

Détection automatique des phases de nitrification et dénitrification en boue activée à partir des signaux DO/REDOX par réseau de neurones convolutif

François Gauthier-Clerc¹, Simon Lambert², Chloë Fillaut¹

¹ Purecontrol, 68 Av. Sergent Maginot, 35000 Rennes

² INSA Rennes, 20 Av. des Buttes de Coesmes, 35000 Rennes

purecontrol

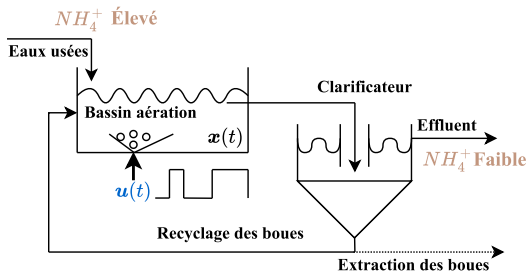


5 mars 2026

- 1 Contexte industriel et enjeux
- 2 Détection d'événement
- 3 Méthode proposée
- 4 Résultats et performances
- 5 Conclusion et perspectives

Contexte industriel et enjeux

La STEP à boues activées : Fonctionnement général



L'aération est le poste le plus énergivore du cycle.

Rôles de la STEP

Élimination du carbone : Dégradation de la matière organique par les micro-organismes.

Traitement de l'Azote :

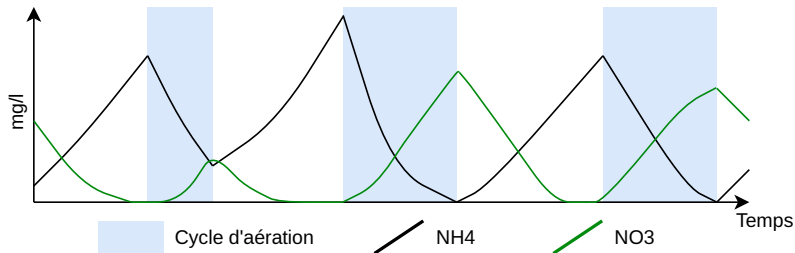
⇒ **Nitrification** (Phase aérée).

⊘ **Dénitrification** (Phase non-aérée).

Garantir un rejet conforme

La métrologie en bassin d'aération

Dynamique biochimique dans le bassin d'aération.

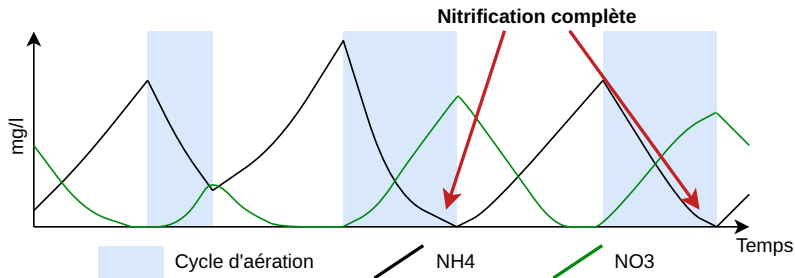


Les capteurs NH_4 et NO_3 permettent facilement d'observer les événements de nitrification et dénitrification complet.

Ces capteurs sont onéreux et demande beaucoup de maintenance.

La métrologie en bassin d'aération

Dynamique biochimique dans le bassin d'aération.

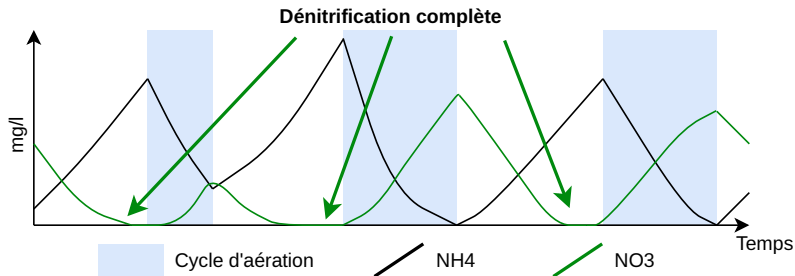


Les capteurs NH_4 et NO_3 permettent facilement d'observer les événements de nitrification et dénitrification complet.

Ces capteurs sont onéreux et demande beaucoup de maintenance.

La métrologie en bassin d'aération

Dynamique biochimique dans le bassin d'aération.

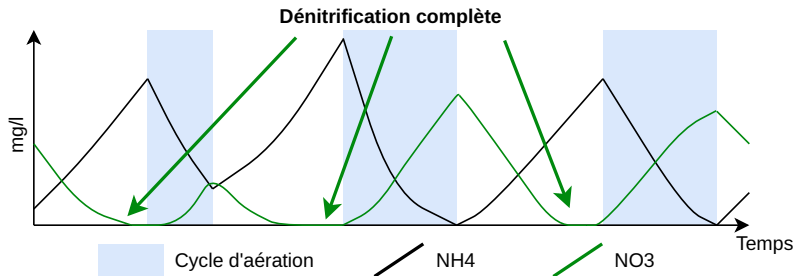


Les capteurs NH_4 et NO_3 permettent facilement d'observer les événements de nitrification et dénitrification complet.

Ces capteurs sont onéreux et demande beaucoup de maintenance.

La métrologie en bassin d'aération

Dynamique biochimique dans le bassin d'aération.

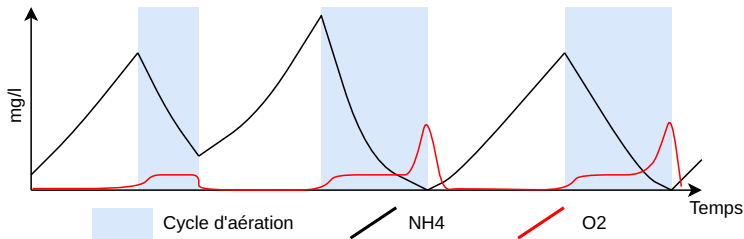


Les capteurs NH_4 et NO_3 permettent facilement d'observer les événements de nitrification et dénitrification complet.

Ces capteurs sont onéreux et demande beaucoup de maintenance.

Sonde oxygène et nitrification complète

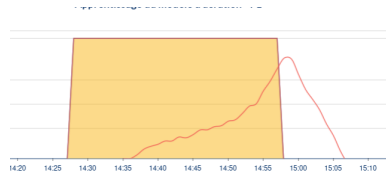
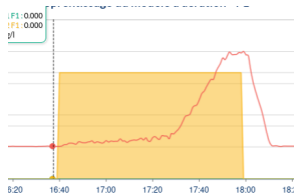
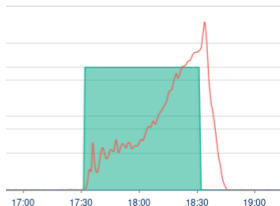
La **sonde d'oxygène** permet de mesurer en **temps réel** la concentration en **oxygène dissous** dans le bassin d'aération.



👁 Observation de la nitrification

L'utilisation d'une sonde oxygène standard (peu onéreuse) permet, par l'analyse de sa **dynamique temporelle**, d'identifier précisément l'instant de **nitrification complète**.

Sonde oxygène et nitrification complète

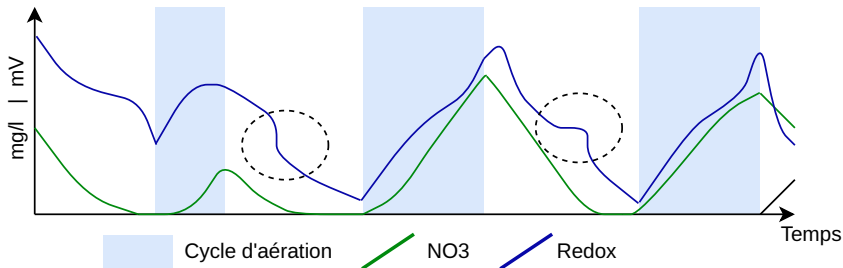


📊 Variabilité des profils selon les sites

❗ **Défi** : Chaque installation présente une **dynamique propre**, rendant les approches par seuils fixes/traitement du signal difficiles à généraliser.

Sonde redox et nitrification complète

La **sonde redox** mesure le **potentiel d'oxydo-réduction** du bassin en temps réel.



Analyse des inflexions

Les **changements de régime** et les **inflexions basses** du signal Redox constituent des signatures biogéochimiques clés pour la détection des événements de **fin de nitrification** sans capteurs coûteux.

État de l'art et problématique

🕒 Approches classiques

Méthodes : Traitement du signal ad-hoc (dérivées, seuils). [Lefebvre-2016]

- ❌ **Instabilité** : Amplification du bruit de mesure .
- ❌ **Rigidité** : Calibration spécifique à chaque site.
- ❌ **Maintenance** : Nécessite un ré-étalonnage continu.

🎯 Ambition du projet

Objectif : Une approche "Boîte Noire" par Apprentissage Profond.

- ✅ **Holistique** : Apprentissage d'un méta modèle.
- ✅ **Plug & Play** : Pas de calibration manuelle par site.
- ✅ **Robuste** : Détection fiable malgré la non-stationnarité.

Question de recherche : Comment garantir une détection d'événements performante et généralisable sans l'usage de capteurs chimiques coûteux ?

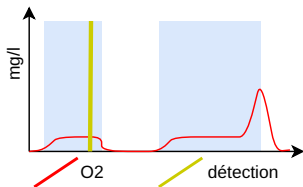
Détection d'événement

Dualité de la détection d'événement

Le problème de **détection d'évènement** temporel admet une **dualité**.

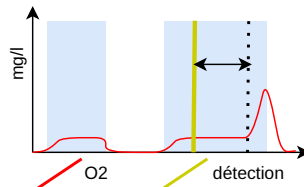
1. Classification (Logique)

Détecter la présence ou l'absence de l'événement sur une période donnée.



2. Précision Temporelle

Déterminer le moment exact t où l'événement survient.



⇒ Les critères de classification (F1 score) ou de regression, indépendamment ne permettent pas de prendre en compte ces deux aspects.

Principe général

Fusion entre **Classification** et **Tolérance temporelle**.

- ◇ **Logique floue** : Score progressif [0, 1].
- ◇ **Fenêtre k** : Zone de tolérance (ex : 15 min).
- ◇ **Symétrie** : Valorise l'avance et le retard.

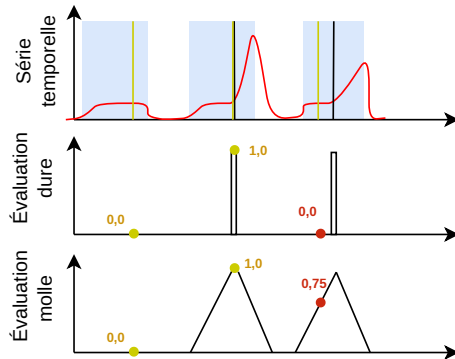
Le F1-score "mou"

$\text{Précision}_{\text{soft}} : \frac{\sum \text{Scores Appartenance}}{\text{Nb total détections}}$

$\text{Rappel}_{\text{soft}} : \frac{\sum \text{Scores Appartenance}}{\text{Nb total événements}}$

$\text{F1}_{\text{soft}} = \text{Moyenne harmonique}$

🔍 Évaluation "Molle" vs "Dure"



Les cercles rouges deviennent des succès partiels grâce à la fonction d'appartenance triangulaire.

Méthode proposée

Concept général : De la donnée brute à la détection

1. Étiquetage

Expertise humaine, utilisation d'heuristique et d'algorithme métier.

2.

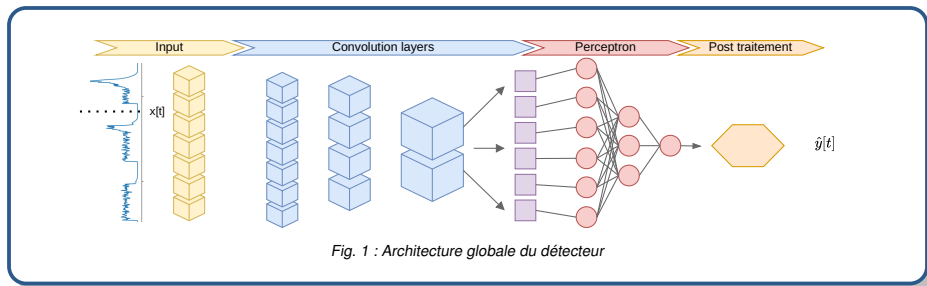
Apprentissage

Modélisation neuronale pour une classification binaire de manière convolutive.

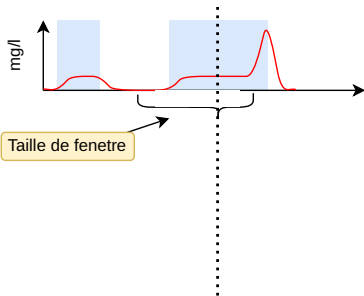
3. Post-Traitement

Contraintes Métier

Un seul événement par cycle via recherche de maximum.



🕒 Structure globale



⚙️ Apprentissage

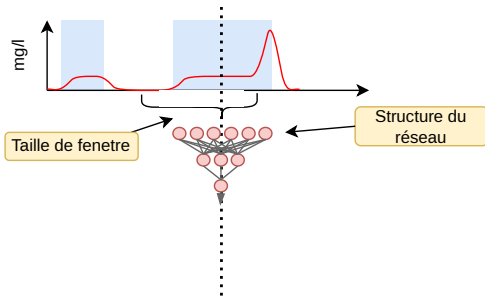
- ▶ **Moteur** : Jax.
- ▶ **Algorithme** : Adam.
- ▶ **Perte** : Binary Cross-Entropy (BCE).

⚙️ Fine-Tuning

Optimisation Bayésienne :

Taille de la fenetre d'entrée
Structure du réseau de neurones
Paramètres d'apprentissage
Post processing

🕒 Structure globale



⚙️ Apprentissage

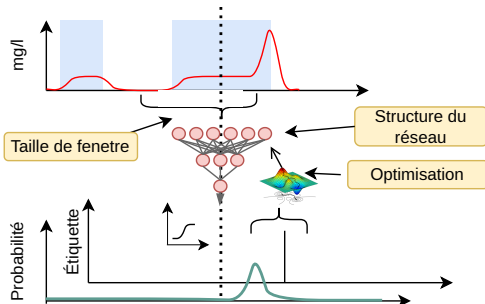
- ▶ **Moteur** : Jax.
- ▶ **Algorithme** : Adam.
- ▶ **Perte** : Binary Cross-Entropy (BCE).

⚙️ Fine-Tuning

Optimisation Bayésienne :

Taille de la fenetre d'entrée
Structure du réseau de neurones
Paramètres d'apprentissage
Post processing

🕒 Structure globale



⚙️ Apprentissage

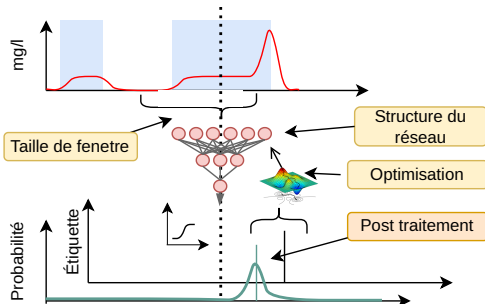
- ▶ **Moteur** : Jax.
- ▶ **Algorithme** : Adam.
- ▶ **Perte** : Binary Cross-Entropy (BCE).

⚙️ Fine-Tuning

Optimisation Bayésienne :

Taille de la fenetre d'entrée
Structure du réseau de neurones
Paramètres d'apprentissage
Post processing

🕒 Structure globale



⚙️ Apprentissage

- ▶ **Moteur** : Jax.
- ▶ **Algorithme** : Adam.
- ▶ **Perte** : Binary Cross-Entropy (BCE).

⚙️ Fine-Tuning

Optimisation Bayésienne :

Taille de la fenetre d'entrée
Structure du réseau de neurones
Paramètres d'apprentissage
Post processing

Post-traitement métier : De la probabilité à l'événement

⚠ Contraintes Physiques

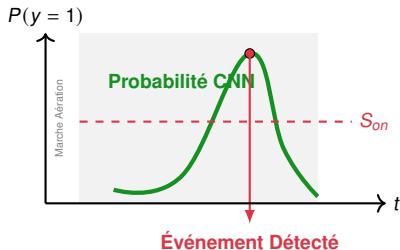
Le post traitement en sortie de CNN admet les caractéristique suivantes :

- ✓ **Unicité** : Un seul événement par cycle d'aération/anoxie.
- ✓ **Robustesse** : Filtrage des faux positifs à l'aide d'un seuil.
- ✓ **Calibration** : Optimisation du seuil S_{on} sur le score F1.

Équation de décision :

$$\hat{y} = 1 \text{ si } \max(f_{\theta}(X_i)) \geq S_{on} \text{ et } t = \operatorname{argmax}(f_{\theta}(X_i))$$

📈 Synchronisation des cycles



Post traitement de la prédiction :

Découpage en périodes *ON/OFF*.

Recherche du maximum de probabilité locale.

Résultats et performances

Campagne de labélisation : Constitution du jeu de données

Volume de données

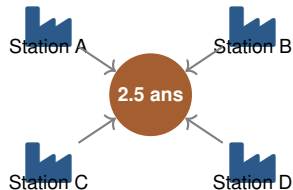
Constitution d'une base de données de référence pour l'apprentissage :

- ✓ **4 Stations d'épuration** distinctes.
- ✓ **2,5 années** de données cumulées et étiquetées.
- ✓ Historique couvrant une période de **deux ans**.

Optimisation

Optimisation réalisée à l'aide d'un échantillonnage aléatoire sur 150 essais.

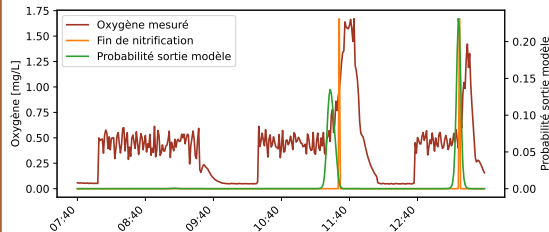
Stratégie de marquage



Marquage parcimonieux :
Étiquettes réalisées sur des périodes de **quatre jours** réparties de manière stratégique.

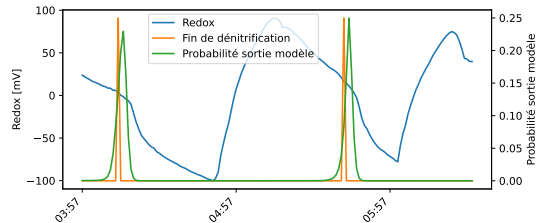
Validation qualitative de la détection CNN

Fin de Nitrification



- ✓ Signal d'entrée : **Oxygène**
- ✓ Pic de probabilité net en fin de phase

Fin de Dénitrification



- ✓ Signal d'entrée : **Redox**
- ✓ Synchronisation précise avec l'étiquette

Résultats

Le modèle CNN apprend des caractéristiques du signal plus **fines** que l'approche métier. Il s'affranchit du bruit de dérivation et s'adapte à la dynamique **non stationnaire** des stations.

Validation quantitative : CNN vs Approche Métier

Comparaison des performances (Données de test)

Métrique	Nitrification		Dénitrification	
	Métier	CNN	Métier	CNN
Précision	0.412	0.739	0.376	0.691
Rappel	0.425	0.799	0.430	0.816
Score F1	0.418	0.768	0.401	0.749

Limites de l'approche experte

Bruit : Sensibilité aux bruits du signals

Rigidité : Difficulté à offrir une réponse homogène sur les 4 stations avec des seuils fixes.

Calibration : Nécessite un étalonnage.

Atouts du modèle CNN

Apprentissage : Capacité à extraire des caractéristiques fines du signal "bout en bout".

Adaptabilité : S'adapte à la diversité sans calibration.

Conclusion et perspectives

✓ Apports de l'approche CNN

Performance accrue : Scores F1 élevés ($> 0,75$) comparés à l'approche expert ($\approx 0,40$).

Apprentissage "End-to-End" : Extraction de caractéristiques fines sans filtrage manuel bruité.

Universalité : Capacité d'adaptation aux dynamiques de différentes stations (4 sites testés).

►► Perspectives

- **Généralisation** : Inclusion d'un panel plus large de STEPs.
- **Robustesse** : Test face à une plus grande variabilité opérationnelle.
- **Intégration** : Couplage avec les stratégies de contrôle optimal.

💡 **Conclusion majeure** : Le modèle CNN permet un contrôle plus avancé et moins onéreux en s'affranchissant partiellement de capteurs physiques coûteux.

Détection automatique des phases de nitrification et dénitrification en boue activée à partir des signaux DO/REDOX par réseau de neurones convolutif

Merci de votre attention

 *Place aux questions*

François Gauthier-Clerc¹, Simon Lambert², Chloë Fillaut¹

¹ Purecontrol, 68 Av. Sergent Maginot, 35000 Rennes

² INSA Rennes, 20 Av. des Buttes de Coesmes, 35000 Rennes

purecontrol

