OSMOSE INVERSE

1 Principe de l'osmose.

Dans le cas d'une osmose l'eau utilisé comme solvant se déplace, à travers une membrane semi-perméable, d'une solution à faible concentration vers une solution à forte concentration jusqu'à équilibre des concentrations et de la pression osmotique engendrée par le phénomène.

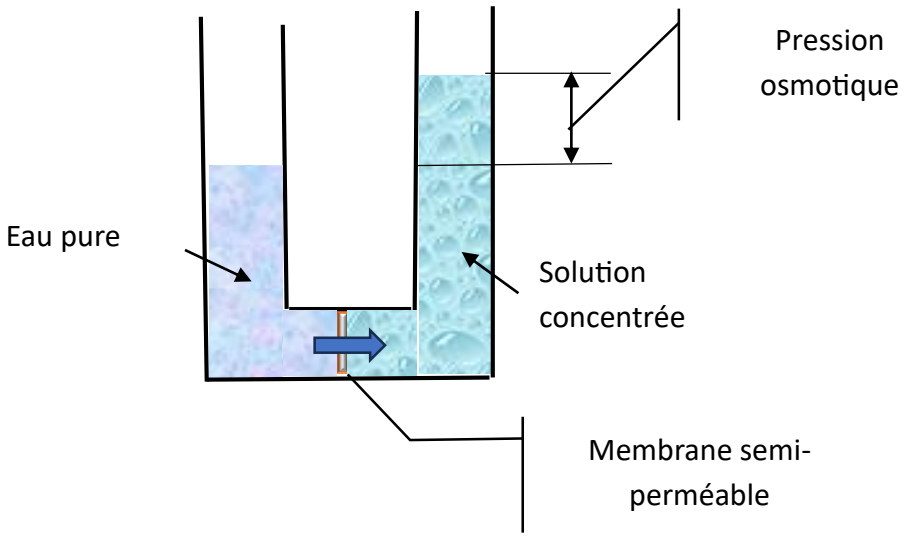


Schéma de principe du phénomène d'osmose

La pression osmotique d'une solution est donnée par la loi de Vant'Hoff, dérivée de la loi des gaz parfait suivant :

$$p = R \times T \times \frac{n}{V} \times i \times \emptyset$$

p : Pression osmotique en Pa.
R : Constante des gaz parfaits égale à 8,314 J mol^{-1} K^{-1}.
T : Température absolue.
N : Nombre de moles de soluté.
V : Volume en m^3.
$\frac{n}{V}$: Concentration molaire en mol m^{-3}.
i : Nombre de particules formées par dissociation du soluté.
Φ : Coefficient osmotique ou facteur de correction. Par défaut égal à 1.

2 Osmose inverse.

En osmose inverse, on applique une pression hydrostatique externe supérieure à la pression osmotique sur la solution concentrée. Cette pression force l'eau à travers la membrane dans le sens inverse de l'osmose naturelle.

La membrane semi-perméable généralement en polyamide avec des pores de un micromètre permet d'obtenir une eau épurée des sels minéraux, bactéries, virus et composés organiques dissouts.

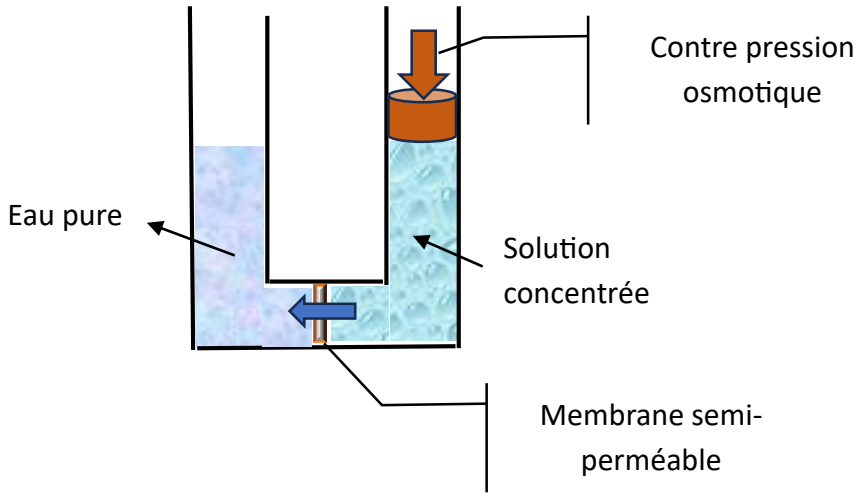
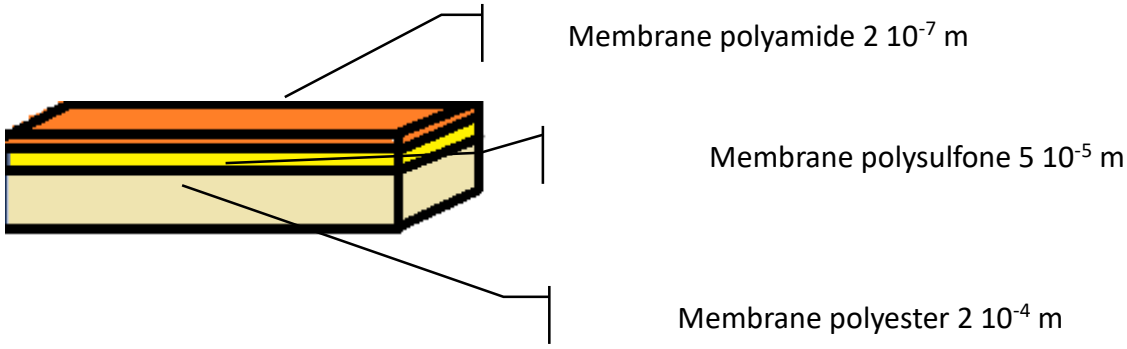


Schéma de principe de l'osmose inverse

3 Les membranes d'osmose inverse.

L'élément fondamental constituant une unité d'osmose inverse est la membrane semi-perméable.

Elle est constituée en général en polyamide d'une épaisseur de 0,1 à 0,2 µm soit 1 à 5 10^{-7} m avec des tailles de coupures apparentes, interstices moyens, de 0,1 nanomètre soit 1 10^{-10} m soit 0,0001 µm, les bactéries de 05 à 5 µm et les virus de 0,02 à 0,3 µm pouvant donc être retenus.
Afin d'apporter de la résistance mécanique cette membrane est associée à une couche intermédiaire microporeuse en polysulfone de 20 à 50 µm soit 2 à 5 10^{-5} m permettant le passage de l'eau filtrée et une couche polyester non tissée de 100 à 200 µm soit 1 10^{-4} à 2 10^{-4} m.
De telles membranes peuvent ainsi rejeter 99,5 à 99,9% des particules présentes dans de l'eau à traiter. C'est, en général, une valeur donné par le constructeur comme étant le taux de rejet.



Exemple d'une membrane d'osmose inverse

Afin d'offrir le maximum de surface active les membranes sont spiralées et forme ainsi des modules cylindriques.

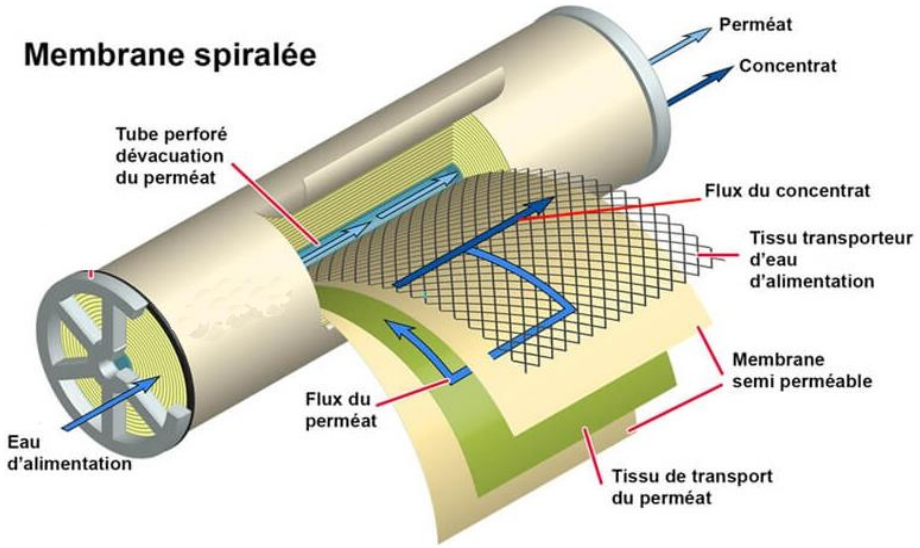
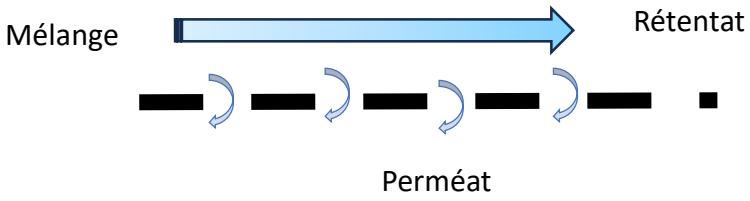


Schéma d'un module de membrane spiralée

D'arès document DOW Filmtec

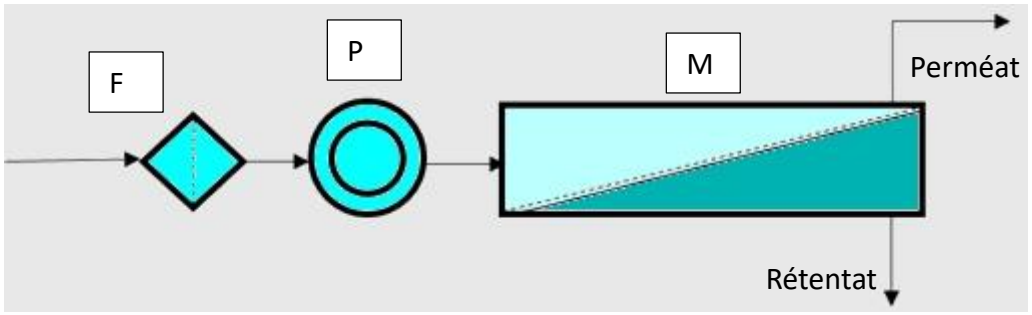
Afin d'éviter les problèmes de polarisation et de colmatage le débit d'alimentation du mélange à traiter s'effectue tangentiellement et non frontalement par rapport à la surface membraneuse.



Principe de la séparation via la membrane d'osmose inverse

4 Unité d'osmose inverse.

Les unités d'osmose inverse sont en général constituées d'un filtre, d'une pompe haute pression d'un ou plusieurs modules de membranes spiralées, et de récepteurs pour recueillir le perméat passant à travers la membrane et le rétentat se concentrant en matières dissoutes.



F : Filtre amont P : Pompe haute pression M : Module d'osmose inverse
Schéma de principe simplifié d'une unité d'osmose inverse.

5 Caractéristiques fonctionnelles des membranes d'osmose inverse.

Les membranes d'osmose inverse peuvent être caractérisées par leur surface active (S en m^2) et leur perméabilité à la température de référence de 25°C.
La densité de flux d'une membrane d'osmose inverse est la quantité d'eau qui traverse la membrane par unité de surface et par unité de temps :

$$J_w = A_w \times (\Delta P - \Delta\pi) \rightarrow A_w = \frac{J_w}{(\Delta P - \Delta\pi)} = \frac{Q_p/S}{(\Delta P - \Delta\pi)}$$

Jw : Densité de flux en m s^{-1} ou dans la pratique en L m^{-2} h^{-1}.
Qp : Débit en m^3 s^{-1} ou dans la pratique en L h^{-1}.
S : Surface active en m^2.
A_w : Perméabilité hydraulique en m s^{-1} Pa^{-1} ou dans la pratique en L m^{-2} h^{-1} 10^5 Pa^{-1}.
ΔP: Différence de pression appliquée en Pa ou dans la pratique en 10^5 Pa.
$\Delta\pi$: Différence de pression osmotique en Pa ou dans la pratique en 10^5 Pa.

5.1 Détermination de la perméabilité d'une membrane d'osmose inverse sur une unité d'osmose inverse.

Etudions le cas d'une unité d'osmose inverse de surface active de 111 m^2 alimentée par un débit de saumure de 15 m^3 h^{-1} d'une concentration de 35 g L^{-1} en chlorure de sodium à la température de 25°C.
Relevons les débits de perméat pour différentes pressions de service.
Nous pouvons alors déterminer la porosité suivant :

$$A_w = \frac{Q_p}{S \times (\Delta P - \Delta\pi)}$$

Surface m^2	$\Delta\Pi$ 10^5 Pa	ΔP 10^5 Pa	Q_p L h^{-1}	A_w L m^{-2} h^{-1} 10^5 Pa^{-1}
111	29,692	50	3381	≈ 1,5
111	29,692	60	5046	≈ 1,5
111	29,692	70	6711	≈ 1,5

5.2. Influence de la température sur la perméabilité d'une membrane d'osmose inverse.

La température influençant la viscosité impact la perméabilité des membranes d'osmose inverse suivant la relation :

$$A_T = A_{25} \times \frac{\mu_{25}}{\mu_T}$$

T en °C	μ en 10^{-3} Pa s
15	1,139
20	1,002
25	0,860
30	0,798
35	0,719

La viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température pouvant être modéliser par la relation :

$$\mu = A \times 10^{\frac{B}{(T-C)}}$$

Avec : A= 2,414 10^{-5} B=247,8 C= 140 et T en K

Par exemple pour une température de 20°C nous avons :

$$\mu = A \times 10^{\frac{B}{(T-C)}} \rightarrow \mu_{20} = 2{,}414\,10^{-5} \times 10^{\frac{247{,}8}{((273{,}15+20)-140)}} = 0{,}001002\ Pa\ s$$

Et :

$$A_T = A_{25} \times \frac{\mu_{25}}{\mu_T} \rightarrow A_{20} = A_w = 1{,}5 \times \frac{0{,}890}{1{,}002} \approx 1{,}333 \text{ L m}^{-2}\text{ h}^{-1}\ 10^5\text{ Pa}^{-1}$$

$$3{,}69\ 10^{-12} \text{ m s}^{-1}\text{ Pa}^{-1}$$

Dans le cas de l'utilisation d'eau pure la pression osmotique est égale à 0 et nous avons alors :

$$A_w = \frac{Q_p}{S \times \Delta P}$$

C'est le moyen de vérifier la perméabilité hydraulique d'une membrane avant son utilisation avec une solution saline.

5.3 Coefficient de perméabilité en sel.

En osmose inverse le transport du sel se modélise suivant la relation :

$$J_{Sel} = B\ (C_m - C_p)$$

J_{Sel} Représente la densité de flux de sel en kg m^{-2} s^{-1}.
C_m est la concentration en sel à la surface de la membrane en kg m^{-3}
C_p est la concentration en sel dans le perméat en kg m^{-3}
B est le coefficient de perméabilité du sel exprimé donc en m s^{-1}.
Suivant le type de membrane et son ancienneté le coefficient de perméabilité du sel peut être compris entre 1 10^{-8} et 1 10^{-6} m s^{-1}.

5.3 Etude des conditions de fonctionnement d'une unité d'osmose inverse.

Les paramètres de fonctionnement d'une unité d'osmose étant sont les suivantes :

Débit d'entrée de l'eau à traiter : 15 $m^3\ h^{-1}$.
Concentration de la solution : 35 $g\ L^{-1}$.
Température : 20°C.
Surface membranaire utile : 100 m^2.
Perméabilité de la membrane à 25°C : 1,5 $L\ m^{-2}\ h^{-1}\ 10^{-5}$ Pa.
Taux de rejet de la membrane de 0,995.

Dans le chapitre précédent la perméabilité à 20°C est calculée est 1,33 $10^{-5}\ L\ m^{-2}\ h^{-1}\ 10^5\ Pa^{-1}$.

La pression différentielle ($\Delta\pi$) osmotique est calculé suivant :

$$p = R \times T \times \frac{n}{V} \times i \times \emptyset$$

$$\Delta\pi = \left(8{,}314 \times (273{,}15 + 20) \times \frac{35 * 1000}{58{,}44} \times 2 \times 1\right) = 29{,}194\ 10^5\ Pa$$

Bilan de matière.

La densité de flux de perméat est directement proportionnel à pression transmembranaire.

$$J = \frac{Q_p}{S} = A_w \times (\Delta P - \Delta\pi)$$

$$J_P = 1{,}333 \times 10^{-5} \times (60 \times 10^5 - 29{,}194 \times 10^5) \approx 41\ L\ m^{-2}\ h^{-1}$$

On en déduit le débit de perméat :

$$J_P = \frac{Q_p}{S} \rightarrow Q_p = J_P \times S \rightarrow Q_p = \frac{41 \times 100}{1000} = 4{,}1\ m^3 h^{-1}$$

Et le débit de rétentat : $Q_R = Q - Q_P \rightarrow Q = 15 - 4{,}1 = 10{,}9\ m^3\ h^{-1}$.

La concentration du perméat dépend du taux de rejet et de la concentration initiale de l'alimentation.

Cp = Centrée × (1-Trejet) → Cp = 35× (1-0,995)= 0,175 $g\ L^{-1}$

Un bilan de matière permet alors de déterminer la concentration du rétentat.

Cr = ((Qentrée×Centrée)-(Qperméat×Cperméat))/Qrétentat

Cr = ((15×35)-(4,1×0,175))/10,9 ≈ 48,1 $g\ L^{-1}$

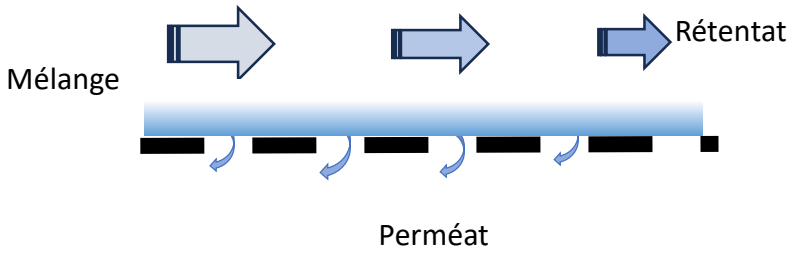
Le taux de récupération est défini comme le rapport du débit de perméat sur le débit d'alimentation du module.

Dans notre cas Trécup = 4,1/15 = 0,273 donc proche de 30%.

Un taux de récupération élevé permet de rejeter moins de concentrat avec un risque accrue de colmatage et d'entartrage.
Un taux de récupération faible permet une meilleure protection des membranes mais avec une production de rétentats plus élevés.

5.4 ETUDE DE CAS
Polarisation des membranes.

En osmose inverse l'accumulation de sels au voisinage de la surface de la membrane provoque l'augmentation de la concentration. La pression osmotique locale augmente donc et réduit le flux de perméat.



Polarisation d'une membrane.

La circulation s'effectuant tangentiellement à la membrane la concentration du rétentat évolue tout au long du module.
Une étude détaillée du fonctionnement repose donc sur la segmentation du module.
Par exemple étudions à 25°C l'osmose inverse de 3 $m^3\ h^{-1}$ d'une solution de NaCl à 35 g L^{-1} dans un module standard d'une longueur de 1,016 m et 37 m^2.
La membrane spiralée à une largeur de 0,9 m pour une hauteur du canal d'alimentation de 7,1 10^{-4} m.
La porosité de la membrane est de 0,89 avec une perméabilité de 2,5 10^{-7} m s^{-1} 10^{-5} Pa^{-1} et une perméabilité au sel de 1 10^{-7} m s^{-1}.
La pression de service est maintenue à 60 10^{-5} Pa .
Divisons le module en 10 segments égaux et étudions le modèle du premier segment.
Le diamètre hydraulique est estimable par la relation :

$$dh = \frac{(4 \times porisité \times hauteur\ du\ canal\ d'alimentation)}{2 + porosité}$$

$$dh = \frac{(4 \times 7{,}1\ 10^{-4} \times 0{,}89)}{2 + 0{,}89} = 8{,}746\ 10^{-4}\ m$$

La longueur du segment considérée (dL) est donc de 1,016 10^{-1} m et sa surface de 3,7 m^2.

Le débit d'entrée de la solution dans le module est de 3/3600 = 8,33 10^{-4} $m^3\ s^{-1}$.

La section de passage est déterminé par le produit de la hauteur du canal par la largeur de la membrane soit : 7,1 10^{-4} × 0,9 = 6,39 10^{-4} m^2.

Calculons la vitesse moyenne dans le segment.

$$Vitesse = u = \frac{Débit}{Section} \quad \rightarrow \quad u = \frac{8{,}33\ 10^{-4}}{6{,}39\ 10^{-4}} = 1{,}304\ m\ s^{-1}$$

La concentration à la surface de la membrane est estimable par la relation :

$$Cm = Cs\ \times \exp\left(\frac{Flux_0}{k}\right)$$

Avec :

Cm : Concentration à la surface de la membrane en g L^{-1}.
Cs : Concentration dans la solution.
$Flux_0$: Flux de matière sans phénomène de polarisation en m s^{-1}.
k : Coefficient de transfert de matière dans la solution en m s^{-1}.

Le coefficient de transfert de matière est calculé suivant :

$$k = \frac{Sh \times D}{dh} \quad Avec$$

$$Sh = 0{,}065\ \times\ Re^{0{,}875} \times Sc^{0{,}25}\ ; \quad Sc = \frac{\mu_s}{\rho_s \times D} \quad et \quad Re = \frac{\rho_s \times u\ \times dh}{\mu_s}$$

ρ_s : Masse volumique de la solution en kg m^{-3}.
u : Vitesse m s^{-1}.
dh : Diamètre hydraulique en m.
μ_s : Viscosité dynamique en Pa s.
D : Coefficient de diffusion du sel dans l'eau $m^2\ s^{-1}$.

Re est le Nb de Reynolds Sc nombre de Schmit et Sh nombre de Sherwood.

Pour une solution à 35 g L^{-1} et 25°C Nous avons :

$$\rho_s\ = 1020{,}96\ \ ;\ \ \mu_s\ = 9{,}29\ 10^{-4}\ ; D = 1{,}5\ 10^{-9}$$

$$Re = \frac{\rho_s \times u\ \times dh}{\mu_s} = \frac{1020{,}96 \times 1{,}304 \times 8{,}74\ 10^{-4}}{9{,}29\ 10^{-4}} \approx 916$$

$$Sc = \frac{\mu_s}{\rho_s \times D} = \frac{9{,}29\ 10^{-4}}{1020{,}96 \times 1{,}5\ 10^{-9}} = 606$$

$$Sh = 0{,}065\ \times\ Re^{0{,}875} \times Sc^{0{,}25} =\ 0{,}065\ \times\ 916^{0{,}875} \times 606^{0{,}25} = 126$$

$$k = \frac{Sh \times D}{dh} \quad = \quad \frac{126 \times\ 1{,}5\ 10^{-9}}{8{,}74\ 10^{-4}} = 2{,}16\ 10^{-4}$$

Pour calculer le flux sans phénomène de polarisation on utilise la relation suivante :

$$\text{Flux}_0 = \text{Perméabilité} \times (\text{Pression de service} - \text{Pression osmotique})$$

La pression osmotique est une fonction de la molarité et de la température de la solution selon :

$$Po = \left[2 \times \frac{35/100}{58,5} \times 8,314 \times (25 + 273,15)\right] = 29,69\ 10^5\ Pa$$

Et donc $\text{Flux}_0 = 2,5\ 10^{-7} \times (60\ 10^5 - 29,69\ 10^5) = 7,58\ 10^{-6}$ m s^{-1}

On en déduit la concentration à la surface de la membrane :

$$Cm = Cs\ \times \exp\left(\frac{Flux_0}{k}\right) = \quad 35\ \times \exp\left[\frac{7,58\ 10^{-6}}{2,16\ 10^{-4}}\right] = 36,2$$

La pression osmotique proche de la membrane peut alors être calculée.

$$Po = \left[2 \times \frac{36,2/100}{58,5} \times 8,314 \times (25 + 273,15)\right] = 30,7\ 10^5\ Pa$$

Le flux traversant la membre est donc de :

$$\text{Flux} = 2,5\ 10^{-7} \times (60\ 10^5 - 30,7\ 10^5) = 5,94\ 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$$

On en déduit le débit du perméat.

$$Qp = 5,94\ 10^{-6} \times 3,7 = 2,2\ 10^{-5}\ m^3\ s^{-1} \quad \rightarrow \quad Qp = 2,2\ 10^{-5} \times 3600 = 0,079\ m^3\ h^{-1}$$

Et la concentration du perméat qui dépend de la perméabilité au sel :

$$Cp = \frac{Psel}{flux \times Psel} \times Cm \qquad \rightarrow \quad Cp = \frac{1\ 10^{-7}}{5,94\ 10^{-6} + 1\ 10^{-7}} \times 36,2 = 0,182\ \text{g}\ L^{-1}$$

Le débit du rétentat entrant dans le segment suivant est de :

$$Qr = Qe - Qp \rightarrow \quad Qr = 3 - 0.079 = 2,921\ m^3\ h^{-1}$$

Pour une concentration de :

$$Cr = \frac{(Q_e \times C_e) - (Q_p \times C_p)}{Qr} \quad \rightarrow \quad Cr = \frac{(3 \times 35) - (0,079 \times 0,182)}{2,921} = 35,94\ g\ L^{-1}$$

Calculons enfin le taux de sélectivité de la membrane.

$$R = 1 - \frac{Cp}{Cs} \quad \rightarrow \quad R = 1 - \frac{0,182}{35} = 99,48$$

5.5 Pertes de charges.

Les pertes de charge dans un module d'osmose inverse influencent directement la consommation énergétique et les performances globales d'une installation d'osmose inverse.
Les pertes de charge proviennent de l'écoulement de l'eau contre les parois du canal et la présence des espaceurs qui créent des turbulences.
Au fur et à mesure que l'eau traverse la membrane le débit du rétentat diminue et la concentration en sel augmente ce qui modifie les caractéristiques de l'écoulement.
L'encrassement par dépôts organiques ou minéraux provoque la réduction de l'écoulement donc l'augmentation des pertes de charge.
Ces pertes de charge sont évaluables suivant :

$$\Delta P = f \times \frac{L}{dh} \times \frac{\rho \times u^2}{2}$$

L : Largeur du canal d'alimentation.
dh : Diamètre hydraulique.
ρ : Masse volumique.
u : Vitesse moyenne dans le canal.
f : Coefficient de frottement.
Avec :

$$f = K \times Re^{-0,3} \quad ou \quad f = 3,6\, Re^{-0,24}$$

Ces relations, en théorie, fournissent des valeurs bien supérieures aux valeurs relevées en pratique. Par exemple on relève en pratique pour:

2 $m^3 h^{-1}$ une ΔP de 0,015 à 0,03 MPa.

3 $m^3 h^{-1}$ une ΔP de 0,025 à 0,05 MPa.

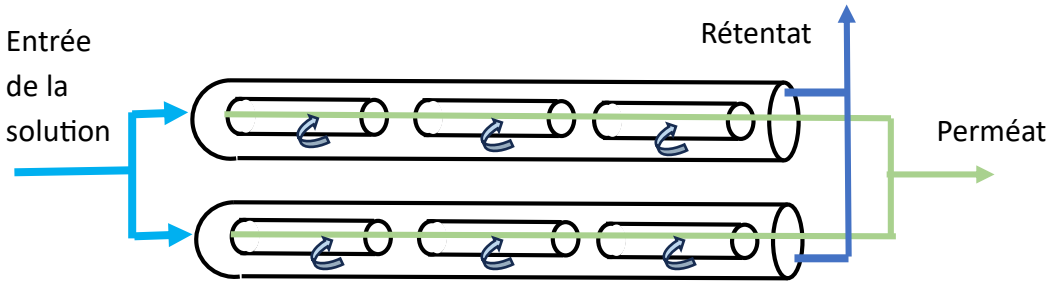
4 $m^3 h^{-1}$ une ΔP de 0,04 à 0,08 MPa.

5 $m^3 h^{-1}$ une ΔP de 0,06 à 0,12 MPa.

De sorte qu'un modèle empirique peut être utilisé suivant : $\Delta P \approx K \times Q^2$

6 Montage de plusieurs modules dans une installation d'osmose inverse.

Suivant les objectifs de production d'une installation il est possible d'associer plusieurs modules en série et parallèle.
En effet des superficies importantes sont généralement requises pour traiter des débits élevés.



Exemple de montage d'une unité d'osmose inverse
Avec 2 lignes en parallèles de 3 modules en séries

Références

[1] Ramade F., *Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau*, Ediscience international, **1998**.

[2] Maurel A., Osmose inverse et ultrafiltration : technologie et applications, *Techniques de l'Ingénieur* (réf. J2796), **1988**.

[3] Maurel A., Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, *Tec & Doc*, 2001.

[4] Alain MAUREL : « Techniques séparatives à membranes Considérations théoriques » Ingénieur ENSIGC (École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Génie Chimique de Toulouse) Licencié ès Sciences Ingénieur au Centre d'Études Nucléaires de Cadarache. *Techniques de l'Ingénieur* (réf **J 2 790**.).

[5] ALAIN Maurel (2006): « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres ». 2ème édition 11, rue Lavoisier, Paris.

[6] DEGREMENT (2005) : « Mémento technique de l'eau ». Tome I, Lavoisier, Paris. France.