



Détection précoce et contrôle de colmatage d'une membrane d'ultrafiltration

Mlle. Nesrine KALBOUSSI

Ph.D student

Nesrine KALBOUSSI

- ▶ Ingénieur chimiste diplômée de l'Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie (INSAT)_TUNISIE



Nesrine KALBOUSSI

- ▶ Projet fin d'étude réalisé au sein de l'Unité de Recherche sur l'Efficacité Energétique et le Développement Durable de la Bioraffinerie Forestière (E2D2BF) – Polytechnique Montréal–Canada sous la supervision de Prof. Jean PARIS et Prof. Nihel BEN AMAR.



La thématique du travail de thèse

- ▶ Le développement d'un outil de prédiction et de contrôle de colmatage d'une membrane d'ultrafiltration.
- ▶ L'objectif est d'assurer le fonctionnement optimal du procédé de filtration moyennant des lois de commande et des actions automatiques sur les paramètres opératoires pour minimiser le colmatage

- ▶ Quelles sont les informations qui existent dans la littérature sur cette thématique ?
- ▶ Comment capitaliser les résultats des travaux de mes collègues (Amine, Imen, Ahlem)?

Etat de l'art

La cinétique biologique
ASM1 ASM2
ASM2-d ASM3
Extension SMP/EPS
La théorie de réacteur
de chemostat

**Les modèles de
filtration**
La résistance en
série
La résistance en
série séquentielle

Les modèles intégrés
ASM1 /SMP + résistance en série
ASM1 /SMP/EPS + résistance en série
ASM3 + résistance en série
ASM1 /SMP + résistance séquentielle
La théorie de réacteur de chemostat +
résistance en série

Output

Input

Contrôle biologique
Le débit de
l'aération (DO)
Le flux pompé

coût

**Contrôle de
filtration**
Cycle (filtration,
relaxation,
rétrolavage)
Aération

Pourquoi l'extension des ASMs à SMP/EPS ?

	Effet sur le colmatage	Référence
EPS	↗EPS => la résistance de la membrane ↗	(Chae, Ahn et al. 2006)
	↗EPS => la vitesse de colmatage ↗	(Drews, Vocks et al. 2006)
	Les EPS affectent la résistance spécifique de gâteau	(Cho, Song et al. 2005)
SMP	↗SMP=> la vitesse de colmatage et l'indice de colmatage de la membrane ↗	(Arabi and Nakhla 2009)
	SMP influence le colmatage sous certaines conditions telqu'un faible âge des boues et grande taille de pores	(Drews, Vocks et al. 2008)
	Les SMP sont la cause majeur de colmatage	(Pan, Su et al. 2010)

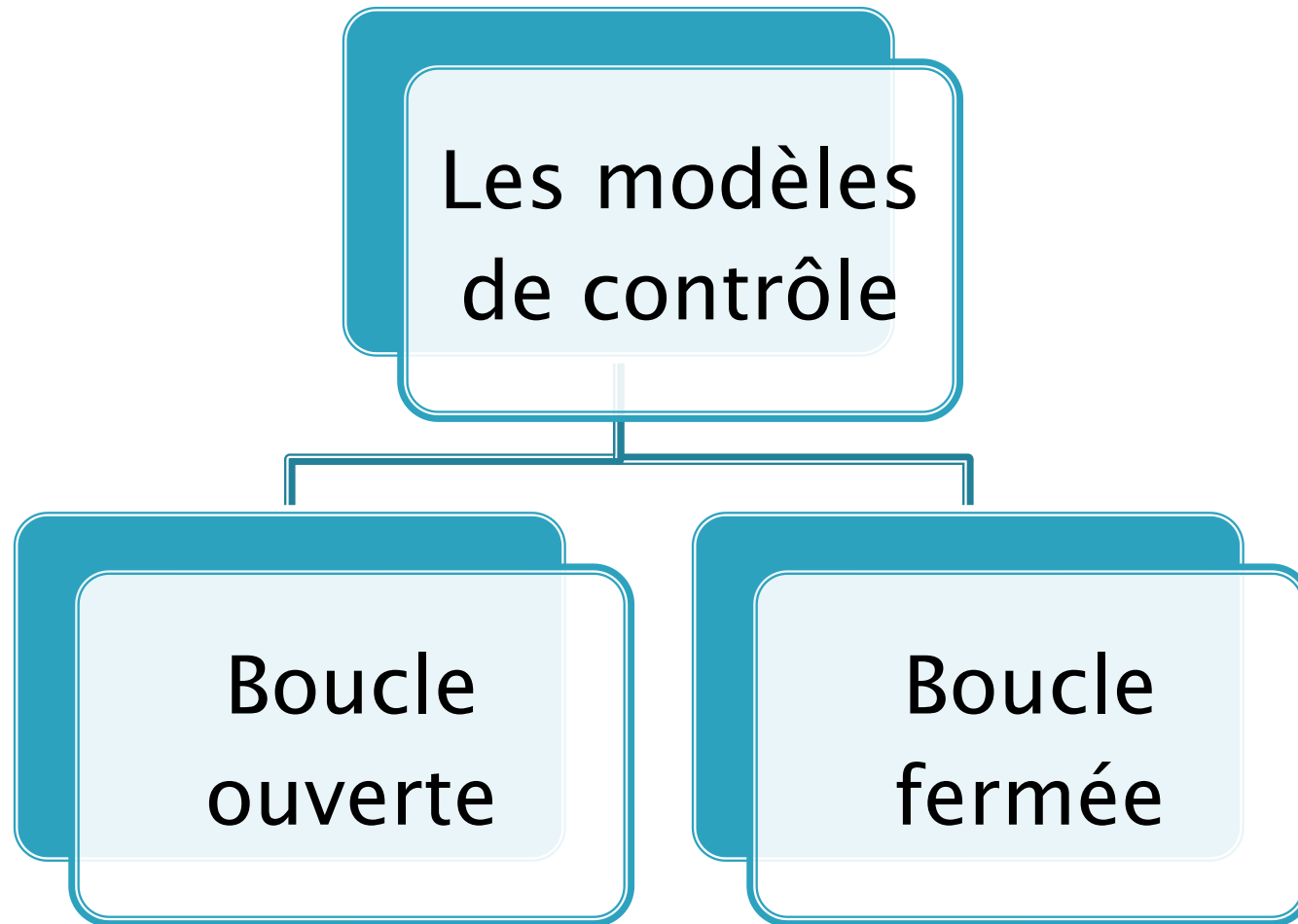
Les résistances en série

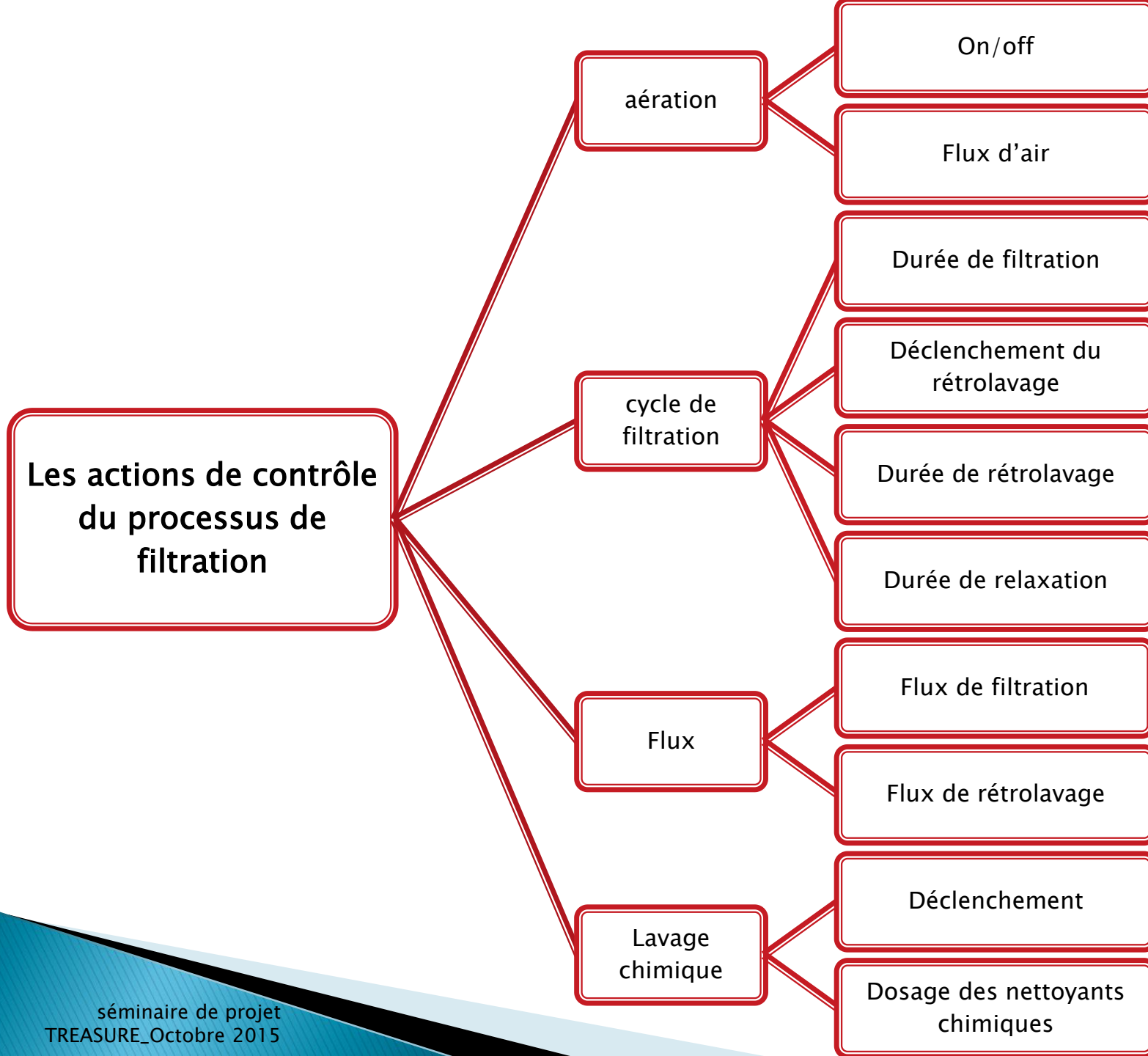
Résistance de la membrane	Référence
$R_t = R_m + R_{cake} + R_{pore} + R_{ir}$	(Broeckmann, Busch et al. 2006)
$R_t = R_m + R_{cake} + R_{pore} + R_{biofilm}$	(Busch, Cruse et al. 2007)
$R_t = R_m + R_{cake}$	(Lee, Cho et al. 2002)
$R_t = R_m + R_{cake} + R_{fouling}$	(Wintgens, Rosen et al. 2003) (Khan, Visvanathan et al. 2009)
$R_t = R_m + R_{cake} + \text{perturbation à la résistance}$	(Pimentel, Vande Wouwer et al. 2015)
$R_t = R_m + R_p + R_{sc} + R_{sf}$	(Li and Wang 2006)

Résistance séquentielles

- ▶ Diviser la surface de la membrane à des sections égales et calculer la résistance totale de chaque section.
- ▶ L'approche séquentielle a été considérée pour tenir compte de la non-uniformité du colmatage à la surface de la membrane due à des forces de cisaillement et de l'aération inégalement réparties sur la surface de la membrane.

Les modèles de contrôle





Contrôle-références scientifiques

input	Action de contrôle	Validation	Résultats	Référence
La perméabilité	Régulation de l'aération	grande échelle sur un BRM	<ul style="list-style-type: none">•Economie de 14% de l'énergie destinée pour l'aération•Aucun effet sur le colmatage	(Monclús, Dalmau et al. 2015)
	Régulation de l'aération	échelle pilote	<ul style="list-style-type: none">•Economie de 21% de l'énergie destinée pour l'aération•Aucun effet sur le colmatage	(Ferrero, Rodríguez-Roda et al. 2012)
	Injection des micro-coagulants	échelle pilote	<ul style="list-style-type: none">•Gestion de l'injection des micro-coagulants	(Langlais, 2008)

Contrôle-références Scientifiques

input	L'action de contrôle	Validation	Résultats	Référence
PTM	<ul style="list-style-type: none"> •L'initiation de rétrolavage •La durée de rétrolavage 	échelle pilote	Economie de 40% de perméat utilisé pour le rétrolavage	Smith et al., 2006a, 2006b
	<ul style="list-style-type: none"> •Flux d'air •Flux de filtration •Durée de la phase de relaxation •Durée de la phase de filtration 	N/A	Patent de Kruger IP	Hong et al., 2008
Le flux de perméat	<ul style="list-style-type: none"> •Le déclenchement du rétrolavage 	échelle pilote		Vargas et al., 2008

Le contrôle_littérature Scientifique

input	L'action de contrôle	Validation	Résultats	Référence
La résistance totale de la membrane	<ul style="list-style-type: none"> •Flux d'air •Flux de perméat •Durée de la filtration •Initiation et durée de rétrolavage •Durée de la relaxation •Fréquence de Nettoyage chimique 	<p>Grande échelle</p> <p>Et</p> <p>Échelle pilote</p>	<p>Patent de Zenon GE IP</p>	<p>Ginzburg et al., 2007</p> <p>Ginzburg et al., 2008</p>
	<ul style="list-style-type: none"> •Flux de perméat •Flux de rétrolavage •Durée de rétrolavage •Durée de filtration 	<p>Échelle pilote</p>		<p>Busch et al., 2007</p> <p>Busch and Marquardt, 2009</p>

Ginzburg et al., 2007

Ginzburg et al., 2008

- ▶ La résistance après un rétrolavage

$$R_{ab} = (R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4} + R_{t5}) / 5$$

- ▶ $\Delta R_{ab} = R_{ab}(\text{cycle 2}) - R_{ab}(\text{cycle 1})$

- ▶ La résistance de gâteau: $R_c = M(T_2 - T_1)$

- ▶ La résistance du colmatage adsorbé à la surface et dans les pores: $R_a = R_{db} * f - R_m$

Ginzburg et al., 2007

Ginzburg et al., 2008

Fixation des valeurs seuils pour ΔR_{ab} , R_c , R_a

Acquisition en continue des données: PTM, flux, T

Calcul des résistances

Comparaison des résultats aux valeurs seuils

Prendre la décision selon la hiérarchie de contrôle pré-établie

Les travaux de l'équipe de recherche

Master d'Ahlem

- ▶ L'influence de cinq facteurs sur le colmatage de la membrane :
 - ❑ le débit de la filtration (FF)
 - ❑ le débit de rétrolavage (BF)
 - ❑ la durée de filtration (FT)
 - ❑ la durée de rétrolavage (BT)
 - ❑ l'intensité de l'aération (AI)

Master d'Ahlem

- ▶ Une étude de criblage a été menée pour déterminer les facteurs les + influents sur le colmatage
- ▶ La réponse considérée est le taux de diminution de la perméabilité au bout de 24h.
- ▶ Le traitement du vecteur réponse a été effectué par le logiciel NEMROD qui permet de calculer le poids de chaque facteur et sa contribution dans la variation de la réponse

Master d'Ahlem

- ▶ Il en ressort d'après cette analyse que seul trois facteurs ont un effet significatif sur la variation de la perméabilité. Ces facteurs sont, dans l'ordre d'influence:
 - ❖ la durée de rétrolavage (BT)
 - ❖ l'intensité de l'aération (AI)
 - ❖ le débit de filtration (FF)
- ➡ Le débit de rétrolavage et la durée de la filtration apparaissent comme complètement insignifiants.

Master d'Ahlem

Les résultats de l'étude de surface de réponse sont:

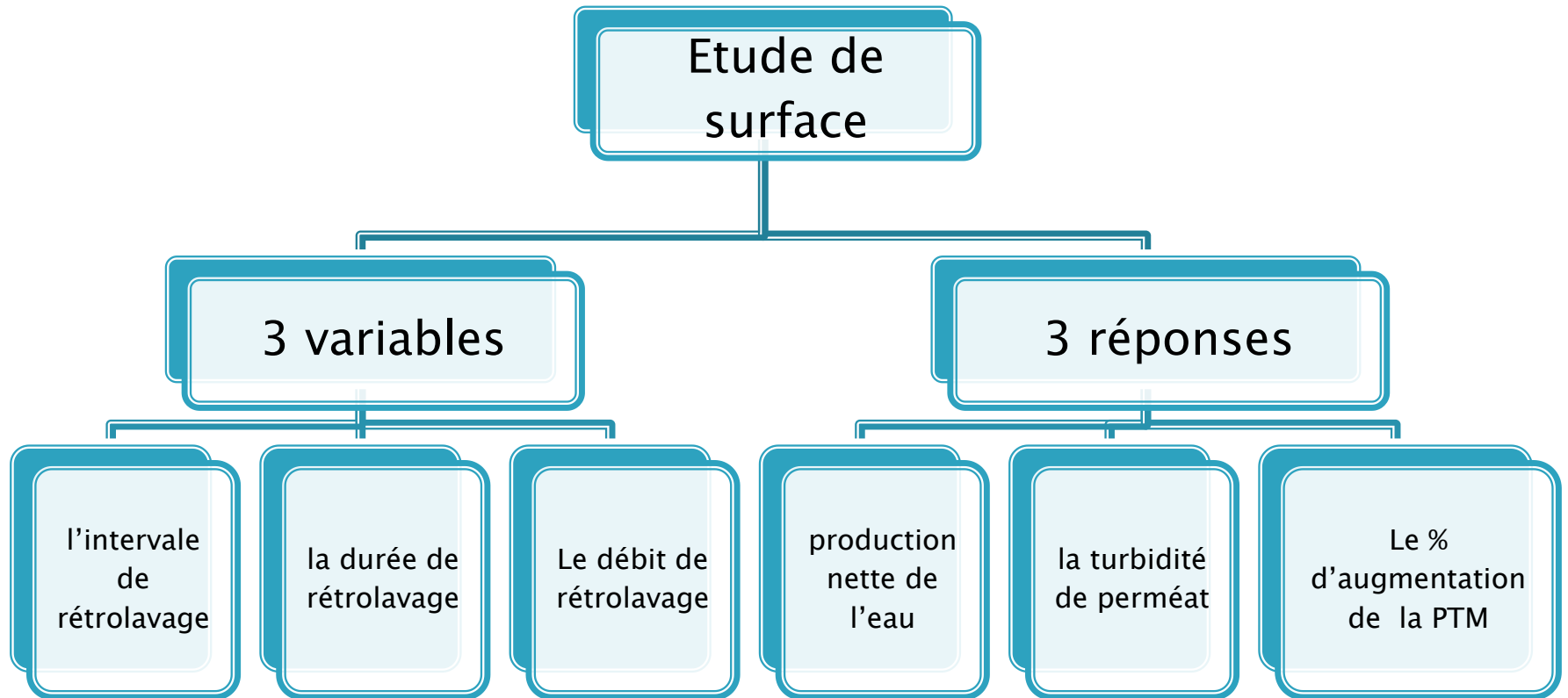
- ❖ lorsque l'aération est **faible**, quelque soit la durée de rétrolavage le colmatage ne s'installe que lorsque la vitesse de filtration est importante.
- ❖ lorsque l'aération est **forte**, le colmatage s'aggrave lorsque le débit de filtration est important et la durée de rétrolavage est courte.

Travail de thèse d'Imen

Ce travail traite l'ultrafiltration de l'eau de mer comme prétraitement à l'osmose inverse dans une centrale thermique. L'objectif est de déterminer les conditions opératoires optimales de système pour lesquels on a:

- ▶ Une production nette d'eau maximale
- ▶ Une meilleure qualité d'eau
- ▶ Moins de colmatage

Travail de thèse d'Imen



Travail de thèse d'Imen

- ▶ Le modèle de « blocage complet » d'Hermia est le modèle qui décrit le mieux le colmatage de la membrane d'UF de l'eau de mer.

Thèse d'Amine

- ▶ Le colmatage par gâteau est le mode de colmatage dominant dans les BRMAN
- ▶ Définition d'un modèle de filtration tangentielle simple à deux paramètres (la résistance spécifique de gâteau, l'effet de cisaillement) en considérant une seule famille de colmatant (MES)
- ▶ Définition d'un autre modèle de filtration tangentielle à trois paramètres en considérant deux familles de colmatant (MES, SMP)

Thèse d'Amine

- ▶ Le modèle de filtration à 3 paramètres permet de modéliser la perméabilité à long terme en tenant compte l'effet du lavage périodique pour la régénération de la membrane (relaxation et rétrolavage)
- ▶ Un modèle couplé pour modéliser un BRMAN

Proposition de recherche

Suivre des paramètres mesurables (PTM, flux, T)

Calcul des indices de colmatage C.T et L.T

Résoudre un problème d'optimisation dont la fonction objective est minimiser le coût énergétique de procédé dans un minimum de temps et avec une bonne qualité d'eau à la sortie

Optimiser les paramètres influant le colmatage:
la durée de rétrolavage (BT), l'intensité de l'aération (AI), le débit de filtration

**Merci pour votre
attention**

(Monclús, Dalmau et al. 2015)

Mesure de la PTM et le flux de perméat(QP)



Calcul de la moyenne journalière de PTM,QP



Déterminer l'évolution de la perméabilité sur le CT(4jours) et le LT(14jours)



Calcul de ratio des pentes $SR = \text{perméabilité CT} / \text{perméabilité LT}$



Prendre l'action de contrôle (manipuler le débit de l'aération) selon la valeur du SR

Les limites de ce qui existe déjà

- ▶ Il n'existe pas encore un modèle intégré au vrai sens, il s'agit plutôt de coupler un modèle de filtration à un modèle biologique
- ▶ Le choix des sous-modèles juxtaposés dans un modèle intégré n'est pas toujours justifier
- ▶ Peu de modèle dynamique au cours de temps
- ▶ Les sous-modèles biologiques utilisés ne s'intéressent pas à l'élimination de phosphore (ASM2 / ASM2-d)
- ▶ La plupart des systèmes de contrôle existant se basent sur l'analyse d'une seule variables (PTM, perméabilité...)

Les OBJECTIFS DE TRAVAIL

Le modèle mathématique développé va permettre de:

- ▶ Identifier, au cours de temps, le mode de colmatage dominant
- ▶ Employer le modèle mathématique intégré adéquat au mode de colmatage identifier
- ▶ Corréler la réalité et prédire l'évolution de colmatage de la membrane

Les OBJECTIFS DE TRAVAIL

- ▶ L'outil de contrôle de colmatage est une stratégie de contrôle qui se base sur les résultats délivrées par le système mathématique développé.
- ▶ Le driver de système de contrôle est l'analyse de plusieurs paramètres juger influant sur le colmatage de la membrane

Résultats-Conditions optimales

Production nette de l'eau

Les conditions dans lesquelles la production nette de l'eau est maximale sont :

- ▶ Intervalle de rétrolavage=[40min,50min]
- ▶ Durée de rétrolavage= [30s,40s]
- ▶ Débit de rétrolavage fixe= 10L/min

Résultats – Conditions optimales

à ces même conditions:

- ▶ la turbidité de perméat est faible, égale à 0.17 NTU (< 0.5 NTU la turbidité recommandée par les fournisseurs de membrane d'osmose inverse)
- ▶ la différence de pression est égale à 6%

La production de l'eau nette

La production d'eau nette la plus élevée est obtenue à:

- ▶ Intervalle de rétrolavage=45 min
- ▶ Durée de rétrolavage=35s
- ▶ Débit de rétrolavage= 10 L/min

La turbidité

La turbidité la plus faible (0.1 NTU) est obtenue à:

- ▶ Intervalle de rétrolavage = 50 min
- ▶ Durée de rétrolavage = 35 s
- ▶ Débit de rétrolavage = 22 L/min

La différence de pression transmembranaire

La différence de pression transmembranaire la plus faible (4%) est obtenue à:

- ▶ Intervalle de rétrolavage=35 min
- ▶ Durée de rétrolavage=30s
- ▶ Débit de rétrolavage= 34 L/min

Des axes de recherche

Peu de travaux qui:

- ▶ Combinent des modèles de filtration à des modèles biologiques des système anaérobies
- ▶ Calibrent parfaitement les paramètres du modèle
- ▶ valident les modèles à grande échelle
- ▶ Justifient le mode de colmatage dominant

Des axes de Recherche

- ▶ Prédire le colmatage à long terme
- ▶ se concentrer sur les effets d'interactions entre la filtration de la couche de gâteau, le blocage des pores et la formation de biofilm.
- ▶ Peu de modèle de contrôle en continu
- ▶ La plupart des systèmes de contrôle existant se basent sur l'analyse d'une seule variables (PTM, perméabilité...)