

La flexibilité des systèmes de traitement pour adapter la qualité de l'eau traitée en vue d'une réutilisation optimisant la croissance des cultures

Farouk AICHOUCHE*, Boumediene BENYAHIA** et Jérôme HARMAND*

*LBE, INRAE, Narbonne-France
Université de Tlemcen-Algérie*



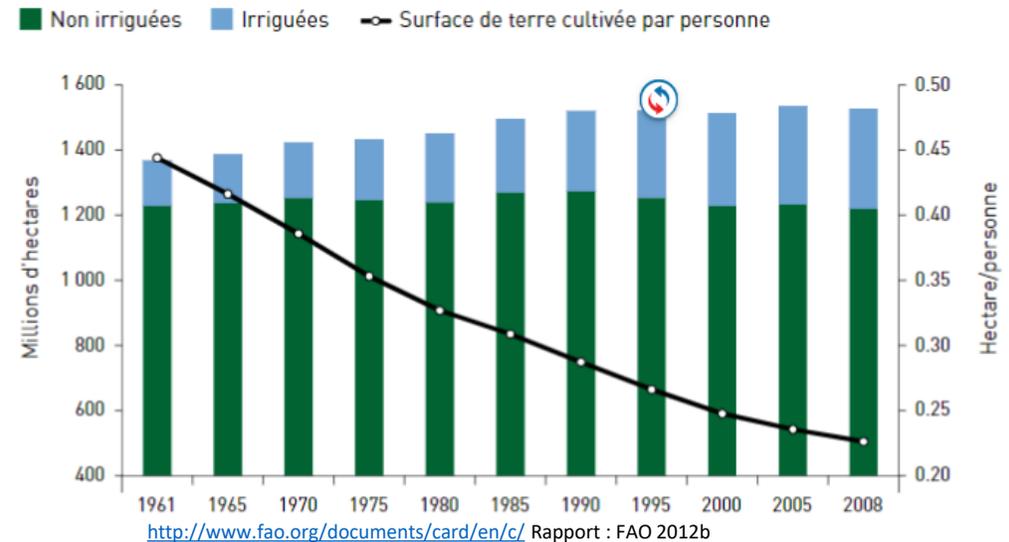
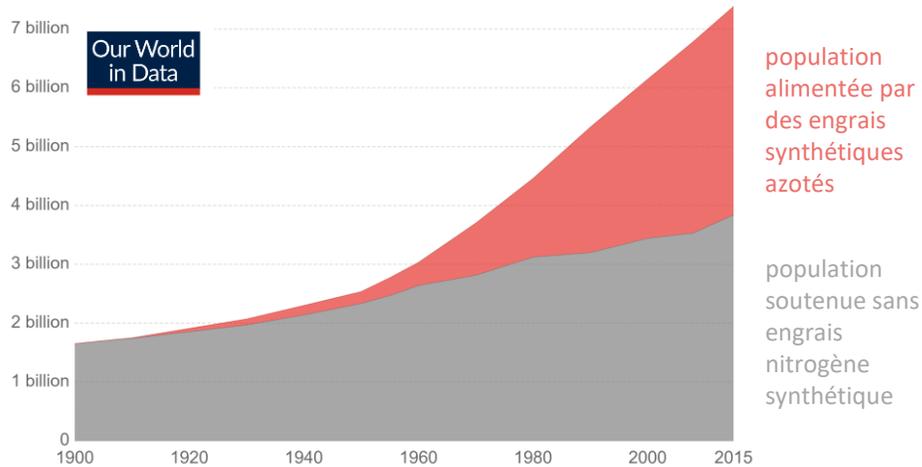
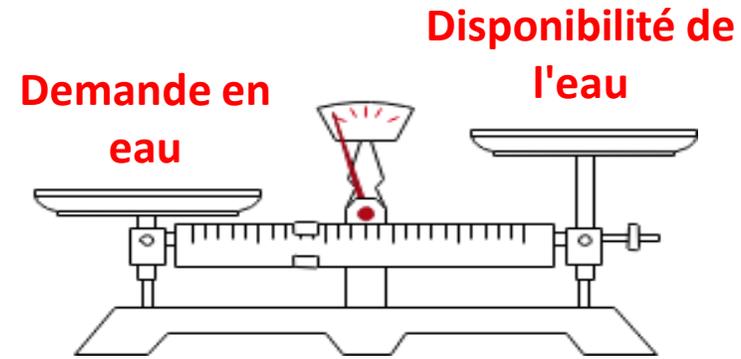
+ Contexte

- **Motivations & approches**
- **Description du système (Plateforme flexible)**
- **L'approche de contrôle en boucle ouverte**
- **Stratégies de contrôle en boucle fermée (Reuse/traitement)**
- **Application à la fertirrigation : couplage des modèles**
- **Conclusion**

+ Motivations: pourquoi la REUT en agriculture

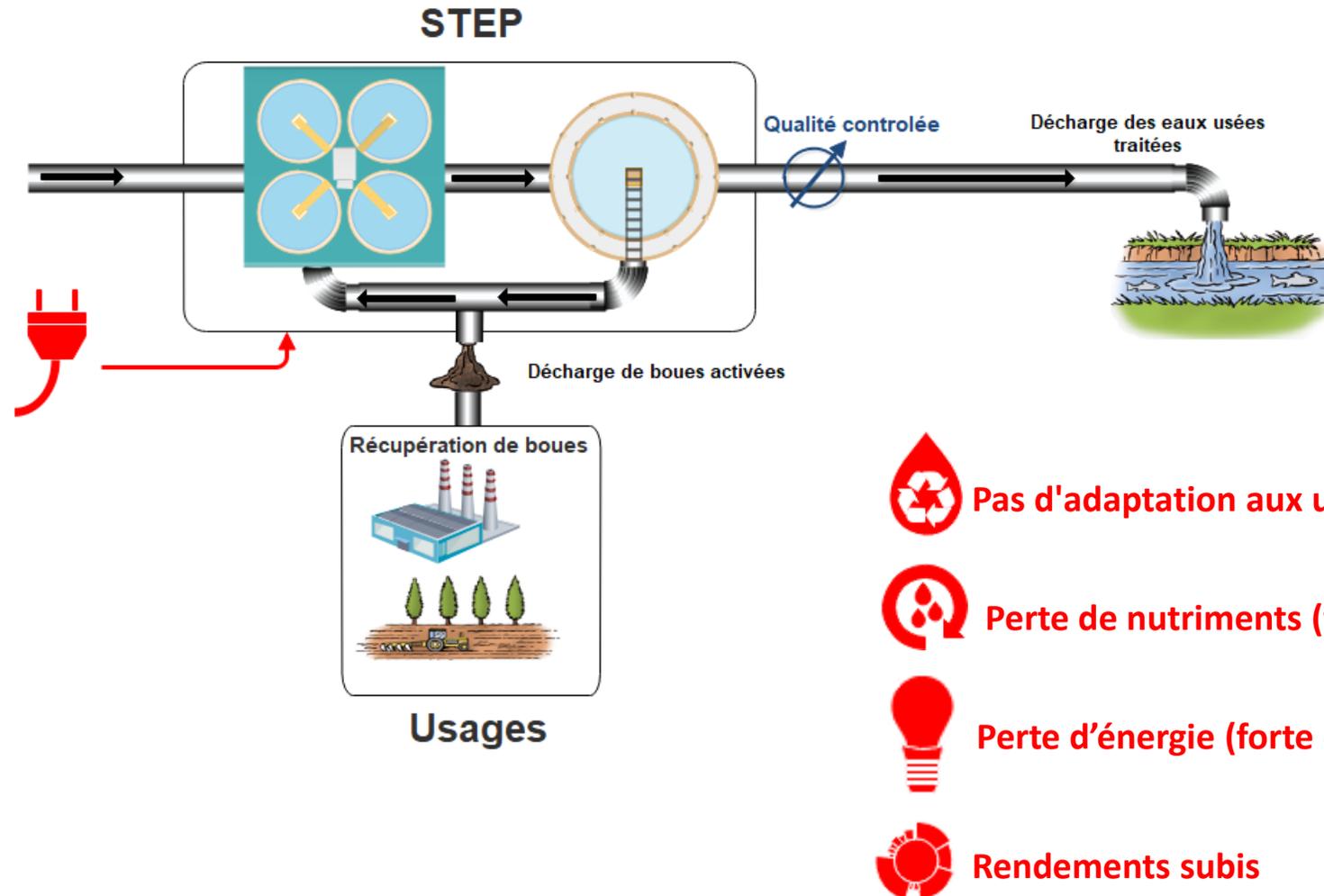
Facteurs motivantes

- Croissance de la population mondiale
- Réchauffement climatique
- Croissance de la demande alimentaire
- L'agriculture est le plus grand consommateur d'eau, soit 70% de la demande



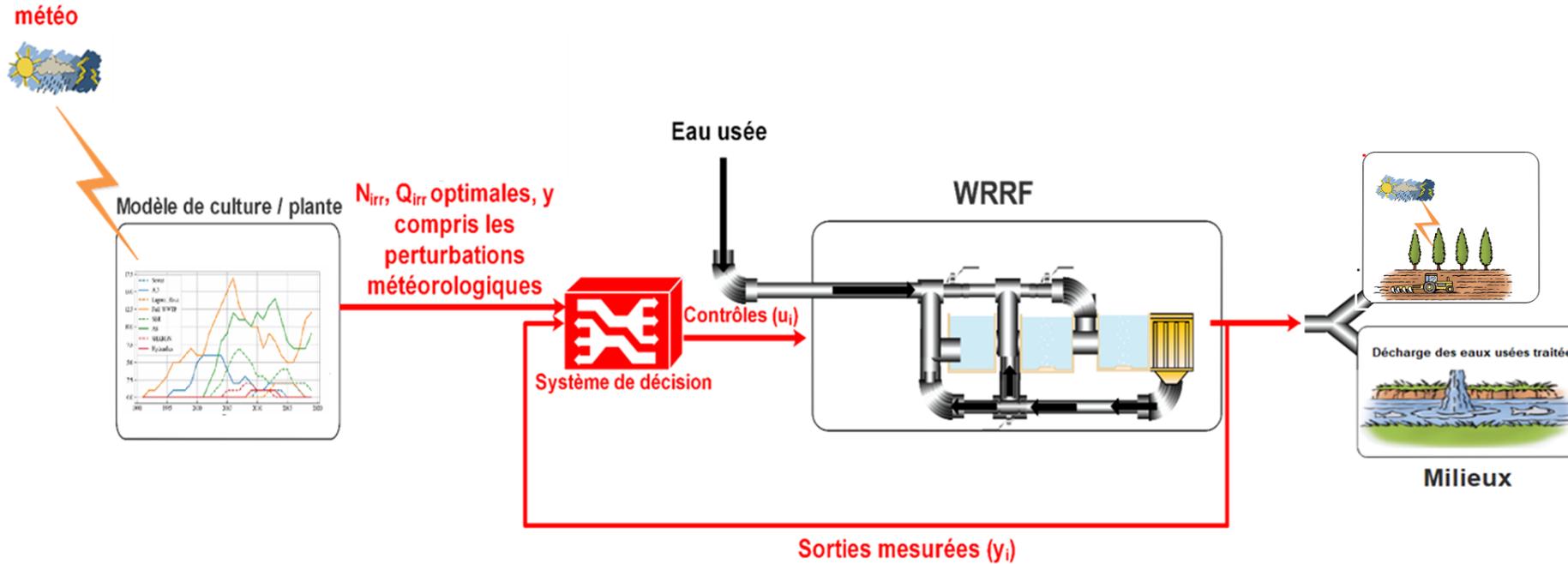
+ Situation actuelle

Filière de traitement des eaux usées



+ Notre approche...

Traitement adapté (Réutilisation)/ Traitement Complet (Conventionnel)

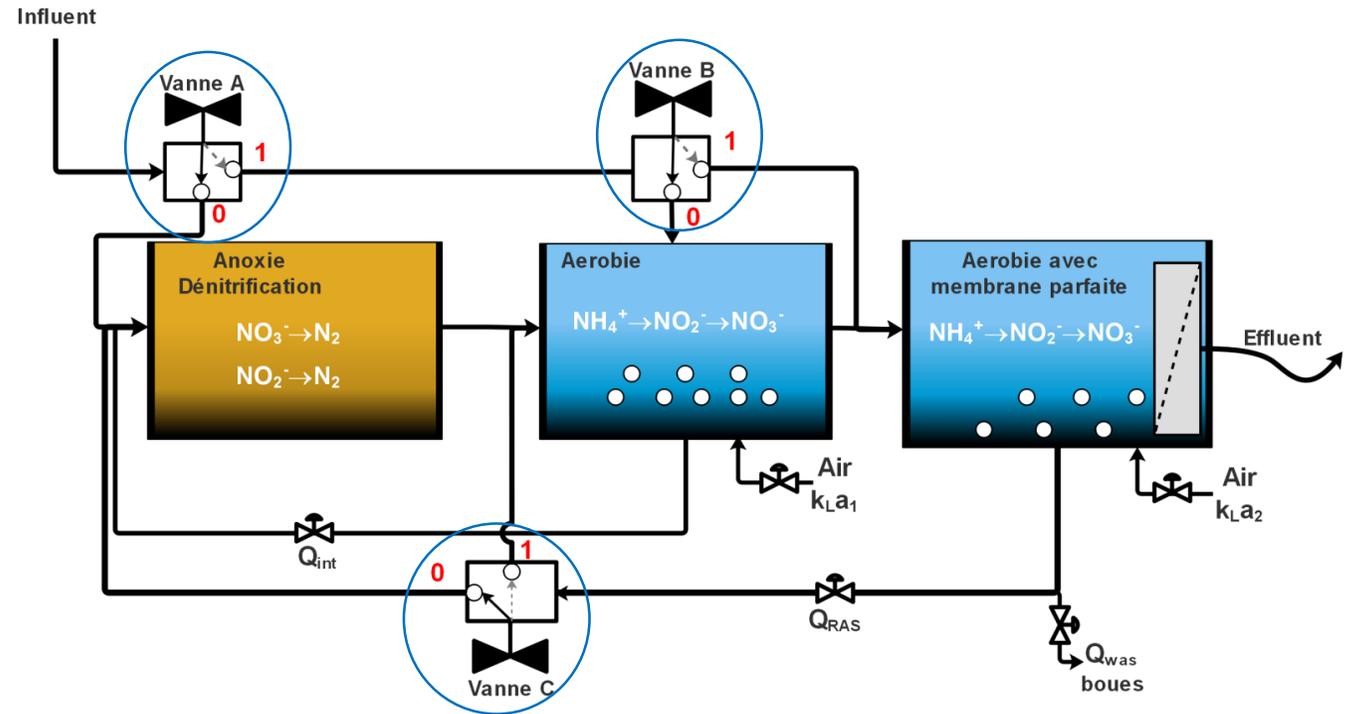


-  Adaptation de l'eau traitée aux usages
-  Recyclage des nutriments
-  Faible demande énergétique
-  Rendements moyens

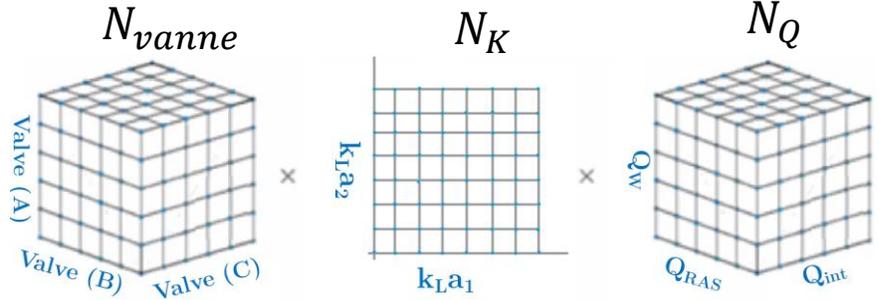
+ Description de la plateforme (WRRF)

Modèle, design, configuration, Flexibilité

- Un modèle modifié de ASM1 (Henze et al 1987)
- **ASM1-2ND** (Ostace et al 2011)
- Modélise la nitrification et la dénitrification en 2 étape
- 16 Variables d'État
- 11 Processus biologiques
- 24 Coefficients stœchiométriques et cinétiques



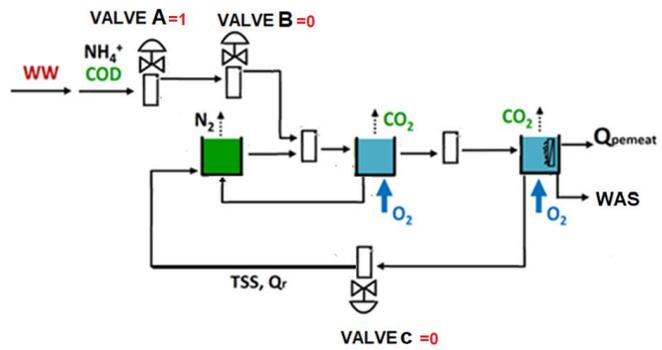
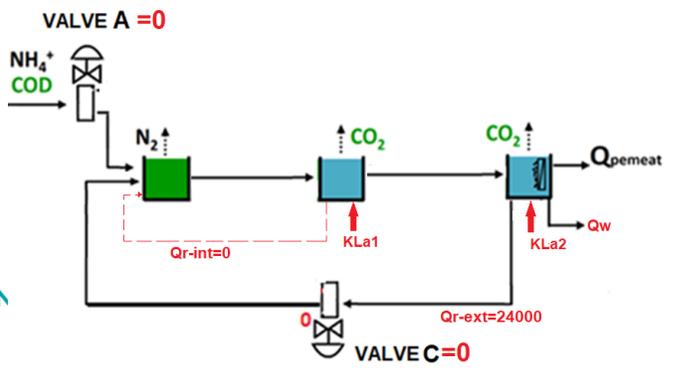
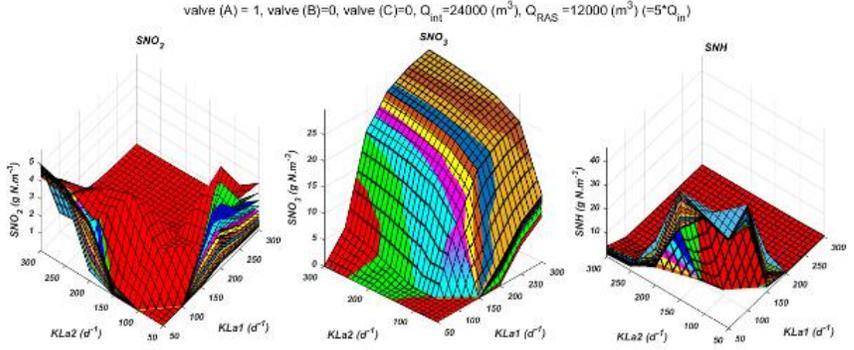
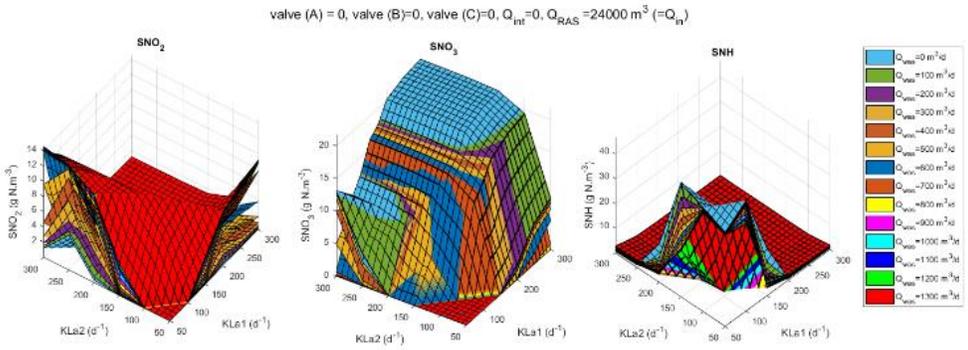
+ Analyse des comportements des états d'équilibre



Nombre total d'États d'équilibre

$$\rightarrow N_{EE} = (N_{vanne})^3 \times (N_K)^2 \times (N_Q)^3$$

N_{vanne}	N_K	N_Q	No. Etats-d'équilibre (N_{EE})
2	6	$5 \cdot 14 \cdot 2$	$42560 \times (16 \text{ variables})[*]$



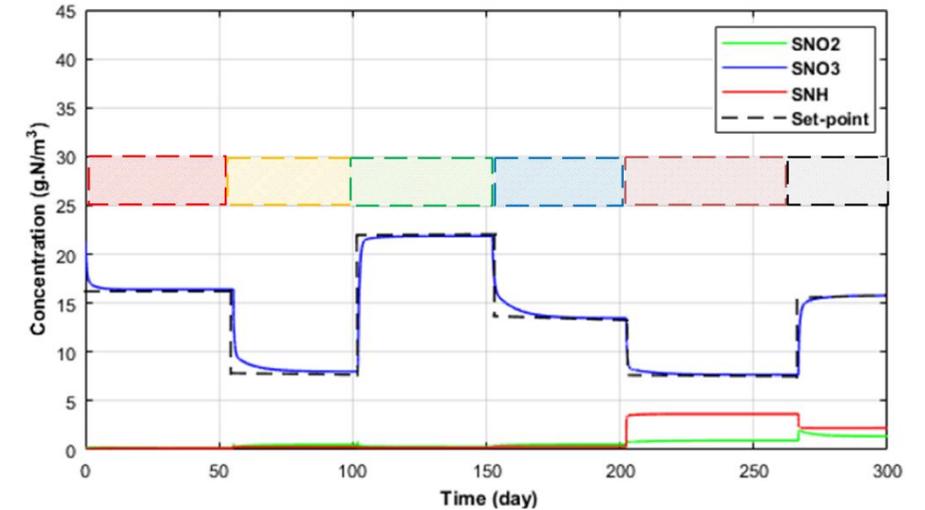
+ Contrôle en boucle ouverte

Algorithme :

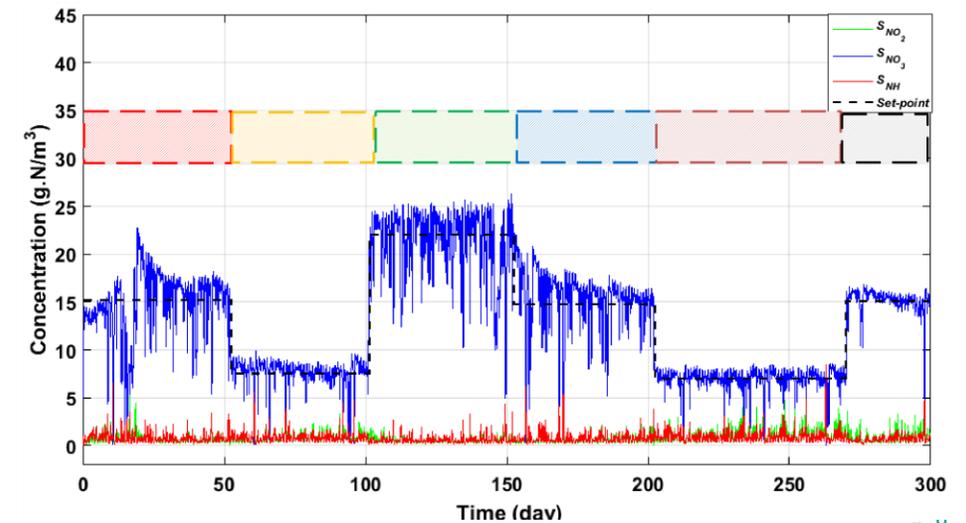
- Fixer $SNO3^*$ de référence
- Chercher $SNO3^*$ dans la base des donnée
- Si $SNO3^* = SNO3$ dans la base des donnée
- Prendre les valeurs des contrôleurs associée à $SNO3$
- Appliquer ces valeurs dans les contrôleurs

$SNO3^*$	$KLa2$	$KLa3$	VA	VB	VC	Q_{WAS}	Q_{RAS}	Q_{int}
15,2	100	300	1	1	0	400	$2 \times Q_{in}$	$1 \times Q_{in}$
7,5	100	150	1	1	1	300	Q_{in}	0
22	150	150	0	0	1	700	Q_{in}	Q_{in}
14,8	150	300	1	1	0	300	Q_{in}	0
7	100	250	1	1	0	400	Q_{in}	Q_{in}
15,1	150	200	1	0	0	300	Q_{in}	0

Cas statique influent



Cas dynamique influent



+ Contrôle en boucle fermée

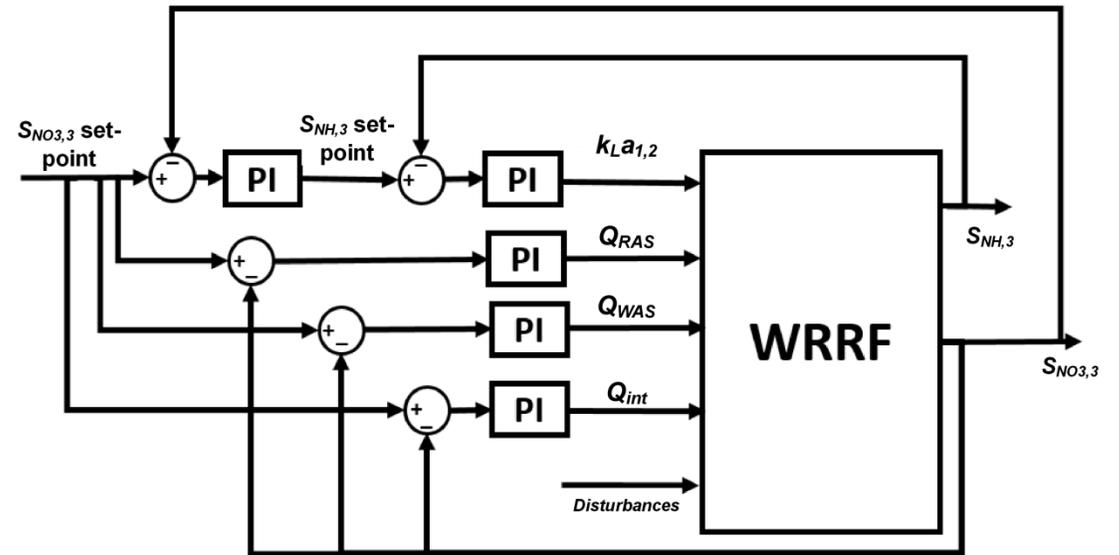
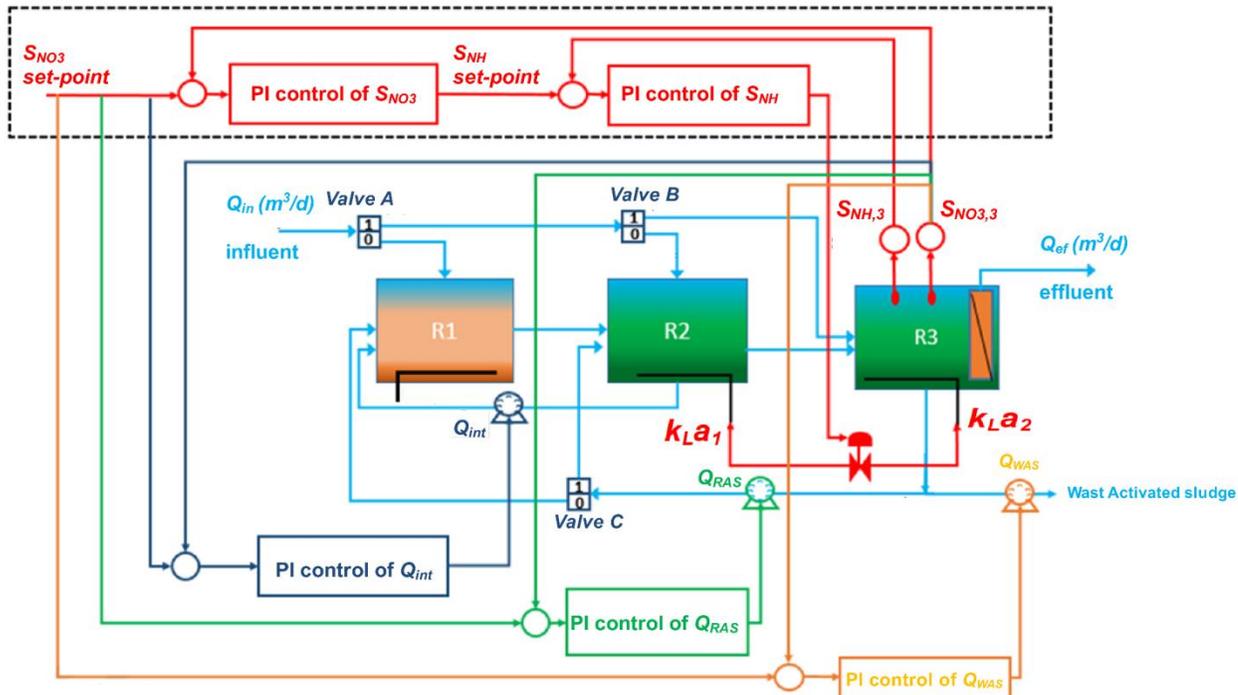
Contrôle de Nitrate S_{NO_3}

Une boucle de régulation PI « en cascade »

Pour contrôler l'oxygène à travers les coefficients de transfert kLa_1 et kLa_2

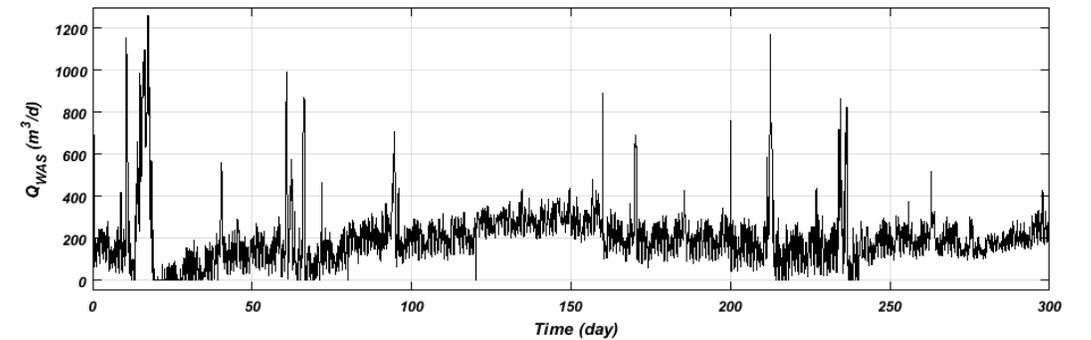
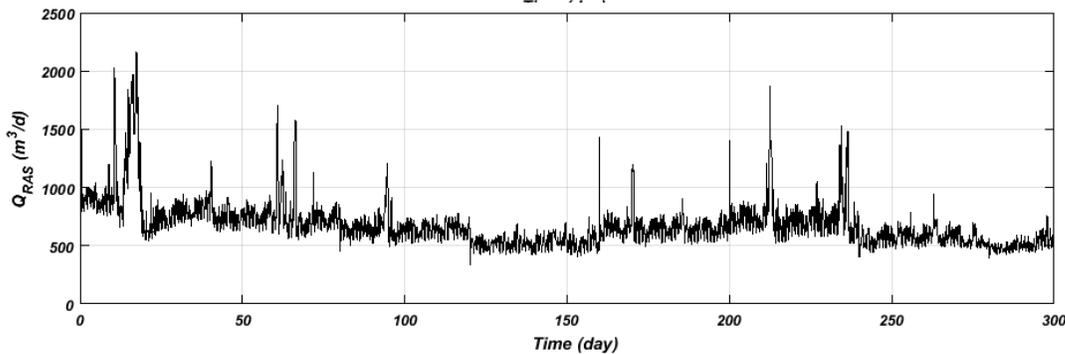
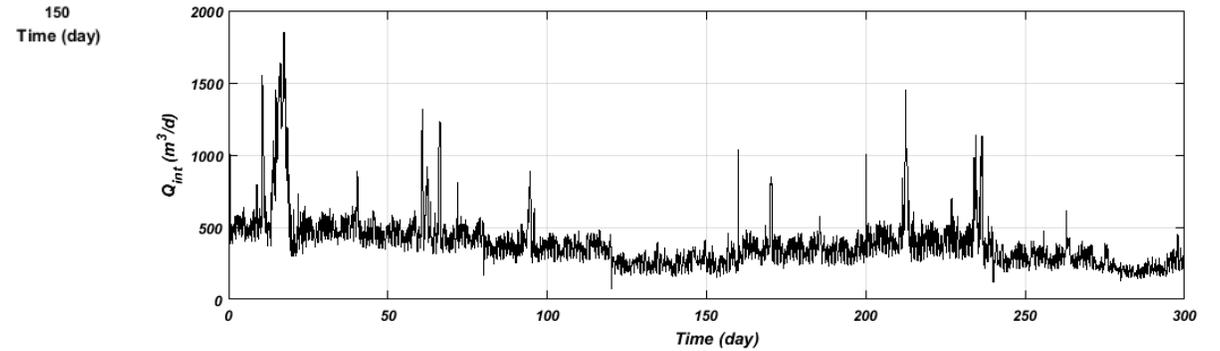
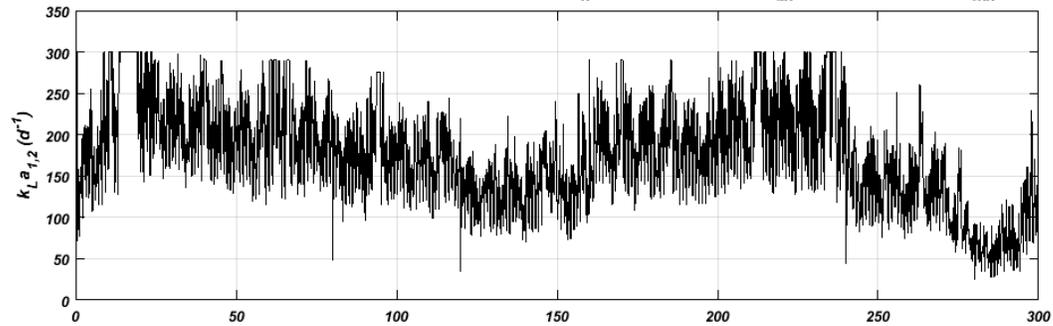
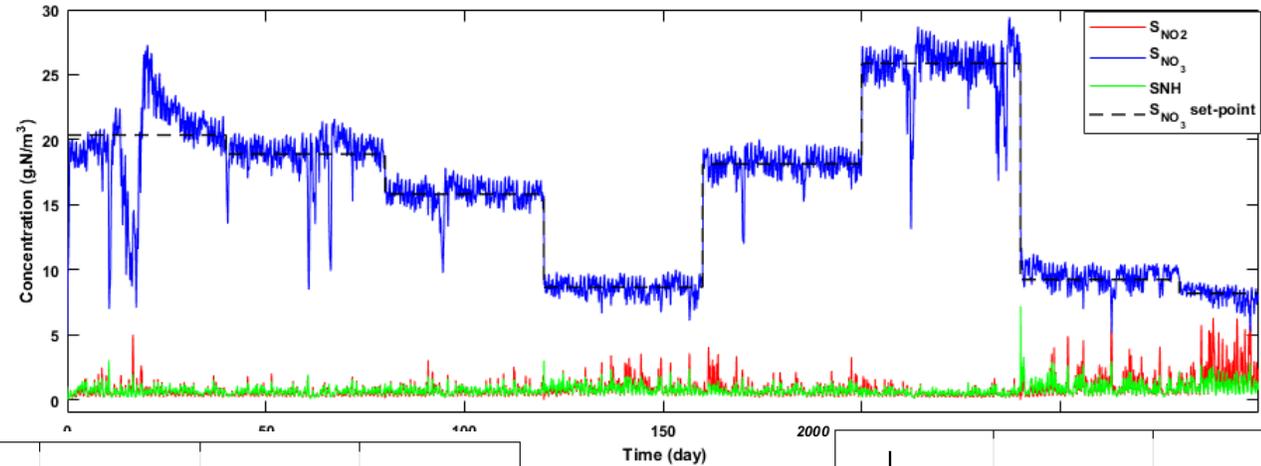
Trois boucles de régulation PI « simple »

Pour contrôler les recirculations et l'âge de boue



+ Résultats du contrôle de Nitrate en boucle fermée

Cas influent dynamique



+ Contrôle en boucle fermée pour un traitement complet

Respecter les normes de rejet (Traitement conventionnel)

Normes de rejet

$$N_{tot} < 18 \text{ g N/m}^3$$

$$DCO_{tot} < 100 \text{ g DCO/m}^3$$

$$DBO_5 < 10 \text{ g DBO/m}^3$$

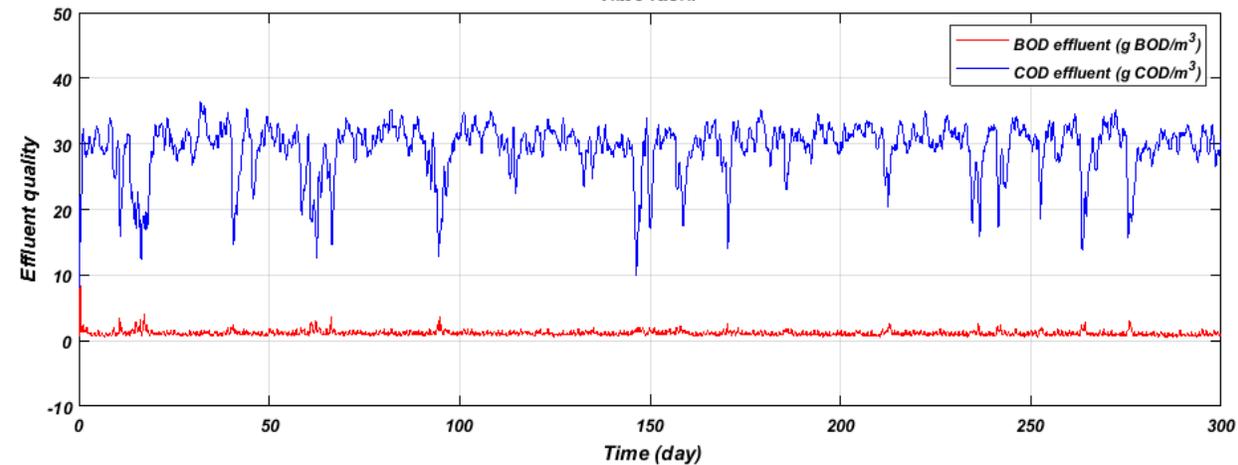
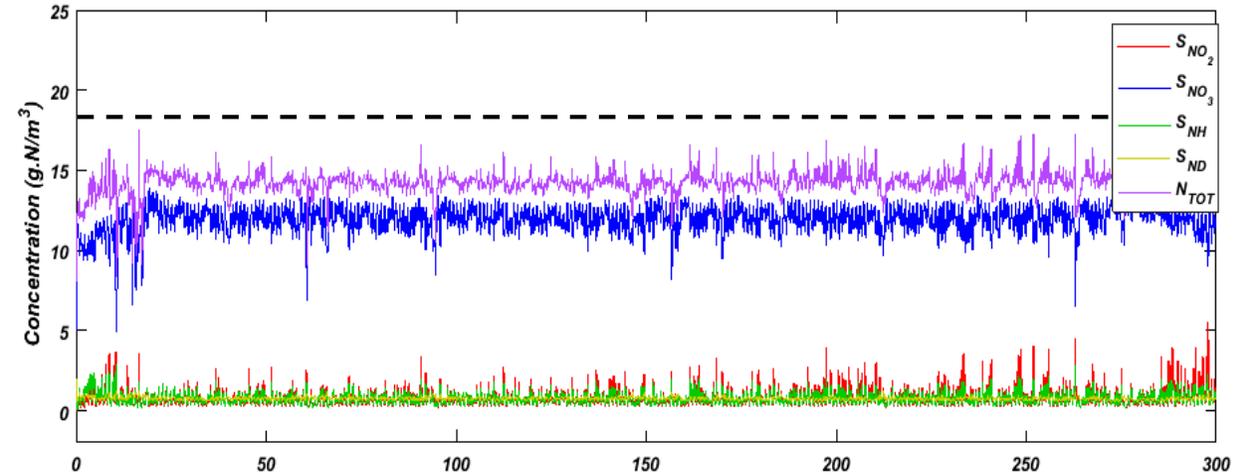
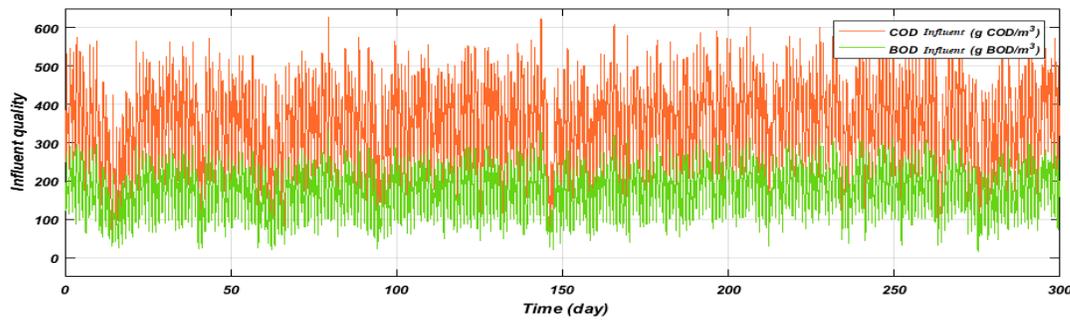
$$SNH < 4 \text{ g N/m}^3$$

Données de l'influent (moyenne):

$$N_{tot} = 35 \text{ g.N m}^{-3} \quad DCO_{tot} = 502.22 \text{ g.DCO m}^{-3}$$

$$SNH = 28 \text{ g.N m}^{-3} \quad DBO_5 = 145 \text{ g.DCO m}^{-3}$$

DCO et DBO influent



+ Contrôle en boucle fermée

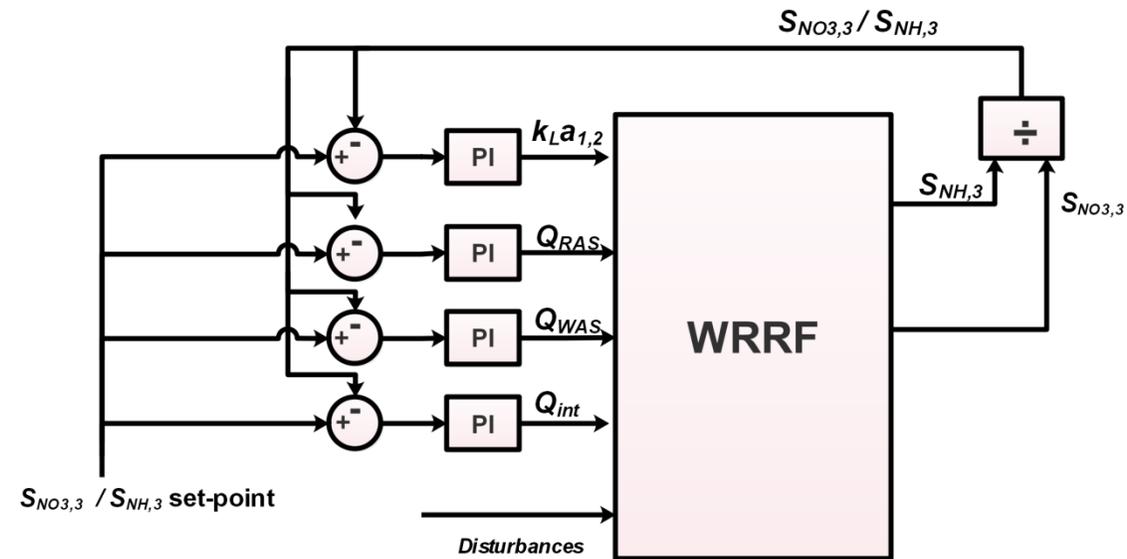
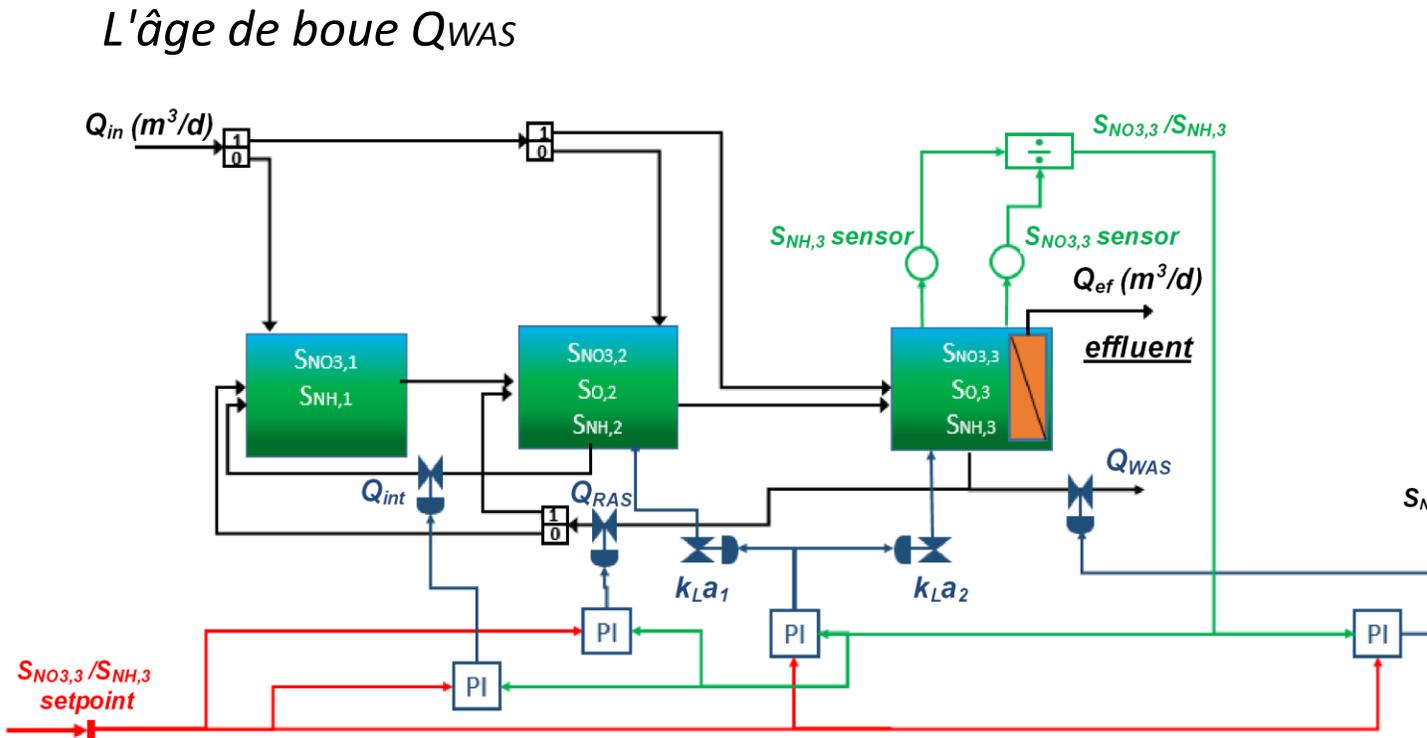
Control du rapport (Nitrate/Ammonium)

Quatre boucles de régulation PI « simple »

Pour contrôler l'oxygène à travers les coefficients de transfert kLa_1 et kLa_2

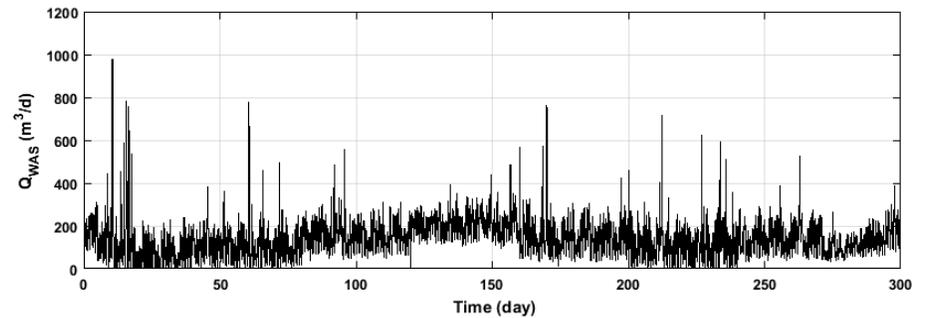
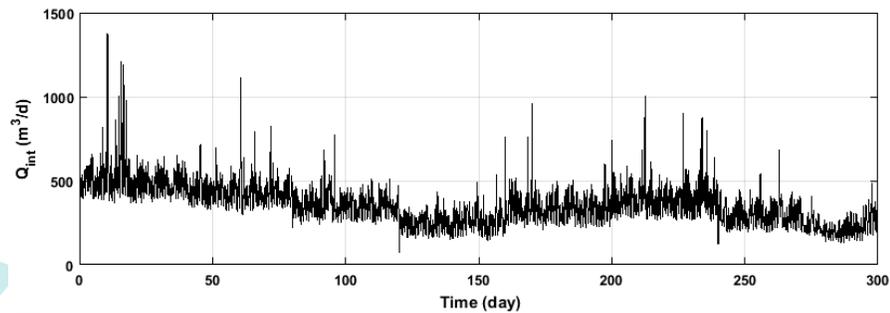
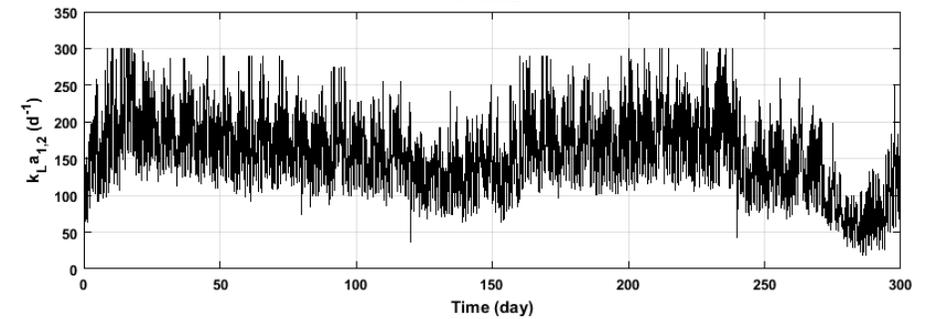
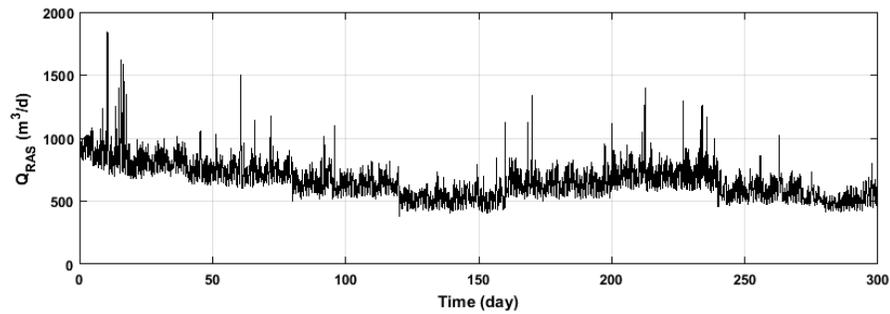
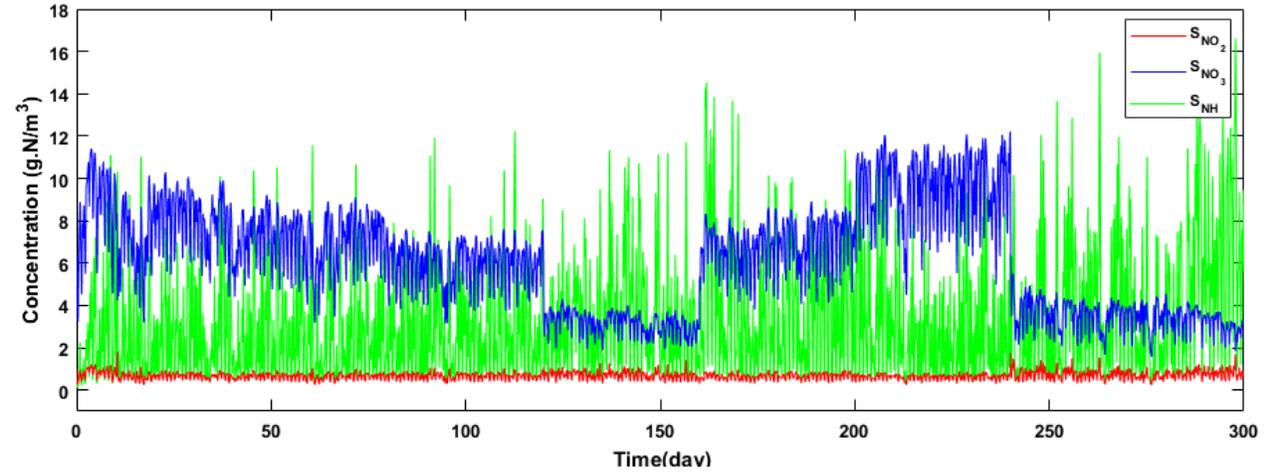
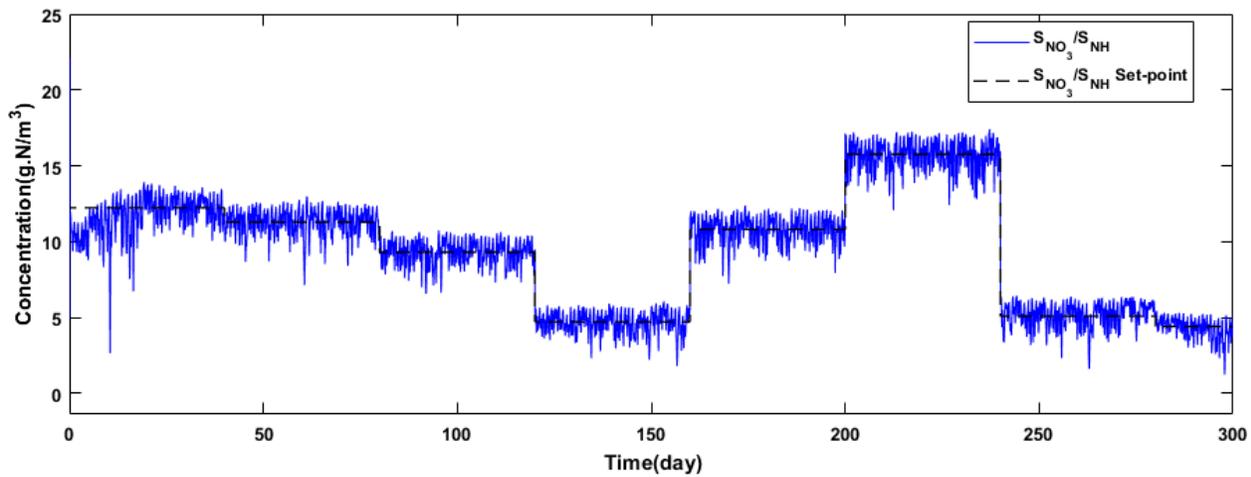
les recirculation Q_{int} et Q_{RAS}

L'âge de boue Q_{WAS}



+ Résultats du contrôle en boucle fermée

Contrôle du rapport S_{NO_3}/S_{NH}



+ Application à la fertirrigation : couplage des modèles de traitement et d'irrigation/culture

Analyse des différentes configurations

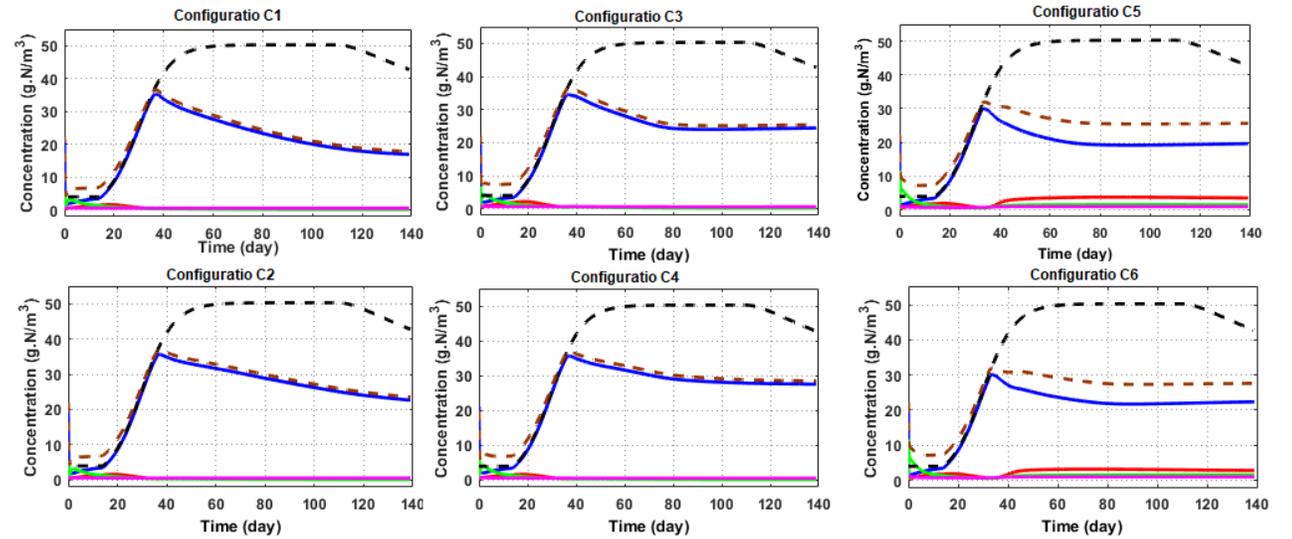
Valve A	Valve B	Valve C	Configuration
0	0	0	C1
0	0	1	C2
0	1	0	-
0	1	1	-
1	0	0	C3
1	0	1	C4
1	1	0	C5
1	1	1	C6

— — : N_{TOT}

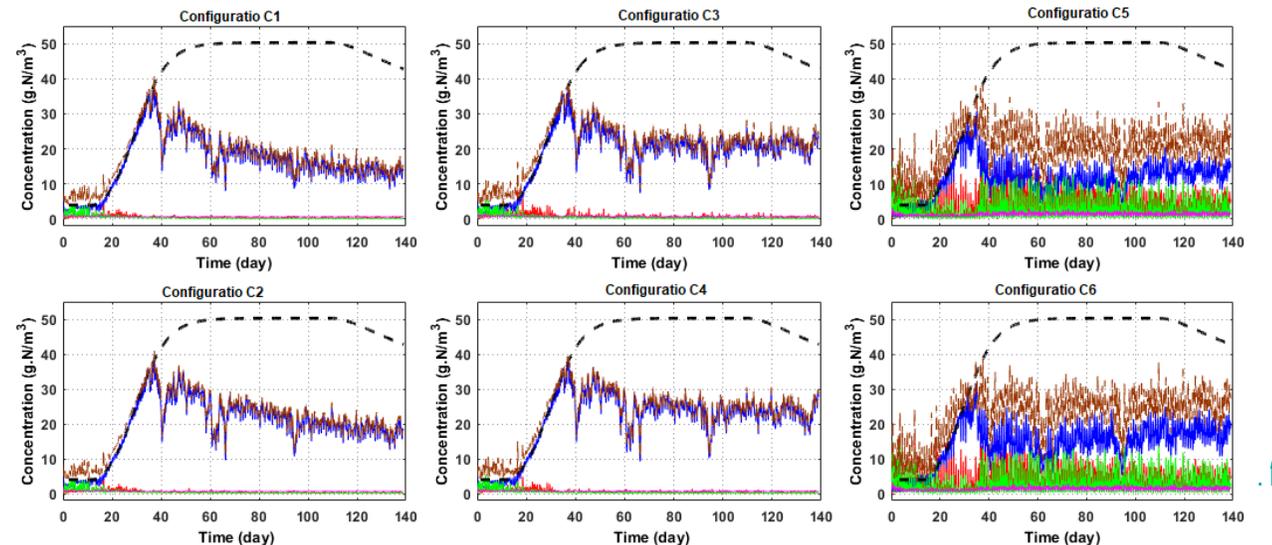
— — : N_{TOT} optimale référence pour irrigation

— : S_{NO3} — : S_{NO2} — : S_{NH} — : S_{ND}

Cas influent statique



Cas influent dynamique



+ Indices de performance

Quantité totale d'azote apportée [Kg]

$$\text{Quantité d'azote apportée} = \int_0^{T \text{ simulation}} N_{tot}(t) Q_{ef}(t) dt$$

Énergie totale de pompage [KWh]

$$PE = \frac{1}{T \text{ simulation}} \sum_{i=1}^N PF_i \int_0^{T \text{ simulation}} Q_i(t) dt$$

Énergie totale d'aération [KWh]

$$AE = \frac{S_0^{sat}}{T \text{ simulation} \times \rho} \int_0^{T \text{ simulation}} V_{R2} K_L a_1(t) + V_{R3} K_L a_2(t) dt$$

ρ : efficacité de transfert de [g] d'oxygène par [kWh]

+ Résultats d'évaluation des indices de performances

Quantité d'azote apportée au sol/culture

- *ANTS [kg]:* Quantité d'azote apportée par influent statique
- *ANTD [kg]:* Quantité d'azote apportée par influent dynamique

Énergie totale de pompage

- *PES [KWh j⁻¹]:* Énergie de pompage par influent statique
- *PED [KWh j⁻¹]:* Énergie de pompage par influent dynamique

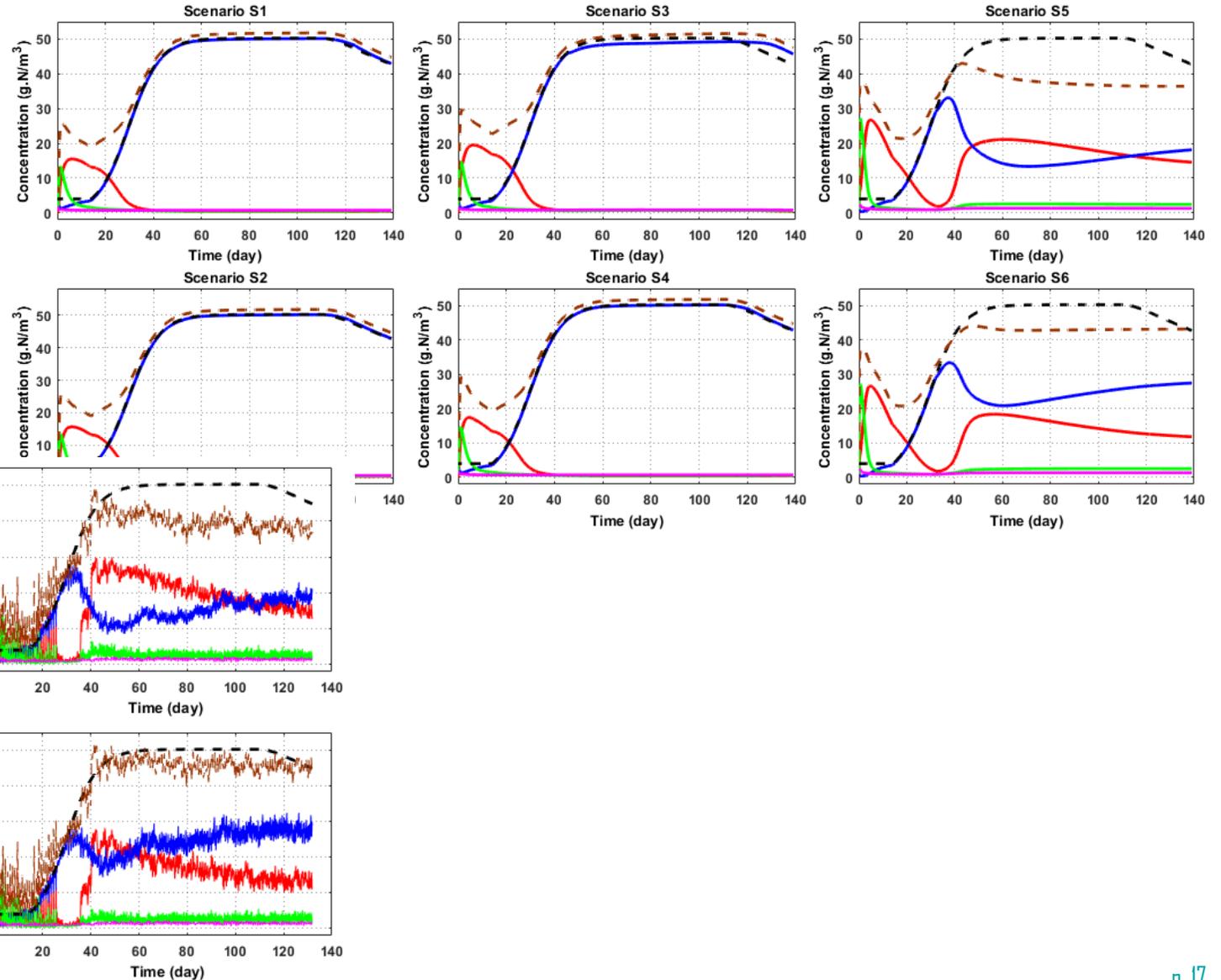
Énergie totale d'aération

- *AES [KWh j⁻¹]:* Énergie d'aération par influent statique
- *AED [KWh j⁻¹]:* Énergie d'aération par influent dynamique

	Traitement complet	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<i>ANTS [kg]</i>	21720	49960	57730	57890	62860	58010	62070
<i>ANTD [kg]</i>	22089	72570	84810	80890	88970	78460	82880
<i>PES [KWh j⁻¹]</i>	2909.2	2639.6	2403.2	2889.2	2499.8	2873.2	2811.3
<i>PED [KWh j⁻¹]</i>	3714.2	3201.8	3003.2	3489.2	3299.8	3493.4	3425.1
<i>AES [KWh j⁻¹]</i>	13959.3	13799.8	13145.3	13656.1	13355.7	13822.7	13799.1
<i>AED [KWh j⁻¹]</i>	14681.3	14291.1	14055.2	13922.5	14009.8	14398.9	14299.0

+ Application à la fertirrigation : couplage des modèles de traitement et d'irrigation/culture

Influent chargé $N_{tot} = 55 \text{ g/m}^3$



+ Conclusions

- La flexibilité permet d'ajouter plus de degrés de liberté, pour une possibilité de contrôler le système en fonction des besoins.
- La stratégie de contrôle en boucle ouverte est utile lorsque les entrées de système sont connues ou statique.
- Les approches en boucle fermée ont montré leur efficacité par rapport aux entrées dynamique
- Grâce à la flexibilité, plusieurs configurations donnent l'opportunité de choisir celle-ci la plus écoénergétique ou qui apporte plus d'azote aux plantes

Merci pour votre attention !