'utilisation de nettoyeurs formulés garantit une grande efficacité et une compatibilité avec les membranes, ce qui prolonge leur durée de vie. Les nettoyeurs formulés sont un mélange d'ingrédients qui agissent en synergie. Ces produits contiennent des ingrédients actifs qui éliminent des salissures spécifiques.

Les produits de nettoyage contenant de l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA) et du phosphore dans leur formulation sont largement utilisés pour le nettoyage des membranes d'osmose inverse. Cependant, leur biodégradabilité et leur teneur en phosphore sont parmi les raisons de l'inquiétude croissante concernant l'impact environnemental du rejet de ces composés. Le fait que l'EDTA ne soit pas biodégradable signifie qu'il se retrouve en quantités considérables dans l'eau, ce qui a de graves conséquences pour l'environnement. Les rejets de produits contenant du phosphore peuvent entraîner une eutrophisation car ils constituent une source de nutriments pour les algues et les bactéries.

Les nettoyages chimiques ont été effectués à l'aide du nettoyeur liquide innovant et écologique ADICLEAN 202 AdicGreen. Il s'agit d'un nettoyeur liquide au pH alcalin, qui ne contient ni EDTA ni phosphore dans sa formulation. Il s'agit d'un produit hautement formulé contenant des ingrédients actifs respectueux de l'environnement qui remplacent les ingrédients actifs non biodégradables qui contribuent à l'eutrophisation. Il est très efficace pour éliminer le biofilm et l'encrassement par l'alumino-silicate (argile). Il est efficace à faible dose et économiquement viable. Son utilisation réduit les coûts d'exploitation et minimise l'impact environnemental de l'élimination.

#### **3.2.2.2 Optimisation du protocole de nettoyage chimique pour l'élimination du biofilm**

Les résultats des tests de nettoyage ont indiqué que le protocole de nettoyage le plus efficace pour éliminer le biofilm et restaurer les performances de la membrane se compose des étapes suivantes :

1. Désinfection à l'aide du biocide non oxydant compatible avec les membranes d'osmose inverse ADICLEAN 128.
2. Nettoyage avec un produit alcalin ADICLEAN 202 AdicGreen formulé avec la capacité de pénétrer, d'atteindre et d'éliminer complètement les couches internes du biofilm. Le nettoyeur est également efficace pour éliminer les alumino-silicates.

Le protocole de nettoyage a été conçu conformément aux recommandations du fabricant de la membrane concernant la pression, le débit, le pH et la température de la solution de nettoyage.

#### **3.2.2.3 Programme d'entretien pour le contrôle des biofilms**

Il a été recommandé d'appliquer un programme d'entretien pour le contrôle du biofilm avec un biocide non oxydant compatible avec les membranes d'osmose inverse. Cela a permis de minimiser et de contrôler la croissance microbologique à la surface des membranes d'osmose inverse.



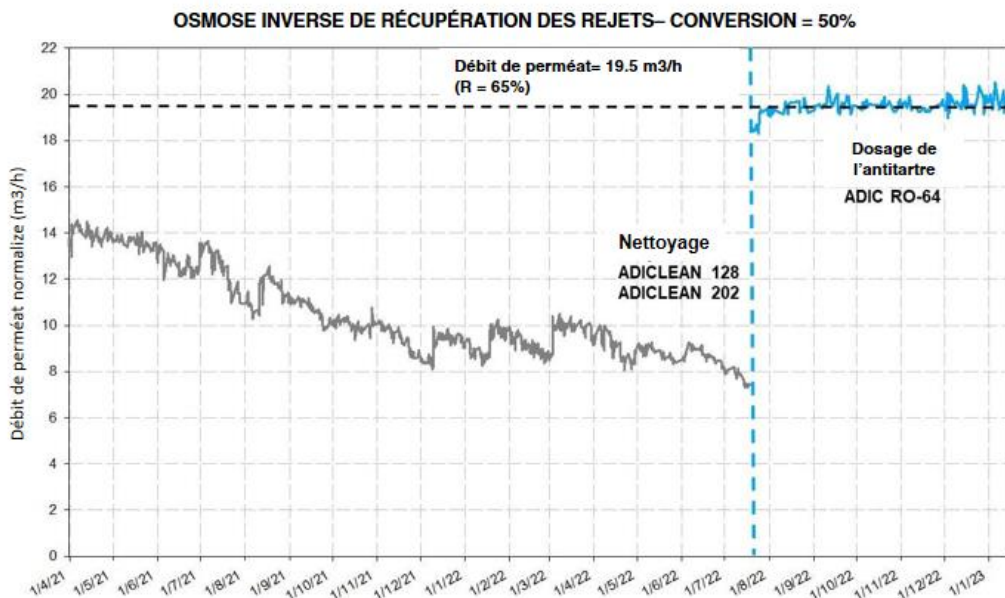
## 4 RÉSULTATS DES ACTIONS D'AMÉLIORATION

### 4.1 Des performances accrues

En juillet 2022, la solution intégrale proposée par ADIQUIMICA a été appliquée à l'usine d'osmose inverse pour la récupération des rejets, ce qui a consisté à mettre en œuvre les actions d'amélioration suivantes :

1. Le protocole de nettoyage chimique combinant le biocide non oxydant ADICLEAN 128 et le nettoyant écologique ADICLEAN 202 AdicGreen a été appliqué.
2. Le dosage de l'antitartre biodégradable sans phosphore ADIC RO-64 AdicGreen a été lancé avec une grande efficacité dans l'inhibition de la formation de tartre de sulfate de calcium, ce qui a augmenté la conversion de l'usine jusqu'à la valeur prévue de 65%.
3. Le programme d'entretien pour le contrôle du biofilm a été appliqué.

La figure 5 montre l'évolution du débit de perméat normalisé avant et après l'application des mesures d'amélioration. En appliquant le protocole de nettoyage proposé, la performance de la membrane a été rétablie à ses valeurs de conception. Le dosage de l'antitartre spécifique pour le sulfate de calcium a permis d'augmenter la conversion de l'usine jusqu'à la valeur de conception de 65 %, avec un débit de perméat normalisé moyen de 19,5 m<sup>3</sup> /h. Le débit de perméat normalisé a augmenté de 30 % avant et après l'application des mesures d'amélioration. Le débit de perméat normalisé a augmenté de 30 % par rapport au débit de conception précédent, lorsque l'usine fonctionnait à une conversion de 50 %. Le dosage d'un antitartre spécifique et le programme d'entretien pour le contrôle du biofilm ont permis de maintenir le débit de perméat stable à la valeur maximale prévue, sans aucun symptôme de formation de tartre ou d'encrassement par le biofilm. L'usine a fonctionné pendant 6 mois sans arrêt pour nettoyage chimique, prolongeant ainsi la durée de vie utile des membranes.



**Figure 5 :** Évolution du débit de perméat normalisé après la mise en œuvre des mesures d'amélioration.



## 4.2 Économies d'eau et d'énergie, réduction des coûts et contribution au développement durable

La haute efficacité de l'antitartre et du nettoyant liquide respectueux de l'environnement, ainsi que le traitement d'entretien approprié, ont permis d'améliorer les performances de l'usine en augmentant la conversion et en évitant l'encrassement de la membrane. Ces performances accrues ont permis d'augmenter le débit du perméat tout en fonctionnant à des pressions d'alimentation plus faibles, réduisant ainsi les coûts énergétiques et l'empreinte carbone. Les économies d'énergie et les réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> obtenues grâce à la mise en œuvre des mesures d'amélioration ont été déterminées. La consommation d'énergie spécifique, qui correspond à la consommation d'énergie par m<sup>3</sup> d'eau perméable exprimée en kWh/m<sup>3</sup> (Li, 2013), et les émissions de CO<sub>2</sub> (Ministère de la transition écologique, 2022) ont été calculées dans les scénarios suivants : (a) avant l'intervention d'ADIQUIMICA et (b) après la mise en œuvre des actions d'amélioration. Le tableau 3 correspond au calcul de la consommation d'énergie spécifique et des émissions de CO<sub>2</sub> dans les conditions de fonctionnement de chaque scénario.

Les résultats indiquent qu'en juillet 2022, avant l'intervention d'ADIQUIMICA, en raison de l'encrassement massif des membranes, l'usine fonctionnait à une pression d'alimentation de 18,8 bars, ce qui correspond à la limite maximale de la pompe. Cette pression élevée entraînait une forte consommation d'énergie. Bien que fonctionnant à la pression maximale, le flux de perméat produit était de 8,9 m<sup>3</sup> /h avec un taux de conversion de 31%. Ces valeurs sont nettement inférieures aux conditions initiales de conception qui prévoyaient une production de 15 m<sup>3</sup> /h avec un taux de conversion de 50 %. La consommation d'énergie spécifique nécessaire était de 2,12 kWh/m<sup>3</sup>.

Avec la mise en œuvre des mesures d'amélioration, les performances de l'usine ont augmenté. En janvier 2023, le débit de perméat est passé à 19,4 m<sup>3</sup> /h, avec un taux de conversion de 65 %. La consommation d'énergie spécifique dans ces conditions était de 0,76 kWh/m<sup>3</sup>. Par conséquent, le débit a été augmenté de 118 % et la consommation d'énergie spécifique a été réduite de 64 % par rapport aux conditions de fonctionnement avec les membranes affectées par un encrassement massif. Ces résultats conduisent à une économie d'énergie annuelle de 6141 €, en supposant un coût de l'électricité de 0,17 €/KW. La réduction annuelle des émissions de CO<sub>2</sub> était de 17,7 tonnes, ce qui correspond à une réduction de 35 %.

**Tableau 3.** Énergie spécifique et émissions de CO<sub>2</sub> avant et après la mise en œuvre des mesures d'amélioration dans l'installation de récupération des rejets.

Date	Juillet 2022 (Avant l'intervention d'ADIQUIMICA)	janvier 2023 (Après la mise en œuvre des actions d'amélioration d'ADIQUIMICA)
Débit de perméat	8,9 m <sup>3</sup> /h	19,4 m <sup>3</sup> /h
Débit d'alimentation	29,2 m <sup>3</sup> /h	29,8 m <sup>3</sup> /h
Conversion	31 %	65 %
Pression d'alimentation	18,8 bar	14,4 bar
Consommation d'énergie spécifique par m <sup>3</sup> de perméat	2,12 kWh/m <sup>3</sup>	0,76 kWh/m <sup>3</sup>
Consommation d'énergie	18,9 kWh	14,7 kWh
Consommation annuelle d'énergie	165284 kWh/an	129157 kWh/an
Coût annuel de l'électricité	28098 €	21957 €



Date	Juillet 2022 (Avant l'intervention d'ADIQUIMICA)	janvier 2023 (Après la mise en œuvre des actions d'amélioration d'ADIQUIMICA)
Émissions de CO <sub>2</sub>	51,2 Tn/an	33,5 Tn/an

Les actions d'amélioration ont également conduit à une gestion durable en augmentant l'utilisation de l'eau réutilisée comme eau d'apport pour les tours de refroidissement. La consommation d'eau et les rejets ont été réduits, ce qui a permis de réaliser des économies. Des produits chimiques biodégradables et respectueux de l'environnement sont utilisés pour minimiser l'impact de leur rejet dans l'environnement. La minimisation des problèmes d'encrassement a permis de réduire les coûts liés aux arrêts de l'usine pour le nettoyage chimique, à la consommation de produits chimiques et au remplacement des membranes en raison de l'augmentation de leur durée de vie utile.

## 5 CONCLUSIONS

La qualité de l'eau est l'un des principaux facteurs qui limitent le fonctionnement des installations d'osmose inverse. La conception d'un traitement durable et spécifique pour les installations d'osmose inverse qui traitent l'eau de purge des tours de refroidissement en vue de sa réutilisation permet de réduire la consommation d'eau d'alimentation des tours de refroidissement et de minimiser les rejets d'eau, ce qui se traduit par des économies et des avantages pour l'environnement.

Les performances de l'osmose inverse ont été améliorées par l'application d'un traitement personnalisé comprenant le nettoyage chimique des membranes à l'aide d'un nettoyant respectueux de l'environnement ne contenant ni EDTA ni phosphore dans sa formulation, le dosage d'un antitartre biodégradable, sans phosphore, très efficace pour inhiber la formation de tartre à base de sulfate de calcium, et l'application d'un programme d'entretien pour le contrôle du biofilm. Ces actions d'amélioration ont permis d'atteindre les objectifs suivants :

- Éliminer l'encrassement massif qui affecte les membranes et rétablir leurs performances aux valeurs de conception.
- Augmenter les performances de l'usine en augmentant la conversion jusqu'à la valeur nominale, en évitant l'encrassement.
- Réduire la consommation d'énergie et les coûts en fonctionnant à une pression d'alimentation plus faible.
- Réduire l'empreinte carbone en réduisant les émissions de CO<sub>2</sub>.
- Augmenter le flux d'eau recyclée en vue de sa réutilisation et réduire les rejets.
- Maintenir des membranes propres et ne pas arrêter l'usine pour le nettoyage chimique, ce qui réduit les coûts associés aux arrêts et à la consommation de produits chimiques.
- Prolonger la durée de vie des membranes, en réduisant les coûts liés à leur remplacement.
- Utiliser des produits chimiques biodégradables et respectueux de l'environnement qui minimisent l'impact de leur rejet dans l'environnement.

## 6 BIBLIOGRAPHIE

Adroer, M., Bodas, J., Coma, J., 2001. Treatment calculation programme for reverse osmosis installations. *Water Technology* 215, 58-74.

Ahmed, J., Jamal, J., Shujaatullah, M., 2020. Recovery of cooling tower blowdown water through reverse osmosis (RO) : review of water parameters affecting membrane fouling and pretreatment schemes. *Desalination and Water Treatment* 189, 9-17.



- American Society for Testing and Materials (ASTM), 2015. Standard Test Method for Modified Fouling Index(MFI-0.45), ASTM Designation D8002-15E1, Annual Book of ASTM Standards, Volume 11.02.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., Melin, T., 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination* 216, 1-76.
- Goh, P.S., Lau, W.J., Othman, M.H.D., Ismail, A.F., 2018. L'encrassement des membranes dans le dessalement et ses stratégies d'atténuation. *Desalination* 425, 130-155.
- Li M., 2013. A unified model-based analysis and optimization of specific energy consumption in BWRO and SWRO ", *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, 17241-17248.
- Matin, A., Khan, Z., Zaidi, S.M.J., Boyce, M.C., 2011. Biofouling in reverse osmosis membranes for seawater desalination : phenomena and prevention. *Desalination* 281, 1-16.
- Ministère de la transition écologique, 2022. Guide pour le calcul de l'empreinte carbone et l'élaboration du plan d'amélioration d'une organisation. TYPE : 280-14-241-8
- OCDE, 1992. Lignes directrices de l'OCDE pour les essais de produits chimiques 302B. Test Zahn-Wellens/EMPA.
- Weinrich, L., Haas, C.N., LeChevallier, M.W., 2013. Recent advances in measuring and modeling reverse osmosis membrane fouling in seawater desalination : a review. *Journal of Water Reuse and Desalination* 3(2), 85-101.
- Vrouwenvelder, J.S., Picioreanu, C., Kruithof, J.C., Van Loosdrecht, M.C.M., 2010. Biofouling in spiral wound membrane systems : three-dimensional CFD model based evaluation of experimental data. *Journal of Membrane Science* 346, 71-85.