

Modéliser pour optimiser le démarrage d'un biofiltre nitrifiant des eaux de forage

Isabelle Queinnec¹ et Etienne Paul²

¹LAAS-CNRS, Université de Toulouse (INSA, UPS, INP, ISAE, UT1), France

²LISBP, Université de Toulouse (INSA, UPS, INP), INRA, CNRS, France



STIC & Environnement 2011, Saint-Etienne

Introduction

Objectifs :

- représenter la dynamique de colonisation et de croissance d'un biofilm
- **analyser les voies d'optimisation pour le démarrage d'un biofiltre**
- influence du support de colonisation

→ Description d'un modèle dynamique mécanistique + calibration de ce modèle : outil de simulation et de prédiction

Contexte :

- eau très faiblement chargée en NH_4^+
- présence de particules dans l'aquifère

Plan de la présentation

I. Introduction

II. Matériel et méthodes

- ✓ Support expérimental

- ✓ Modélisation

III. Ensemencement naturel versus ensemencement exogène

- ✓ Ensemencement exogène

- ✓ Ajout de nitrite au démarrage

- ✓ Validation du modèle

IV. Prédications par le modèle

- ✓ Conditions de mise en régime en quelques jours

V. Conclusions - perspectives

II. Matériel et méthodes

Support expérimental

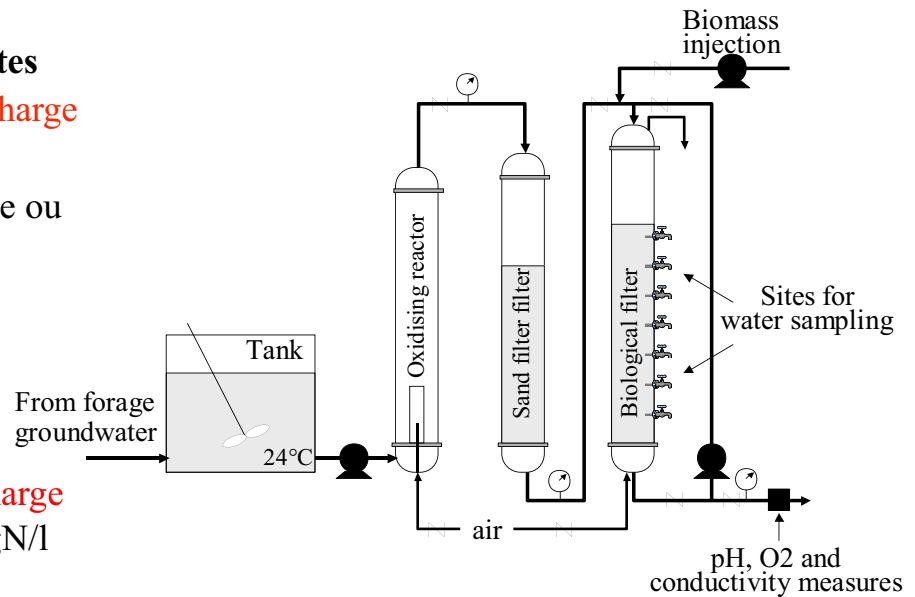
Deux colonnes différentes

C1: Expériences faible charge

- $S_{NH_4^+}^{in} = 0.2 \text{ mgN/l}$
- Inoculum endogène ou exogène
- $T = 24^\circ\text{C}$
- Faible quantité de bactéries

C2: Expériences forte charge

- $S_{NH_4^+}^{in} = 1.1 \text{ to } 5 \text{ mgN/l}$
- $T = 15^\circ\text{C}$
- Grande quantité de bactéries inoculées
- tests sur différents supports



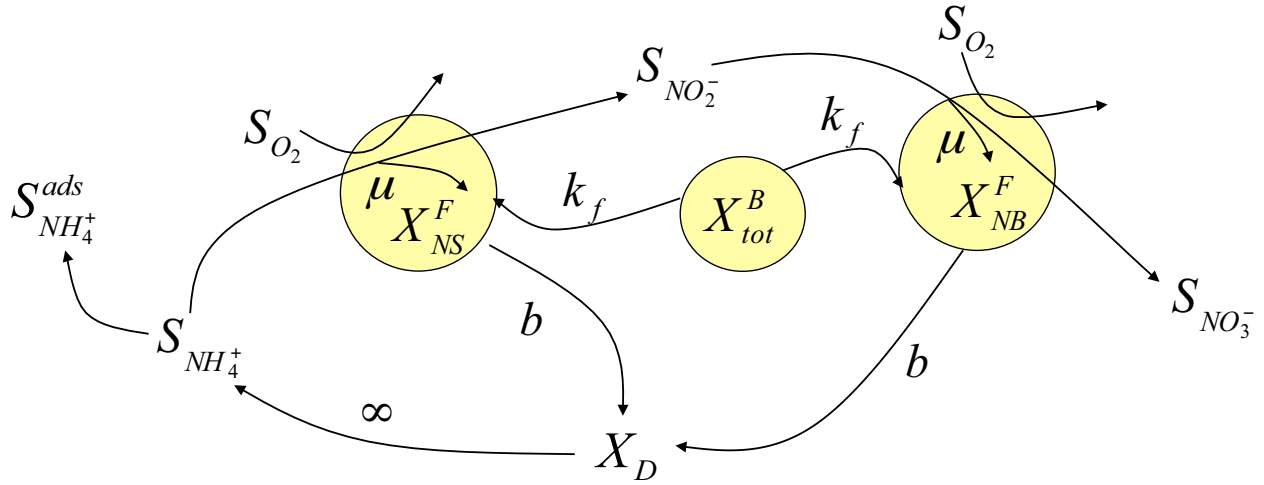
Conditions opératoires largement différentes

Modélisation (1/4)

- Modèle basé sur l'ASM1
 - **deux populations**: *nitrosomonas* (X_{NS}), *nitrobacter* (X_{NB})
 - dynamique sur l'oxygène
 - **effet de la température** sur la croissance
 - cycle de l'ammonium provenant de la **lyse** cellulaire + hypothèse que les dynamiques sur X_{ND} et S_{ND} sont beaucoup plus rapides que les autres réactions
- Modèle d'**adsorption** de Freundlich (utile principalement quand de la zéolite est utilisée comme support)
- Modèle de **filtration** des particules provenant de l'eau de nappe
 - modèle hydrodynamique simple (pas de dispersion axiale)
 - coefficient de capture des microorganismes

On aurait pu/dû considérer : la dynamique des hétérotrophes, des variations de la fraction de vide, un modèle de détachement des particules ...

Modélisation (2/4)



- 8 variables d'état

$$S_{NH_4^+}, S_{NO_2^-}, S_{NO_3^-}, S_{O_2}, X_{tot}^B, S_{NH_4^+}^{ads}, X_{NS}^F, X_{NB}^F$$

- 19 paramètres + conditions initiales + conditions d'alimentation du biofiltre

Modélisation (3/4)

$$\dot{S}_{NH_4^+} = -\frac{Q}{\varepsilon A} \frac{\partial S_{NH_4^+}}{\partial z} - \frac{\mu_{NS}}{Y_{NS}} \frac{X_{NS}^F}{\varepsilon} - \frac{k_{ads}}{\varepsilon} \left(S_{NH_4^+} - \left(\frac{S_{NH_4^+}^{ads}}{K_{Fr}} \right)^{1/n_{Fr}} \right) + vb \frac{X_{NS}^F + X_{NB}^F}{\varepsilon}$$

$$\dot{S}_{NO_2^-} = -\frac{Q}{\varepsilon A} \frac{\partial S_{NO_2^-}}{\partial z} + \frac{Y_{NO_2^-}}{Y_{NS}} \mu_{NS} \frac{X_{NS}^F}{\varepsilon} - \frac{1}{Y_{NB}} \mu_{NB} \frac{X_{NB}^F}{\varepsilon}$$

$$\dot{S}_{NO_3^-} = -\frac{Q}{\varepsilon A} \frac{\partial S_{NO_3^-}}{\partial z} + \frac{Y_{NO_3^-}}{Y_{NB}} \mu_{NB} \frac{X_{NB}^F}{\varepsilon}$$

$$\dot{S}_{O_2} = -\frac{Q}{\varepsilon A} \frac{\partial S_{O_2}}{\partial z} - \frac{Y_{O_2,NS}}{Y_{NS}} \mu_{NS} \frac{X_{NS}^F}{\varepsilon} - \frac{Y_{O_2,NB}}{Y_{NB}} \mu_{NB} \frac{X_{NB}^F}{\varepsilon}$$

$$\dot{X}_{tot}^B = -\frac{Q}{\varepsilon A} \frac{\partial X_{tot}^B}{\partial z} - k_f \frac{Q}{\varepsilon A} X_{tot}^B$$

$$\dot{S}_{NH_4^+}^{ads} = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} k_{ads} \left(S_{NH_4^+} - \left(\frac{S_{NH_4^+}^{ads}}{K_{Fr}} \right)^{1/n_{Fr}} \right)$$

$$\mu_{NSmax} = \mu_{NS20max} 1.103^{T-20}$$

$$\mu_{NBmax} = \mu_{NB20max} 1.103^{T-20}$$

$$\mu_{NS} = \mu_{NSmax} \frac{S_{NH_4^+}}{K_{NS} + S_{NH_4^+}} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}}$$

$$\mu_{NB} = \mu_{NBmax} \frac{S_{NO_2^-}}{K_{NB} + S_{NO_2^-}} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}}$$

$$\dot{X}_{NS}^F = \mu_{NS} X_{NS}^F + f_{NS,in} k_f \frac{Q}{A} X_{tot}^B - b X_{NS}^F - \frac{X_{NS}^F}{X_{max}^F} \left(\mu_{NS} X_{NS}^F + \mu_{NB} X_{NB}^F - b(X_{NS}^F + X_{NB}^F) + k_f \frac{Q}{A} X_{tot}^B \right)$$

$$\dot{X}_{NB}^F = \mu_{NB} X_{NB}^F + (1-f_{NS,in}) k_f \frac{Q}{A} X_{tot}^B - b X_{NB}^F - \frac{X_{NB}^F}{X_{max}^F} \left(\mu_{NS} X_{NS}^F + \mu_{NB} X_{NB}^F - b(X_{NS}^F + X_{NB}^F) + k_f \frac{Q}{A} X_{tot}^B \right)$$

Modélisation (4/4)

Paramètres **indépendants** du support et des conditions expérimentales

- constantes de demi-saturation associées à l'oxygène
- rendements
- μ max
- constantes de décès
- coefficients d'assimilation



Valeurs "standard" issues de Henze *et al.* (2002)

Paramètres **dépendants** du support **mais pas** des conditions expérimentales

- paramètres du modèle d'adsorption (Freundlich)
- paramètres physiques du support (porosité, diamètre des particules)



Déterminés par des expériences spécifiques

Paramètres **dépendants** du support et des conditions expérimentales

- constantes de demi-saturation
- concentration maximale de biomasse active
- concentration initiale dans l'inoculum
- concentration en particules dans l'eau de nappe



Paramètres estimés

III. Ensemencement naturel versus ensemencement exogène

- Caractéristiques des expériences
- Les résultats expérimentaux
- Effet de l'ensemencement exogène (exogènes 1 et 2)
- Effet de l'ensemencement exogène + ajout de nitrite (exogène 3)

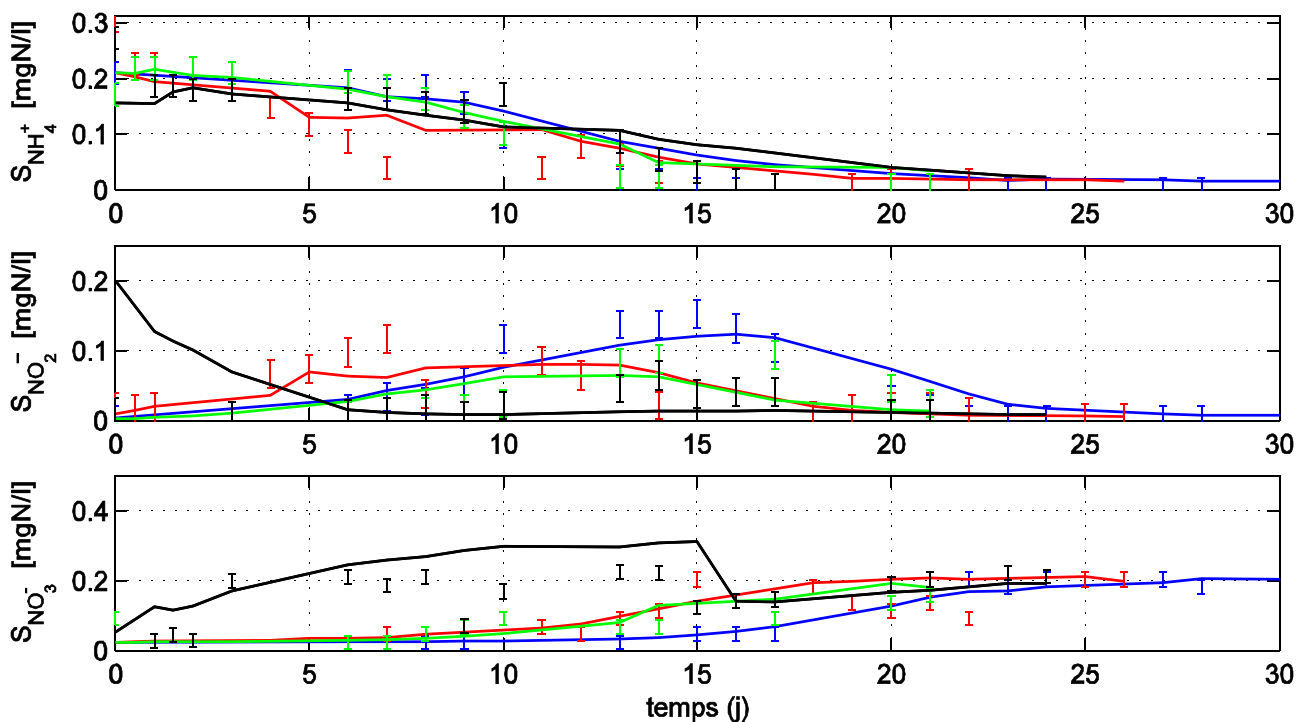
Caractéristiques des expériences

	expériences faible charge			
	Naturel	Exo 1	Exo 2	Exo 3
$X_{NS, in}$ (mgDCO/l)	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
$X_{NB, in}$ (mgDCO/l)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
$X_{NS}(0)$ (mgDCO/l)	0	0.25	0	0
$X_{NB}(0)$ (mgDCO/l)	0	0.25	0.5	1
ajout de nitrite (mgN/l)	0	0	0	0.2 / 9 jours



Les événements (tels que la chloration du filtre à sable) ayant affectés le biofiltre ne sont pas pris en compte

Résultats expérimentaux (1/2)



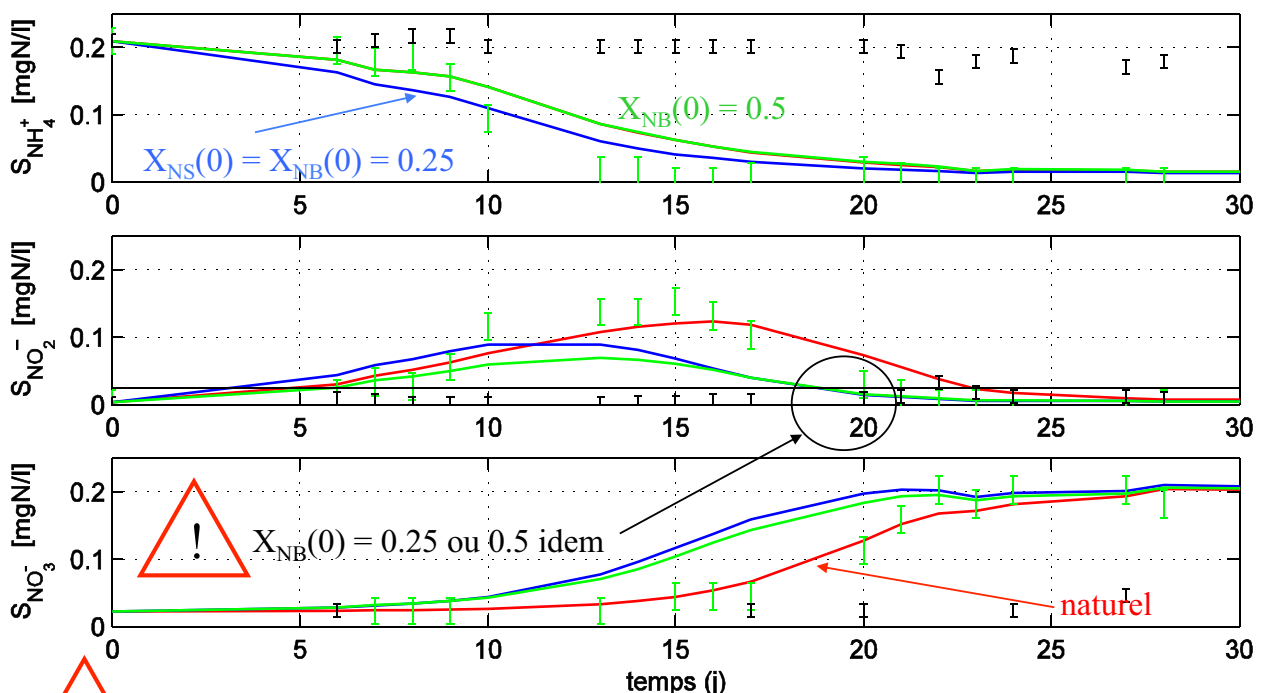
Ensemencements naturel, exogène 1, exogène 2 et exogène 3

Résultats expérimentaux (2/2)

	expériences faible charge			
	Naturel	Exo 1	Exo 2	Exo 3
$X_{NS, in}$ (mgDCO/l)	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
$X_{NB, in}$ (mgDCO/l)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
$X_{NS}(0)$ (mgDCO/l)	0	0.25	0	0
$X_{NB}(0)$ (mgDCO/l)	0	0.25	0.5	1
ajout de nitrite (mgN/l)	0	0	0	0.2 / 9 jours
régime permanent ¹ (jours)	23	18	18	14

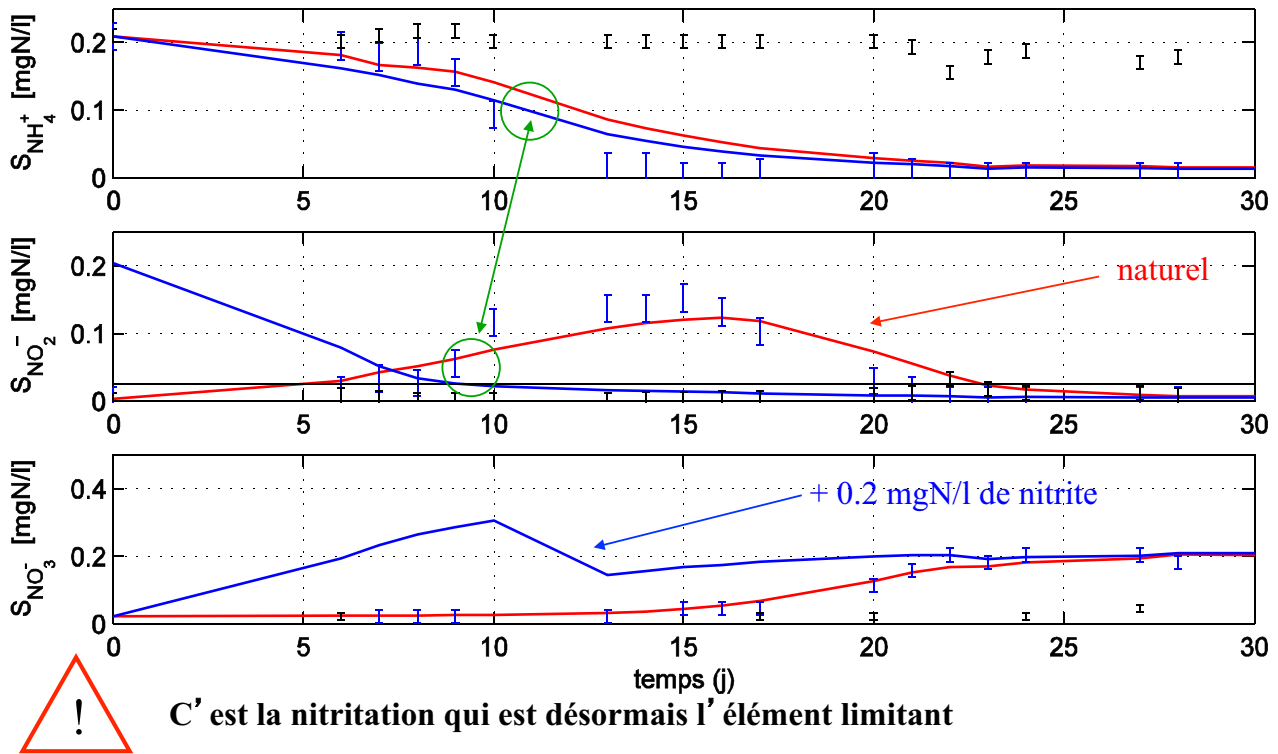
¹ Le régime permanent correspond à la date à laquelle les concentrations en ammonium et nitrite en sortie du biofiltre sont respectivement inférieures à 0.1 mgN/l et 0.025 mgN/l

Effet ensemencement exogène



C' est la disponibilité de nitrite qui est désormais l'élément limitant

Effet ensemencement exogène + nitrite

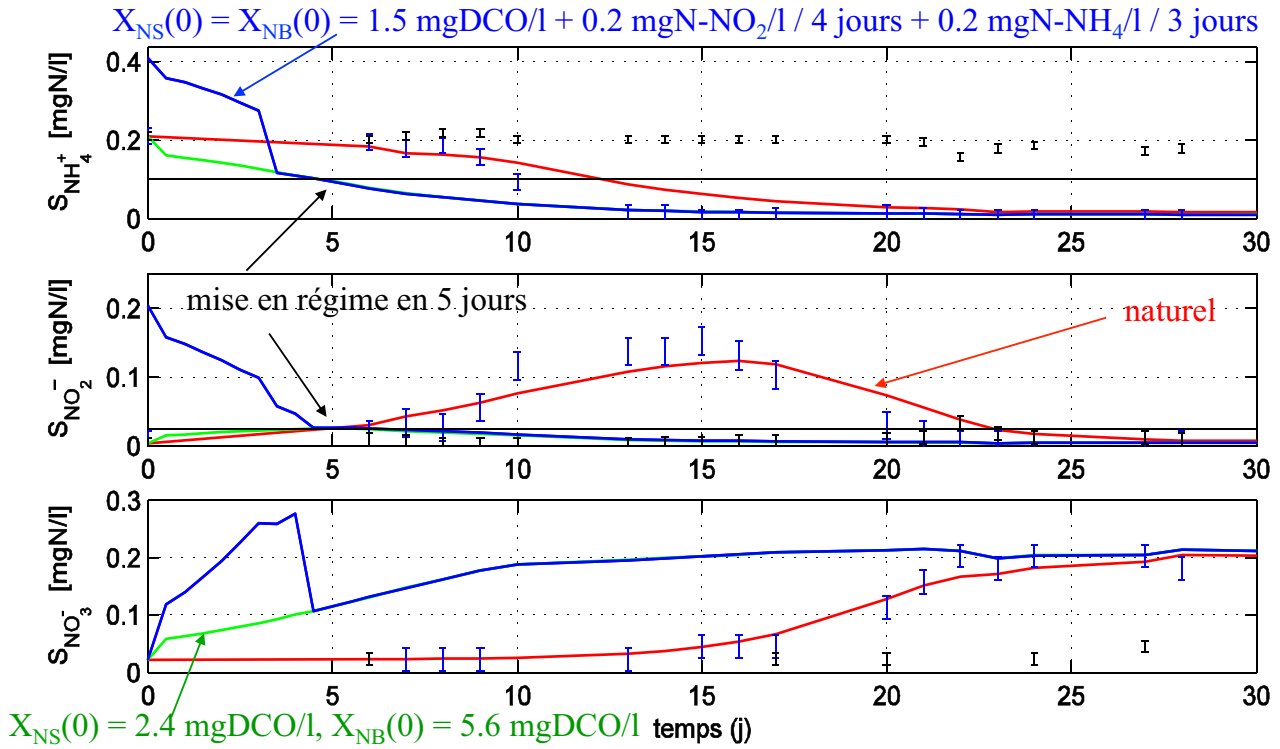


IV. Prédications par le modèle

- Evaluation des conditions à appliquer pour mettre un biofiltre faible charge en régime en 5 jours
- Evaluation des conditions à appliquer pour mettre un biofiltre en régime en 5 jours (aquifère faiblement chargé en particules)
- Evaluation du dimensionnement du biofiltre

Mise en régime du biofiltre en 5 jours (1/2)

Conditions opératoires faible charge



Mise en régime du biofiltre en 5 jours (2/2)

Conditions opératoires faible charge

$X_{NS}^F(0)$ (mgDCO/l)	$X_{NB}^F(0)$ (mgDCO/l)	$S_{NH_4^+,in}$ (mgN/l)	$S_{NO_2^-,in}$ (mgN/l)
2.4	5.6	0	0
1.5	1.5	0.2 / 3 jours	0.2 / 4 jours
1.1	0.9	0.3 / 3 jours	0.2 / 4 jours
0.55	0.45	1 / 3 jours	0.5 / 4 jours
0.4	0.3	2 / 3 jours	0.75 / 4 jours
0	0.04	10 / 4 jours + 20 h	4 / 4 jours + 20 h
0	0.03	10 / 4 jours + 20 h	10 / 4 jours + 20 h



Les 5 jours de mise en régime sont à comparer aux 23 jours de l'expérience en ensemencement naturel dans les mêmes conditions

Eau de forage faiblement chargée en X (1/2)

Aquifère : 0.00007 mgDCO/l composé pour moitié de *Nitrosomonas*
0.2 mgN/l d' ammonium

Alimentation : 254 l/h

Température : 24 °C

$X_{NS}^F(0)$ (mgDCO/l)	$X_{NB}^F(0)$ (mgDCO/l)	$S_{NH_4^+,in}$ (mgN/l)	$S_{NO_2^-,in}$ (mgN/l)	mise en régime (jours)
0	0	0	0	37
0	0	0.5 / 14 jours	0.25 / 14 jours	15
0	0	1 / 11 jours	0.4 / 11 jours	12
0.05	0.05	1 / 7.5 jours	0.4 / 7.5 jours	8.5
0.1	0.1	0.5 / 8.5 jours	0.25 / 8.5 jours	10
0.1	0.1	1.5 / 5.5 jours	0.75 / 5.5 jours	7.5
0.5	0.5	1.5 / 4 jours	0.75 / 4 jours	4.5

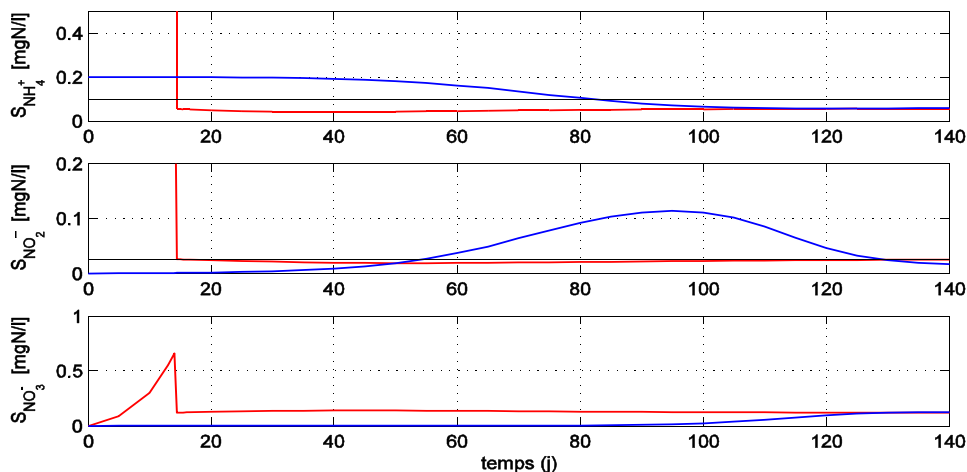
Eau de forage faiblement chargée en X (2/2)

Aquifère : 0.00007 mgDCO/l composé pour moitié de *Nitrosomonas*
0.2 mgN/l d' ammonium

Alimentation : 254 l/h

Température : 15 °C

$X_{NS}^F(0)$ (mgDCO/l)	$X_{NB}^F(0)$ (mgDCO/l)	$S_{NH_4^+,in}$ (mgN/l)	$S_{NO_2^-,in}$ (mgN/l)	régime (jours)
0	0	0	0	130
0.75	0.75	2.3 / 14 jours	0.5 / 14 jours	< 15



V. Conclusions - perspectives

Conclusion - perspectives

- **Modèle unique** (structure et valeurs de paramètres) validé sur les expériences en laboratoire et site industriel, en faible ou forte charge, sur différents supports
- Calage des paramètres fortement favorisé par les conditions opératoires très différentes, et par les mesures à l'intérieur de la colonne
- **Apport significatif de la simulation**
 - évaluer les performances du biofiltre
 - aider au dimensionnement d'une installation
- **Perspectives** : meilleur prise en compte de phénomènes affectant la colonisation du biofilm (hydrolytique, croissance du biofilm, sites actifs, effet des perturbation (pH, chlore...))