



**Faculté des Sciences
Kénitra- Maroc**

**Laboratoire des Procédés de
Séparation**

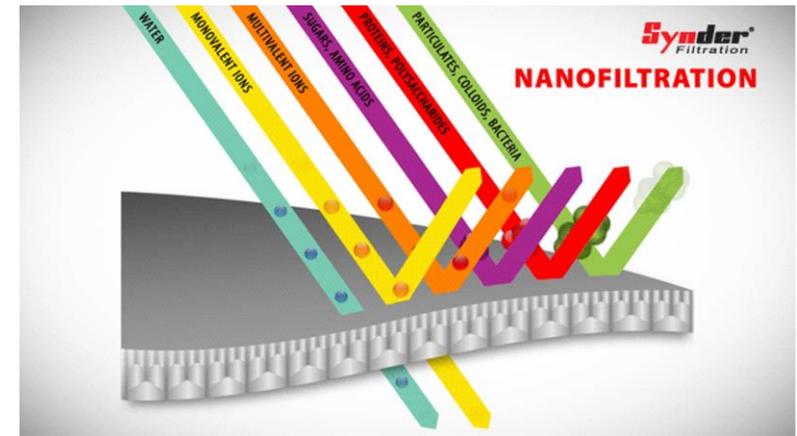
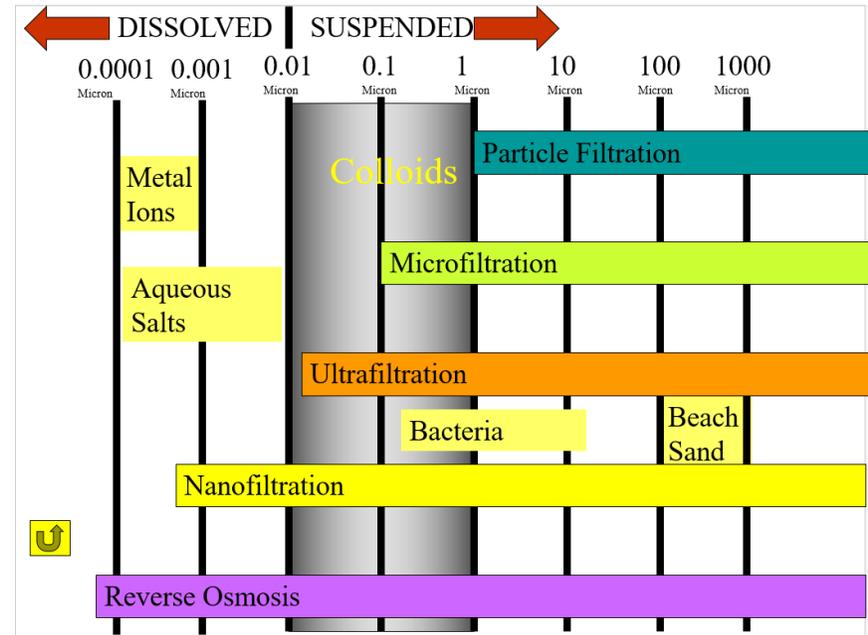
Modélisation de l'élimination des micropolluants ioniques des eaux souterraines par nanofiltration

Pr Mohamed TAKY

27 Janvier 2021

Nanofiltration

- La nanofiltration est une technologie récente.
- La champ d'application se situe entre ceux de l'ultrafiltration et de l'osmose inverse.
- La nanofiltration peut concurrencer l'osmose inverse dans certains cas de filtration particulière :
 - * Une pression de travail faible,
 - * De grands flux de solvant,
 - * Une sélectivité préférentielle pour les ions multivalents par rapport aux ions monovalents.

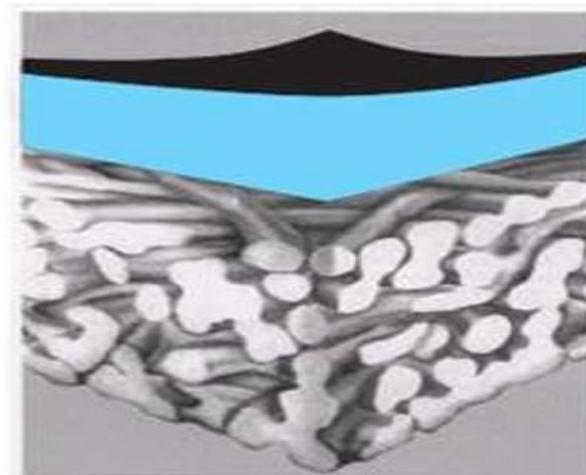


Applications

- recyclage des eaux dans les effluents de teinturerie;
- Traitement des eaux de blanchiment de la pâte à papier;
- Recyclage des eaux de lavage dans l'industrie des traitements de surface;
- Production d'eau potable;
- Traitement d'affinement;
- Décoloration des sirops de sucre;
- Déminéralisation des lactosérums,
- Elimination des pesticides,...

Caractéristiques des membranes de nanofiltration

- ✓ Flux volumique et perméabilité hydraulique
- ✓ Seuil de coupure
- ✓ Taux de rejet
- ✓ Sélectivité
- ✓ Charge superficielle.



Peau ou couche sélective
(1 μm ou moins)

Sous-couche poreuse
100 μm

Support mécanique
non tissé

Les phénomènes qui régissent la sélectivité des membranes de nanofiltration sont :

- Les effets stériques liés aux tailles relatives des pores et des solutés;
- L'affinité chimique des membranes vis-à-vis des solutés;
- La charge superficielle de la membrane qui génère des interactions de type électrostatiques (les forces coulombiennes, les phénomènes d'exclusion diélectrique).

D'où la nécessité de disposer d'outils fiables de modélisation reliant les caractéristiques d'un nanofiltre à ses propriétés de transfert.

Plusieurs approches ont été développées pour décrire le transport de matière dans des membranes de filtration :

- Modèle de Kedem et Katchalsky
- Modèle de Spiegler-Kedem
- Modèle de Nernst-Planck étendu

Modèle de Kedem et Katchalsky :

- ✓ Repose sur la théorie linéaire de la thermodynamique des processus irréversible.
- ✓ Donne des relations du flux volumique et du flux molaire de soluté en fonction de trois coefficients de transport (coefficient de réflexion, perméabilité du soluté, perméabilité hydraulique).

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma \Delta \pi)$$
$$J_s = P_s \Delta C_s + (1 - \sigma) J_v C_m$$

Sigma : coefficient de réflexion. Compris entre 0 et 1.

Quand sigma = 1 on retrouve les équations qui décrivent le transfert de matière en osmose inverse.

Limitation :

Valable pour des faibles valeurs de flux volumique et de la différence de concentration transmembranaire.

Modèle de Spiegler-Kedem

- ✓ Repose sur la théorie linéaire de la thermodynamique des processus irréversible,
- ✓ Donne l'équation reliant le taux de rejet du soluté au flux volumique, au coefficient de réflexion et à sa perméabilité au soluté.

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma \Delta \pi)$$

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} = \frac{\sigma(1-F)}{1-\sigma F} \quad \text{with} \quad F = \exp\left(\frac{(1-\sigma)J_v}{P_s}\right)$$

Sigma : coefficient de réflexion. Compris entre 0 et 1.

Quand sigma = 1 on retrouve les équations qui décrivent le transfert de matière en osmose inverse.

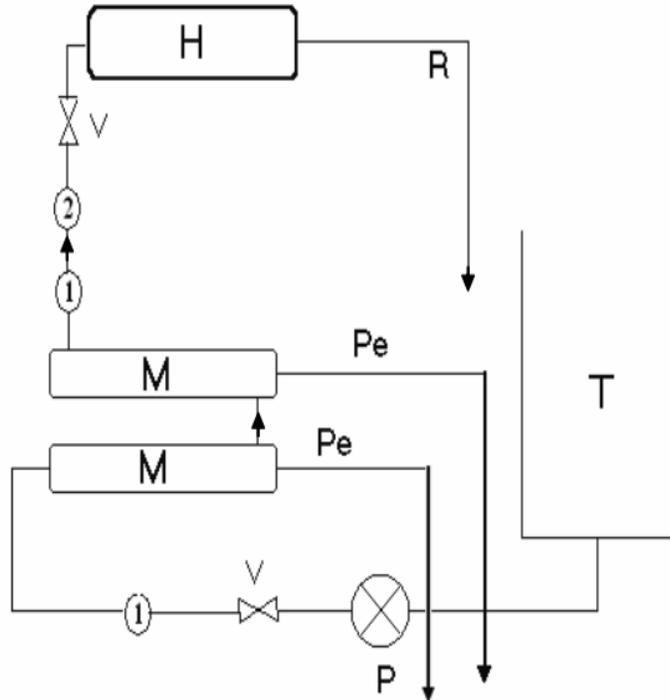
Limitation :

Ne pas prendre en considération la charge surfacique de la membrane et les interactions entre soluté chargé et les charges à la surface de la membrane.

Exemple d'application du modèle de Spiegler-Kedem

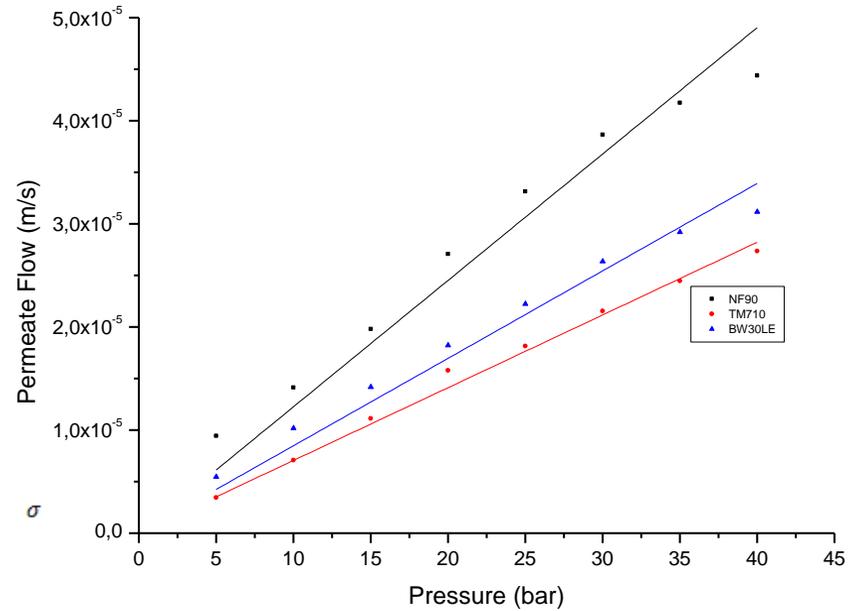
Défluoruration des eaux souterraines de la région de Benguerir (Maroc)

Le pilote d'étude:



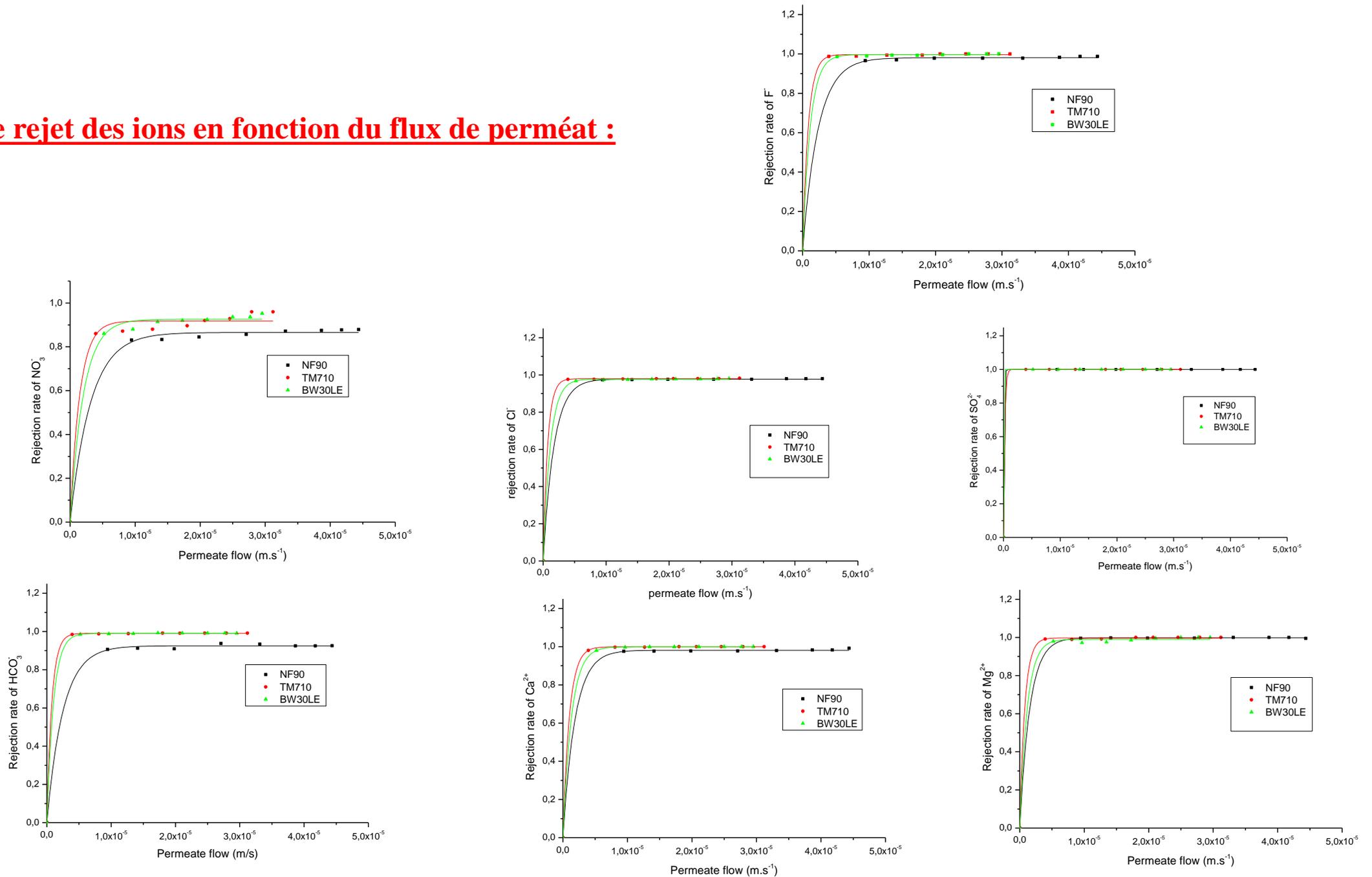
Schematic diagram and picture of the nanofiltration/reverse osmosis pilot plant. T: tank; P: feed pump; V: pressure regulation valves; M: nanofiltration module; Pe: permeate recirculation; R: retentate recirculation; H: heat exchanger; 1: pressure sensor; 2: temperature sensor.

Flux du solvant en fonction de la pression:



	NF90	TM710	BW30LE
Permeability to solvent P	1.225 10 ⁻⁶	7.0537 10 ⁻⁷	8.478 10 ⁻⁷
reflection coefficient	1.130 10 ⁻¹⁴	4.6401 10 ⁻¹³	1.131 10 ⁻¹⁴
Adj. R-Square	0.94	0.98	0.96

Taux de rejet des ions en fonction du flux de perméat :



		NF90	TM710	BW30LE
F ⁻	Permeability to solute P _s	4.450 10 ⁻⁸	2.852 10 ⁻⁹	4.326 10 ⁻⁹
	reflection coefficient	0.980	0.996	0.996
	Adj. R-Square	0.988	0.998	0.999
Cl ⁻	Permeability to solute P _s	3.805 10 ⁻⁸	1.484 10 ⁻⁸	2.520 10 ⁻⁸
	reflection coefficient	0.997	0.979	0.977
	Adj. R-Square	0.999	0.999	0.999
HCO ₃ ⁻	Permeability to solute P _s	1.883 10 ⁻⁷	7.488 10 ⁻⁹	9.681 10 ⁻⁹
	reflection coefficient	0.925	0.990	0.990
	Adj. R-Square	0.999	0.999	0.999
NO ₃ ⁻	Permeability to solute P _s	4.258 10 ⁻⁷	1.215 10 ⁻⁷	1.527 10 ⁻⁷
	reflection coefficient	0.865	0.917	0.925
	Adj. R-Square	0.987	0.988	0.996
SO ₄ ²⁻	Permeability to solute P _s	2.641 10 ⁻¹⁹	7.890 10 ⁻¹⁹	5.54 10 ⁻²¹
	reflection coefficient	1	1	1
	Adj. R-Square	1	1	1
Ca ²⁺	Permeability to solute P _s	3.505 10 ⁻⁸	7.985 10 ⁻¹⁰	1.062 10 ⁻⁹
	reflection coefficient	0.981	0.999	0.985
	Adj. R-Square	0.999	0.999	0.999
Mg ²⁺	Permeability to solute P _s	3.233 10 ⁻⁹	2.087 10 ⁻⁸	1.171 10 ⁻⁸
	reflection coefficient	0.997	0.997	0.989
	Adj. R-Square	0.999	0.998	0.998

Les résultats montrent :

- Un bon ajustement du flux de perméat en fonction de la pression et du taux de rétention de tous les ions en fonction des valeurs de flux de perméat pour toutes les membranes étudiées.
- Le coefficient de réflexion σ et la perméabilité au solvant P obtenus pour les trois membranes sont proches. La perméabilité suit l'ordre suivant: NF90 > BW30LE4040 > TM710.
- Les trois membranes ont des coefficients de réflexion σ élevés qui sont presque égaux à l'unité pour tous les ions étudiés.
- Les membranes présentent une rétention complète de tous les ions.
- Le mécanisme de transport approprié dans ces membranes est de nature purement diffusif. La membrane NF90 a une valeur σ proche de celles présentées par les membranes RO.

Modèle de Nernst-Planck étendu

- ✓ Repose sur la théorie de la thermodynamique des processus irréversible,
- ✓ Repose sur l'équation de Navier-Stokes pour la description du flux volumique et sur l'équation de Poisson-Boltzmann pour le calcul du profil radial du potentiel électrostatique à l'intérieur des pores.

$$J_i = -K_{i,d}D_i \frac{dc_i}{dx} - \frac{z_i c_i K_{i,d} D_i}{RT} F \frac{d\varphi}{dx} + K_{i,c} c_i V$$

où J_i est le flux molaire des espèces i , $K_{i,d}$ est le facteur d'encombrement ionique pour la diffusion, $K_{i,c}$ est le facteur d'encombrement ionique pour la convection, D_i est le coefficient de diffusion de l'ion i , c_i est la concentration de l'ion i à l'intérieur des pores de la membrane, x est la position axiale dans le pore, φ est le potentiel électrique d'ion à l'intérieur des pores, F est la constante de Faraday, R est la constante de gaz universelle, T est la température, V est la vitesse du solvant, z_i est la valence de l'ion i [-].

Limitation :

Complexité des calculs requis et le temps de calcul pour l'étude d'électrolytes.

Conclusion

- Les mécanismes de transfert en nanofiltration sont très complexes, c'est pourquoi les recherches qui visent à mettre au point des outils fiables de modélisation du transport se sont intensifiées au cours des dernières années,
- Le modèle de Nernst-Planck étendu couplé à d'autres modèles déjà existant ou bien à développer peuvent décrire le transport des soluté ionique dans les pores et peuvent aussi déterminer la contribution de l'interaction électrostatique entre le soluté ionique et les charge à la surface des membranes de nanofiltration,

Perspectives

L'utilisation du modèle de Nernst-Planck étendu seul ou couplé avec d'autres modèles pour décrire le transfert des ions chargés (Fluorure et nitrate) dans les membranes de nanofiltration en tenant compte des interactions électrostatiques entre ces ions et la charge superficielle de la membrane.

Merci pour votre attention

takymohamed@gmail.com

mohamed.taky@uit.ac.ma