

## EXEMPLE D'APPLICATION PROSIMPLUS

## FILTRATION MEMBRANAIRE

### INTERET DE L'EXEMPLE

Cet exemple présente les simulations de deux filtres à membranes : l'une au sujet d'une filtration liquide-liquide et l'autre d'une filtration gaz-gaz. L'intérêt de cet exemple est d'illustrer l'utilisation des modules de filtration membranaire dans le logiciel ProSimPlus.

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

<b>FICHIERS PROSIMPLUS CORRESPONDANTS</b>	<i>PSPS_EX_FR-Separation-membranaire-O2-N2.pmp3</i> <i>PSPS_EX_FR-Dessalement-Eau-De-Mer.pmp3</i>
---	--

*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](http://www.fivesgroup.com) / [www.fives-prosim.com](http://www.fives-prosim.com)

## TABLE DES MATIÈRES

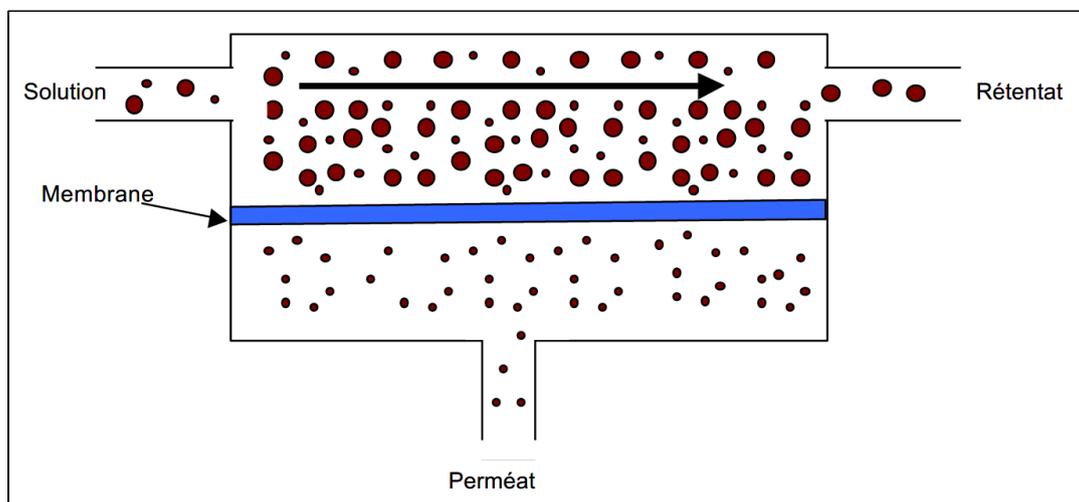
<b>1</b>	<b>MODELISATION DU PROCEDE .....</b>	<b>3</b>
1.1	Présentation du procédé .....	3
1.2	Schéma du procédé .....	4
<b>2</b>	<b>SEPARATION OXYGENE/AZOTE .....</b>	<b>5</b>
2.1	Schéma de simulation .....	5
2.2	Constituants.....	5
2.3	Modèle thermodynamique .....	6
2.4	Conditions opératoires.....	6
2.5	Résultats.....	12
<b>3</b>	<b>DESSALEMENT EAU DE MER .....</b>	<b>15</b>
3.1	Schéma de simulation .....	15
3.2	Constituants.....	15
3.3	Modèle thermodynamique .....	15
3.4	Conditions opératoires.....	16
3.5	Résultats.....	21
<b>4</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>23</b>
	<b>ANNEXE 1 : L'OSMOSE INVERSE.....</b>	<b>24</b>
	<b>ANNEXE 2 : BASE DE DONNEES DE PERMEABILITES.....</b>	<b>25</b>
	<b>ANNEXE 3 : DEFINITION DES RESULTATS DE FILTRATION.....</b>	<b>26</b>

# 1 MODELISATION DU PROCEDE

## 1.1 Présentation du procédé

Cet exemple présente l'utilisation des filtres à membrane appliquée à 2 cas de filtrations membranaires : une filtration liquide-liquide (filtration d'une solution aqueuse de chlorure de sodium) et gaz-gaz (séparation de l'oxygène et de l'azote contenus dans l'air).

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). Dans le cas de la filtration liquide-liquide présentée dans ce document, l'effet d'osmose inverse est également à prendre en compte comme une force motrice (cf. Annexe 1 : L'osmose inverse).



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.

Les filtres à membrane peuvent être utilisés pour les opérations de :

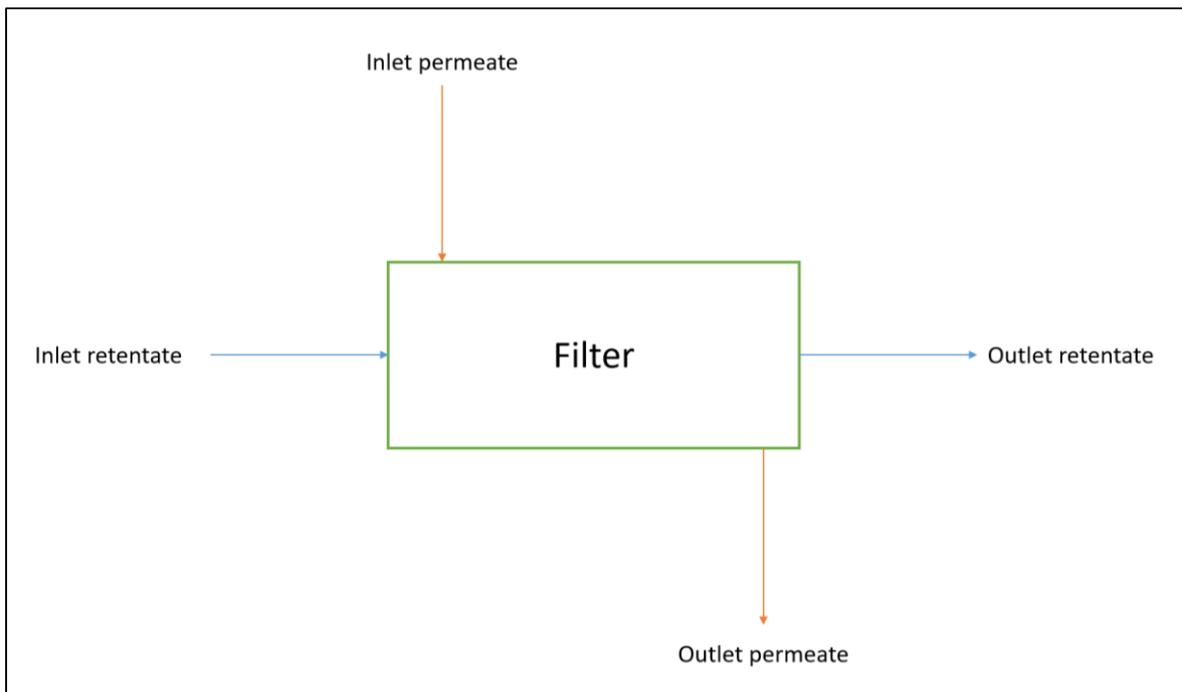
- Déshumidification de gaz / séchage d'air ;
- Humidification de gaz/air ;
- Traitement des polluants gazeux (COV : Composé Organique Volatile) ou liquides ;
- Purification de biogaz ;
- Séparation des constituants de l'air ( $O_2/N_2$ ) ;
- ...

## 1.2 Schéma du procédé

Les 2 procédés de filtration membranaire présentés dans ce document sont construits à partir d'un module de filtre à membrane.

Le courant à traiter entre côté rétentat. Il est séparé en deux au sein du filtre. Les constituants traversant le filtre ressortent dans le perméat tandis que la phase retenue sort côté rétentat.

Le courant d'intérêt peut être le perméat, le rétentat, voir les deux dans certains cas. Dans le cas de la filtration de l'eau de mer (cf. 3 Dessalement eau de mer), le courant d'intérêt est le perméat (eau dessalée). Alors que pour la filtration de l'air (cf. 2 Séparation oxygène/azote), les deux courants ont un intérêt ( $N_2$  et  $O_2$  purifiés de part et d'autre de la membrane).



Dans une grande majorité des cas, il n'existe pas de courant entrant côté perméat. Dans les configurations pour lesquelles ce courant entrant côté perméat existe, c'est un courant de balayage, qui est utilisé notamment dans les applications de filtration gaz-gaz. Le courant de balayage est un gaz neutre (c'est-à-dire n'intervenant pas dans la perméation) et il est utilisé pour « balayer » la surface de la membrane afin d'augmenter le différentiel de concentration de part et d'autre de la membrane pour améliorer le transfert.

## 2 Séparation oxygène/azote

L'exemple suivant est fondé sur la séparation de l'oxygène (O<sub>2</sub>) et de l'azote (N<sub>2</sub>) de l'air. Cet exemple est extrait de [PER08].

### 2.1 Schéma de simulation

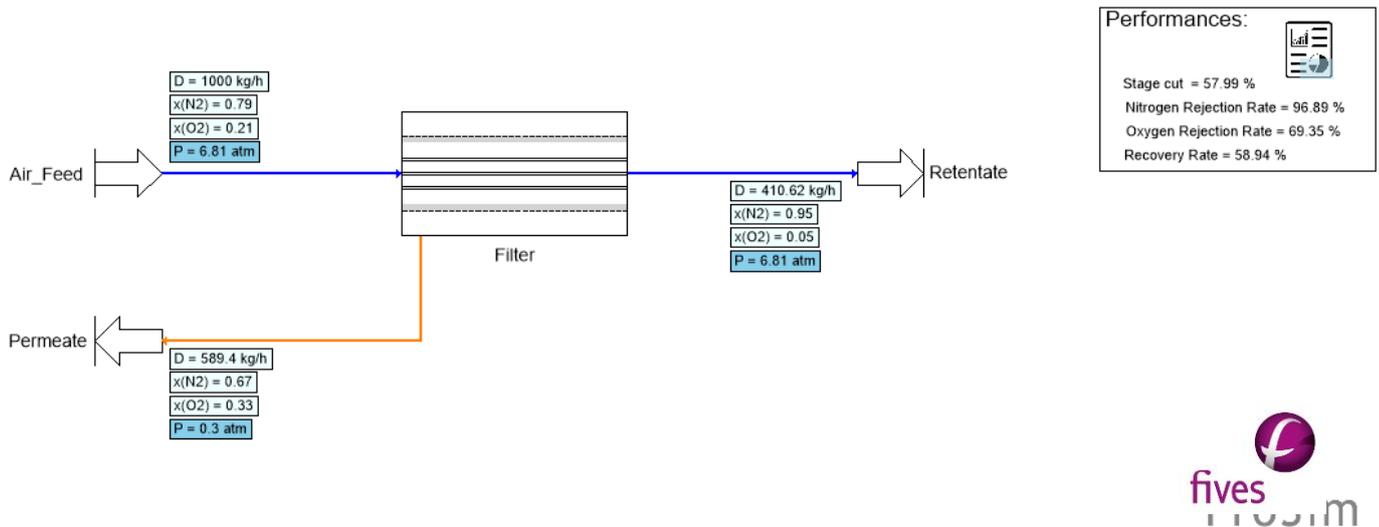


Schéma de simulation de la séparation oxygène/azote

### 2.2 Constituants

Les constituants pris en compte dans la simulation ainsi que leurs formules chimiques et leurs numéros CAS<sup>1</sup> 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 <sup>1</sup>
NITROGEN	N <sub>2</sub>	7727-37-9
OXYGEN	O <sub>2</sub>	7782-44-7

<sup>1</sup>CAS 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

## 2.3 Modèle thermodynamique

Le système étudié est un mélange de  $N_2/O_2$  qui peut s'apparenter à de l'air. Dans les conditions de pressions du procédé (0.3 à 6 atm), le profil thermodynamique retenu est le profil « Idéal ».

## 2.4 Conditions opératoires

- ✓ Alimentation du procédé

Air côté tubes		
Composition molaire (%)	O <sub>2</sub>	21
	N <sub>2</sub>	79
Température entrée (°C)		25
Pression entrée (kPa)		690
Débit massique (kg/h)		1000

## ✓ Filtre à membrane tubulaire

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

Filter à membrane tubulaire (SCMRE3)

Nom: Filter

Desc :

Identification Paramètres Scripts Rapport Courants Profils Notes Paramètres avancés

Configuration Général Perméation Pertes de charge Paramètres numériques

Géométrie de l'appareil

Le rétentat est défini Coté tubes

Sens de l'écoulement Co-courant

Nombre de tubes 50000

Longueur (L) 50 m

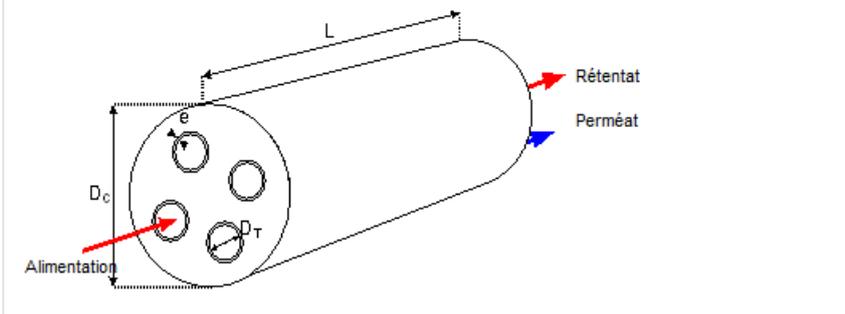
Diamètre de la calandre (Dc) 0,5 m

Diamètre interne des tubes (Dt) 0,0008 m

Epaisseur des tubes (e) 5E-5 m

Rugosité des tubes 0 m

Inclinaison 0 °



The diagram illustrates a cylindrical tubular membrane filter. It shows the length (L), the outer diameter of the shell (Dc), and the inner diameter of the tubes (Dt). The thickness of the tubes is denoted as (e). A red arrow labeled 'Alimentation' (Feed) enters from the left. A red arrow labeled 'Rétentat' (Retentate) exits from the right. A blue arrow labeled 'Perméat' (Permeate) exits from the bottom right. The flow is labeled as 'Co-courant' (Co-current).

OK Annuler

## 1. Configuration

<b>Rétentat défini</b>	Coté tubes
<b>Sens de l'écoulement</b>	Co-courant
<b>Nombre de tubes</b>	50 000
<b>Longueur (m)</b>	50
<b>Diamètre de la calandre Dc (m)</b>	0.5
<b>Diamètre interne des tubes Dt (m)</b>	0.0008
<b>Epaisseur des tubes (m)</b>	$5 \times 10^{-5}$
<b>Rugosité des tubes (m)</b>	0
<b>Inclinaison (°)</b>	0

## 2. Général

<b>Température (°C)</b>	25
<b>Etat physique</b>	Vapeur
<b>Pression coté perméat (atm)</b>	0.3

### 3. Perméation

L'ensemble des cases suivantes doivent être cochées :

The screenshot shows the 'Filtre à membrane tubulaire (SCMRE3)' window. The 'Nom' field contains 'Filter' and 'Desc' is empty. The 'Perméation' tab is selected, showing the following options:

- Type de membrane:**  Standard (poreuse ou dense),  Dense à échange isotopique.
- Définition des perméabilités de la membrane:**  Standard,  Script.
- Type de membrane (detailed):**  Perméabilités des constituants,  Perméabilité d'un composé de référence et sélectivités,  Perméabilités du solvant et des solutés,  Perméabilités du solvant et d'un composé de référence avec sélectivités.

Constituants	Perméabilités...
<input checked="" type="checkbox"/> NITROGEN	Editer...
<input checked="" type="checkbox"/> OXYGEN	Editer...

Buttons: OK, Annuler

Dans cet exemple, la membrane est une membrane poreuse en silicone. Tous les constituants de l'air diffusent à travers ce type de membrane. Néanmoins, ce type de membrane est sélective car les perméabilités des constituants diffèrent (cf. Annexe 2 : Base de données de perméabilités) :

- Perméabilité du O<sub>2</sub> : 650 barrer soit  $2.0 \times 10^{-13}$  mol/(s.m.Pa) ;
- Perméabilité du N<sub>2</sub> : 155 barrer soit  $4.76 \times 10^{-14}$  mol/(s.m.Pa).

Les valeurs de perméabilités et de polarisation de l'oxygène et de l'azote sont renseignées comme suit :

Perméabilité N <sub>2</sub>	
Modèle de perméation	Pression partielle
Type de définition	Constant
Type	Molaire
Perméabilité molaire (mol.m/m <sup>2</sup> /s/Pa)	4.76 × 10 <sup>-14</sup>

Perméabilité O <sub>2</sub>	
Modèle de perméation	Pression partielle
Type de définition	Constant
Type	Molaire
Perméabilité molaire (mol.m/m <sup>2</sup> /s/Pa)	2 × 10 <sup>-13</sup>

Commentaire : Pour un mélange binaire (A/B), il est fréquent de renseigner la perméabilité du constituant B par rapport à la perméabilité du constituant A (coefficient de séparation :  $\alpha$ ) et la perméabilité d'un des 2 constituants.

$$\alpha = \frac{\text{Perméabilité de A}}{\text{Perméabilité de B}}$$

Cette fonctionnalité est également disponible dans l'onglet « Perméation » du module de filtration membranaire :

The screenshot shows the 'Filtre à membrane tubulaire (\$CMRE3)' window. The 'Perméation' tab is active, displaying the following settings:

- Type de membrane:**
  - Standard (poreuse ou dense)
  - Dense à échange isotopique
- Définition des perméabilités de la membrane:**
  - Standard
  - Script
- Type de membrane (highlighted with a red box):**
  - Perméabilités des constituants
  - Perméabilité d'un composé de référence et sélectivités
  - Perméabilités du solvant et des solutés
  - Perméabilités du solvant et d'un composé de référence avec sélectivités

Additional options include 'Prise en compte de l'effet de polarisation à la membrane' and 'Prise en compte de l'effet de osmotique', both currently unchecked. An 'Editer...' button is visible next to the second option.

#### 4. Pertes de charge

Les valeurs par défaut sont utilisées.

#### 5. Paramètres numériques

Le nombre de cellules, le nombre maximum d'itérations et le critère de convergence sont respectivement modifiés à 150, 500 et  $1 \times 10^{-9}$ .

#### ✓ Script

Le script suivant est utilisé dans le module (Windows Script «Stage Cut»).

```
Function OnCalculation()  
  With Project.Modules("Filter")  
    ' Get streams  
    F_RET_E = .InputStream(1).MolarFlowrate  
    F_PER_S = .OutputStream(2).MolarFlowrate  
  End With  
  ' Stage cut calculation  
  Stage_Cut = (F_PER_S/F_RET_E)*100.0  
  Module.parameter(1) = Stage_Cut  
  OnCalculation = True  
End Function
```

## 2.5 Résultats

- ✓ Bilan

		Coté Rétentat		Coté Perméat
		Entrée	Sortie	Sortie
Température (°C)		25	25	25
Pression (atm)		6.8	6.8	0.3
Vitesse (m/s)		1.38	0.58	2.77
Flux massique (t/h)		1000	411	589
Composition molaire (%)	NITROGEN	0.79	0.95	0.67
	OXYGEN	0.21	0.05	0.33

- ✓ Performances (cf. Annexe 3 : Définition des résultats de filtration)

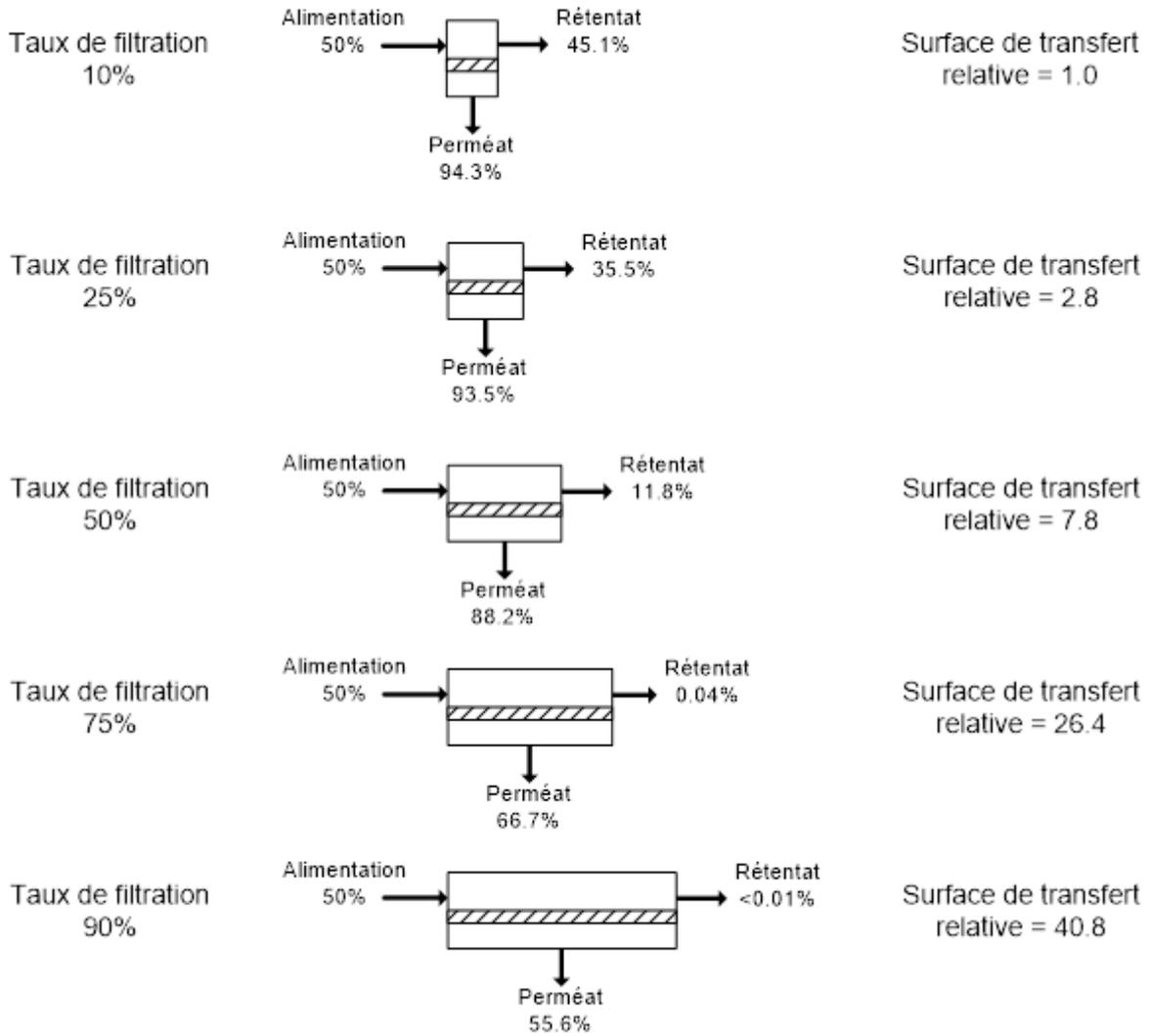
Taux de rejet N <sub>2</sub> (%)	96.89
Taux de rejet O <sub>2</sub> (%)	69.35
Taux de récupération (%)	58.94

La membrane rejette  $\approx 97\%$  de l'oxygène et  $\approx 70\%$  de l'azote. Ce filtre permet d'obtenir un courant plus concentré en azote (le rétentat) et un autre plus concentré en oxygène (le perméat).

- ✓ Comparaison avec les données expérimentales

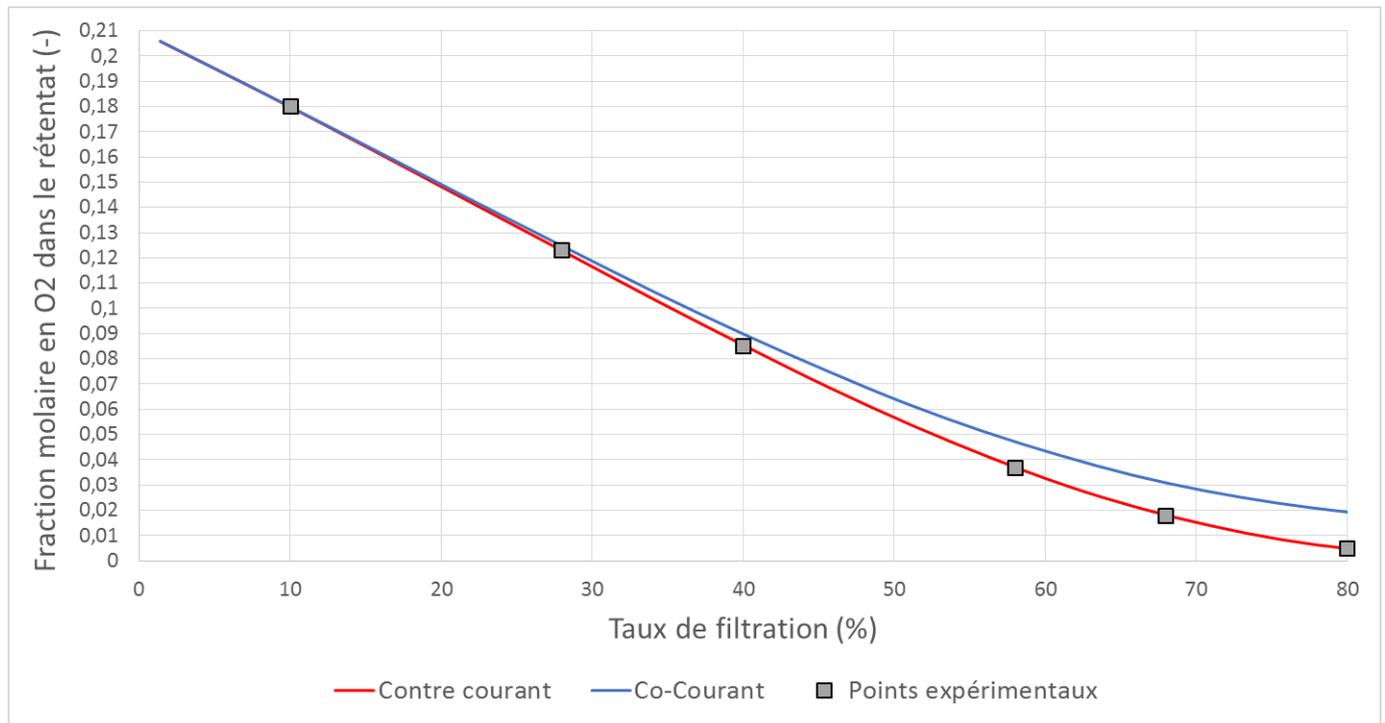
La comparaison des résultats est réalisée en analysant le taux de conversion (« stage cut ») (cf. Annexe 3 : Définition des résultats de filtration) et la composition en O<sub>2</sub> en sortie du rétentat par rapport aux données expérimentales issues de [PER08].

Plus le taux de filtration (taux de conversion) est important (plus la surface de transfert est importante), moins le perméat est enrichi en espèce la plus perméante.



*Relation entre surface de transfert, taux de filtration et purification*

La comparaison des données expérimentales et des résultats obtenus par la simulation ProSimPlus pour la séparation  $O_2/N_2$  est la suivante :



Les résultats sont cohérents avec les données expérimentales. Il faut noter que le modèle « co-courant » est moins performant que le modèle « contre-courant » pour des taux de filtration supérieurs à 30% [PER08].

### 3 DESSALEMENT EAU DE MER

L'exemple suivant est fondé sur la séparation de l'eau (H<sub>2</sub>O) et du chlorure de sodium (NaCl). Ce type de filtre est notamment utilisé pour le dessalement de l'eau de mer.

#### 3.1 Schéma de simulation

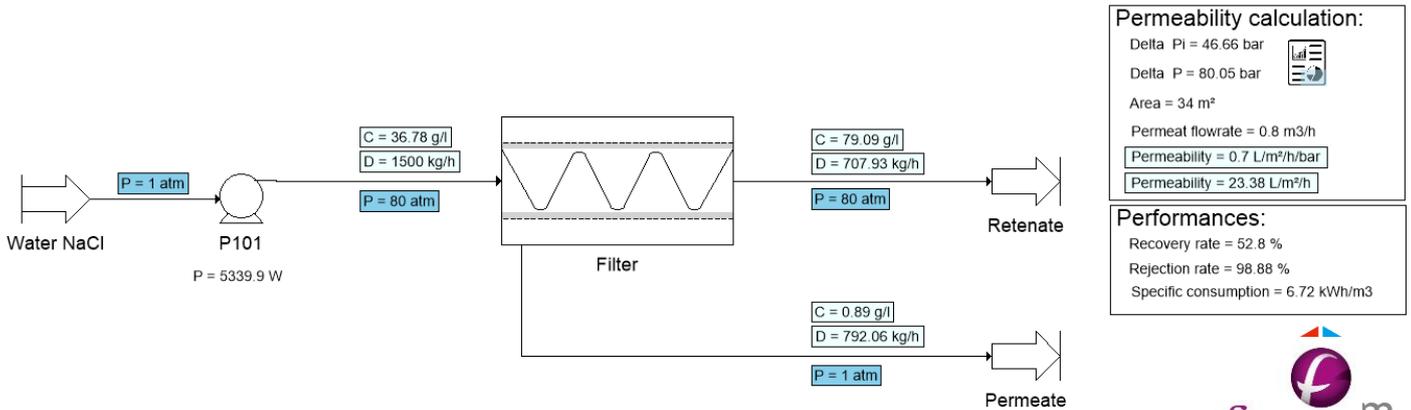


Schéma de simulation dessalement eau de mer

#### 3.2 Constituants

Les constituants pris en compte dans la simulation ainsi que leurs formules chimiques et leurs numéros CAS<sup>1</sup> 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 <sup>1</sup>
WATER	H <sub>2</sub> O	7732-18-5
SODIUM CHLORIDE	NaCl	7647-14-5

<sup>1</sup>CAS 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

#### 3.3 Modèle 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.

### 3.4 Conditions opératoires

Les conditions opératoires des différents modules sont les suivantes :

- ✓ Alimentation du procédé

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

- ✓ Pompe centrifuge

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

## ✓ Filtre membranaire spiralé

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

**Filtre à membrane spiralée (SCMRE1)**

Nom: Filter

Desc:

Identification Paramètres Scripts Rapport Courants Notes Paramètres avancés

Configuration Général Perméation Pertes de charge Paramètres numériques

Géométrie de l'appareil

Sens de l'écoulement: Contre-courant

Définition de la membrane: Surface et longueur

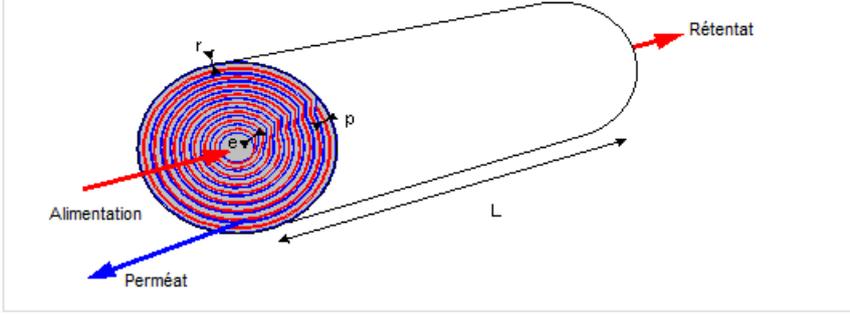
Longueur (L): 1 m

Surface de filtration (S): 34 m<sup>2</sup>

Epaisseur de passage côté rétentat (r): 0,9 mm

Epaisseur de passage côté perméat (p): 0,9 mm

Epaisseur de la membrane (e): 1E-6 m



OK Annuler

## 1. Configuration

<b>Sens de l'écoulement</b>	Contre-courant
<b>Définition de la membrane</b>	Surface et longueur
<b>Longueur (m)</b>	1
<b>Surface (m<sup>2</sup>)</b>	34
<b>Epaisseur de passage coté rétentat (mm)</b>	0.9
<b>Epaisseur de passage coté perméat (mm)</b>	0.9
<b>Epaisseur de la membrane (m)</b>	1×10 <sup>-6</sup>

## 2. Général

Température (°C)	30
Etat physique	Liquide
Pression coté perméat (atm)	1

## 3. Perméation

L'ensemble des cases suivantes doivent être cochées :

**Filtre à membrane spiralée (SCMRE1)**

Nom: Filter  
Desc:

Identification Paramètres Scripts Rapport Courants Notes Paramètres avancés

Configuration Général **Perméation** Pertes de charge Paramètres numériques

Type de membrane  
 Standard (poreuse ou dense)  Prise en compte de l'effet de polarisation à la membrane  
 Dense à échange isotopique  Prise en compte de l'effet de osmotique [Editer...](#)

Définition des perméabilités de la membrane  
 Standard  Script

Type de membrane  
 Perméabilités des constituants  
 Perméabilité d'un composé de référence et sélectivités  
 Perméabilités du solvant et des solutés  
 Perméabilités du solvant et d'un composé de référence avec sélectivités

Constituants	Perméabilités...	Solvant	Polarisé ?	Polarisation...
<input checked="" type="checkbox"/> WATER	<a href="#">Editer...</a>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<a href="#">Editer...</a>
<input checked="" type="checkbox"/> SODIUM CHLORIDE	<a href="#">Editer...</a>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">Editer...</a>

OK Annuler

Pour ce type de filtration, des valeurs de perméabilités 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 perméabilités 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 <sup>2</sup> /h/atm)	$7.1 \times 10^{-10}$

Perméabilité NaCl	
Modèle de perméation	Concentration
Perméabilité (m/s)	$1 \times 10^{-7}$
Polarisation chlorure de sodium	
Modèle pour le calcul du coefficient de transfert de masse (ki)	Chen and Qin
Di (m <sup>2</sup> /s)	$1 \times 10^{-6}$
$\alpha$	0.031
$\beta$	0.9243
$\gamma$	0.3495

#### 4. Pertes de charge

Les valeurs par défaut sont utilisées.

#### 5. Paramètres numériques

Seul le nombre de cellules est modifié à 20.

## ✓ 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
```

### 3.5 Résultats

✓ Bilan

		Coté Rétentat		Coté Perméat
		Entrée	Sortie	Sortie
Température (°C)		32.9	30.0	30.0
Pression (atm)		80	80	1
Flux volumique (m <sup>3</sup> /h)		1.47	0.67	0.79
Vitesse (m/s)		1.33×10 <sup>-2</sup>	6.12×10 <sup>-3</sup>	7.19×10 <sup>-3</sup>
Flux massique (t/h)		1.50	0.71	0.79
Concentration (g/l)		36.84	79.02	0.89
Composition massique (%)	WATER	0.964	0.925	0.999
	SODIUM CHLORIDE	0.036	0.075	0.001

✓ Performances (cf. Annexe 3 : Définition des résultats de filtration)

Taux de conversion (%)	52.8
Taux de rejet du NaCl (%)	98.9
Consommation spécifique (kWh/m <sup>3</sup> )	6.7

## 4 CONCLUSION

Cet exemple a permis de présenter des filtrations membranaires liquide-liquide et gaz-gaz via les filtres à membrane du logiciel ProSimPlus. Il existe 3 types de filtres à membrane différents dans le logiciel ProSimPlus : un filtre à membrane plane, un filtre à membrane tubulaire et un filtre à membrane spiralée. L'objectif de cet exemple était d'illustrer l'utilisation de ces modules de filtration membranaire.

Les exemples présentés dans ce document sont volontairement simplifiés par rapport à des unités de filtrations industrielles. Des configurations plus complexes (filtres en série et/ou parallèle selon la pureté et le débit spécifiés) sont présentés dans l'exemple « PSPS\_EX\_FR–Dessalement-Eau-De-Mer ».

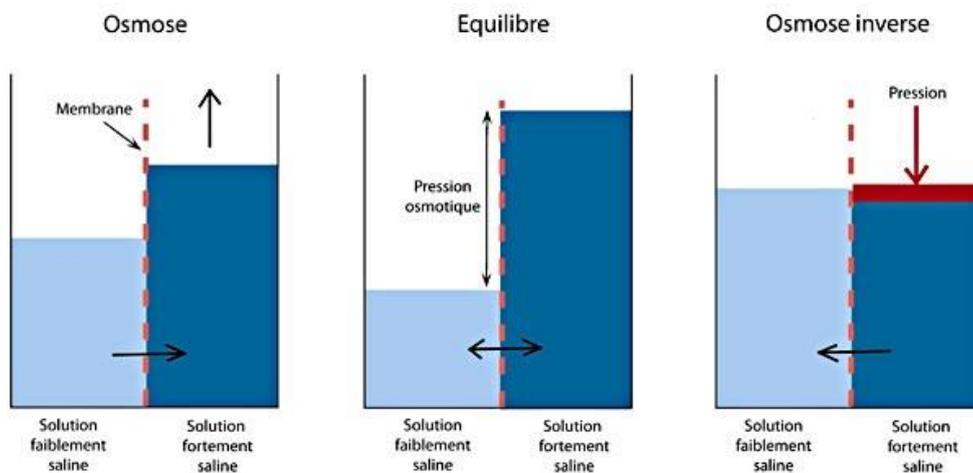
## 5 BIBLIOGRAPHIE

- [BER02] BERLAND J.M., « Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau », document technique FNDAE, Office International de l'eau SNIDE, (2002).
- [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).
- [CHA05] CHAY L., « Etude comparative des membranes utilisées en production d'eau potable : microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse », Office International de l'eau SNIDE, (2005).
- [DEO20] DEON S., FIEVET P., « Chapitre XIII. Traitement des eaux par nanofiltration : généralités, mécanismes et applications », Eaux industrielles contaminées, (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).
- [PER08] PERRY R.H., « Perry's Chemical Engineers's Handbook », 8<sup>th</sup> edition, 2008, Membrane permeation processes, 20-57.
- [POL21] Site internet de Polymem, fabricant de membranes, <https://www.polymem.fr/produits/membranes> , consultée le 10/11/2021.
- [ROB68] ROBB W. L., « THIN SILICONE MEMBRANES-THEIR PERMEATION PROPERTIES AND SOME APPLICATIONS », Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 146, issue 1 Materials in , pp. 119-137, (1968).
- [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).

## ANNEXE 1 : L'OSMOSE INVERSE

L'osmose inverse (OI) est une technique qui peut être utilisée pour remplacer une étape de distillation ou en complément d'une étape de distillation pour augmenter la production.

Pour comprendre l'osmose inverse, il est nécessaire d'expliquer le phénomène d'osmose. L'osmose est un phénomène naturel qui se produit lorsqu'une solution diluée en soluté(s) est séparée d'une solution concentrée par une membrane semi-perméable. L'eau (solvant le plus utilisé), sous l'action d'une force générée par le gradient de concentration, passe à travers la membrane de la solution la moins concentrée vers la plus concentrée. Ce passage se fait jusqu'à ce que la solution concentrée soit diluée. Lorsque les concentrations de part et d'autre de la membrane sont égales, l'équilibre osmotique est atteint. La différence de concentration crée une pression, appelée la pression osmotique (notée  $\pi$ ). Lors de cet équilibre, la pression empêche tout passage ultérieur pour équilibrer les concentrations ([BER02], [CHA05], [POL21]).



*Principe de l'effet osmotique*

Si une pression supérieure à la pression osmotique est appliquée du côté de la solution concentrée, le sens normal du flux osmotique est inversé. L'eau pure passe à travers la membrane de la solution la plus concentrée vers la solution la moins concentrée. Elle est ainsi séparée de ses contaminants. C'est le principe de base de l'osmose inverse.

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laissent passer l'eau en arrêtant tous les sels à la différence des membranes MF (Micro Filtration) et UF (Ultra Filtration). Ce type de membrane dense a une épaisseur de quelques microns (0.2  $\mu\text{m}$ ) [POL20].

Les principales applications industrielles de l'OI sont [DEO20] :

- Le dessalement des eaux de mer ;
- Le dessalement des eaux saumâtres ;
- L'élimination de pesticides et d'herbicides ;
- La production d'eau ultra pure (industrie électronique, pharmaceutique, etc.) ;
- La production d'eau de process...

## ANNEXE 2 : BASE DE DONNEES DE PERMEABILITES

Cette annexe présente une base de données de perméabilités de constituants gazeux

Le tableau ci-dessous présente les perméabilités de quelques constituants gazeux à travers une membrane en silicone [ROB68] :

NOM DU GAZ	FORMULE CHIMIQUE	COEFFICIENT DE PERMEABILITE DANS LE SILICONE (Barrer)
Nitrogen	N <sub>2</sub>	280
Carbon monoxide	CO	340
Oxygen	O <sub>2</sub>	600
Nitric oxide	NO	600
Argon	Ar	600
Hydrogen	H <sub>2</sub>	650
Helium	He	350
Methane	CH <sub>4</sub>	950
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1350
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2500
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	3250
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4100
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	4350
Acetone	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	5860
Ammonia	NH <sub>3</sub>	5900
Nitrogen dioxide	NO <sub>2</sub>	7500
Octane	n-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	8600
Butane	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	9000
Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	9130
Hexane	n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	9400
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	10000
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	10800
Methanol	CH <sub>3</sub> OH	13900
Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub>	15000
Pentane	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	20000
Water	H <sub>2</sub> O	36000
Carbon disulfide	CS <sub>2</sub>	90000

### ANNEXE 3 : DEFINITION DES RESULTATS DE FILTRATION

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/m<sup>3</sup>)

$C_{r,i,out}$  : Concentration massique du constituant i en entrée côté rétentat (kg/m<sup>3</sup>)

- ✓ Consommation spécifique (kWh/m<sup>3</sup>)

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

$P_w$  : Puissance électrique totale consommée (kW)

$F_{p,out}$  : Débit massique en sortie côté perméat (m<sup>3</sup>/h)