

PHOSTWIN

Etablissement d'un modèle déterministe simplifié décrivant le fonctionnement d'une station d'épuration à boue activée

**Jérôme Fehrenbach¹, Paul Fraux³, Narjes Kandil¹, Xavier Lefebvre²,
Mathieu Spérandio², Michel Mauret²**

¹ Institut de Mathématiques de Toulouse

² CRITT-INSA, Toulouse Biotechnology Institute

³ ENSEEIHT

Paris - 2025, May 14th



1. **Contexte**
 2. **Objectifs du projet**
 3. **Validation de la méthode sur l'azote**
 4. **Premiers résultats sur le phosphore**
- Perspectives**

1. **Contexte**
 2. Objectifs du projet
 3. Validation de la méthode sur l'azote
 4. Premiers résultats sur le phosphore
- Perspectives

Station d'épuration à boue activée (= micro-organismes)



En France : +20k stations de ce type.

Bassin Adour-Garonne : 4400 stations, dont 80% ont une capacité <5000 eq hab.

Les rejets sont soumis à des **normes**, qui seront amenées à se renforcer lorsque les débits d'étiage vont diminuer.

rejets en **azote** N sous forme NH_4 et NO_3

rejets en **phosphore** P sous forme PO_4

problématique de coût : on cherche à respecter les normes, mais avec peu d'instruments (mesure débit entrant, O₂ et redox seulement) et peu de personnel.

Dans un bassin à aération alternée, le pilotage (ON/OFF) de l'aération permet de faire se succéder des états :

- **aérobie** (présence O₂)
- **anoxie** (absence O₂, présence NO₃)
- **anaérobie** (ni O₂, ni NO₃)

Les processus biochimiques sont différents dans ces états.

échelle de temps pour l'aération : 10 à 12 cycles par jour, soit 2-3h/cycle. Nécessité d'un pilotage automatique.

La croissance de la biomasse entraîne une augmentation des matières en suspension (MES), ce qui nécessite des purges régulières.

échelle de temps pour la purge : 1j à 1 semaine. Intervention humaine.

Etat de l'art :

- pilotage de l'aération alternée depuis des décennies (horloge / seuil sur O2 et redox).
- modèles EDO décrivant le fonctionnement d'un bassin ASM1, ASM2, ASM2d (années '80)
- logiciels commerciaux (déterministes) très complets décrivant le fonctionnement d'une STEP.
- automate INFLEX pilotant l'aération, en vue d'optimiser le traitement de N (CRITT-INSA Toulouse, années '90, commercialisé depuis 2012)
- logiciel DISTEP de diagnostic de l'état du bassin (CRITT-INSA et IMT, 2020-)
- solutions contrôle-commande par IA

1. Contexte
 2. **Objectifs du projet**
 3. Validation de la méthode sur l'azote
 4. Premiers résultats sur le phosphore
- Perspectives

financement :

AMIES : 12 mois de postdoc

Agence de l'Eau Adour-Garonne : 82.257 euros

INSA, Université de Toulouse : salaires des permanents

- 1) On souhaite comprendre et décrire quantitativement le fonctionnement d'un bassin = **calibration d'un modèle EDO**
- 2) en déduire une **stratégie de pilotage de l'aération** pour optimiser le traitement biologique de N et de P. Si le traitement biologique est suffisant, il n'est pas nécessaire de recourir au traitement chimique.

Plusieurs objectifs possibles :

a) minimiser les rejets

b) respecter les normes et minimiser la consommation électrique

Optimisation multi-objectifs (sous contrainte).

A notre disposition : 2 ans de données obtenues dans une station sur-instrumentée (O₂, NH₄, NO₃, PO₄) qui vont permettre de calibrer le modèle.

PHOSTWIN : Utilisation des données de Villefranche-de-Lauragais pour établir une preuve de concept de pilotage optimal.

Par la suite il faudra mettre en situation dans plusieurs STEP pour valider/affiner la méthode.

Calendrier prévisionnel : préciser le calendrier prévisionnel du projet par tâche, (et si applicable par partenaires et budget et livrables ou jalons associés)

	sept-24	oct-24	nov-24	déc-24	janv-25	févr-25	mars-25	avr-25	mai-25	juin-25	juil-25	août-25	sept-25	oct-25	nov-25	déc-25	janv-26	févr-26	livrables
Lot 1 Elaboration des codes de calcul																			
Etape 1 : simplification du modèle																			
Etape 2 : Calibration du modèle																			
Etape 3 : Identifiabilité NH4, NO3, PO4																			
Lot 2 Génération de stratégies de pilotage																			
Etape 1 : Stratégie de pilotage théorique																			
Etape 2 : Stratégie de pilotage effectif																			
Etape 3 : Consolidation du prototype de pilotage																			
Lot 3 Prospectives pour le déploiement industriel																			
design d'un prototype																			
sites de démonstration																			

1. Contexte
2. Objectifs du projet
3. **Validation de la méthode sur l'azote**
4. Premiers résultats sur le phosphore
Perspectives

On a commencé à travailler sur N, pour valider notre méthode (car les stratégies sont déjà connues des experts).

- ▶ dérivation d'un **modèle simplifié** à 3 espèces
- ▶ **calibration** du modèle jour par jour
- ▶ avec les paramètres obtenus sur une journée 'typique' on a cherché à **minimiser la consommation électrique** sous contrainte de rejet.

Modèle simplifié

$$\begin{cases} S'_{NO_3} &= -DS_{NO_3} - \alpha_4 \frac{1-Y_H}{2.86} \mathfrak{M}_{NO_3} \mathfrak{I}_{O_2H} + \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \\ S'_{NH_4} &= DS_{NH_4in} - DS_{NH_4} - \alpha_4 Y_H i_{NBM} \mathfrak{M}_{NH_4} (\mathfrak{M}_{O_2H} + \mathfrak{M}_{NO_3} \mathfrak{I}_{O_2H}) - \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \\ S'_{O_2} &= -DS_{O_2} + u(S_{O_2SAT} - S_{O_2}) - \alpha_4 (1 - Y_H) \mathfrak{M}_{O_2H} - 4.57 \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \end{cases}$$

S_X : concentration en X

$\mathfrak{M}_X = \frac{X}{K_X + X}$: coefficient de Monod. activation si $X \gg K_X$, inhibition si $X \ll K_X$.

$\mathfrak{I}_X = 1 - \mathfrak{M}_X$: coefficient d'inhibition. inhibition si $X \gg K_X$, activation si $X \ll K_X$.

Modèle simplifié

$$\begin{cases} S'_{NO_3} &= -DS_{NO_3} - \alpha_4 \frac{1-Y_H}{2.86} \mathfrak{M}_{NO_3} \mathfrak{I}_{O_2H} + \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \\ S'_{NH_4} &= DS_{NH_4in} - DS_{NH_4} - \alpha_4 Y_H i_{NBM} \mathfrak{M}_{NH_4} (\mathfrak{M}_{O_2H} + \mathfrak{M}_{NO_3} \mathfrak{I}_{O_2H}) - \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \\ S'_{O_2} &= -DS_{O_2} + u(S_{O_2SAT} - S_{O_2}) - \alpha_4 (1 - Y_H) \mathfrak{M}_{O_2H} - 4.57 \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \end{cases}$$

S_X : concentration en X

$\mathfrak{M}_X = \frac{X}{K_X + X}$: coefficient de Monod. activation si $X \gg K_X$, inhibition si $X \ll K_X$.

$\mathfrak{I}_X = 1 - \mathfrak{M}_X$: coefficient d'inhibition. inhibition si $X \gg K_X$, activation si $X \ll K_X$.

Influent

Modèle simplifié

$$\begin{cases} S'_{NO3} &= -DS_{NO3} - \alpha_4 \frac{1-Y_H}{2.86} \mathfrak{M}_{NO3} \mathfrak{I}_{O2_H} + \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH4} \mathfrak{M}_{O2_{AUT}} \\ S'_{NH4} &= DS_{NH4_{in}} - DS_{NH4} - \alpha_4 Y_H i_{NBM} \mathfrak{M}_{NH4} (\mathfrak{M}_{O2_H} + \mathfrak{M}_{NO3} \mathfrak{I}_{O2_H}) - \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH4} \mathfrak{M}_{O2_{AUT}} \\ S'_{O2} &= -DS_{O2} + u(S_{O2_{SAT}} - S_{O2}) - \alpha_4 (1 - Y_H) \mathfrak{M}_{O2_H} - 4.57 \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH4} \mathfrak{M}_{O2_{AUT}} \end{cases}$$

S_X : concentration en X

$\mathfrak{M}_X = \frac{X}{K_X + X}$: coefficient de Monod. activation si $X \gg K_X$, inhibition si $X \ll K_X$.

$\mathfrak{I}_X = 1 - \mathfrak{M}_X$: coefficient d'inhibition. inhibition si $X \gg K_X$, activation si $X \ll K_X$.

Influent

Sortie du bassin par surverse

Modèle simplifié

$$\begin{cases} S'_{NO_3} &= -DS_{NO_3} - \alpha_4 \frac{1-Y_H}{2.86} \mathfrak{M}_{NO_3} \mathfrak{I}_{O_2H} + \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \\ S'_{NH_4} &= DS_{NH_4in} - DS_{NH_4} - \alpha_4 Y_H i_{NBM} \mathfrak{M}_{NH_4} (\mathfrak{M}_{O_2H} + \mathfrak{M}_{NO_3} \mathfrak{I}_{O_2H}) - \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \\ S'_{O_2} &= -DS_{O_2} + u(S_{O_2SAT} - S_{O_2}) - \alpha_4 (1 - Y_H) \mathfrak{M}_{O_2H} - 4.57 \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \end{cases}$$

S_X : concentration en X

$\mathfrak{M}_X = \frac{X}{K_X + X}$: coefficient de Monod. activation si $X \gg K_X$, inhibition si $X \ll K_X$.

$\mathfrak{I}_X = 1 - \mathfrak{M}_X$: coefficient d'inhibition. inhibition si $X \gg K_X$, activation si $X \ll K_X$.

Influent

Sortie du bassin par surverse

Aération (u vaut 0 ou kLa)

Modèle simplifié

$$\begin{cases} S'_{NO_3} &= -DS_{NO_3} - \alpha_4 \frac{1-Y_H}{2.86} \mathfrak{M}_{NO_3} \mathfrak{I}_{O_2H} + \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \\ S'_{NH_4} &= DS_{NH_{4in}} - DS_{NH_4} - \alpha_4 Y_H i_{NBM} \mathfrak{M}_{NH_4} (\mathfrak{M}_{O_2H} + \mathfrak{M}_{NO_3} \mathfrak{I}_{O_2H}) - \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \\ S'_{O_2} &= -DS_{O_2} + u(S_{O_2SAT} - S_{O_2}) - \alpha_4 (1 - Y_H) \mathfrak{M}_{O_2H} - 4.57 \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \end{cases}$$

S_X : concentration en X

$\mathfrak{M}_X = \frac{X}{K_X + X}$: coefficient de Monod. activation si $X \gg K_X$, inhibition si $X \ll K_X$.

$\mathfrak{I}_X = 1 - \mathfrak{M}_X$: coefficient d'inhibition. inhibition si $X \gg K_X$, activation si $X \ll K_X$.

Influent

Sortie du bassin par surverse

Aération (u vaut 0 ou kLa)

Croissance aérobie des micro-organismes autotrophes (nitrification)

Modèle simplifié

$$\begin{cases} S'_{NO_3} &= -DS_{NO_3} - \alpha_4 \frac{1-Y_H}{2.86} \mathfrak{M}_{NO_3} \mathfrak{I}_{O_2H} + \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \\ S'_{NH_4} &= DS_{NH_4in} - DS_{NH_4} - \alpha_4 Y_H i_{NBM} \mathfrak{M}_{NH_4} (\mathfrak{M}_{O_2H} + \mathfrak{M}_{NO_3} \mathfrak{I}_{O_2H}) - \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \\ S'_{O_2} &= -DS_{O_2} + u(S_{O_2SAT} - S_{O_2}) - \alpha_4 (1 - Y_H) \mathfrak{M}_{O_2H} - 4.57 \alpha_2 \mathfrak{M}_{NH_4} \mathfrak{M}_{O_2AUT} \end{cases}$$

S_X : concentration en X

$\mathfrak{M}_X = \frac{X}{K_X + X}$: coefficient de Monod. activation si $X \gg K_X$, inhibition si $X \ll K_X$.

$\mathfrak{I}_X = 1 - \mathfrak{M}_X$: coefficient d'inhibition. inhibition si $X \gg K_X$, activation si $X \ll K_X$.

Influent

Sortie du bassin par surverse

Aération (u vaut 0 ou kLa)

Croissance aérobie des micro-organismes autotrophes (nitrification)

Croissance aérobie/anoxique des micro-organismes hétérotrophes (dénitrification si anoxie)

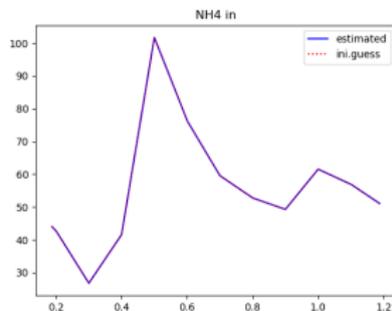
Résultats de l'assimilation des données

Assimilation de données variationnelle

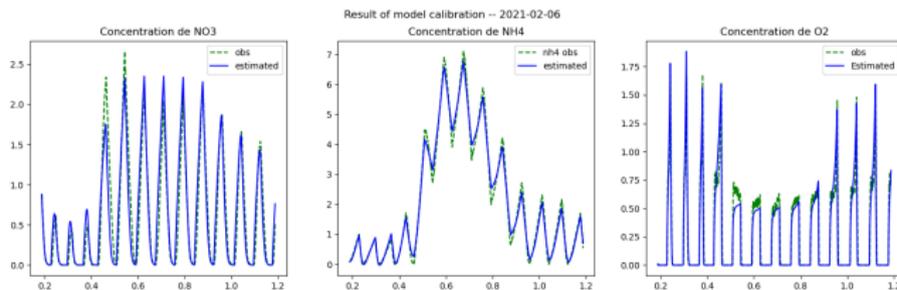
Résultats de l'assimilation des données

Assimilation de données variationnelle

première constatation : la concentration NH_4 entrante est variable dans le temps !

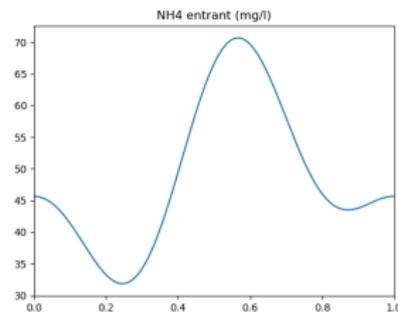
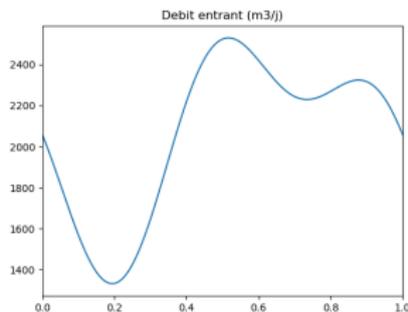


Exemple de recalage des courbes expérimentales



Optimisation de l'aération

On se donne un profil typique de débit entrant/concentration entrante



On souhaite définir une stratégie d'aération qui minimise la consommation électrique en gardant un rejet moyen (sur la journée) inférieur à C_{SEUIL} .

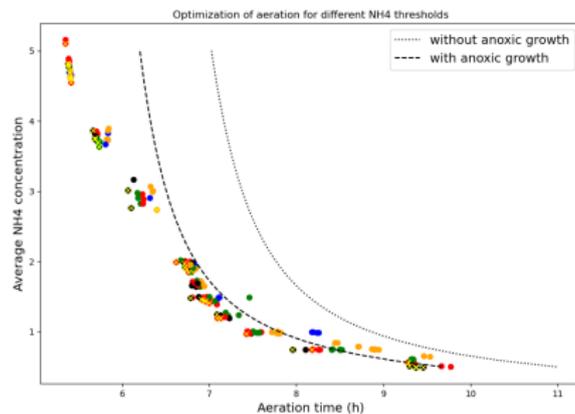
Plusieurs valeurs de C_{SEUIL} ont été testées.

Hypothèse : on peut avoir 2 niveaux d'aération (1 / 0.5).

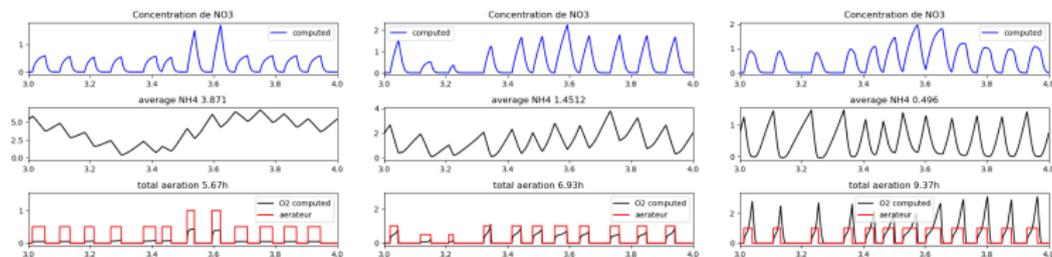
Cas favorable : on suppose toutes les concentrations connues.

Il y a de nombreux minima locaux. On exécute plusieurs fois l'algorithme, avec des points de départs différents.

Résultats :



Quelques courbes



1. Contexte
2. Objectifs du projet
3. Validation de la méthode sur l'azote
4. **Premiers résultats sur le phosphore**
Perspectives

Pour le phosphore les phénomènes sont plus complexes car les bactéries "dé-phosphatantes" font du stockage et du dé-stockage de P.

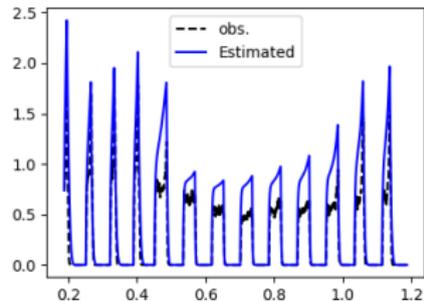
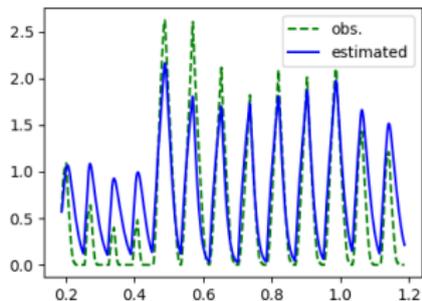
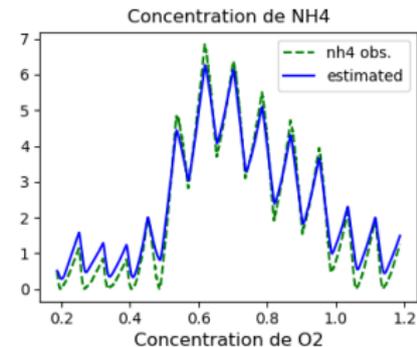
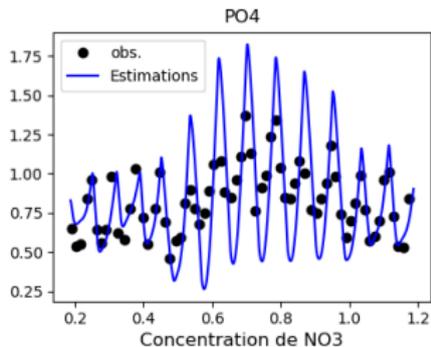
modèle simplifié à 7 équations

calibration du modèle : résultats **préliminaires**

Pour le phosphore les phénomènes sont plus complexes car les bactéries "dé-phosphatantes" font du stockage et du dé-stockage de P.

modèle simplifié à 7 équations

calibration du modèle : résultats **préliminaires**



1. Contexte
2. Objectifs du projet
3. Validation de la méthode sur l'azote
4. Premiers résultats sur le phosphore

Perspectives

à court terme :

- amélioration et calibration du modèle P sur une grande plage de journées
- étudier (numériquement) l'identifiabilité des paramètres
- stratégie optimale de consommation électrique sous double contrainte de rejets P/N

ensuite :

- définition d'un algorithme (temps réel) permettant de minimiser les rejets de P/N.