



Institut
Européen des
Membranes

UMR 5635, Montpellier



Défis et perspectives du dessalement par osmose inverse pour la réutilisation

Solution décentralisée

*A. Chougradi, F. Zaviska,
J. Harmand, M. Heran*



MUSE

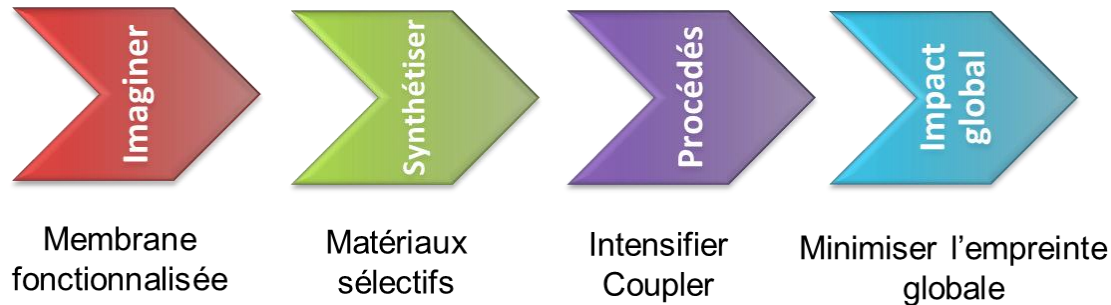


MONTPELLIER UNIVERSITY of EXCELLENCE

LabEx
CheMISyst



Du matériau au procédé : De l'imagination à sa mise en oeuvre



De la membrane à son application

- Sujets émergents :
- Nouveaux matériaux
 - Procédés innovants : Extraction d'eau douce, extraction d'ions

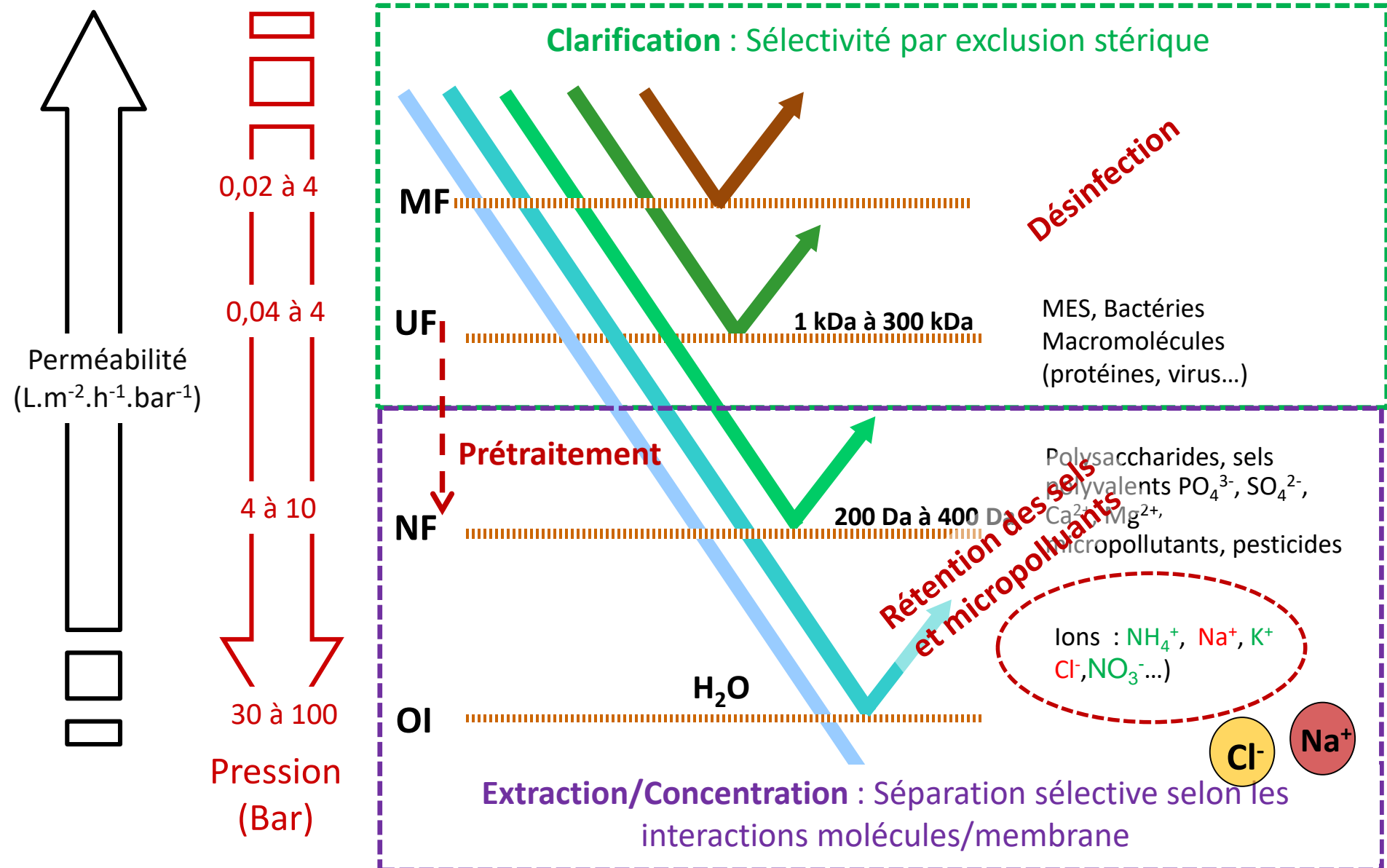


→ Pertinence des procédés membranaires ?

→ Pour atteindre ces nouveaux objectifs



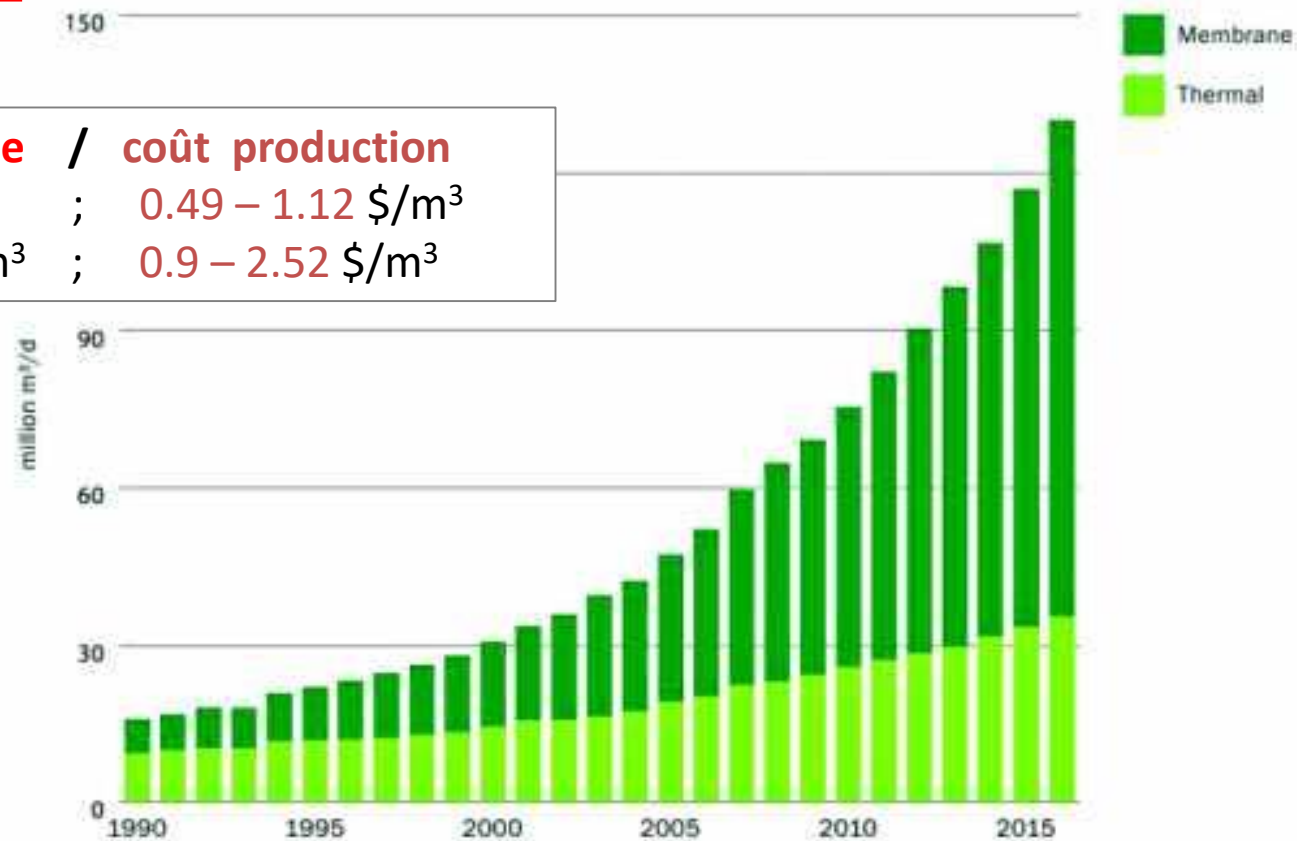
Les procédés membranaires : Séparation



Les enjeux

Evolution de la production d'eau issu du dessalement

	Énergie consommée	/	coût production
<u>OI</u> :	3-4 kWh/m ³	;	0.49 – 1.12 \$/m ³
<u>Distillation</u> :	6-7 kWh/m ³	;	0.9 – 2.52 \$/m ³



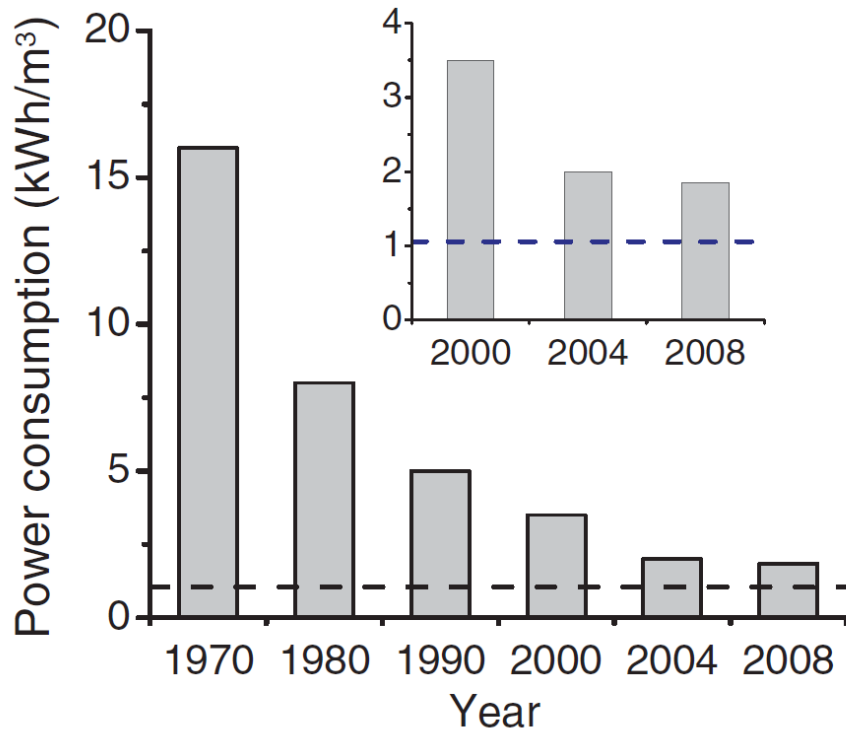
Source: GWI DesalData

- **Technologie leader** du marché : améliorations continues depuis 50 ans (membranes, design de module, procédés, récupérateur énergie...).
- Faible consommation d'énergie
- Modularité et flexibilité de fonctionnement

Les enjeux

Evolution de la production d'eau issu du dessalement

Pourquoi le dessalement par OI coute cher en énergie?



Energie min. théorique

(eau de mer 35g/L)

- $Y = 0 \% \rightarrow 0,76 \text{ kWh/m}^3$
- $Y = 50 \% \rightarrow 1,06 \text{ kWh/m}^3$

➔ Dépasser la pression osmotique

$$-d(\Delta G_{mix}) = -RT \ln a_{eau} dn_{eau} = \pi_{mer} V_{M_{eau}} dn_{eau}$$

$$\Delta G = \sum \mu_{eau} dn_{eau} \text{ avec } \mu_{eau} = \mu^\circ_{eau} + RT \ln a_{eau}$$

Evolution de la production d'eau issu du dessalement

Pourquoi le dessalement par OI coute cher en énergie?

1. « **pression osmotique** » de l'eau de mer
 - Eau de mer: Conc. typique en **TDS = 35 g/L**
 - Pression osmotique : $\pi = iMRT$ **$\Pi_{\text{eau de mer}} = 28 \text{ bar} !!!$**
2. La pression nécessaire à appliquer dépend du **taux de conversion** « Y »
 - Pour un Y de 50%, il faut appliquer une P_H d'environ 60 bar
3. **Pertes de charge** et **concentration de polarisation (CP)**
 - Pertes de charge: dissipation de l'E (passage a travers le module membranaire)
 - CP: couche de diffusion (surface membrane) lié a J_p ; notion de π_{eff}
 - Nécessite 10-20% de P_H de plus

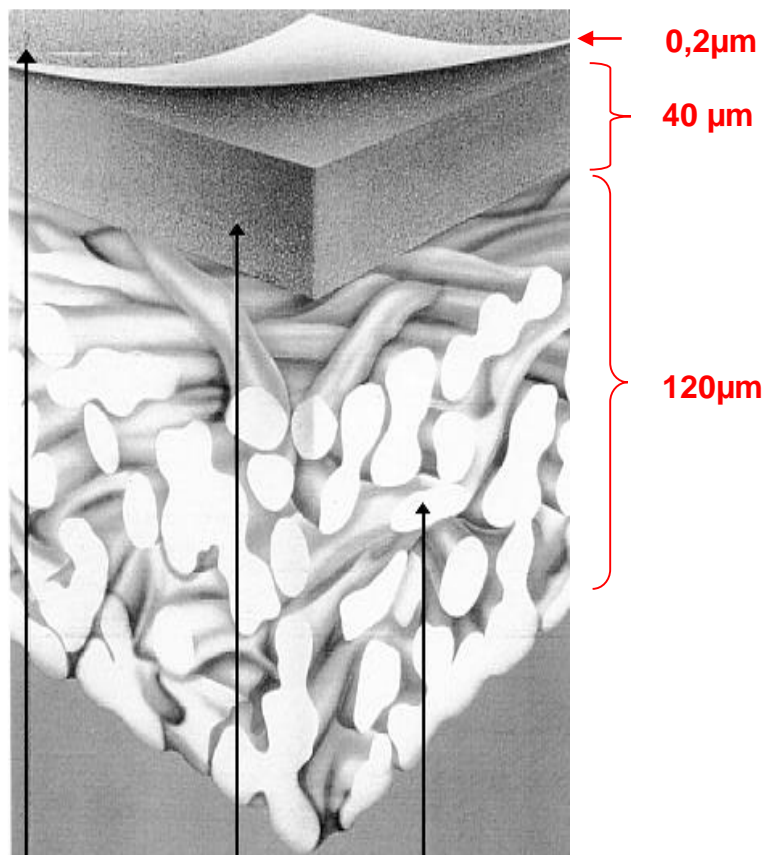
$$SEC = \frac{\Delta P}{\eta_p \times Y_{RO}}$$

La technologies

Tube de pression et modules spiralés

1. La membrane

TCF : Thin film Composite



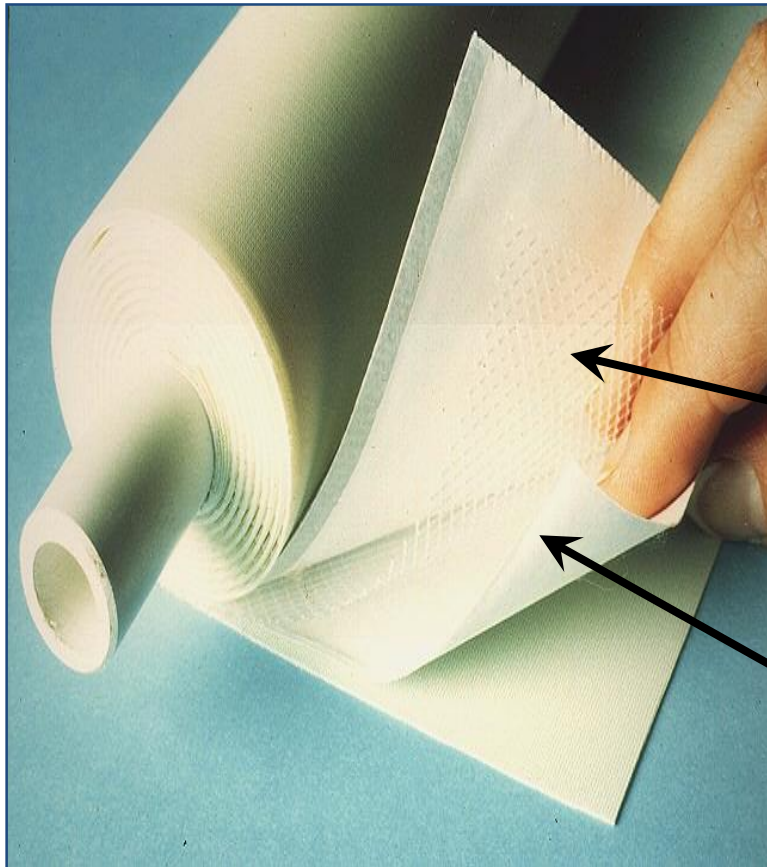
Membrane polyamide
Couche Polysulfone
Support Polyester

Type	Matériau	Fabricant	Appellation commerciale	Module
Asymétrique polymère unique	Acétate de cellulose	UOP (US) Osmonics (US) Envirogenics (US) Nitto (JP) Kobe Steel (JP)	Roga Sepa - 1500 -	Spirale Spirale Spirale Tubulaire Fibres creuses
	Di/Triacétate de cellulose	Dow Chem (US) Hydranautics (US) Toyobo (JP) DDS (Danemark) Wafilin (P-Bas)	Dowex Hollosep C-A WFR	Fibres creuses Spirale Fibres creuses Plan Tubulaire
	Polyamide aromatique	Du Pont de Nemours (US) DDS (Danemark)	Permassep HMX	Fibres creuses Plan
	Polybenzimidazole	Celanese/ Osmonics (US)	-	-
	Polybenzimidazole	Teijin (JP)	-	Tubulaire
Composite support polysulfone dans la plupart des cas	Polyamide	Filmtec (US)	FT 30	Spirale
	Polyamide	UOP (US)	PA 300	-
	Polyfurane/ cyanurate	Toray (JP)	PEC 1000	Spirale
	Polyurée Polyether	UOP (US)	RC 100	-
Composite	Autres	Desalination (US) Hydranautics (US) Nitto (JP)	-	-
Dynamique Support Inox	Polyacrylamide/ Zircone	Carre (US)	Zopa	Tubulaire

La technologies

Tube de pression et modules spiralées

2. Le module

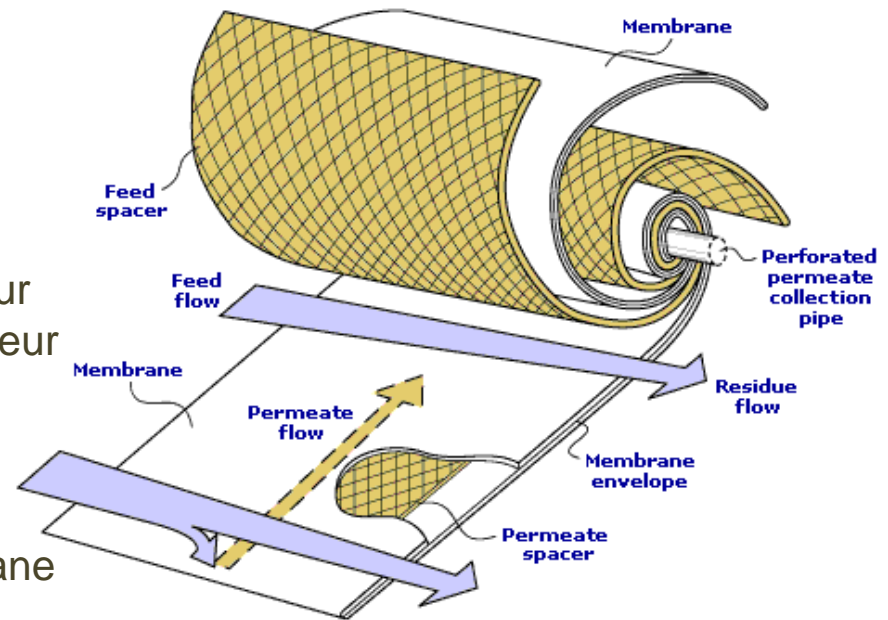


Membrane
polyamide

espaceur
séparateur

membrane

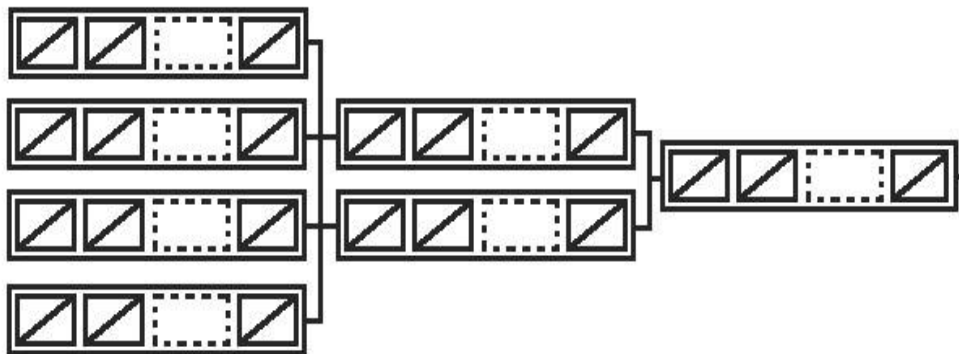
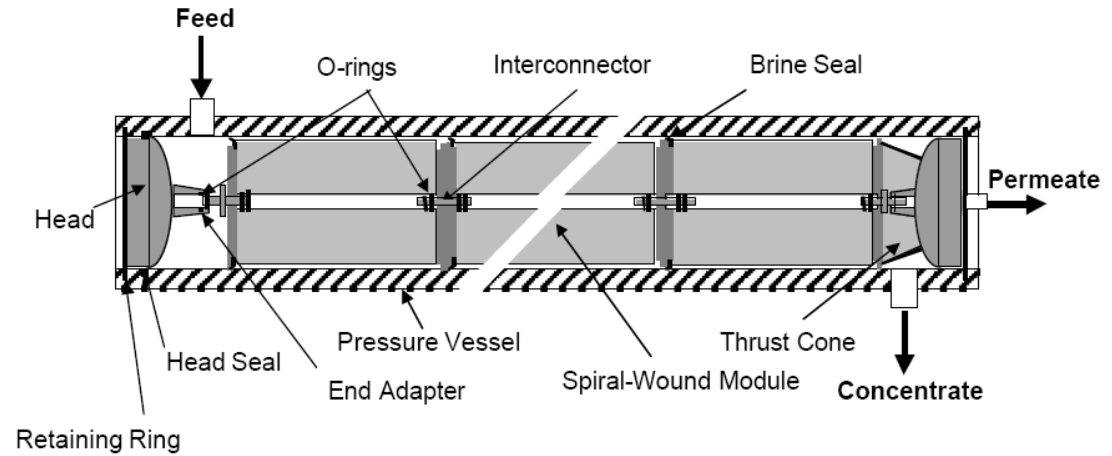
SWHR-30



La technologies

Tube de pression et modules spiralées

3. Le procédé

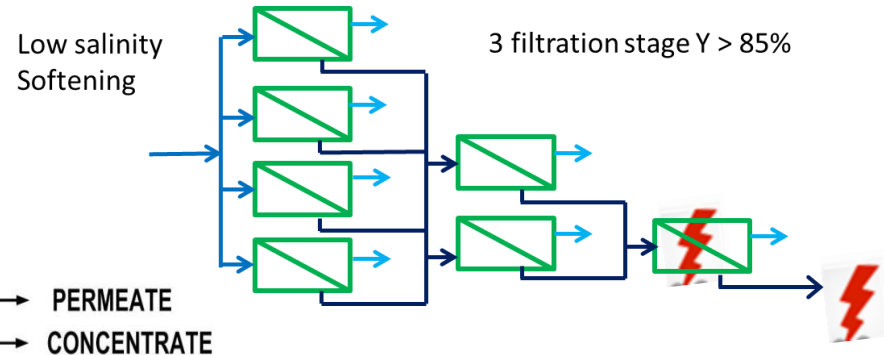
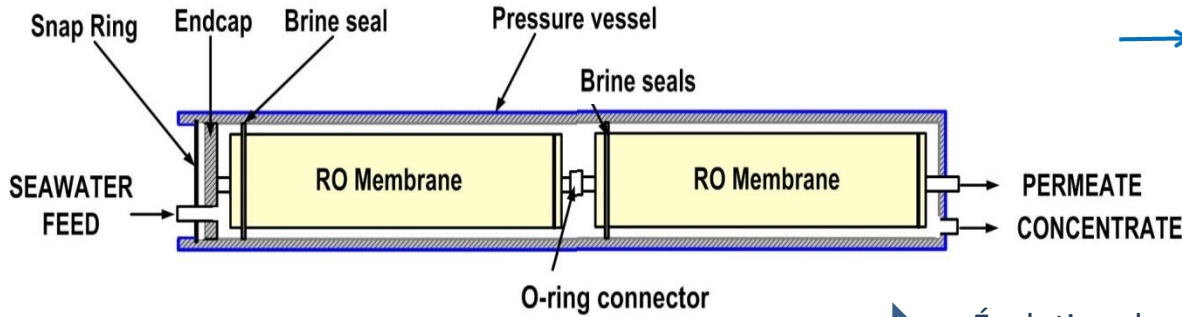


➔ Filtration tangentielle : Module de 20 cm de diamètre, 1 m de long : 37 m² de membrane

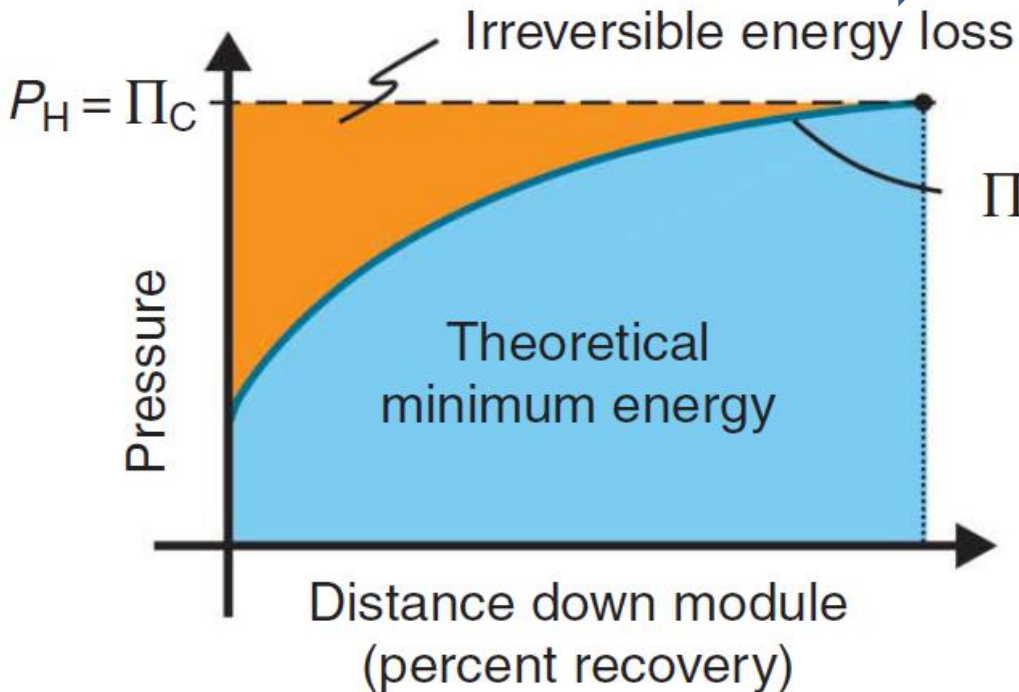
➔ 12 à 24 m³/j

La technologies

Tube de pression et modules spiralés



Évolution de π le long membrane



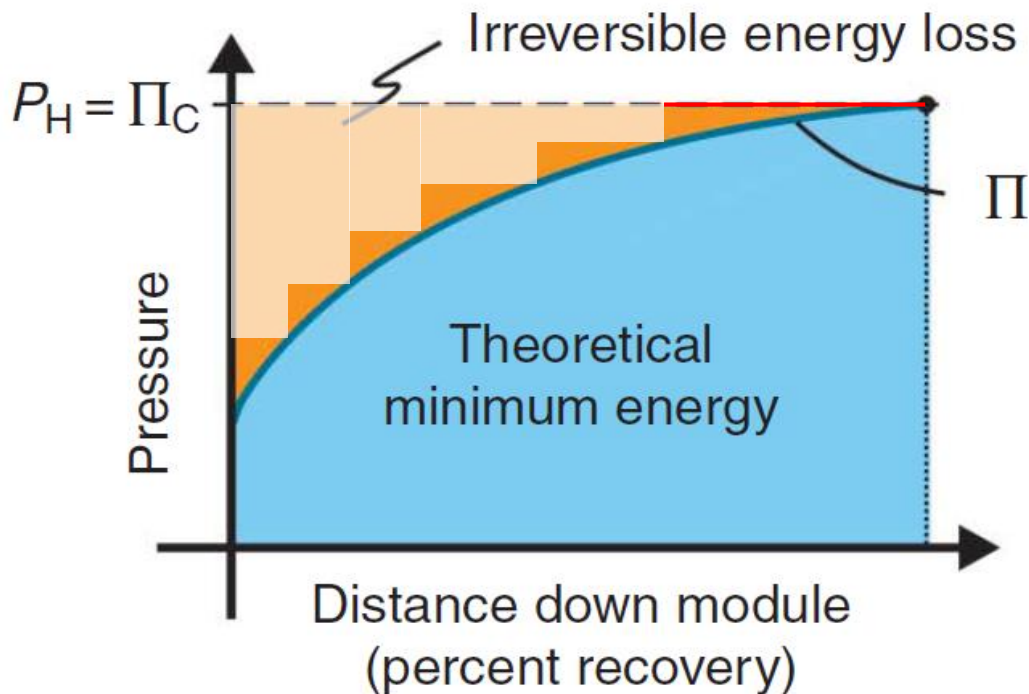
Pour $Y = 50\%$:
 Entrée: 35 g/L (eau de mer)
 Sortie: 70g/L soit $\pi = 56$ bar
 $E_{\text{theorique}} = 1,06 \text{ kWh/m}^3$
 $E_{\text{pratique}} = 1,56 \text{ kWh/m}^3$

Tube de pression et modules spiralées

3. Le procédé

Développement d'un procédé à plusieurs étapes (n)

Plus $n \nearrow$, plus $E_{\text{pratique}} \searrow$ (se rapprochant de $E_{\text{thermo.}}$) mais plus le coût d'investissement \nearrow



Pour $Y = 50\%$; $n = \infty$ étapes :

Entrée: 35 g/L

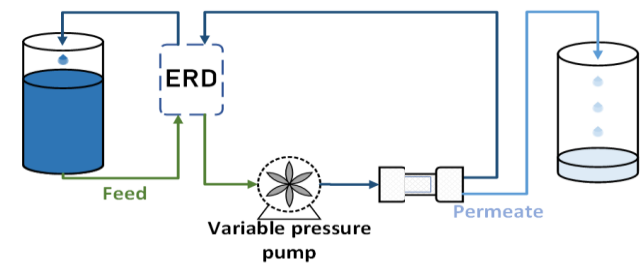
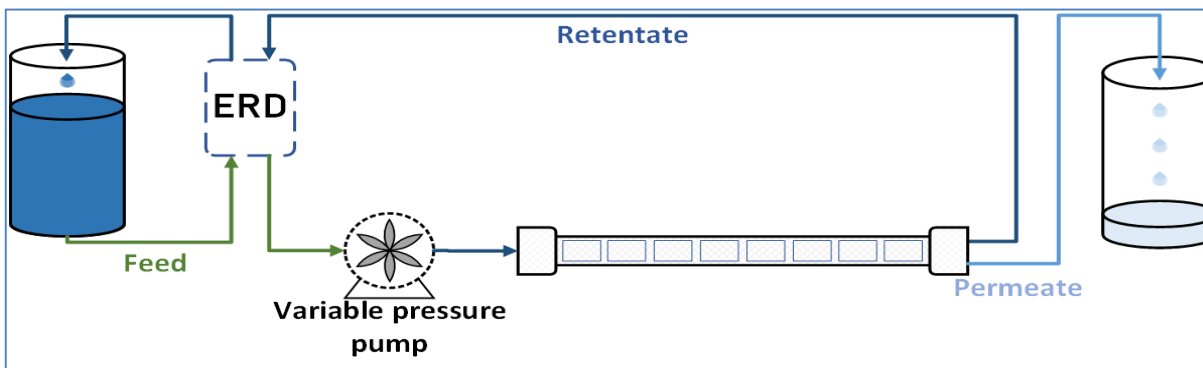
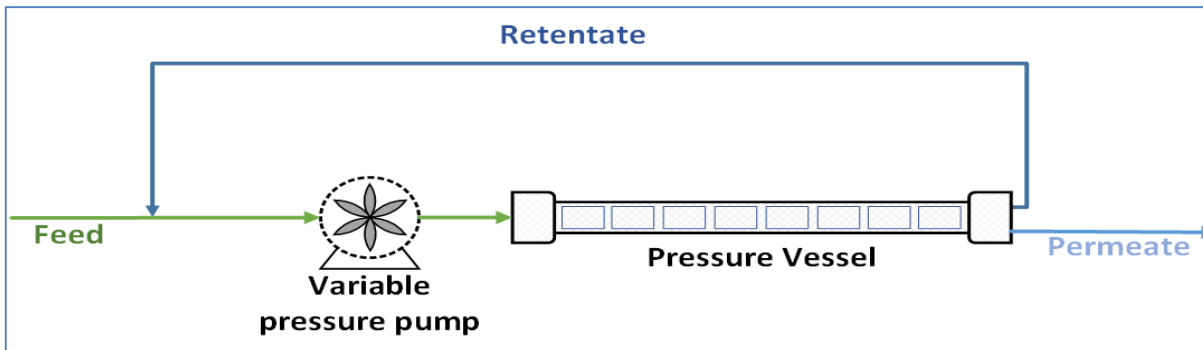
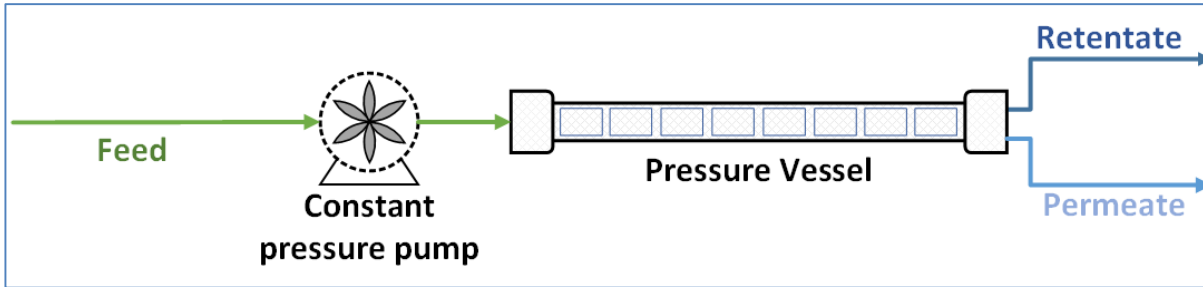
Sortie: 70g/L soit $\pi = 56$ bar

$E_{\text{theorique}} = 1,06 \text{ kWh/m}^3$

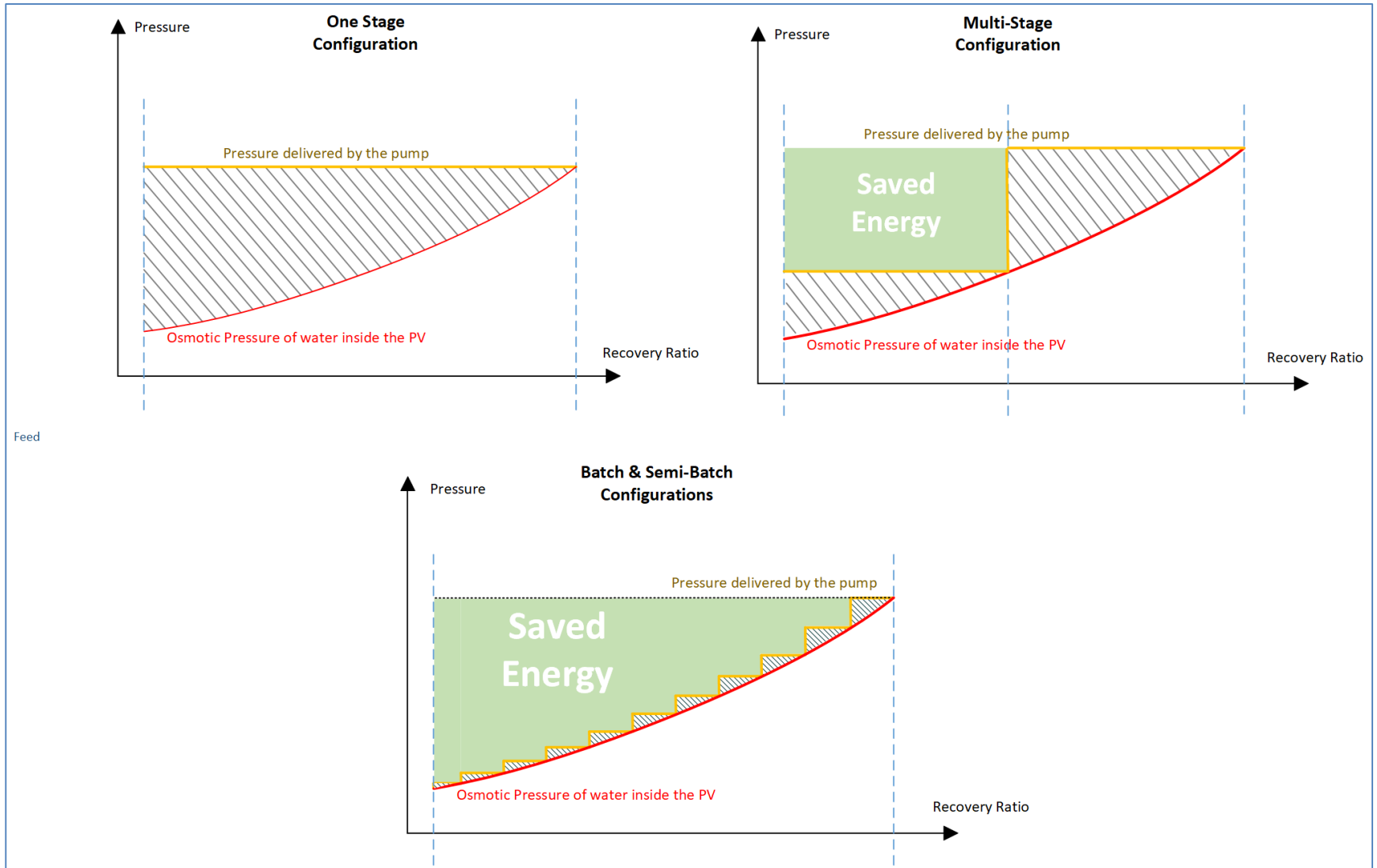
$E_{\text{pratique}} = 1,06 \text{ kWh/m}^3$

La technologies

Configurations alternatives et décentralisées



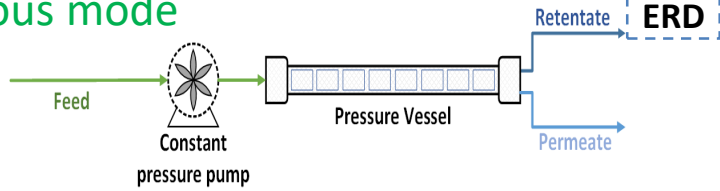
Configurations alternatives et décentralisées



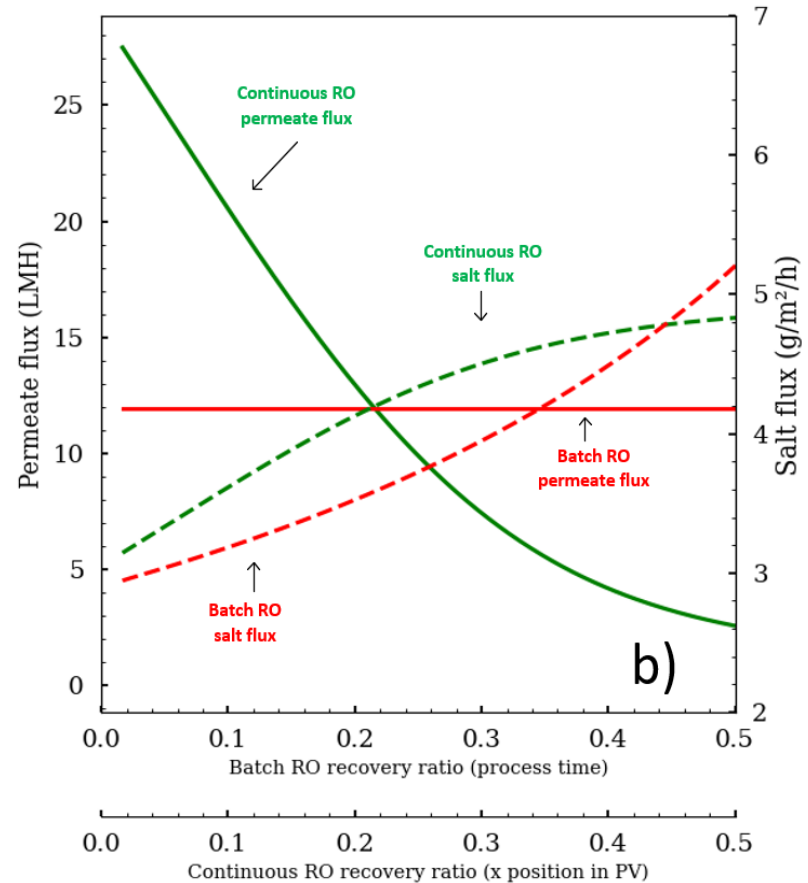
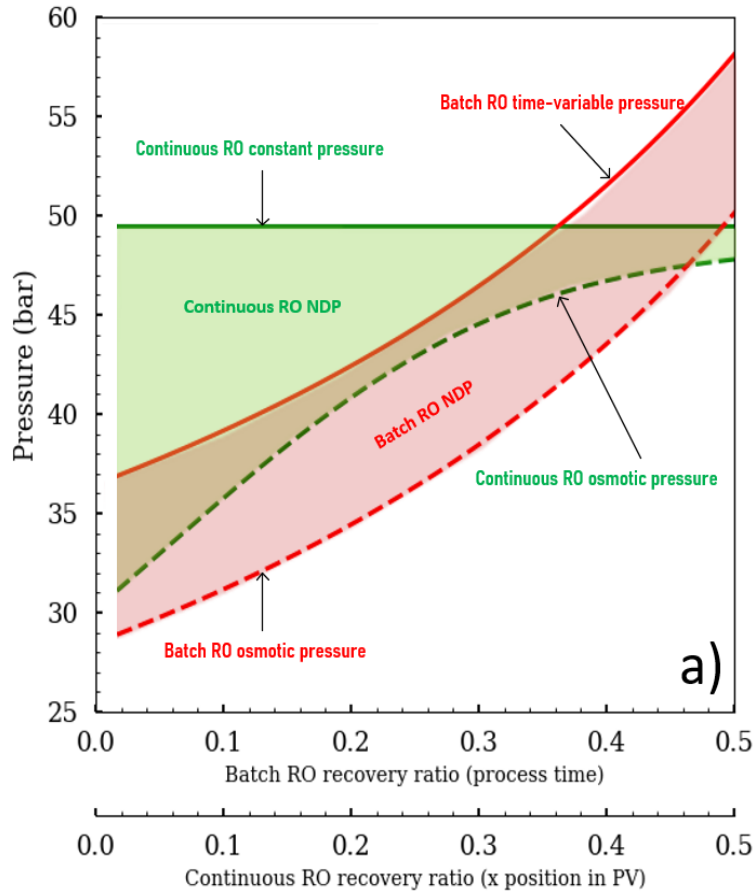
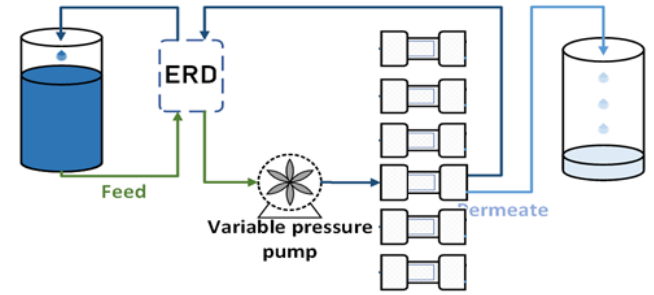
La technologie

Configurations alternatives et décentralisées

Continuous mode



Batch mode



Qualité d'eau

$$J_w = L_{p0}(\Delta P - \Delta\pi)$$

J_w : Water flux (LMH)

L_{p0} : Membrane permeability toward the solvent ($L.h^{-1}.m^{-2}.bar^{-1}$)

$\Delta\pi$: Transmembrane osmotic pressure difference (bar)

ΔP : Transmembranaire hydraulic pressure applied (bar)

influence of the osmotic pressure f(Salinity)

$$J_{salts} = B(\Delta C)$$

J_{salts} : Solute flux ($mol.s^{-1}.m^{-2}$)

B : Solute membrane permeability ($m.s^{-1}$)

depend on: partition coefficient H of the solute, membrane thickness e (m), diffusion coefficient of the solute in the membrane D (m^2/s)

ΔC : Difference of the transmembrane concentration (mol/m^3)

$$B = \frac{HD}{e}$$

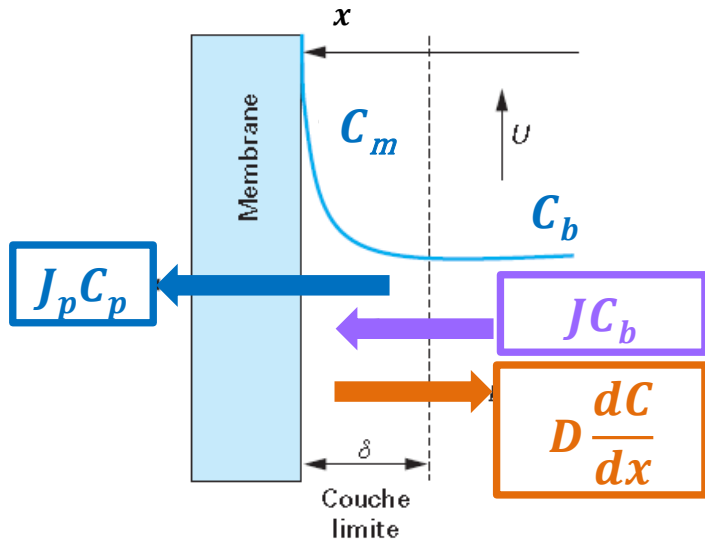
Taux de conversion

$$Y = \frac{Q_p}{Q_a} \cdot 100$$

Maximum values of Y in order to limit concentration polarisation and membrane fouling throw salt precipitation (scaling) (sea water Y<40%)

La technologies

La mise en équation : Phénomène local



Concentration Polarisation : Difference of concentration between membrane interface and the « bulk »

$$CPF = \frac{C_m}{C_b} \quad \text{Polarisation factor}$$

Solute mass balance (double layer model)

Convectif flux – **diffusion flux** = **Transferred flux throw the membrane**

$$J_p C_b - D \frac{dC}{dx} = J_p C_p$$

$$J_p = \frac{D}{\delta} \ln \left(\frac{C_m - C_p}{C_b - C_m} \right) = K \ln \left(\frac{C_m - C_p}{C_b - C_m} \right)$$

D : diffusion coefficient

δ : thickness of limiting layer of concentration polarisation

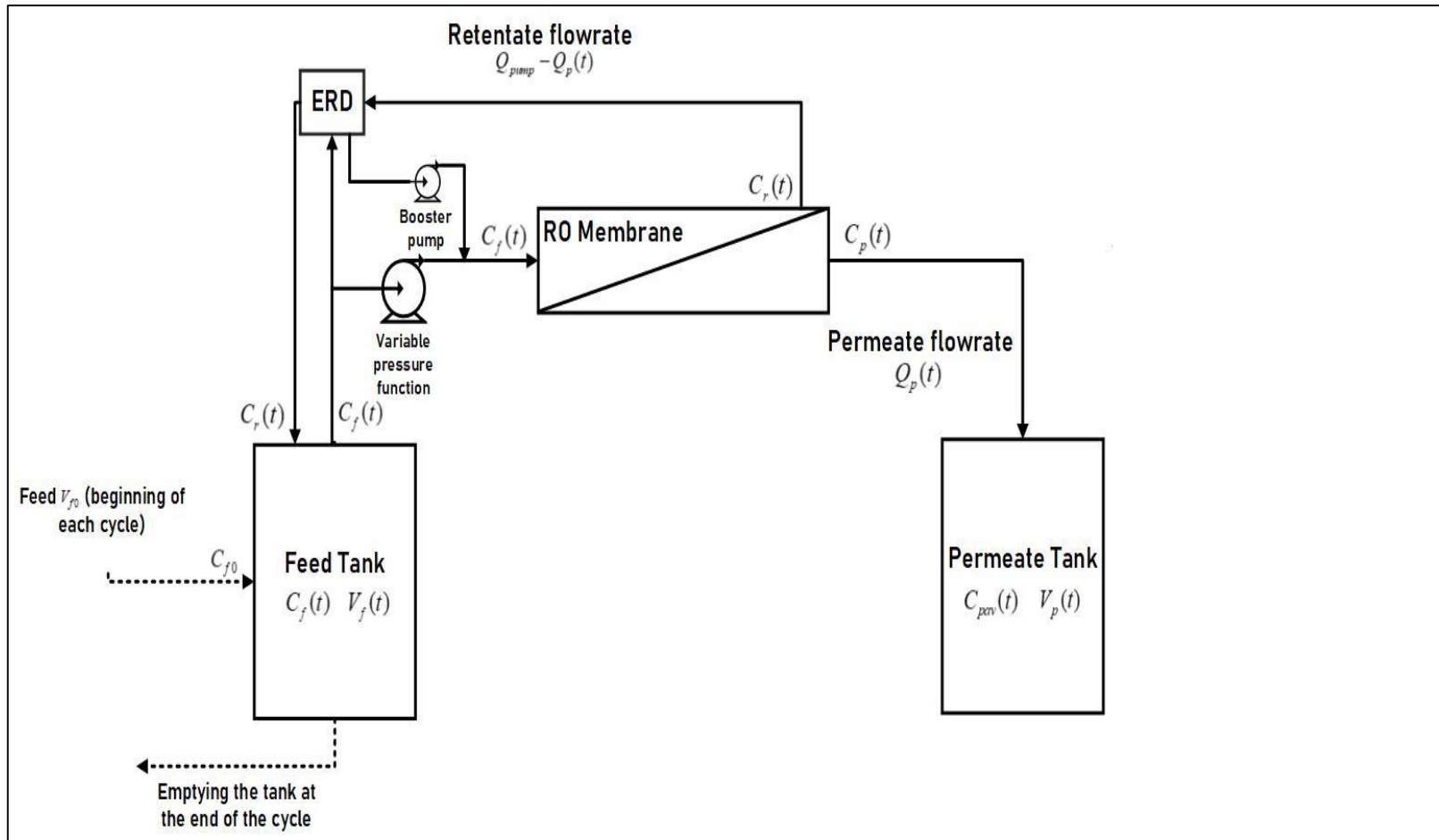
K : mass transfer coefficient

Couche de polarisation :

- **permeate flux decline** (decrease the effective driving force due to higher osmotic pressure at the membrane interface)
- **decrease of the selectivity** (increase ΔC at membranes interfaces)
- **scaling risk** (Limit of solubility can be reached on membrane interface)

La technologies

La mise en équation : à l'échelle du procédé



La technologies

La mise en équation

$$C_{p_CP}(t) = \frac{\sqrt{(\alpha_3 \Delta P(t) - \alpha_4 C_m(t) + 1)^2 + 4\alpha_4 C_m(t)} - (\alpha_3 \Delta P(t) - \alpha_4 C_m(t) + 1)}{2\alpha_4}.$$

$$\Delta\pi_{CP}(t) = \psi \left(C_m(t) - C_{p_CP}(t) \right),$$

$$\begin{aligned} Q_{p_CP}(t) &= J_{w_CP}(t)S = \frac{A_w S}{C_w(t)} \left(\Delta P(t) - \psi \left(C_m(t) - C_{p_CP}(t) \right) \right) \\ &= \alpha_1 \Delta P(t) - \alpha_2 (C_m(t) - C_{p_CP}(t)), \end{aligned}$$

$$V_{p_CP}(t) = \int_0^t Q_{p_CP}(x) dx,$$

$$V_r(t) = \int_0^t \left(Q - Q_{p_CP}(x) \right) dx,$$

$$X_{CP}(t) = \frac{V_{p_CP}(t)}{V_{f0}}.$$

Méthodes itératives :

Calcul le flux d'eau,

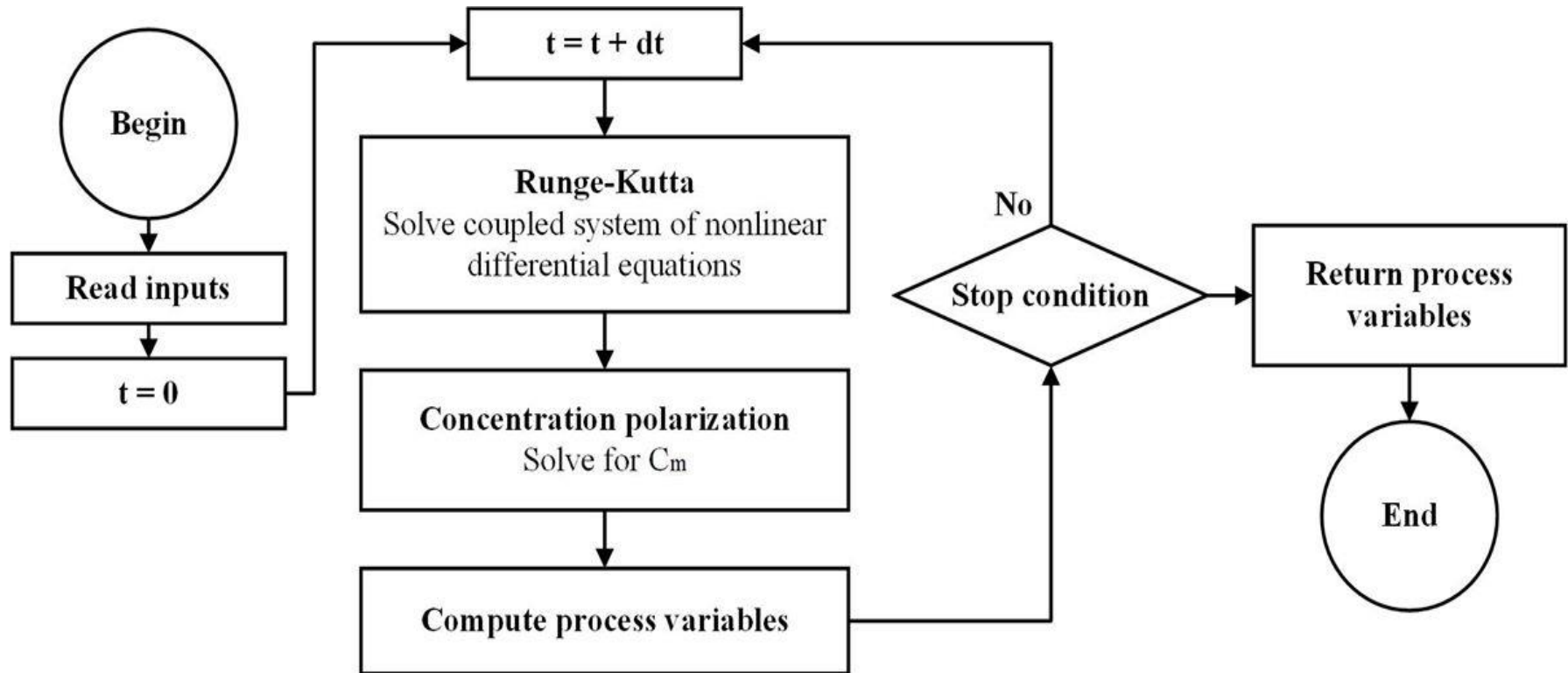
Donne les concentrations locales,

Donne la pression osmotique

Corrige le flux

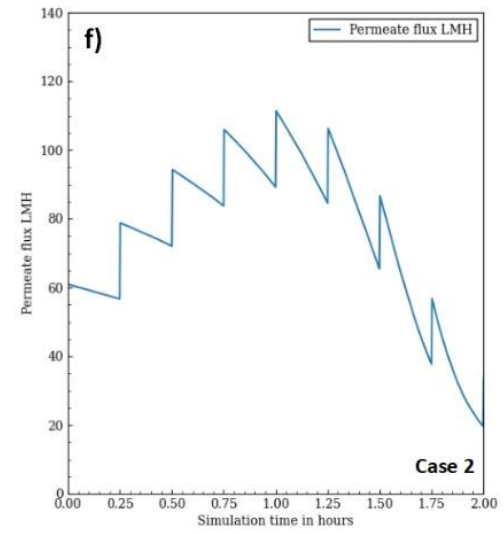
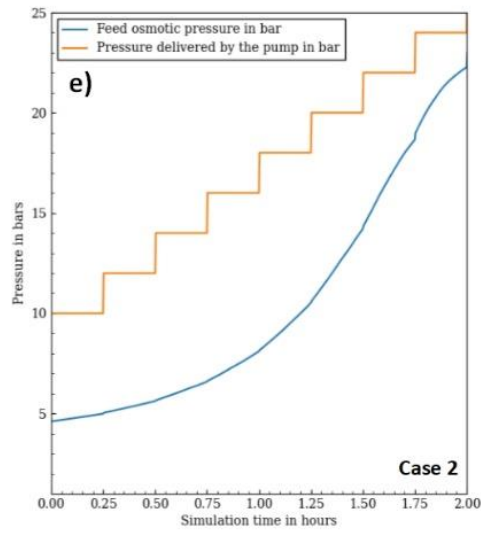
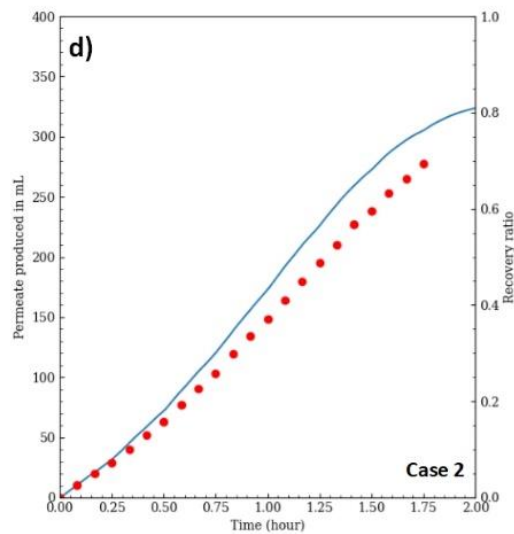
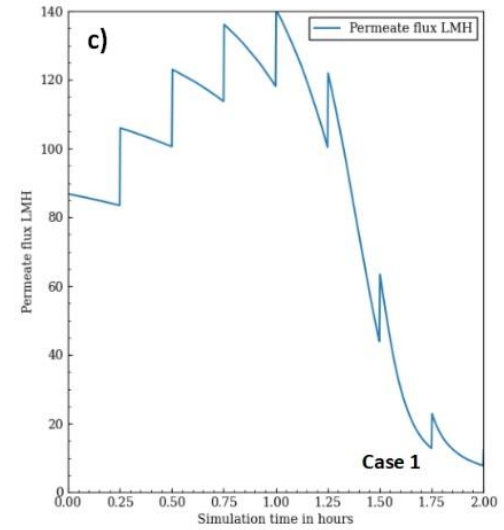
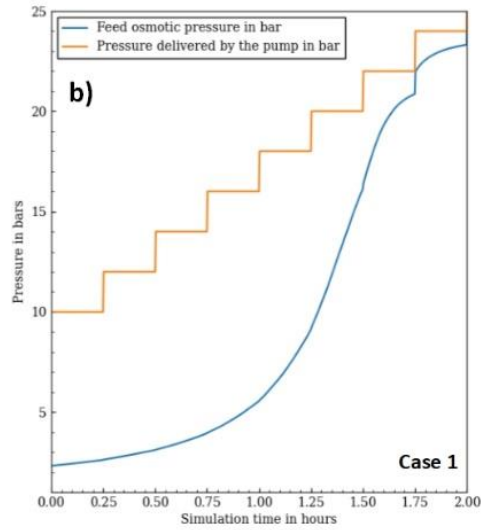
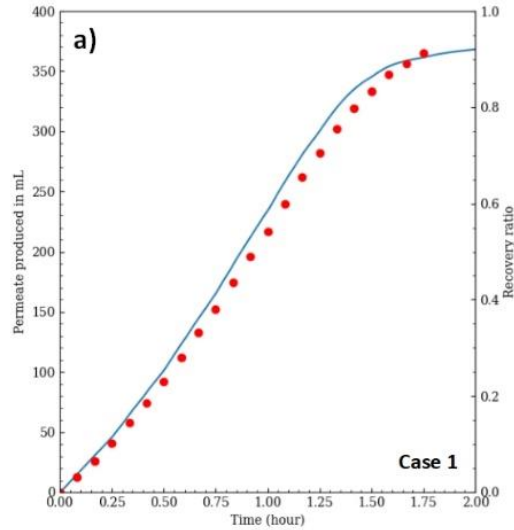
La technologies

La mise en équation



La technologie

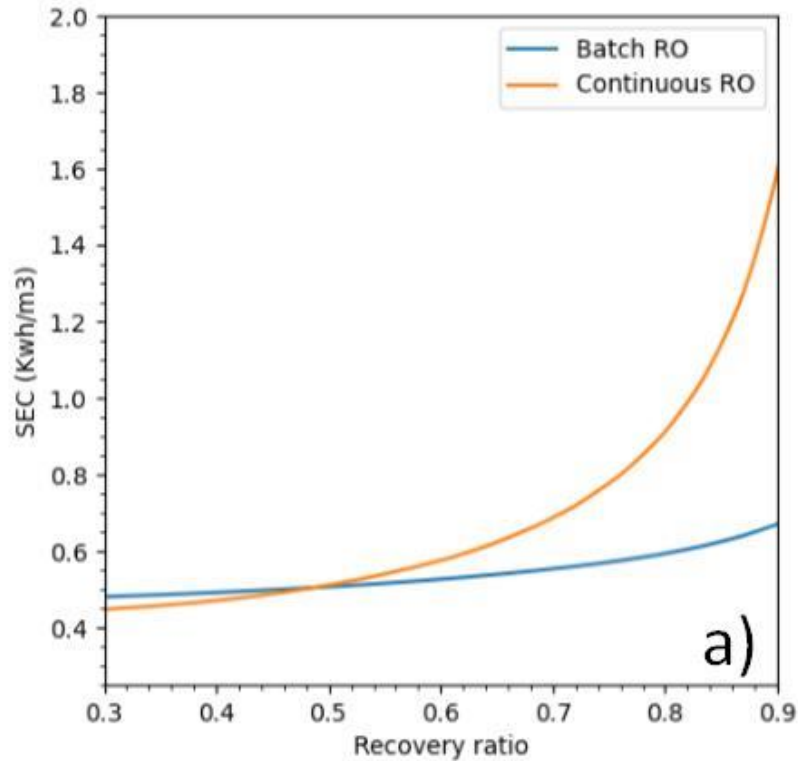
Résultats : Validation du modèle



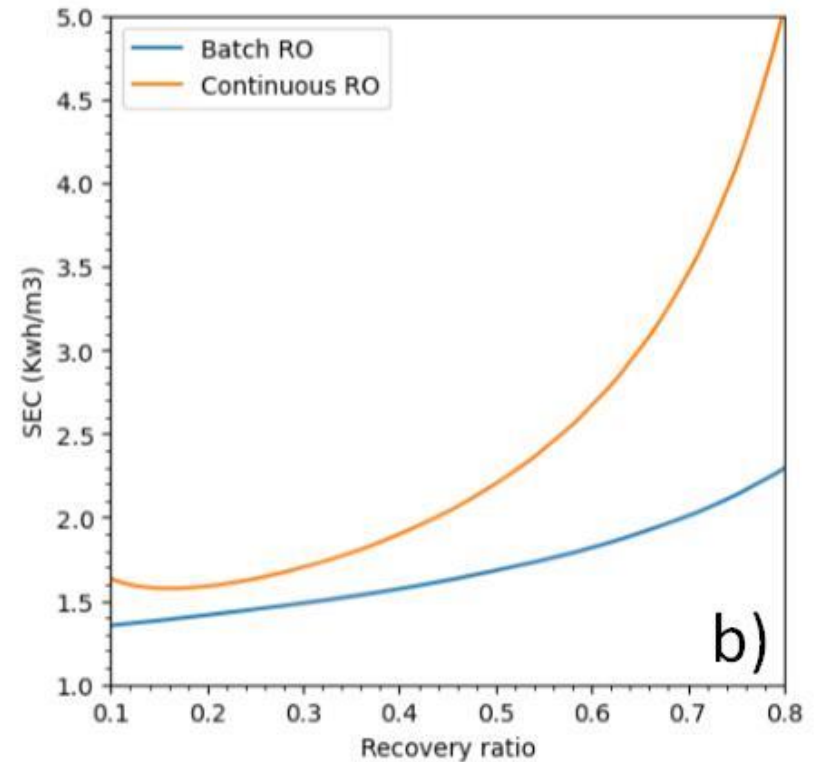
La technologie

Résultats

Concentration en Sels : 5 g/L



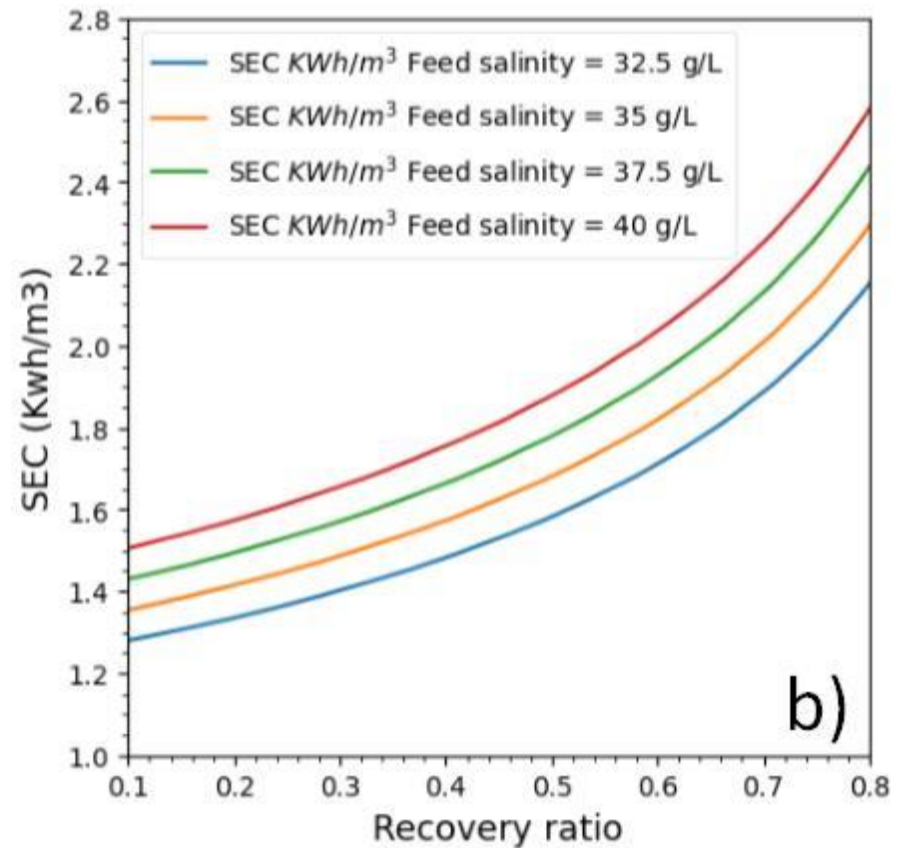
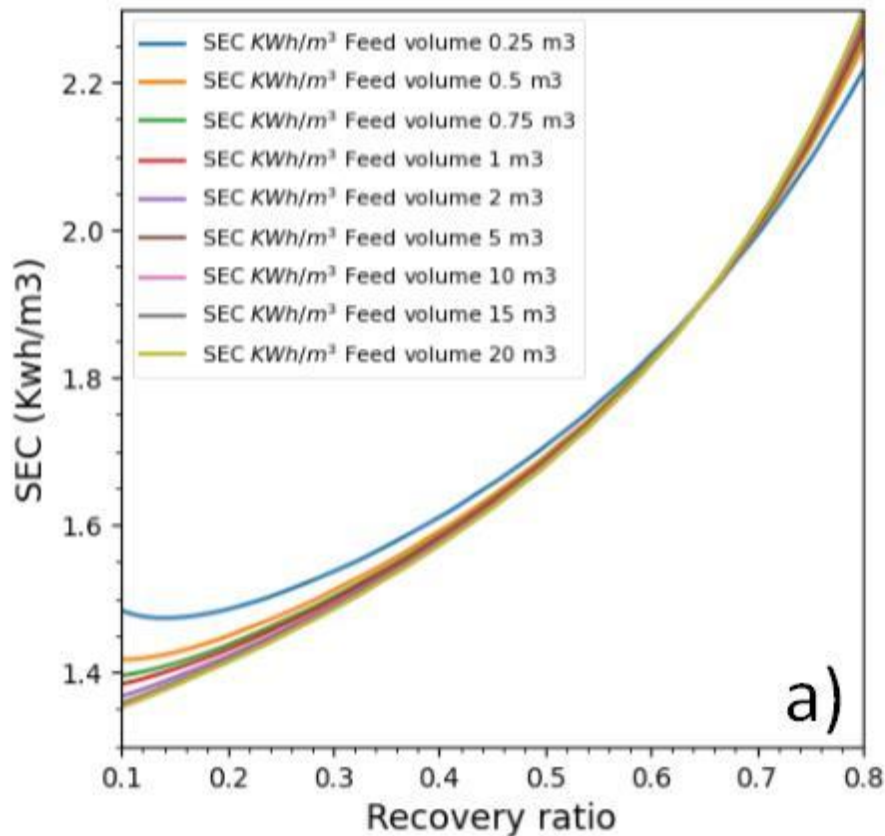
Concentration en Sels : 35g/L



SEC of batch RO and continuous RO vs recovery ratios for (a) brackish water and (b) seawater.

La technologie

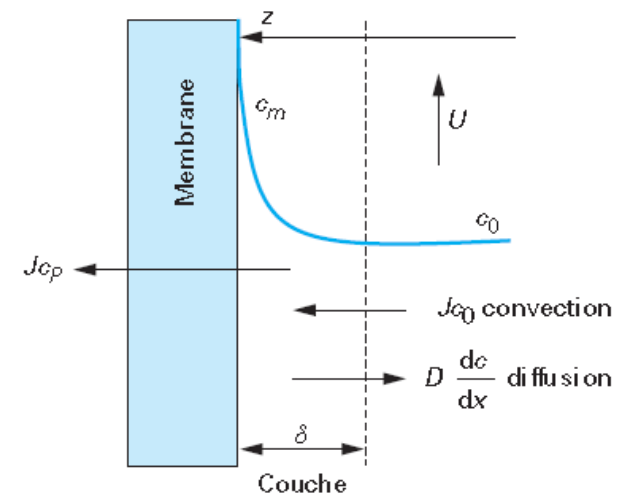
Résultats

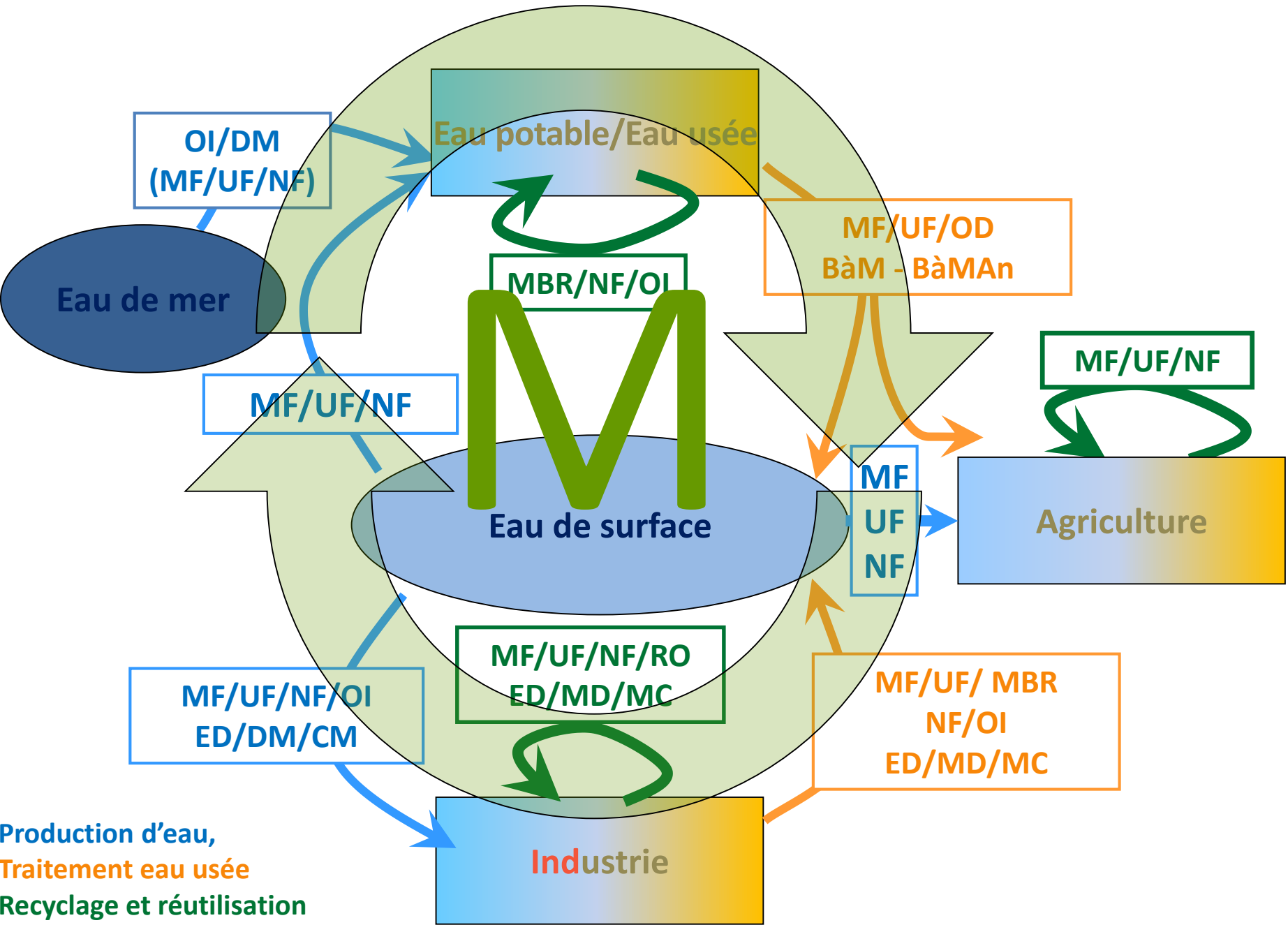


Impact du volume d'alimentation et de la salinité

Conclusions

- Solution décentralisée : Peut fonctionner qu'avec un seul module
- Un modèle mathématique éprouvé (Outils de dimensionnement/Prédiction)
- La modélisation confirme les gains d'énergie :
 - Salinité 5 g/L taux de conversion 80% : 0,75 kWh/m³
- La consommation augmente de 0,15 kWh/m³ quand la salinité augmente de 2,5g/L
- L'augmentation du $V_{\text{Alimentation}}$ a un effet positif jusqu'à 3,86L/m²de membrane
- Le contrôle de la force motrice ($P_{\text{Alimentation}}$) permet le contrôle la couche de polarisation
 - Contrôler les risques de colmatage (C_0)
 - Contrôler la qualité d'eau
 - Clef de l'optimisation énergétique





Production d'eau,
 Traitement eau usée
 Recyclage et réutilisation