

EXEMPLE D'APPLICATION PROSIMPLUS

DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

INTERET DE L'EXEMPLE

Cet exemple présente deux technologies de dessalement d'eau de mer. L'une est fondée sur la distillation et l'autre est fondée sur la filtration membranaire (avec l'association en série et/ou parallèle de filtres membranaires). L'intérêt de cet exemple est de présenter ces technologies et de les comparer.

| | | | | |
|------------------|---|--|--|--|
| DIFFUSION | <input checked="" type="checkbox"/> Libre Internet | <input type="checkbox"/> Réservée clients | <input type="checkbox"/> Restreinte | <input type="checkbox"/> Confidentielle |
|------------------|---|--|--|--|

| | |
|---|--|
| FICHIERS PROSIMPLUS CORRESPONDANTS | <p><i>PSPS_EX_FR-Distillation.pmp3</i></p> <p><i>PSPS_EX_FR-V1-1-Etage.pmp3</i></p> <p><i>PSPS_EX_FR-V2-2-Etages-Serie.pmp3</i></p> <p><i>PSPS_EX_FR-V3-2-Etages-Parallele.pmp3</i></p> <p><i>PSPS_EX_FR-V4-Version-Hybride.pmp3</i></p> <p><i>PSPS_EX_FR-V5-1-Etage-ERD.pmp3</i></p> <p><i>PSPS_EX_FR-V6-2-Version-Hybride-ERD.pmp3</i></p> |
|---|--|

Il est rappelé au lecteur que ce cas d'utilisation est un exemple et ne doit pas être utilisé à d'autres fins. Bien que cet exemple soit basé sur un cas réel il ne doit pas être considéré comme un modèle de ce type de procédé et les données utilisées ne sont pas toujours les plus exactes disponibles. Fives ProSim ne pourra en aucun cas être tenu pour responsable de l'application qui pourra être faite des calculs basés sur cet exemple.

Energy

Fives ProSim

Siège social : Immeuble Stratège A - 51 rue Ampère - 31670 Labège - FRANCE

Tél. : +33 (0)5 62 88 24 30

S.A.S. au capital de 147 800 € - 350 476 487 R.C.S. Toulouse - Siret 350 476 487 00037 - APE 5829C - N° TVA FR 10 350 476 487

www.fivesgroup.com / www.fives-prosim.com

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 4 |
| 2 | CONSTITUANTS..... | 5 |
| 3 | MODELE THERMODYNAMIQUE..... | 5 |
| 4 | CONDITIONS OPERATOIRES | 5 |
| 5 | DISTILLATION | 15 |
| 5.1 | Présentation du procédé | 15 |
| 5.2 | Schéma du procédé | 16 |
| 5.3 | Schéma de simulation | 16 |
| 5.4 | Conditions opératoires..... | 17 |
| 5.5 | Initialisation | 19 |
| 5.6 | Résultats..... | 19 |
| 6 | FILTRATION | 21 |
| 6.1 | Présentation du procédé | 21 |
| 6.2 | Schéma du procédé | 22 |
| 6.3 | Un étage de filtration | 22 |
| 6.3.1 | Schéma de simulation | 22 |
| 6.3.2 | Conditions opératoires..... | 23 |
| 6.3.3 | Résultats..... | 23 |
| 6.4 | Deux étages de filtration en série..... | 24 |
| 6.4.1 | Schéma de simulation | 24 |
| 6.4.2 | Conditions opératoires..... | 24 |
| 6.4.3 | Résultats..... | 25 |
| 6.5 | Deux étages de filtration en parallèle | 26 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.5.1 | Schéma de simulation | 26 |
| 6.5.2 | Conditions opératoires | 26 |
| 6.5.3 | Résultats | 27 |
| 6.6 | Version hybride | 27 |
| 6.6.1 | Schéma de simulation | 28 |
| 6.6.2 | Conditions opératoires | 28 |
| 6.6.3 | Résultats | 29 |
| 6.7 | Un étage de filtration avec récupération d'énergie | 30 |
| 6.7.1 | Schéma de simulation | 30 |
| 6.7.2 | Conditions opératoires | 30 |
| 6.7.3 | Résultats | 31 |
| 6.8 | Version hybride avec récupération d'énergie | 32 |
| 6.8.1 | Schéma de simulation | 32 |
| 6.8.2 | Conditions opératoires | 32 |
| 6.8.3 | Résultats | 33 |
| 7 | CONCLUSION..... | 34 |
| 8 | BIBLIOGRAPHIE | 35 |
| | ANNEXE | 36 |

1 INTRODUCTION

Dans certaines régions du monde, l'obtention d'eau potable est un réel défi. Le puisement de l'eau dans des nappes phréatiques ou dans des rivières n'est pas possible ou insuffisant. D'autre part, 97.5% des réserves mondiales en eau sont constituées d'eau de mer ou saumâtres (impropres à la consommation). Dans ce contexte, le dessalement de l'eau de mer est un procédé intéressant pour produire de l'eau potable.

Pour réaliser le dessalement de l'eau de mer, il existe deux technologies majeures :

- La distillation : le procédé consiste à faire bouillir l'eau de mer ou saumâtre concentrée en sel afin d'extraire l'eau potable sous forme de vapeur. Cette vapeur est ensuite condensée. Ce type de procédé est très énergivore car il est fondé sur la vaporisation et la condensation de l'eau (la chaleur de vaporisation de l'eau étant importante $\approx 2\,500$ kJ/kg). Pour ces raisons, des récupérations d'énergie sont mises en place afin de limiter la consommation énergétique du procédé. Une des stratégies de diminution des consommations d'énergie est d'« étager » la vaporisation de l'eau en plusieurs effets, communément appelée évaporation multi-effets [DAN03]. Plusieurs cellules (« flashes ») sont placées les unes à la suite des autres. L'énergie contenue dans le courant vaporisé d'eau potable est transmise à la cellule suivante via une condensation.
- La filtration : ce procédé est fondé sur l'utilisation de membranes semi-perméables. Le principe de fonctionnement des filtres à membranes est détaillé dans l'exemple PSPS_EX_FR–Filtration-Membranaire. Pour résumer, sous l'effet d'une pression supérieure à la pression osmotique du mélange, les espèces peuvent traverser la membrane du côté rétentat vers le côté perméat. La séparation ou la purification d'un courant via un filtre à membrane permet d'obtenir 2 courants sortants : un rétentat (les espèces retenues) et un perméat (les espèces ayant traversé la membrane).

Pour la filtration membranaire, 6 configurations (versions) de filtres à membranes sont présentées :

- Un étage de filtration (V1) ;
- Deux étages de filtration en série, c'est-à-dire qu'un deuxième filtre est placé à la sortie côté rétentat (V2) ;
- Deux étages de filtration en parallèle, c'est-à-dire qu'un deuxième filtre est placé à la sortie côté perméat (V3) ;
- Une version hybride (« industrielle ») présentant une configuration intermédiaire avec des filtres en parallèle et en série (V4) ;
- Un étage de filtration avec un récupérateur d'énergie (V5) ;
- Une version hybride avec un récupérateur d'énergie (V6).

Le but de cet exemple est de comparer l'ensemble des procédés afin de déterminer les avantages et les inconvénients des différentes technologies. Afin de réaliser cette comparaison, les paramètres de l'alimentation (débit et composition) resteront inchangés entre les différents cas d'étude. De plus, pour la comparaison, la surface globale de transfert est conservée. Finalement, le taux de conversion, le taux de rejet et la consommation spécifique (cf. Annexe) seront calculés et comparés.

2 CONSTITUANTS

Les constituants pris en compte pour les différents procédés étudiés ainsi que leurs formules chimiques et leurs numéros CAS¹ sont présentés dans le tableau ci-après. Les propriétés de corps purs sont extraites de la base de données standard des logiciels ProSim [WIL21].

| Constituant | Formule Chimique | Numéro CAS ¹ |
|-----------------|------------------|-------------------------|
| WATER | H ₂ O | 7732-18-5 |
| SODIUM CHLORIDE | NaCl | 7647-14-5 |

Dans un souci de simplification, seul le chlorure de sodium (NaCl) est pris en compte pour la modélisation de l'eau de mer pour les différents cas d'étude. Il est possible de modéliser des systèmes plus complexes présentant plusieurs espèces électrolytiques grâce à un modèle thermodynamique adapté.

¹CAS Registry numbers® are the intellectual property of the American Chemical Society and are used by ProSim SA with the express permission of ACS. CAS Registry Numbers® have not been verified by ACS and may be inaccurate

3 MODELE THERMODYNAMIQUE

Le système considéré est une solution aqueuse de chlorure de sodium. Par conséquent, le profil thermodynamique « Sour water » est retenu pour représenter cette solution électrolytique. Ce modèle thermodynamique est adapté aux contraintes de molalité, de pression et de température rencontrées dans les exemples présentés dans ce document.

4 CONDITIONS OPERATOIRES

Pour l'ensemble des procédés présentés dans ce document, les paramètres suivants resteront inchangés :

- L'alimentation d'eau de mer ;
- Les Windows Scripts permettant de calculer la perméabilité moyenne des unités de filtration ;
- Les conditions opératoires de l'ERD (récupérateur de puissance / « Energy Recovery Device ») ;
- Les paramètres opératoires des filtres à membrane à l'exception de la surface de transfert.

Ces paramètres inchangés sont présentés ci-dessous :

- ✓ Alimentation du procédé

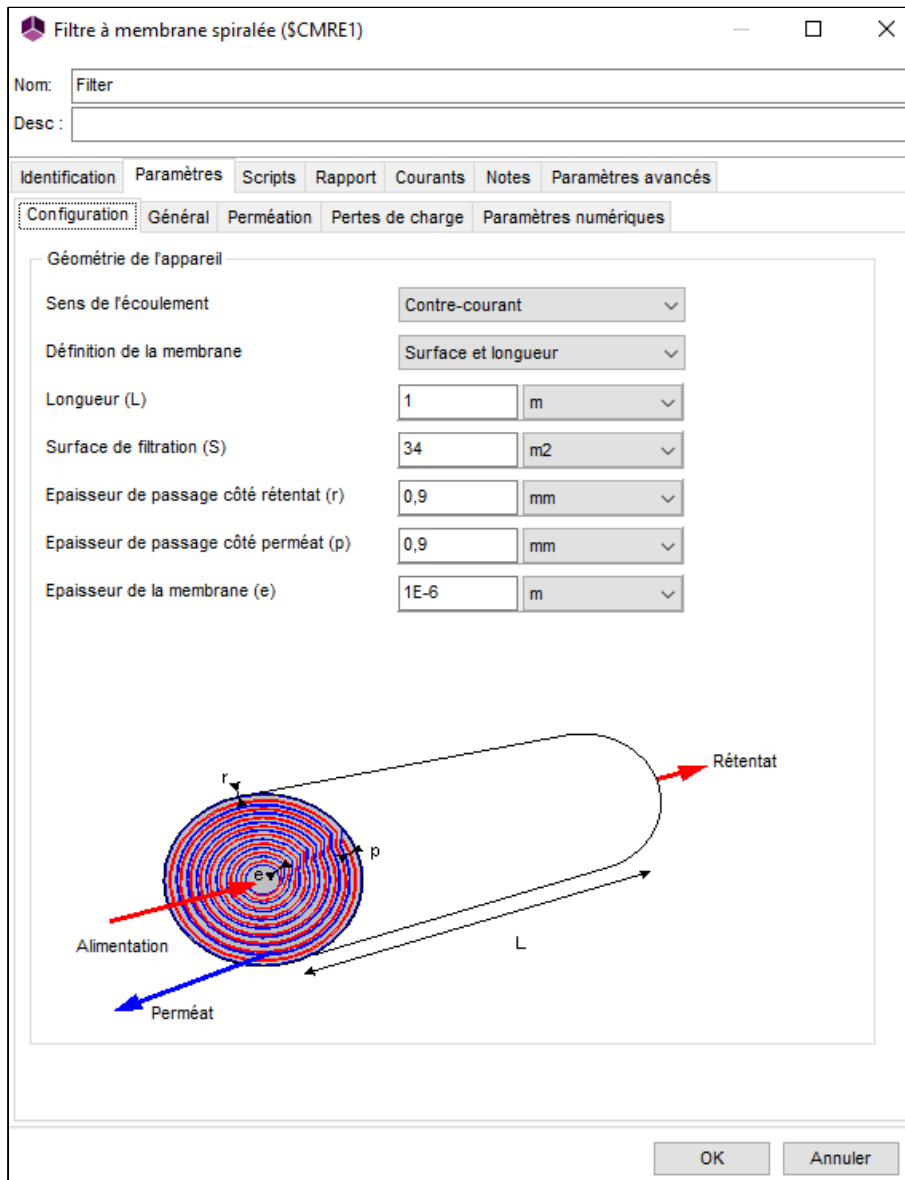
| | | Inlet Water NaCl |
|------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| Composition massique (%) | WATER | 96.4 |
| | NaCl | 3.6 |
| Concentration en NaCl (g/l) | | 36.8 |
| Débit massique total (t/h) | | 1.5 |
| Température (°C) | | 30 |
| Pression (atm) | | 1 |

La concentration d'eau de mer classiquement rencontrée sur Terre est de 30 à 40 g de chlorure de sodium par kilogramme d'eau.

- ✓ Filtre membranaire spiralé

La configuration du module est inspirée d'un filtre industriel [DUP20]. La surface de ce filtre est de 34 m². Dans la suite du document, la surface totale de transfert des différents cas étudiés sera toujours équivalente à 34 m² afin de pouvoir comparer les solutions technologiques.

Les paramètres de design et opératoires du filtre sont présentés dans les 5 onglets suivants :



1. Configuration

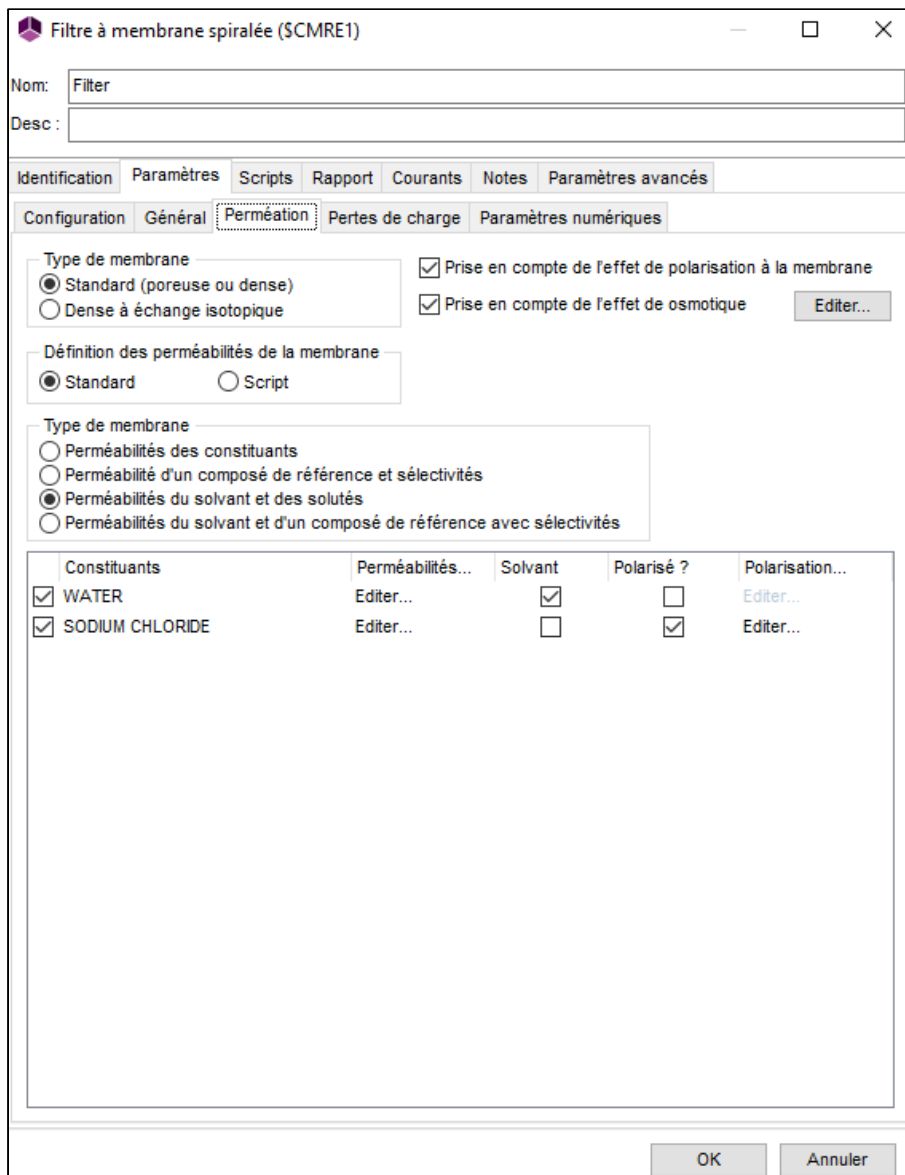
| | |
|--|---------------------|
| Sens de l'écoulement | Contre-courant |
| Définition de la membrane | Surface et longueur |
| Longueur (m) | 1 |
| Surface (m²) | Variable |
| Epaisseur de passage coté rétentat (mm) | 0.9 |
| Epaisseur de passage coté perméat (mm) | 0.9 |
| Epaisseur de la membrane (m) | 1×10^{-6} |

2. Général

| | |
|-----------------------------|---------|
| Température (°C) | 30 |
| Etat physique | Liquide |
| Pression côté perméat (atm) | 1 |

3. Perméation

Les cases suivantes doivent être cochées :



Pour ce type de filtration, des valeurs de perméabilité peuvent être extraites de la littérature ([MAU74] et [OKA19]).

Les valeurs par défaut pour la définition de l'effet osmotique sont utilisées (calcul de la pression osmotique par le modèle thermodynamique).

En revanche les valeurs de perméabilité et de polarisation pour l'eau et le chlorure de sodium sont renseignées comme suit :

| Perméabilité de l'eau | |
|--|-----------------------|
| Modèle de perméation | Pression partielle |
| Type de définition | Constant |
| Type | Volume |
| Perméabilité molaire (m ² /h/bar) | 7.1×10^{-10} |

| Perméabilité NaCl | |
|---|--------------------|
| Modèle de perméation | Concentration |
| Perméabilité (m/s) | 1×10^{-7} |
| Polarisation NaCl | |
| Modèle pour le calcul du coefficient de transfert de masse (ki) | Chen and Qin |
| Di (m ² /s) | 1×10^{-6} |
| α | 0.031 |
| β | 0.9243 |
| γ | 0.3495 |

4. Pertes de charge

Les valeurs par défaut sont utilisées.

5. Paramètres numériques

Seul le nombre de cellules est modifié à 20.

✓ Windows Script

Le script suivant est utilisé dans le module (Windows script «Permeability calculation »). Ce script permet notamment de calculer la perméabilité moyenne et la différence de pression osmotique moyenne du filtre :

```
With CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
    ExecuteGlobal .OpenTextFile(Project.ApplicationPath & "Scripts\UnitConversion.vbs", 1).ReadAll()
End With

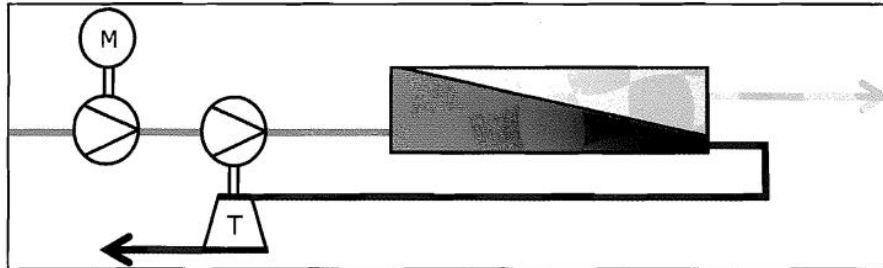
Function OnCalculation()
    '
    ' Parameters
    Filter_Name = "Filter"
    '
    With Project.Modules(Filter_Name)
        ' Streams
        Set Feed      = .InputStream(1)
        Set Permeate  = .OutputStream(2)
        'Osmotic pressure
        Nb_Cells = .GridCellsNumber
        a = (.OsmoticPressureDifferenceProfile(1) + .OsmoticPressureDifferenceProfile(Nb_Cells+1)) / 2
        a = ConvertFromProSim("pressure", a, "bar")
        'Membrane transfer area m2
        S = .TransferTotalArea
    End With
    '
    'Pressure deviation
    b = Feed.Pressure - Permeate.Pressure
    b = ConvertFromProSim("pressure", b, "bar")
    '
    'Permeate flowrate m3/h
    F = Permeate.VolumeFlowrate
    '
    'Permeability L/m²/h/bar
    Perma2 = F*1000.0/S
    Perma1 = Perma2/(b-a)
    '
    'Save of the parameters
    Module.Parameters(1) = a
    Module.Parameters(2) = b
    Module.Parameters(3) = S
    Module.Parameters(4) = F
    Module.Parameters(5) = Perma1
    Module.Parameters(6) = Perma2

    OnCalculation = True
End Function
```

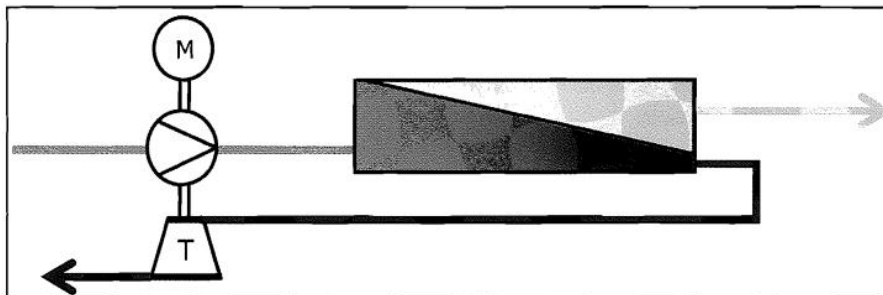
✓ ERD

Du fait de l'effet d'osmose, la pression côté rétentat est importante lors du dessalement de l'eau de mer par filtration membranaire. Par conséquent, la consommation énergétique de la pompe en entrée côté rétentat est élevée. Pour réduire la consommation électrique due à l'augmentation de la pression, il existe différentes technologies de récupération énergétique :

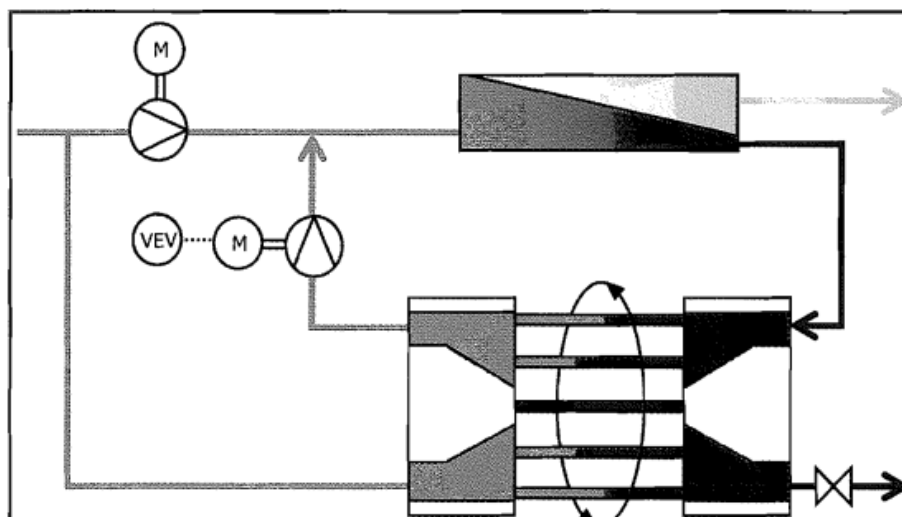
- Utiliser une turbopompe placée en série sur la pompe haute pression :



- Utiliser une turbine Pelton accouplée au moteur de la pompe haute pression :



- Utiliser un ou plusieurs échangeurs d'énergie rotatifs (ERD « Exchanger Recovery Device ») :

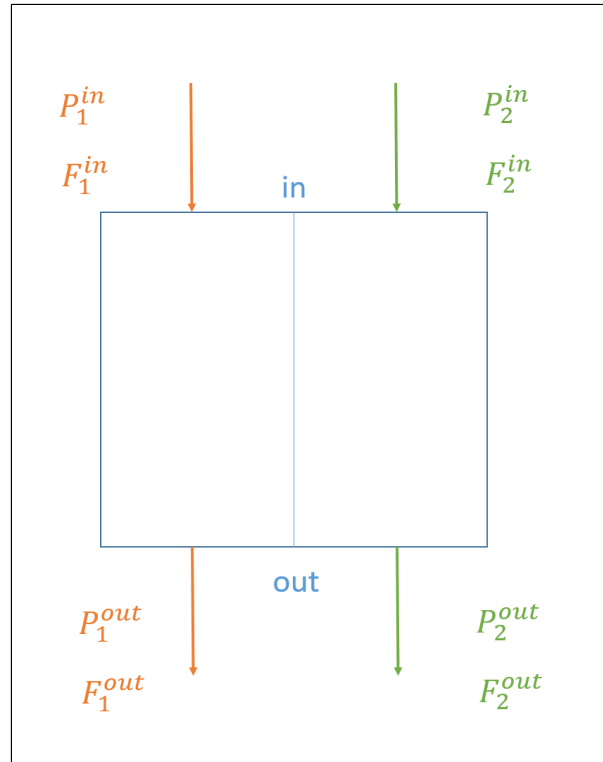


Les deux premières technologies transforment l'énergie hydraulique en énergie mécanique, puis de nouveau en énergie hydraulique. Les échangeurs de pression (ERD) transfèrent directement l'énergie résiduelle du rétentat à l'eau de mer entrant dans le filtre.

Pour cet exemple, la technologie d'ERD a été retenue.

L'échangeur de pression est un dispositif de récupération d'énergie rotatif. Le liquide sous pression transmet l'énergie lors d'une courte période de contact direct entre les 2 fluides. Ce transfert est réalisé au sein d'un rotor. La pression de la saumure (haute pression) est transférée à l'alimentation d'eau de mer (basse pression). Le dispositif rotatif permet de mettre en contact les deux fluides puis de les extraire en évitant le mélange des deux fluides.

Un tel appareil est schématisé de la façon suivante :



F_i^{in} : Flux molaire du fluide i en entrée de l'échangeur de pression (m^3/s)

F_i^{out} : Flux molaire du fluide i en sortie de l'échangeur de pression (m^3/s)

P_i^{in} : Pression du fluide i en entrée de l'échangeur de pression (Pa)

P_i^{out} : Pression du fluide i en sortie de l'échangeur de pression (Pa)

Les fluides considérés sont :

1 : l'eau de mer

2 : le rétentat

L'efficacité est définie comme suit :

$$\eta = \frac{F_1^{out} P_1^{out} + F_2^{out} P_2^{out}}{F_1^{in} P_1^{in} + F_2^{in} P_2^{in}}$$

Sachant que les fluides utilisés dans l'échangeur de pression sont à l'état liquide :

$$F_1^{in} \approx F_1^{out}$$

$$F_2^{in} \approx F_2^{out}$$

Finalement :

$$\eta = \frac{F_1^{in} P_1^{out} + F_2^{in} P_2^{out}}{F_1^{in} P_1^{in} + F_2^{in} P_2^{in}}$$

Dans le cas présent, la pression et le flux molaire en entrée sont connus pour les deux fluides. En connaissant l'efficacité de l'échangeur et la pression de décharge du rétentat, il est possible d'en déduire la pression de sortie de l'eau de mer :

$$P_1^{out} = \frac{\eta(F_1^{in} P_1^{in} + F_2^{in} P_2^{in}) - F_2^{in} P_2^{out}}{F_1^{in}}$$

C'est ce qui est réalisé dans le script ci-dessous implémenté dans un module « Windows Script ». Tout d'abord, les courants d'entrée sont copiés-collés en sortie. Ensuite, toutes les variables utilisées sont définies et converties en unité SI (Système International). Le calcul de la pression, la conversion d'unité et l'affectation aux courants de sorties sont réalisés via le script ci-dessous.

```
With CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
    ExecuteGlobal .OpenTextFile(Project.ApplicationPath & "Scripts\UnitConversion.vbs", 1).ReadAll()
End With

Function OnCalculation()
    '
    set vapor = CreateObject("ProSimPlusScriptableObjects.ProSimStream")
    set liquid = CreateObject("ProSimPlusScriptableObjects.ProSimStream")
    '
    'Exchanger characteristic
    Eta = 0.96 ' (ERD yield)
    Pout2 = 101325.0 ' (Pa)
    '
    With Module
        ' Copy streams
        .OutputStream(1).CopyFrom(.InputStream(1))
        .OutputStream(2).CopyFrom(.InputStream(2))
        '
        ' Conversions
        Fa = .InputStream(1).VolumeFlowrate
        Fa = ConvertFromProSim("volume flow rate", Fa, "m3/s")

        Fb = .InputStream(2).VolumeFlowrate
        Fb = ConvertFromProSim("volume flow rate", Fb, "m3/s")

        Pa = .InputStream(1).pressure
        Pa = ConvertFromProSim("pressure", Pa, "Pa")

        Pb = .InputStream(2).pressure
        Pb = ConvertFromProSim("pressure", Pb, "Pa")
        '
        ' Output pressures calculation
        Pout1 = (eta*(Fa*Pa+Fb*Pb)-Fb*Pout2)/Fa
        .OutputStream(1).pressure = ConvertToProSim("pressure", Pout1, "Pa")
        .OutputStream(2).pressure = ConvertToProSim("pressure", Pout2, "Pa")
        '
        ' Temperature calculation
        .OutputStream(1).FlashAtHP .OutputStream(1).Temperature, vapRatio, liquidEnthalpy, _
            vaporEnthalpy, liquidFractions, vaporFractions, equiConstants
        '
        ' Physical state of output stream 2
        .ComputePhysicalState Module.OutputStream(2), vapor, liquid
        .ComputeEnthalpy Vapor
    End With
End Function
```

```
.ComputeEnthalpy Liquid
.OutputStream(2).EnthalpyFlux = Vapor.EnthalpyFlux + Liquid.EnthalpyFlux
End With

OnCalculation = True

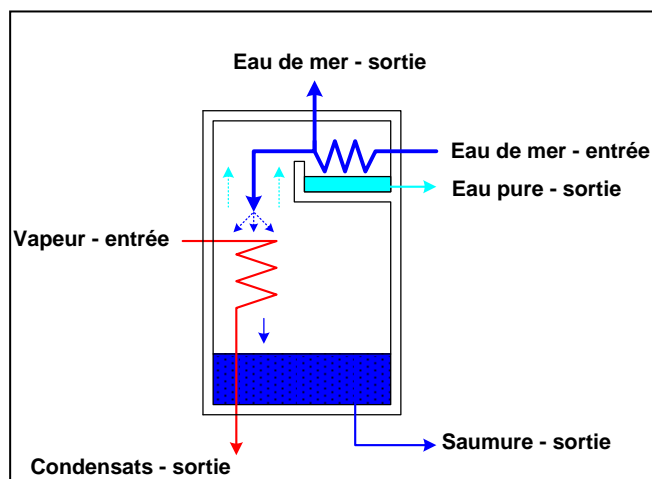
End Function
```

5 DISTILLATION

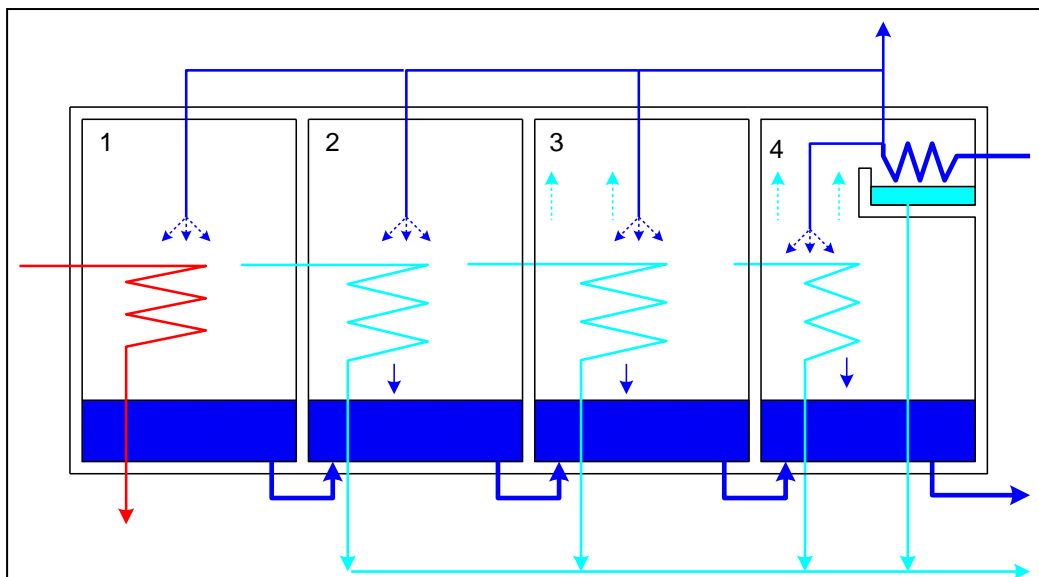
5.1 Présentation du procédé

Une cellule de distillation est composée de deux serpentins et de pompes.

L'eau de mer est portée à ébullition à l'aide d'un premier serpentin (serpentin rouge sur le schéma suivant). Puis cette vapeur se condense au contact du second serpentin (serpentin bleu). La saumure se retrouve ainsi dans la partie inférieure tandis que l'eau pure se trouve dans la partie supérieure. Ces deux produits sont évacués à l'aide de pompes, tout comme les gaz incondensables présents dans la cellule.

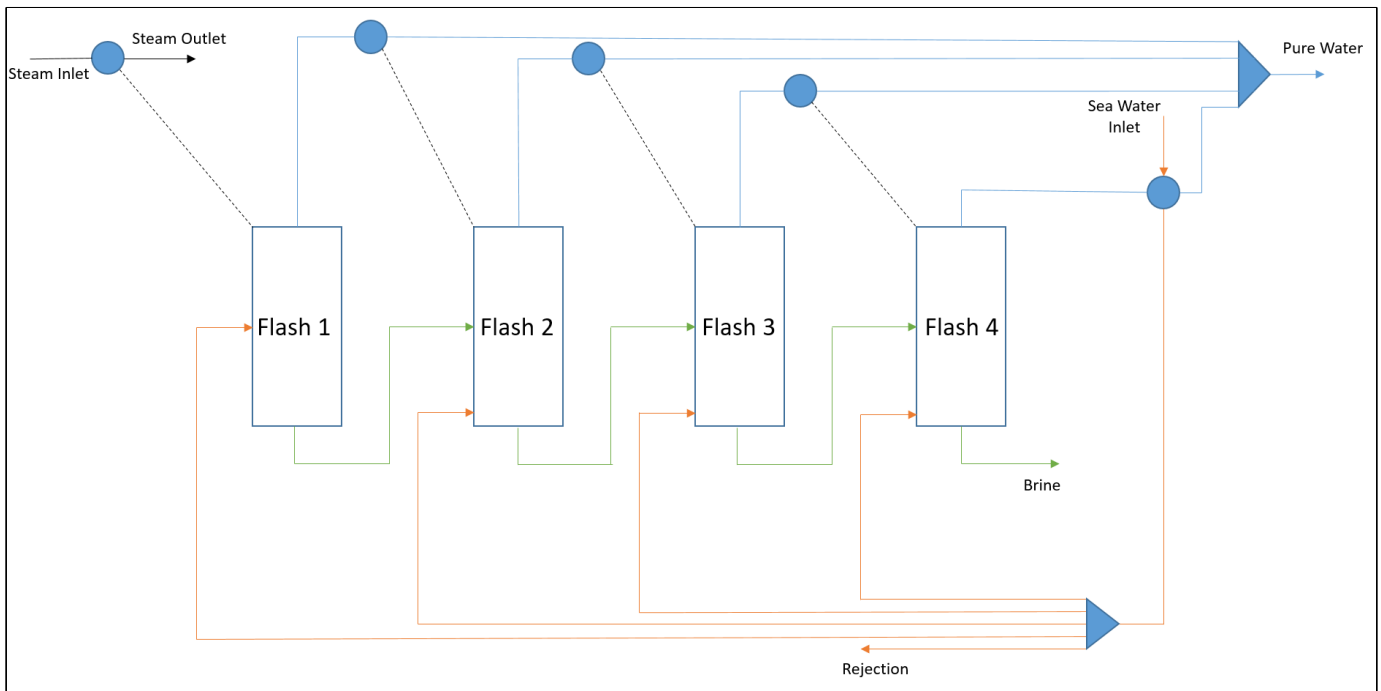


Une amélioration de ce système consiste à disposer différentes cellules en série.



La vapeur produite dans la cellule n°1 est utilisée dans la cellule n°2 pour évaporer l'eau de mer. Ensuite, la vapeur produite dans la cellule n°2 est utilisée dans la cellule 3 pour évaporer l'eau de mer et ainsi de suite. En ajoutant plusieurs cellules (effets), il est possible de diminuer la consommation énergétique du procédé. Cette configuration est simulée dans l'exemple suivant. Les cellules sont modélisées par des flashes diphasiques.

5.2 Schéma du procédé



L'eau de mer est préchauffée à l'aide de l'énergie de condensation de la sortie de la dernière cellule. L'eau de mer est ensuite divisée pour être injectée dans les différentes cellules. Une partie de l'énergie permettant de réaliser le flash est fournie par l'énergie de condensation des cellules précédentes à l'exception de la première cellule, dont l'énergie provient d'une source de chaleur non modélisée dans le cadre de cet exemple.

5.3 Schéma de simulation

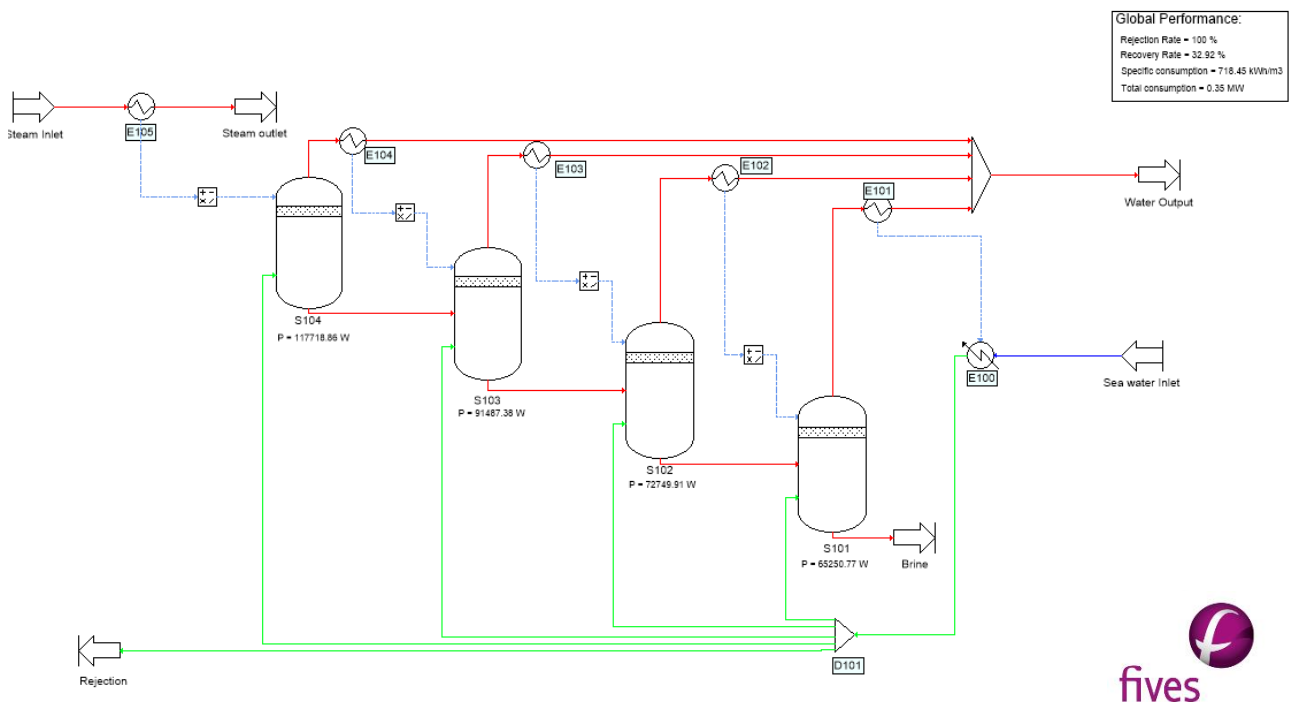


Schéma de simulation du dessalement d'eau de mer par distillation multi-étagée



5.4 Conditions opératoires

- ✓ Alimentation utilité

| | | Steam Inlet |
|-----------------------------|-------|----------------------|
| Composition massique (%) | WATER | 100 |
| | NaCl | 0 |
| Concentration en NaCl (g/l) | | 0 |
| Débit massique total (t/h) | | 0.1875 |
| Température (°C) | | Température de rosée |
| Pression (atm) | | 1 |

- ✓ Simples échangeurs de chaleur (E100)

| | |
|---|------------|
| Quantité de chaleur (kJ/h) (initialisation) | -2 000 000 |
|---|------------|

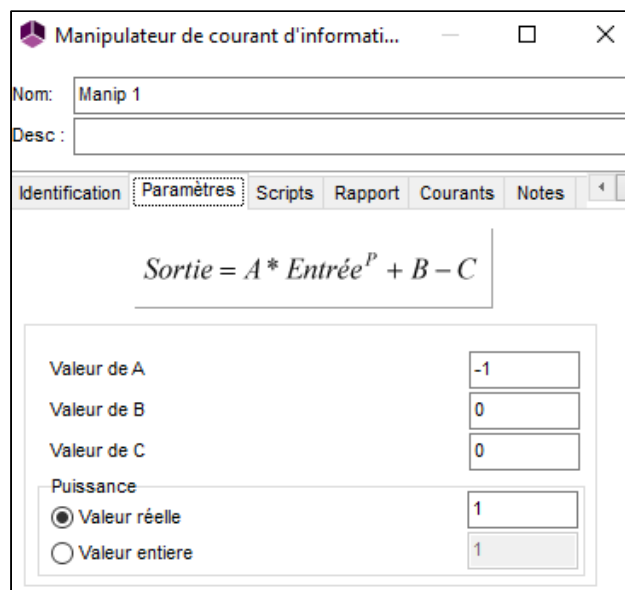
- ✓ Consigneurs de température

L'ensemble des consigneurs de températures (E101, E102, E103, E104, E105) ont la consigne suivante :

| | |
|-----------------------|----------------------|
| Température de sortie | Température de bulle |
|-----------------------|----------------------|

- ✓ Manipulateurs de courant d'information

L'ensemble des manipulateurs de courant d'information sont paramétrés comme suit :



Ces manipulateurs de courants d'information ainsi que les courants d'information permettent de réaliser la récupération énergétique. Les quantités de chaleur de condensation des vapeurs des différents effets sont récupérées pour chauffer les flashes.

✓ Diviseur de courants

| D101 | | |
|--|-------------------------------|-------------|
| Spécification fournie | Débits Massiques | |
| Pression de sortie | Egale à la pression d'entrée | |
| Courant calculé automatiquement | C5 | |
| Courants | Débits Massiques (t/h) | Vers |
| C6 | 0.09375 | S101 |
| C7 | 0.65625 | S104 |
| C8 | 0.46875 | S103 |
| C9 | 0.1875 | S102 |

✓ Séparateurs diphasiques liquide-vapeur

L'ensemble des flashes (S101, S102, S103, S104) ont la configuration suivante :

| | |
|---|---|
| Type de flash | Pression et quantité de chaleur données |
| Pression (atm) | 1 |
| Quantité de chaleur échangée (kJ/h) (initialisation) | 2 000 000 |

✓ Mélangeur

Le mélangeur M101 est configuré avec les paramètres par défaut.

5.5 Initialisation

La séquence de calcul est automatiquement déterminée par ProSimPlus. Un courant coupé est détecté : « C4 » (sortie de l'échangeur de chaleur « E100 » vers le diviseur de courants). L'initialisation suivante est utilisée pour ce courant :

| | | |
|---------------------------------|--------------|------|
| Nom courant | | C4 |
| De | | E100 |
| Vers | | D101 |
| Débit (t/h) | | 1.5 |
| Composition massique (%) | WATER | 96.4 |
| | NaCl | 3.6 |
| Température (°C) | | 90 |
| Pression (atm) | | 1 |

5.6 Résultats

✓ Bilan

| | | Sea Water Inlet | Brine | Water Output | Rejection |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------|---------------------|------------------|
| Débit massique (t/h) | | 1.50 | 0.94 | 0.46 | 0.094 |
| Flux molaire (m³/h) | | 1.47 | 0.95 | 0.48 | 0.09 |
| Concentration en NaCl (g/l) | | 36.84 | 53.42 | 0 | 36.84 |
| Composition massique (%) | WATER | 0.964 | 0.946 | 1 | 0.964 |
| | SODIUM CHLORIDE | 0.036 | 0.054 | 0 | 0.036 |

✓ Performances

| | |
|---|-----|
| Quantité de l'échangeur de chauffe E105 (kW) | 118 |
|---|-----|

| Chaleur récupérée (kW) | | | |
|-------------------------------|------|------|------|
| S101 | S102 | S103 | S104 |
| 91 | 73 | 65 | 62 |

| | |
|--|--------|
| Taux de conversion (%) | 30.88 |
| Taux de rejet NaCl (%) | 100 |
| Consommation spécifique (kWh/m³) | 243.59 |

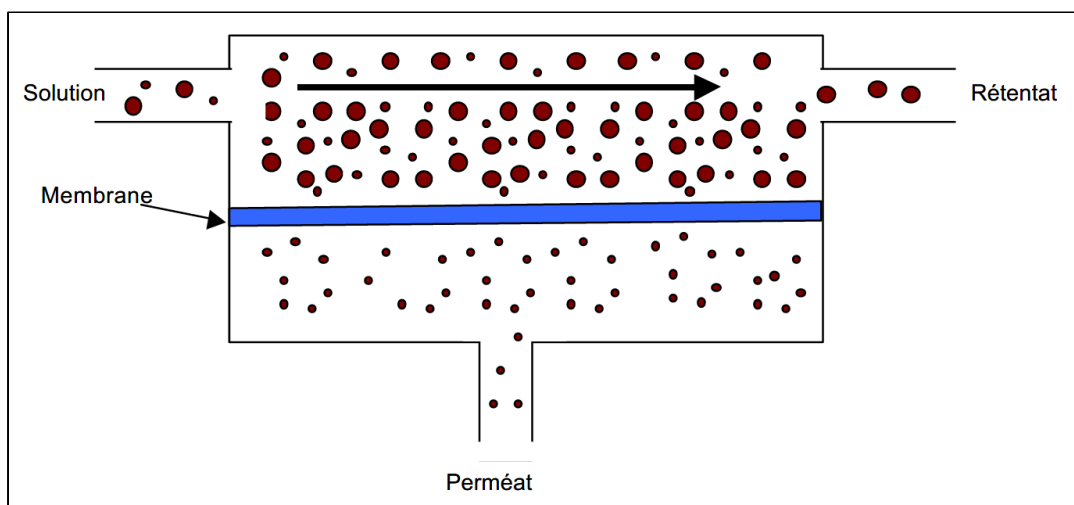
La distillation permet de produire de l'eau pure exempt de sel. La production d'eau pure est coûteuse : pour une production de 0.48 m³/h la consommation totale d'énergie est de 0.12 MW. La consommation spécifique est donc d'environ 244 kWh/m³.

6 FILTRATION

6.1 Présentation du procédé

Cet exemple présente des procédés de dessalement via l'utilisation d'un ou plusieurs filtres à membrane sous différentes configurations (série, parallèle, hybride).

La filtration membranaire est un procédé de séparation physique. Elle repose sur le principe de perméation à travers une membrane permselective. Cette membrane permselective, selon ses caractéristiques intrinsèques et son mode d'utilisation, constitue une barrière permettant (ou favorisant) certains transferts de matière et en limitant d'autres. Les forces motrices permettant la perméation à travers la membrane peuvent être la diffusion (transport actif) mais également des différentiels de pressions, de concentrations, ou de potentiels électriques (transport passif).



En fonction de la taille des pores, la membrane de filtration constitue une barrière physique absolue pour des molécules ou particules de taille supérieure à un certain seuil. C'est l'avantage principal que présente la filtration membranaire en comparaison aux traitements conventionnels (filtre à sable, charbon activés...). En effet, ceux-ci consistent en une filtration sur média granulaire (sable et/ou charbon actif), qui ne constitue pas un filtre absolu [CAU17].

À l'issue d'une opération de filtration membranaire, deux courants sont obtenus :

- le rétentat (ou concentrat) dans lequel se concentrent les molécules et/ou particules retenues par la membrane.
- le perméat, exempt des molécules et/ou particules retenues.

L'exemple V1 (cf. 6.3 un étage de filtration) illustre le dessalement d'eau de mer via un seul étage de filtration membranaire. Industriellement, selon les spécifications recherchées en débit et en concentration, des configurations de filtres en série et/ou parallèle sont généralement utilisées.

Ces configurations plus complexes sont parfois dotées d'un système de récupération de puissance (ERD « Exchanger Recovery Device ») ou d'une turbine Pelton pour produire de l'énergie électrique (cf. 4 Conditions opératoires).

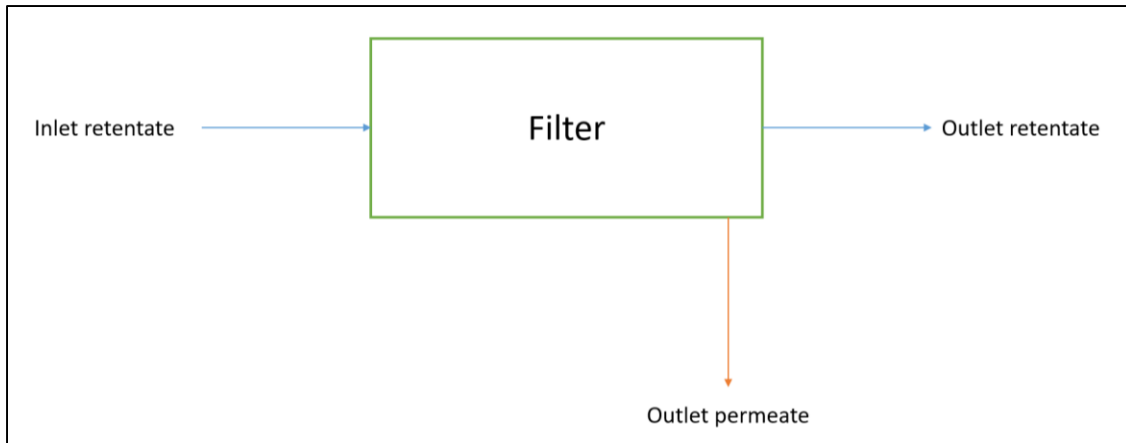
6.2 Schéma du procédé

Les procédés considérés sont composés d'un ou plusieurs filtres. Ces filtres sont disposés en :

- Parallèle : un second filtre est placé sur la sortie du perméat du premier filtre.
- Série : un second filtre est placé sur la sortie du rétentat du premier filtre.

Il existe également des configurations hybrides entre les configurations parallèle et série (configuration « industrielle »).

Le schéma d'un filtre simple est fourni ci-dessous :



Le courant à traiter entre côté rétentat. Il est séparé en deux courants au sein du filtre. Les constituants traversant le filtre ressortent côté perméat tandis que les constituants retenus sont extraits côté rétentat.

6.3 Un étage de filtration

6.3.1 Schéma de simulation

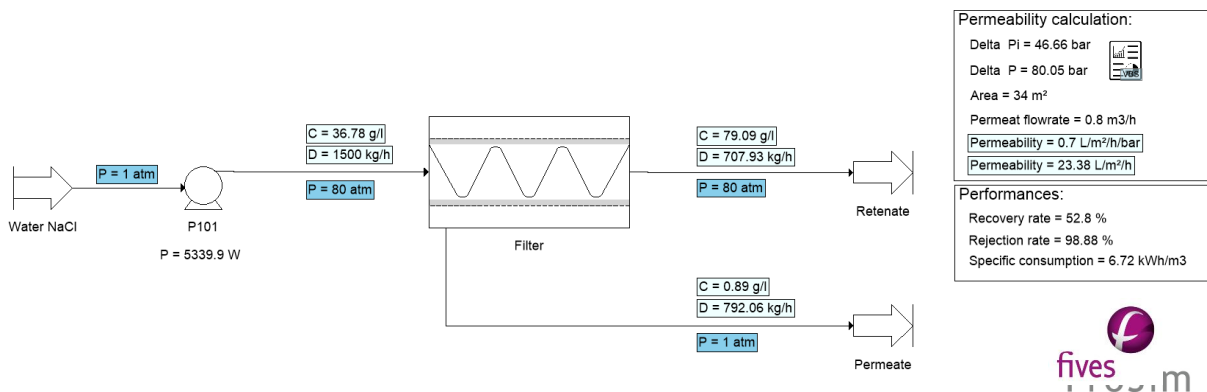


Schéma de simulation du dessalement d'eau de mer utilisant un seul étage de filtration

6.3.2 Conditions opératoires

- ✓ Filtre membranaire spiralé

| | |
|--------------------------------|----|
| Surface (m²) | 34 |
|--------------------------------|----|

Comme évoqué précédemment (cf.4 Conditions opératoires), la configuration du filtre est extraite d'un filtre commercial [DUP20].

- ✓ Pompe centrifuge

| | |
|--------------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 80 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |

6.3.3 Résultats

- ✓ Bilan

| | | Alimentation | Rétentat | Perméat |
|--|------------------------|---------------------|-----------------|----------------|
| Débit volumique (m³/h) | | 1.47 | 0.67 | 0.80 |
| Débit massique (t/h) | | 1.50 | 0.71 | 0.79 |
| Concentration en NaCl (g/l) | | 36.78 | 79.09 | 0.89 |
| Composition massique (%) | WATER | 0.964 | 0.976 | 0.9997 |
| | SODIUM CHLORIDE | 0.036 | 0.024 | 0.0003 |

- ✓ Performances

| | |
|--|-------|
| Taux de conversion (%) | 52.80 |
| Taux de rejet NaCl (%) | 98.88 |
| Consommation spécifique (kWh/m³) | 6.72 |

6.4 Deux étages de filtration en série

Un second filtre est placé sur la sortie du rétentat du premier filtre.

6.4.1 Schéma de simulation

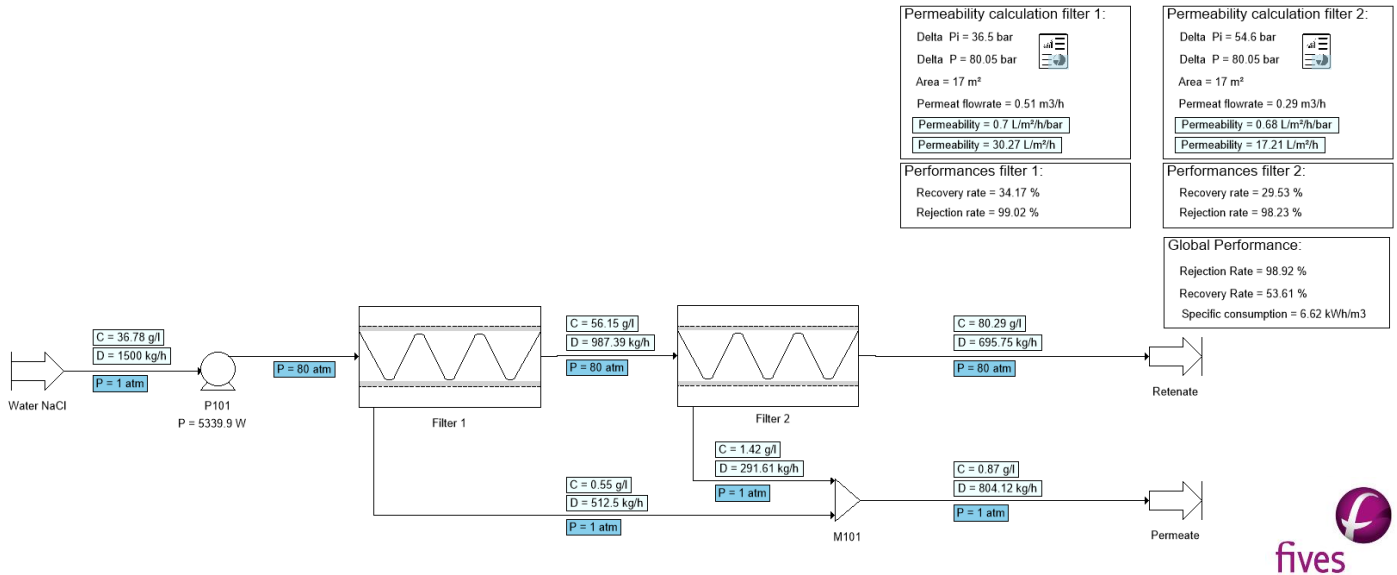


Schéma de simulation du dessalement d'eau de mer utilisant deux étages de filtration en série

6.4.2 Conditions opératoires

- ✓ Filtres membranaires spiralés

| Nom filtre | Filter 1 | Filter 2 | Total |
|---------------------------|----------|----------|-------|
| Surface (m ²) | 17 | 17 | 34 |

- ✓ Pompe centrifuge

| | |
|-------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 80 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |

6.4.3 Résultats

✓ Bilan

| | | Alimentation | Rétentat | Perméat |
|--|------------------------|--------------|----------|---------|
| Débit volumique (m³/h) | | 1.47 | 0.66 | 0.80 |
| Débit massique (t/h) | | 1.50 | 0.70 | 0.80 |
| Concentration en NaCl (g/l) | | 36.78 | 80.29 | 0.87 |
| Composition massique (%) | WATER | 0.964 | 0.924 | 0.999 |
| | SODIUM CHLORIDE | 0.036 | 0.076 | 0.001 |

✓ Performances

| | |
|--|-------|
| Taux de conversion (%) | 53.61 |
| Taux de rejet NaCl (%) | 98.92 |
| Consommation spécifique (kWh/m³) | 6.62 |

L'association en série permet d'augmenter le débit de perméat produit, mais ce type d'association a tendance à dégrader la qualité globale du produit. Par conséquent, la concentration de chlorure de sodium (NaCl) en sortie est plus importante côté perméat.

6.5 Deux étages de filtration en parallèle

Un second filtre est placé sur la sortie du perméat du premier filtre.

6.5.1 Schéma de simulation

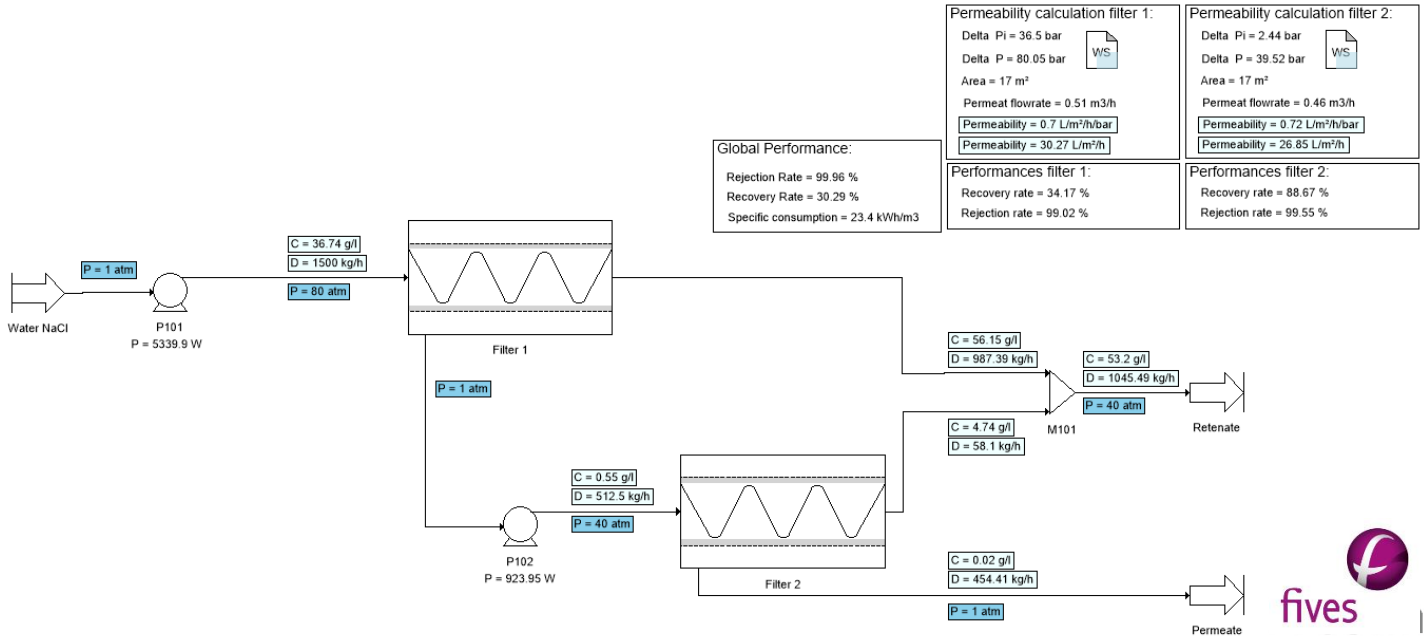


Schéma de simulation du dessalement d'eau de mer utilisant deux étages de filtration en parallèle

6.5.2 Conditions opératoires

- ✓ Filtres membranaires spiralés

| Nom filtre | Filter 1 | Filter 2 | Total |
|---------------------------|----------|----------|-------|
| Surface (m ²) | 17 | 17 | 34 |

- ✓ Pompe centrifuge (P101)

| | |
|-------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 80 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |

- ✓ Pompe centrifuge (P102)

| | |
|-------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 40 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |

6.5.3 Résultats

✓ Bilan

| | | Alimentation | Rétentat | Perméat |
|--|------------------------|--------------|----------|---------|
| Débit volumique (m³/h) | | 1.47 | 1.01 | 0.46 |
| Débit massique (t/h) | | 1.50 | 1.05 | 0.45 |
| Concentration en NaCl (g/l) | | 36.74 | 53.2 | 0.02 |
| Composition massique (%) | WATER | 0.964 | 0.949 | 0.99998 |
| | SODIUM CHLORIDE | 0.036 | 0.051 | 0.00002 |

✓ Performances

| | |
|--|-------|
| Taux de conversion (%) | 30.29 |
| Taux de rejet NaCl (%) | 99.96 |
| Consommation spécifique (kWh/m³) | 23.4 |

L'association en parallèle permet d'augmenter la pureté. Cependant le débit de perméat produit diminue.

6.6 Version hybride

L'association en parallèle permet d'augmenter la pureté mais s'accompagne d'une diminution du débit de perméat produit. C'est l'inverse pour l'association en série, le débit augmente tandis que la pureté diminue.

Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre ces deux configurations afin d'atteindre les spécifications en pureté et en débit désirées.

L'exemple V5 est inspiré de l'installation Barka II [SUE09]. Pour cette installation industrielle, le débit nominal traité est de 5000 t/h. Afin de pouvoir comparer les performances des différentes configurations, le débit utilisé pour modéliser ce cas étude a été fixé à 1.5 m³/h (cf. 4 Conditions opératoires). Comparé au fichier de simulation V5, l'installation Barka II dispose de plus de pompes (plus de débit) et de filtres (surface de transfert plus importante) en parallèle afin de traiter le débit nominal de 5000 t/h (configuration identique).

6.6.1 Schéma de simulation

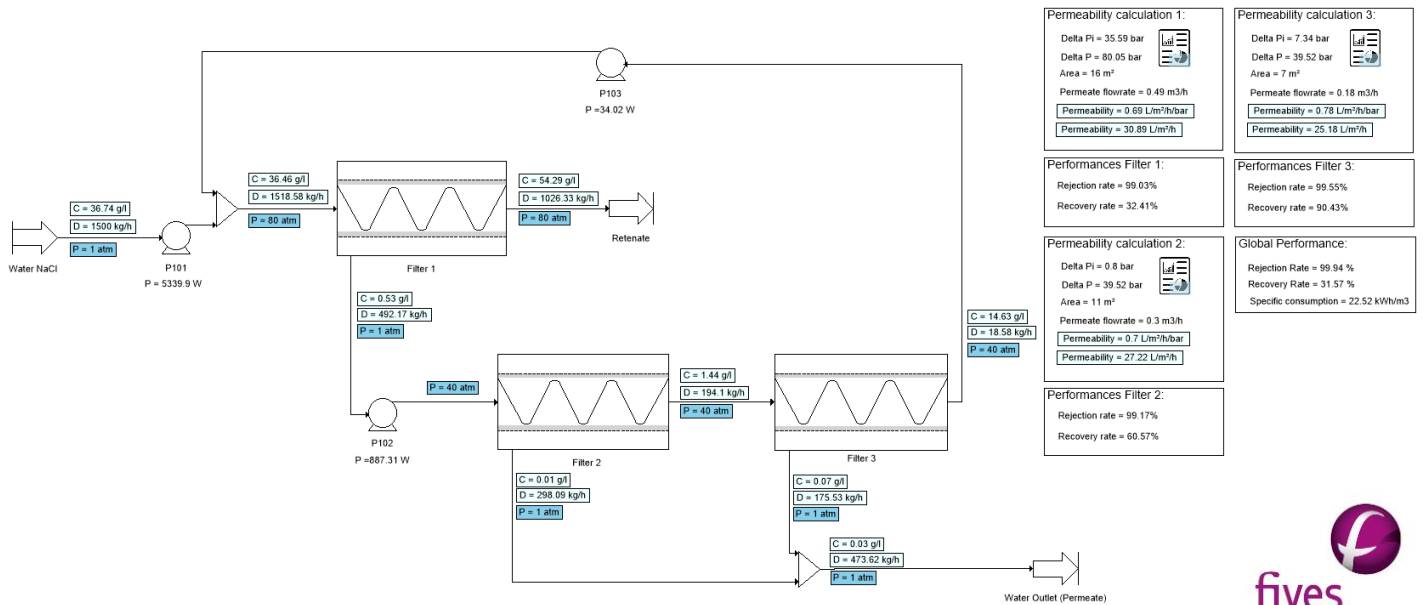


Schéma de simulation du dessalement d'eau de mer en version hybride

6.6.2 Conditions opératoires

- ✓ Filtres membranaires spiralés

| Nom filtre | Filter 1 | Filter 2 | Filter 3 | Total |
|---------------------------|----------|----------|----------|-------|
| Surface (m ²) | 16 | 11 | 7 | 34 |

- ✓ Pompe centrifuge (P101)

| | |
|-------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 80 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |

- ✓ Pompe centrifuge (P102)

| | |
|-------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 40 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |



- ✓ Pompe centrifuge (P103)

| | |
|--------------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 80 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |

6.6.3 Résultats

- ✓ Bilan

| | | Alimentation | Rétentat | Perméat |
|--|------------------------|--------------|----------|---------|
| Débit volumique (m³/h) | | 1.47 | 0.99 | 0.48 |
| Débit massique (t/h) | | 1.50 | 1.03 | 0.47 |
| Concentration en NaCl (g/l) | | 36.74 | 54.29 | 0.03 |
| Composition massique (%) | WATER | 0.964 | 0.947 | 0.99997 |
| | SODIUM CHLORIDE | 0.036 | 0.053 | 0.00003 |

- ✓ Performances

| | |
|--|-------|
| Taux de conversion (%) | 31.57 |
| Taux de rejet NaCl (%) | 99.94 |
| Consommation spécifique (kWh/m³) | 22.52 |

C'est bien un compromis entre les filtres en série et les filtres en parallèle :

- Meilleur taux de rejet et donc pureté plus élevée que celle observée pour la configuration en série V2 ;
- Meilleur taux de conversion comparé à la configuration en parallèle V3.

6.7 Un étage de filtration avec récupération d'énergie

Comme expliqué précédemment (cf. 4 Conditions opératoires), il est possible de récupérer l'énergie hydraulique du courant de rétentat pour diminuer les consommations électriques des installations. L'exemple présenté dans ce paragraphe propose l'ajout d'un échangeur de pression (ERD).

6.7.1 Schéma de simulation

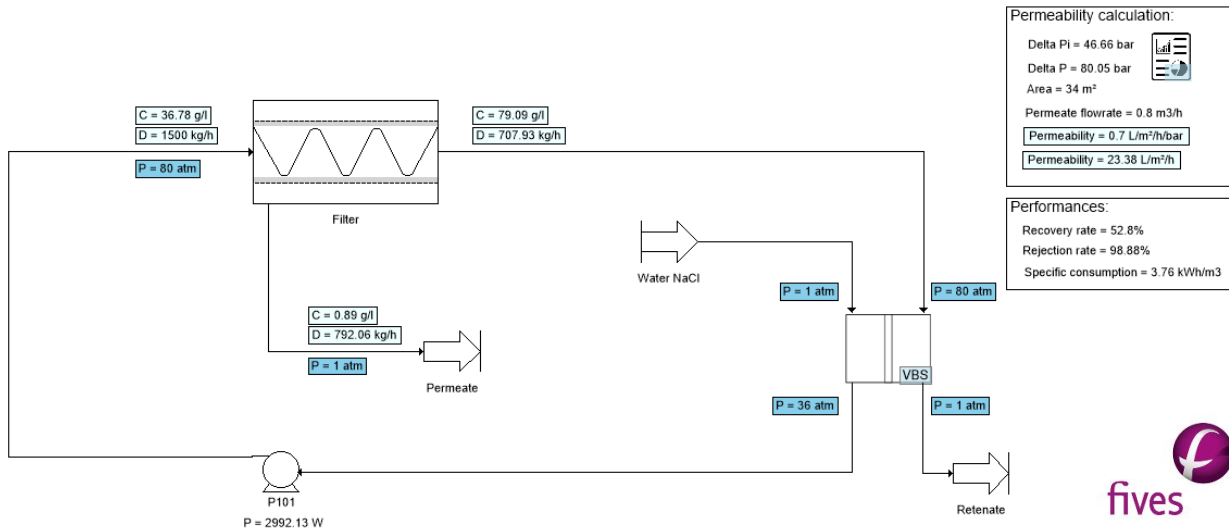


Schéma de simulation dessalement eau de mer à un étage de filtration avec ERD

6.7.2 Conditions opératoires

- ✓ Filtre membranaire spiralé

| | |
|---------------------------|----|
| Surface (m ²) | 34 |
|---------------------------|----|

- ✓ Pompe centrifuge (P101)

| | |
|-------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 80 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |

- ✓ ERD

Les paramètres de l'échangeur de pression (ERD) sont décrits dans le paragraphe ERD des conditions opératoires globales (cf. 4 Conditions opératoires).

6.7.3 Résultats

✓ Bilan

| | | Alimentation | Rétentat | Perméat |
|--|------------------------|--------------|----------|---------|
| Débit volumique (m³/h) | | 1.47 | 0.67 | 0.80 |
| Débit massique (t/h) | | 1.50 | 0.71 | 0.79 |
| Concentration en NaCl (g/l) | | 36.78 | 79.09 | 0.89 |
| Composition massique (%) | WATER | 0.964 | 0.976 | 0.9997 |
| | SODIUM CHLORIDE | 0.036 | 0.024 | 0.0003 |

✓ Performances

| | |
|--|-------|
| Taux de conversion (%) | 52.80 |
| Taux de rejet NaCl (%) | 98.88 |
| Consommation spécifique (kWh/m³) | 3.76 |

Le bilan massique, le taux de conversion et le taux de rejet de chlorure de sodium sont inchangés par rapport à la version V1 sans ERD. L'échangeur de pression (ERD) a seulement une influence sur la puissance consommée et donc la consommation spécifique. Ici, elle est réduite de 44 % par rapport à la version V1 à un seul étage de filtration.

6.8 Version hybride avec récupération d'énergie

Une autre version consiste à améliorer la consommation spécifique de la version hybride V5, en utilisant un échangeur de pression (ERD).

6.8.1 Schéma de simulation

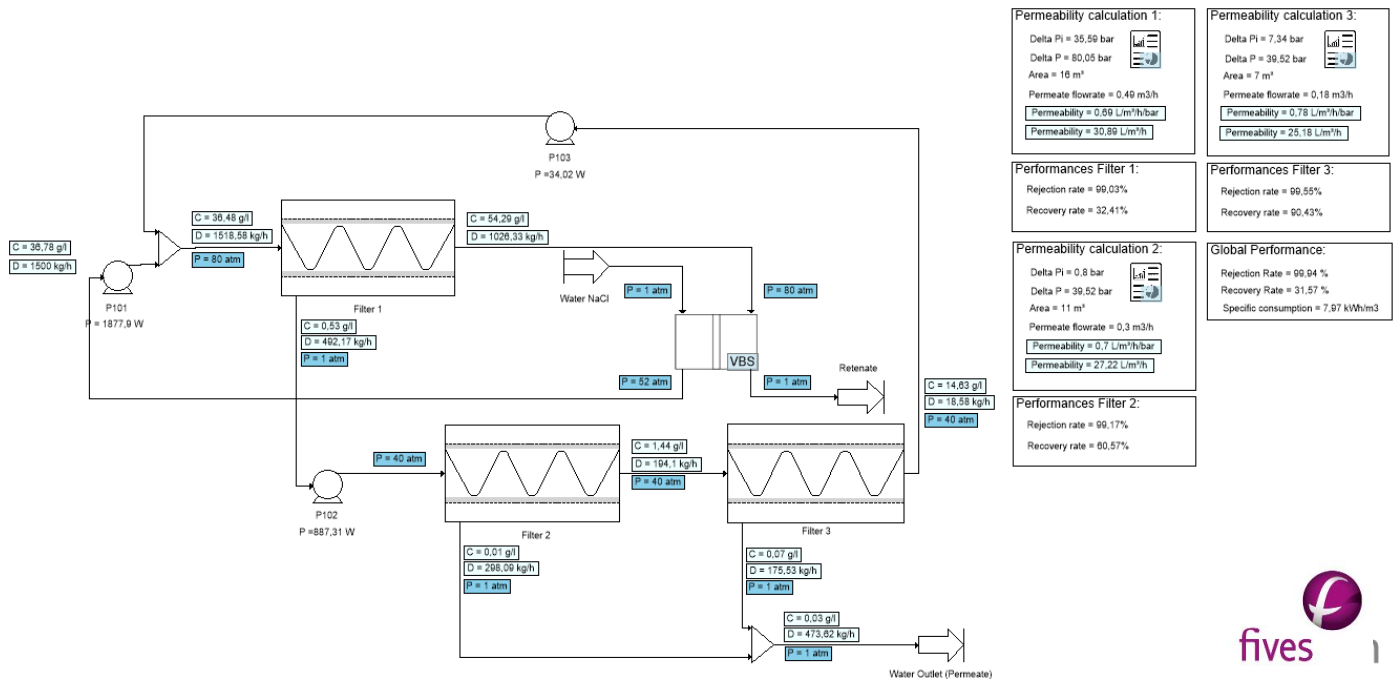


Schéma de simulation du dessalement d'eau de mer en version hybride avec ERD

6.8.2 Conditions opératoires

- ✓ Filtres membranaires spiralés

| Nom filtre | Filter 1 | Filter 2 | Filter 3 | Total |
|---------------------------|----------|----------|----------|-------|
| Surface (m ²) | 16 | 11 | 7 | 34 |

- ✓ Pompe centrifuge (P101)

| | |
|-------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 80 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |



✓ Pompe centrifuge (P102)

| | |
|--------------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 40 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |

✓ Pompe centrifuge (P103)

| | |
|--------------------------------------|------|
| Pression de refoulement (atm) | 80 |
| Efficacité volumétrique | 0.65 |
| Efficacité mécanique | 0.95 |
| Efficacité électrique | 0.99 |

✓ ERD

Les paramètres de l'échangeur de pression (ERD) sont décrits dans le paragraphe ERD des conditions opératoires globales (cf. 4 Conditions opératoires).

6.8.3 Résultats

✓ Bilan

| | | Alimentation | Rétentat | Perméat |
|--|------------------------|---------------------|-----------------|----------------|
| Débit volumique (m³/h) | | 1.47 | 0.99 | 0.48 |
| Débit massique (t/h) | | 1.50 | 1.03 | 0.47 |
| Concentration en NaCl (g/l) | | 36.74 | 54.29 | 0.03 |
| Composition massique (%) | WATER | 0.964 | 0.947 | 0.99997 |
| | SODIUM CHLORIDE | 0.036 | 0.053 | 0.00003 |

✓ Performances

| | |
|--|-------|
| Taux de conversion (%) | 31.57 |
| Taux de rejet NaCl (%) | 99.94 |
| Consommation spécifique (kWh/m³) | 7.97 |

La consommation spécifique est réduite de 65 % comparée au cas V4 (cf. 6.6.3 Version hybride\Résultats).

7 CONCLUSION

| Nom | Distillation | 1 étage | 2 étages série | 2 étages parallèle | Hybride | 1 étage + ERD | Hybride + ERD |
|---|--------------|---------|----------------|--------------------|---------|---------------|---------------|
| Version | | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 |
| Débit de perméat (m ³ /h) | 0.48 | 0.8 | 0.81 | 0.46 | 0.48 | 0.8 | 0.48 |
| Concentration en NaCl de l'eau produite (g/l) | 0 | 0.89 | 0.87 | 0.02 | 0.03 | 0.89 | 0.03 |
| Taux de conversion (%) | 30.88 | 52.80 | 53.61 | 30.29 | 31.57 | 52.80 | 31.57 |
| Taux de rejet (%) | 100 | 98.88 | 98.92 | 99.96 | 99.94 | 98.88 | 99.94 |
| Consommation spécifique (kWh/m ³) | 243.59 | 6.72 | 6.62 | 23.4 | 22.52 | 3.76 | 7.97 |

L'association de filtres en série permet d'obtenir un débit plus important. Dans cette configuration, le seuil de potabilité de l'eau est dépassé (selon l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), le seuil est fixé à 0.2 g/l de NaCl [WHO11]). Pour ne pas dépasser ce seuil limite, l'utilisation de filtres en parallèle peut être envisagée. Néanmoins, cette configuration en parallèle implique un débit de perméat produit plus faible.

Finalement, le choix le plus pertinent pour atteindre les spécifications est de trouver un compromis entre ces deux configurations en série et en parallèle. La configuration hybride présentée dans ce document est effectivement utilisée industriellement pour le dessalement de l'eau de mer [SUE09].

Afin de diminuer la consommation énergétique, un système de récupération de pression peut être intéressant.

La consommation spécifique des unités de dessalement d'eau de mer est de l'ordre de 2.5 à 4 kWh/m³ [OKA19]. Cette consommation spécifique n'a fait que baisser grâce aux avancées technologiques (pompes plus efficaces, systèmes de récupération d'énergie, efficacités de membrane plus élevée...) en passant de plus de 20 kWh/m³ dans les années 1980, à 5 kWh/m³ dans les années 1990 puis à 2.5-4 kWh/m³ actuellement.

En termes de performances, la filtration membranaire est plus intéressante que la distillation d'un point de vue de la consommation énergétique. En revanche, la distillation peut être pertinente pour la production d'une eau totalement pure.

8 BIBLIOGRAPHIE

- [CAU17] CAUSSERAND C, ALBASI C, ROUX de BALMANN H., « Filtration membranaire (OI, NF, UF, MF) - Applications en traitement des eaux », Techniques de l'ingénieur, référence, J2794 v2 (2017)
- [DAN03] DANIS P., « Dessalement de l'eau de mer », Techniques de l'ingénieur, référence, J2-700 (2003)
- [DUP20] DUPONT, « Product Data Sheet: FilmTec™ BW30-365 Element » (2020)
- [MAU74] MAUREL A., « Osmose inverse et ultrafiltration, Considérations théoriques », Techniques de l'ingénieur (1974)
- [OKA19] OKAMOTO Y., LIENHARD J. H., « How RO membrane permeability and other performance factors affect process cost and energy use: A review », Desalination (2019)
- [SUE09] SUEZ, « Barka II seawater reverse osmosis desalination plant » (2009)
- [WIL21] WILDING W. V., KNOTTS T. A., GILES N. F., ROWLEY R. L. « DIPPR Data Compilation of Pure Chemical Properties; Design Institute for Physical Properties », AIChE, New York, NY (2021)
- [WHO11] World Health Organization, « Guidelines for Drinking-water Quality » (2011)

ANNEXE

Les principaux résultats d'une filtration membranaire sont résumés à l'aide de coefficients usuellement employés dans le domaine de la filtration :

- ✓ Taux de conversion :

$$\text{Taux de conversion} = \frac{F_{p,out} - F_{p,in}}{F_{r,in}}$$

S'il n'y a pas de connexion en entrée côté perméat, la formule est simplifiée comme suit :

$$\text{Taux de conversion} = \frac{F_{p,out}}{F_{r,in}}$$

$F_{p,out}$: Débit massique en sortie côté perméat (kg/h)

$F_{p,in}$: Débit massique en entrée côté perméat (kg/h)

$F_{r,in}$: Débit d'alimentation (entrée côté rétentat) (kg/h)

- ✓ Taux de rejet du constituant i :

$$Tr_i = 1 - \frac{C_{p,i,out}}{C_{r,i,out}}$$

$C_{p,i,out}$: Concentration massique du constituant i en sortie côté perméat (kg/m³)

$C_{r,i,out}$: Concentration massique du constituant i en entrée côté rétentat (kg/m³)

- ✓ Consommation spécifique (kWh/m³)

$$\text{Consommation spécifique} = \frac{P_w}{F_{p,out}}$$

P_w : Puissance électrique totale consommée (kW)

$F_{p,out}$: Débit massique en sortie côté perméat (m³/h)