



**UNIVERSITÉ
LAVAL**



Rapport de stage Pratique de l'ingénierie

4 Mai 2015 au 31 Juillet 2015

GRAEBLING Maxence

FORMATION D'INGENIEUR

2013/2016

Promotion STUTTGART

Suivi d'un pilote de traitement des eaux usées : échantillonnage, analyse des échantillons, entretien des capteurs et analyse des données



Organisme: Université Laval, Québec, Canada

Maître de stage: Mr Peter VANROLLEGHEM

Sommaire

| | |
|---|----|
| Table des illustrations..... | 4 |
| Table des tableaux | 4 |
| Remerciements..... | 6 |
| I. Présentation de la structure d'accueil..... | 7 |
| II. Description du projet pilEAUte | 8 |
| III. Analyse des différents paramètres caractéristiques des eaux usées | 9 |
| 1. Détermination des Matières En Suspension (MES) et des Matières Volatiles En Suspension (MVeS) | 9 |
| 2. Analyses de plusieurs paramètres avec les tubes HACH LANGE | 10 |
| IV. Station de mesure monEAU | 10 |
| 1. Composition et localisation de la station de mesure monEAU | 11 |
| 2. Entretien, validation et calibration des capteurs de la station monEAU ... | 12 |
| 2.1. L'entretien des capteurs | 12 |
| 2.2. Validation et calibration des capteurs | 13 |
| 3. Exploitation des données de la station de mesure monEAU | 14 |
| 3.1. Vérification des débits d'alimentation du pilote et du co-pilote..... | 15 |
| 3.2. Traitement des données de la station de mesure monEAU suite à l'installation des lignes d'air pour le nettoyage automatique des capteur..... | 17 |
| V. Campagne de mesure de 24h sur le projet pilEAUte en temps sec..... | 18 |
| Conclusion..... | 25 |
| BIBLIOGRAPHIE | 26 |

Table des illustrations

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Carte du Canada zoomée sur l'état du Québec | 7 |
| Figure 2 : Schématisation vue de dessus de la station du projet pilEAUte | 9 |
| Figure 3 : Détermination de la concentration en NH_4^+ avec les tubes HACH LANGE | 10 |
| Figure 4 : Localisation des différents capteurs de la station monEAU | 12 |
| Figure 5 : Les conséquences d'une calibration sur un capteur | 13 |
| Figure 6 : Comparaison de la concentration en NO_3^- à l'affluent et à l'effluent du pilote et du co-pilote | 15 |
| Figure 7 : Schématisation du traitement secondaire (bassin biologique + décanteur secondaire)..... | 15 |
| Figure 8 : L'impact du nettoyage automatique des capteurs sur les données brutes | 17 |
| Figure 9 : Comparaison avant et après lissage des données NO_3^- | 18 |
| Figure 10 : Points d'échantillonnages de la campagne de mesure de 24h | 19 |
| Figure 11 : Graphique des données de la campagne de mesure de 24h à l'affluent | 20 |
| Figure 12 : Suivi de NH_4^+ et des NO_3^- tout au long du traitement secondaire du pilote | 20 |
| Figure 13 : Suivi du pH tout au long du traitement secondaire du pilote | 21 |
| Figure 14 : Suivi de l'oxygène dissous tout au long du bassin biologique..... | 22 |
| Figure 15 : Graphique comparant le suivi de l'azote ammoniacal à l'effluent du pilote par les capteurs et avec les données du laboratoire | 23 |
| Figure 16 : Graphique comparant le suivi des nitrates à l'effluent du pilote par les capteurs et avec les données du laboratoire..... | 23 |
| Figure 17 : Graphique comparant le suivi de l'azote ammoniacal à l'effluent du co-pilote par les capteurs et avec les données du laboratoire..... | 24 |
| Figure 18 : Graphique comparant le suivi des nitrates à l'effluent du co-pilote par les capteurs et avec les données du laboratoire..... | 24 |

Table des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Validation de deux paramètres de l'ammo::lyser, la température et le pH | 14 |
| Tableau 2 : Calibration de deux paramètres de l'ammo::lyser, la température et le pH..... | 14 |
| Tableau 3 : Tests pour vérifier les débits d'alimentation du pilote et du co-pilote | 16 |
| Tableau 4 : Liste des étapes réalisées lors d'un test de détermination du débit d'alimentation | 16 |
| Tableau 5 : Résultats des tests de vérification des débits d'alimentation du pilote et du co-pilote | 17 |

Table des annexes

| | |
|--|----|
| Annexe 1 : Photo du bassin tampon et du décanteur primaire du projet pilEAUte .. | 27 |
| Annexe 2 : Photo des deux lignes de traitement secondaires (pilote et co-pilote) .. | 27 |
| Annexe 3 : Description détaillée d'une ligne de traitement secondaire..... | 28 |
| Annexe 4 : Photo de la station de mesure monEAU permettant de récolter les données des capteurs | 28 |
| Annexe 5 : Dispositif de nettoyage automatique par insufflation d'air d'un capteur. | 29 |
| Annexe 6 : Délimitation du volume d'étude dans le décanteur secondaire | 29 |
| Annexe 7 : Suivi de l'azote ammoniacal et des nitrates à l'effluent du pilote avant lissage des données | 30 |
| Annexe 8 : Suivi de l'azote ammoniacal et des nitrates à l'effluent du pilote après lissage des données | 30 |
| Annexe 9 : Graphique montrant le suivi de l'azote ammoniacal et des nitrates sur le co-pilote réalisé durant la campagne de mesure de 24h | 31 |
| Annexe 10 : Graphique montrant le suivi du pH sur le co-pilote réalisé durant de la campagne de mesure de 24h | 31 |
| Annexe 11 : Graphique montrant le suivi de l'oxygène dissous sur le co-pilote réalisé durant la campagne de mesure de 24h..... | 32 |

Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier mon maître de stage Mr Peter VANROLLEGHEM pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser mon stage pratique de l'ingénierie au sein de son équipe de recherche modelEAU, pour toutes les connaissances qu'il m'a apporté et pour son côté humain.

Je tiens à remercier Queralt PLANA pour m'avoir appris énormément de choses sur les stations de mesure ainsi que pour sa patience.

Je tiens également à remercier Sey-Hana SAING pour les compétences qu'il ma transmises en maintenance mais également pour son énorme gentillesse.

Je souhaite remercier Sylvie LEDUC pour son accueil et pour sa gentillesse.

Enfin, je souhaite remercier l'équipe de recherche modelEAU ainsi que toutes les personnes que j'ai côtoyées durant mes trois mois de stage.

I. Présentation de la structure d'accueil

L'université Laval est l'une des plus grandes universités du Canada. Elle est située au sein de la ville de Québec. Elle a été fondée en 1852.



Figure 1 : Carte du Canada zoomée sur l'état du Québec

L'université est une petite ville dans une ville avec notamment plus de 40 pavillons comportant 17 facultés et 67 départements. J'ai effectué mon stage au sein du département de génie civil et de génie des eaux. Cette université consacre un budget important pour la recherche avec plus de 250 millions de dollars par an. C'est l'une des 10 plus importantes universités canadiennes en matière de recherche.

Au sein de la section génie des eaux, les recherches sont axées aussi bien sur l'eau potable que sur les eaux usées. J'ai réalisé mon stage au sein de l'équipe de recherche modelEAU. C'est un groupe de recherche autour de la chaire de recherche du Canada en modélisation de la qualité de l'eau décernée à Peter VANROLLEGHEM en 2006. Durant mes 3 mois de stage, j'ai travaillé sur le projet intitulé piEAUte.

II. Description du projet pilEAUte

Le projet pilEAUte consiste à mettre en œuvre un pilote d'élimination des nutriments (azote et phosphore) des eaux usées. Ce pilote a été acquis récemment (fin de l'année 2014), et par conséquent l'un des objectifs de mon stage a été d'évaluer le fonctionnement du pilote afin de caractériser le type d'affluent mais également d'acquérir des connaissances sur celui-ci. À l'avenir, ce pilote de traitement des eaux usées sera l'équipement clé de recherche. Il va permettre de tester des modèles numériques (problématique de basse température très présente au Canada) et de concevoir des nouvelles méthodes de modélisation. Il va également permettre d'évaluer l'utilité des capteurs en ligne ainsi que d'établir des conditions d'utilisation pour les capteurs (entretien, calibration) en testant notamment de nouveaux capteurs dans le but de fournir des informations sur l'état et les performances des stations d'épuration et finalement d'améliorer la conception et la gestion des stations d'épuration.

Le pilote de traitement des eaux usées est une station d'épuration miniaturisée. Il est alimenté en eau usée par une résidence universitaire située sur le campus de l'Université Laval. C'est une station de pompage (deux pompes déchiqueteuses car pas de dégrilleur) qui permet d'acheminer cette eau usée vers le bassin tampon (voir Annexe 1) (premier bassin de la chaîne de traitement d'un volume de 6m^3). Une fois arrivée dans le bassin tampon, l'eau usée est acheminée vers le décanteur primaire (voir Annexe 1) à l'aide d'une pompe à un débit de $1,1\text{m}^3/\text{h}$ afin de réduire la fraction particulaire de l'eau usée. À la sortie du décanteur primaire (affluent), la ligne de traitement est divisée en deux. En effet, il y a deux lignes de traitement similaires appelés pilote et co-pilote (voir Annexe 2). Deux pompes acheminent l'eau brute de l'affluent vers le pilote (respectivement vers le co-pilote) à un débit de $0,5\text{m}^3/\text{h}$. La composition de la ligne de traitement du pilote et du co-pilote est identique (voir Annexe 3). En tête de filière, nous avons deux bassins d'anoxie permettant notamment de réaliser la dénitrification (bactéries hétérotrophes). Le premier a un volume de 1m^3 et le deuxième de $1,5\text{m}^3$. Ensuite, nous avons 3 bassins aérobies permettant notamment de réaliser la nitrification (bactéries autotrophes) de 1m^3 , 1m^3 et 2m^3 . À la suite, il y a un décanteur secondaire pour finaliser le traitement et concentrer les boues biologiques.

Il y a également une recirculation de la liqueur mixte qui permet d'acheminer des boues biologiques (essentiellement des bactéries) du décanteur secondaire vers le premier bassin d'anoxie. Le débit de la recirculation de la liqueur mixte est de $0,5\text{m}^3/\text{h}$. Une recirculation interne est présente entre le 3^{ème} bassin aérobie et le premier bassin d'anoxie afin d'acheminer les nitrates en tête de filière pour optimiser la dénitrification. Le débit de la recirculation interne est de $1,5\text{m}^3/\text{h}$ (3 fois le débit d'alimentation). Le pilote et le co-pilote sont munis d'un échangeur de chaleur (chacun) afin de contrôler la température de la liqueur mixte dans les bassins biologiques et le décanteur secondaire.

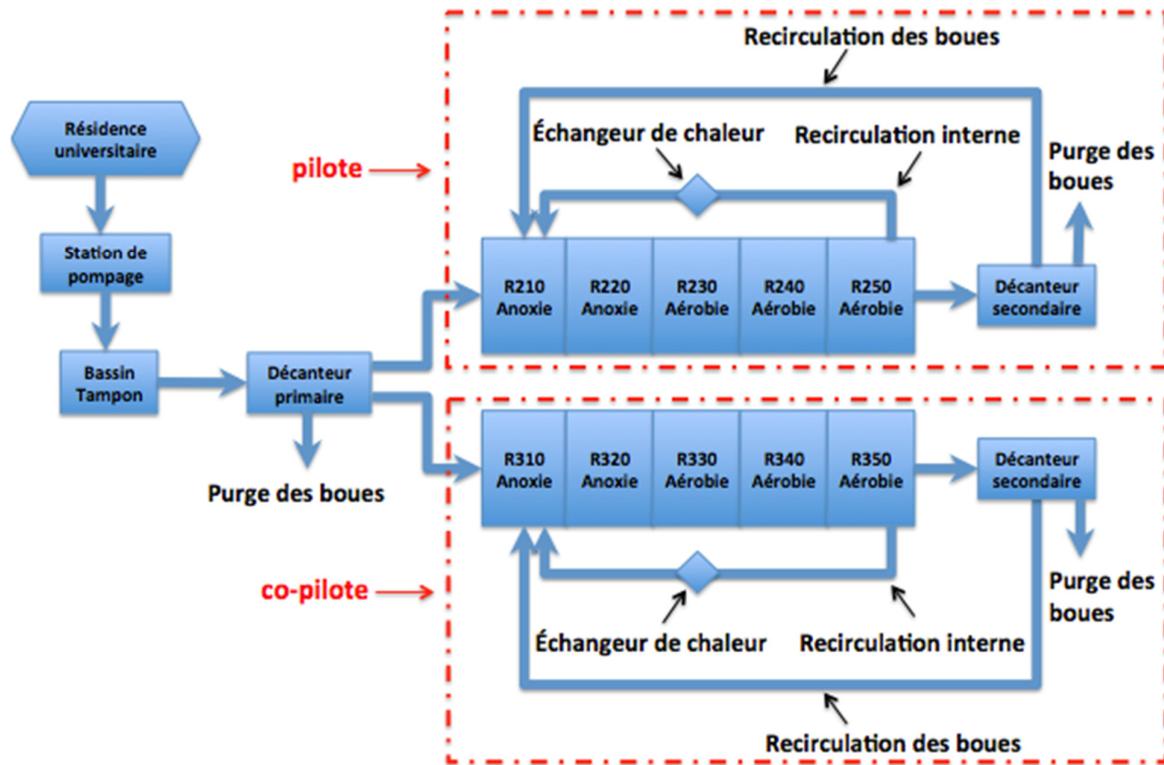


Figure 2 : Schématisation vue de dessus de la station du projet pilEAUte

III. Analyse des différents paramètres caractéristiques des eaux usées

Afin de caractériser le fonctionnement du pilote et d'améliorer les connaissances sur celui-ci, j'ai réalisé différentes analyses au laboratoire.

1. Détermination des Matières En Suspension (MES) et des Matières Volatiles En Suspension (MVeS)

La première étape pour déterminer les MES (ou MVeS) consiste à conditionner les filtres. Le conditionnement des filtres permet de « nettoyer » les pores du filtre afin de faciliter la filtration lorsque l'on filtre l'eau usée. Le protocole pour conditionner un filtre MES (ou MVeS) est le suivant :

- Filtrer de l'eau distillée (environ 3 fois 20ml)
- Placer le filtre dans l'étuve à 105°C pendant 2h (au four à 550°C pendant 1h pour les MVeS)
- Déposer le filtre dans le dessiccateur pendant 30 minutes afin de le refroidir
- Peser le filtre afin d'obtenir la masse initiale M_0

Une fois que le filtre est conditionné, on peut l'utiliser pour déterminer la concentration en MES (ou MVeS) d'une eau usée. Pour ce faire, j'ai prélevé un échantillon d'eau usée et j'ai réalisé la filtration d'un volume d'eau usée choisi noté (V_E). J'ai déposé

le filtre dans l'étuve à 105°C pour une durée de 2h puis 30 minutes au dessiccateur pour le refroidissement et enfin j'ai pesé le filtre et j'ai obtenu la masse M_1 . On obtient la concentration en MES de la manière suivante :

$$MES = \frac{M_1 - M_0}{V_E}$$

Pour les MVeS, une étape supplémentaire est nécessaire. Il faut placer le filtre de masse M_1 dans le four à 550°C pendant 30 minutes puis 30 minutes dans le dessiccateur. Il faut ensuite peser le filtre pour obtenir la masse M_2 . La masse M_2 représente la fraction minérale des MES car les matières organiques sont volatiles à 550°C. Pour déterminer la concentration en MVeS, il suffit de faire le calcul suivant :

$$MVeS = \frac{M_2 - M_1}{V_E}$$

2. Analyses de plusieurs paramètres avec les tubes HACH LANGE

Dans le but de réaliser des campagnes de mesure, l'équipe de recherche utilise la technologie HACH LANGE pour réaliser les analyses de plusieurs paramètres (DCO_{TOT} , DCO_{SOL} , N_{TOT} , N_{SOL} , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-). Cette technologie permet de gagner un gain de temps et ainsi permettre la réalisation de nombreuses analyses en peu de temps.

Bien évidemment pour chaque paramètre, le contenu d'un tube change, mais le principe général reste le même dans le sens où les tubes utilisent la spectrophotométrie pour obtenir les résultats.

Avec cette technologie, un protocole est établi par type d'analyse. Ce protocole fixe notamment le volume d'eau usée à introduire dans un tube.



Figure 3 : Détermination de la concentration en NH_4^+ avec les tubes HACH LANGE

J'ai également réalisé des analyses pour déterminer la concentration en potassium K^+ avec des réactifs en poudre de la compagnie HACH. C'est également une lecture par spectrophotomètre qui permet d'obtenir la concentration en potassium.

IV. Station de mesure monEAU

Pour pouvoir connaître à chaque instant la valeur de plusieurs paramètres caractéristiques d'une eau usée (DCO, NH_4^+ , NO_3^- , ...), l'installation d'une station de mesure est indispensable. En effet, réaliser des analyses au laboratoire permet d'obtenir une valeur moyenne de chaque paramètre mais on n'est pas capable d'observer les variations d'un paramètre sur un pas de temps court. C'est bien là toute la force d'une station de mesure. On est capable avec cet outil d'observer des phénomènes très rapides (variation de la composition de l'eau usée en fonction de la météo, en fonction de l'heure, ...).

1. Composition et localisation de la station de mesure monEAU

Le projet pilEAUte est muni d'une station de mesure nommée monEAU (voir Annexe 4) (monEAU pour « monitoring EAU »). Cette station de mesure est composée de 8 capteurs positionnés à différents endroits du pilote dans le but d'obtenir un maximum d'informations.

Au niveau de l'affluent (sortie du décanteur primaire), il y a trois capteurs appartenant à la station monEAU. Le premier capteur, le spectro:lyser détermine la concentration de l'eau usée en MES, DCO_{TOT} , DCO_{SOL} , et en NO_3^- . C'est un capteur de la compagnie S::CAN. Nous avons également au niveau de l'affluent un ammo:lyser afin d'obtenir les valeurs de la température, du pH, du potassium (K^+), et de l'azote ammoniacal (NH_4^+). C'est également un capteur de la compagnie S::CAN. On retrouve un dernier capteur appartenant à la station monEAU au niveau de l'affluent. C'est un capteur Varion de la compagnie WTW (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten). Ce capteur détermine la concentration en NH_4^+ , en K^+ ainsi que la température de l'affluent. Nous l'appelons VarionR100. Nous avons donc trois capteurs appartenant à la station monEAU au niveau de l'affluent.

Afin de connaître les caractéristiques de l'eau traitée ainsi que l'efficacité du procédé, des capteurs sont placés au niveau de l'effluent du pilote (sortie du décanteur secondaire du pilote) et au niveau de l'effluent du co-pilote (sortie du décanteur secondaire du co-pilote).

En ce qui concerne l'effluent du pilote, trois capteurs sont installés. Un pH-mètre pour déterminer la valeur du pH ainsi que la température nommée pH200. Nous avons également un turbidimètre déterminant la turbidité nommé TurbR200. Enfin, un capteur Varion nommé VarionR200 est installé pour déterminer la concentration en NH_4^+ , NO_3^- , K^+ ainsi que la température de l'effluent du pilote. Ces trois capteurs proviennent de la compagnie WTW.

Nous avons deux capteurs placés au sein de l'effluent du co-pilote. Un turbidimètre permettant de mesurer la turbidité de l'effluent du co-pilote nommé Turb300. Puis un capteur Varion nommé VarionR300 pour déterminer la concentration en NH_4^+ , NO_3^- , K^+ ainsi que la température de l'effluent du co-pilote. Ces deux capteurs proviennent de la compagnie WTW.

Un logiciel « ana-pro » s'occupe de récolter les données des deux capteurs S::CAN (spectro:lyser et ammo:lyser). Un autre logiciel « PrecisionNow Basestation » gère les données des capteurs de la compagnie WTW (VarionR100, VarionR200, Turb200, pH200, VarionR300, Turb300).

Il y a d'autres capteurs installés sur le projet pilote et co-pilote, comme des capteurs d'oxygène dissous, des turbidimètres mais ces capteurs ne font pas partie de la station de mesure monEAU. Par conséquent, je n'ai pas travaillé sur ces capteurs. J'ai tout de même exploité les données obtenues par ces capteurs.

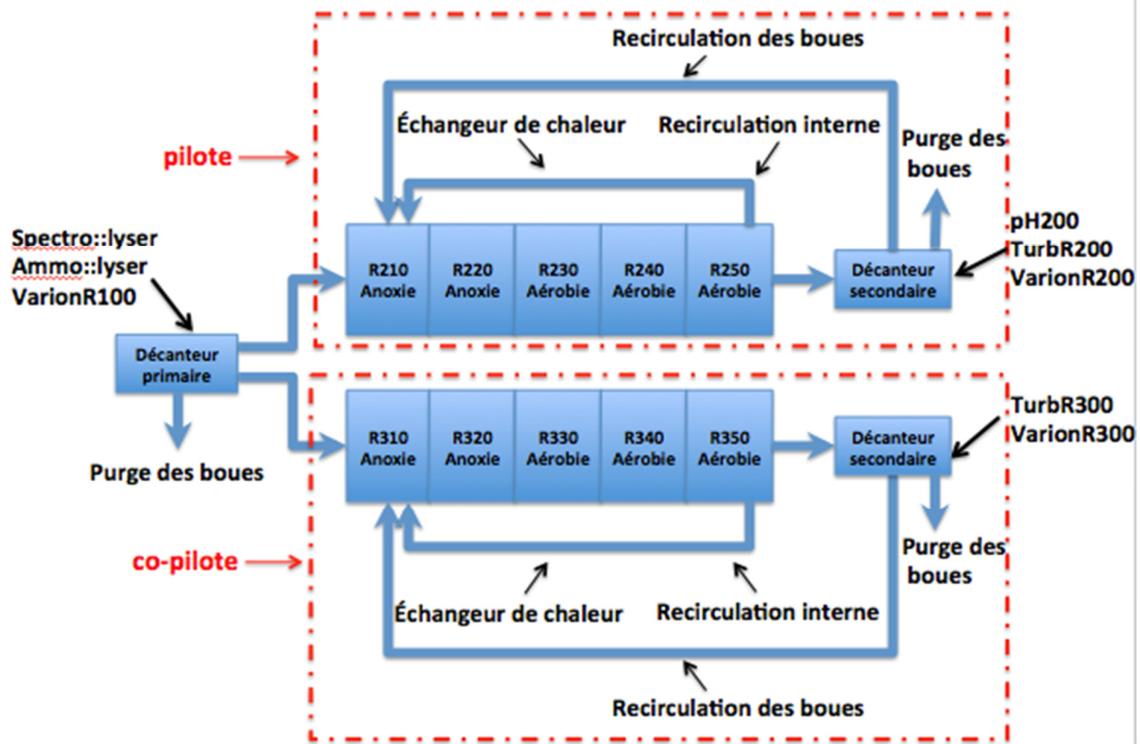


Figure 4 : Localisation des différents capteurs de la station monEAU

2. Entretien, validation et calibration des capteurs de la station monEAU

Comme je l'ai expliqué au-dessus, les capteurs sont des outils très puissants permettant d'acquérir énormément de données et ainsi améliorer nos connaissances sur les phénomènes. Mais pour pouvoir obtenir des données représentatives de la réalité, il faut réaliser un entretien régulier des capteurs, ainsi que des réglages permettant de minimiser la différence entre la valeur obtenue avec le capteur et la réalité.

2.1. L'entretien des capteurs

Au début de mon stage, je nettoyais les capteurs manuellement avec une fréquence assez importante (2 fois par semaine pour les capteurs situés au niveau de l'effluent du pilote et du co-pilote et tous les jours pour les capteurs situés à l'affluent). En effet, la fréquence de nettoyage est plus importante à l'affluent qu'à l'effluent car l'eau est plus chargée en matière organique. L'entretien des capteurs consiste à éliminer la matière organique qui se dépose à la surface de ceux-ci. Le nettoyage nécessite le déplacement des capteurs. La manipulation des capteurs doit s'effectuer avec précaution pour ne pas endommager les électrodes.

Par la suite j'ai raccordé des lignes d'air aux capteurs afin d'effectuer un nettoyage automatique (voir Annexe 5). Ce nettoyage automatique est réalisé en envoyant une insufflation d'air au niveau de la tête du capteur afin d'éliminer les particules qui se déposent sur celle-ci. Ces insufflations d'air sont envoyées à un pas de temps régulier (toutes les 5 minutes). Avec ce système, le temps consacré au nettoyage des capteurs est

optimisé (nettoyage 1 fois par semaine voir une fois tous les 10 jours avec le nettoyage automatique).

Un bon entretien des capteurs est indispensable pour pouvoir espérer obtenir des données représentatives de la réalité. L'entretien est nécessaire mais pas suffisant. Il faut réaliser des réglages pour que les capteurs donnent des valeurs représentatives de la réalité.

2.2. Validation et calibration des capteurs

La validation d'un capteur est l'étape permettant de comparer la donnée du capteur avec la donnée réelle. La donnée du capteur est obtenue avec les logiciels d'acquisition basestation et ana::pro. La donnée réelle est obtenue soit en réalisant des analyses au laboratoire (MES, DCO_{TOT}, DCO_{SOL}, NH₄⁺, NO₃⁻, K⁺) soit en utilisant des solutions standards (solutions pH 7 et 10, solutions pour le turbidimètre 200 NTU et 800 NTU). Si la validation est correcte, c'est à dire que la différence entre la valeur du capteur et la valeur réelle est faible, le capteur est correctement calibré, sinon il faut réaliser une calibration afin de réduire l'erreur commise par le capteur.

Lorsque j'ai commencé mon stage, les capteurs venaient d'être installés. Par conséquent, mon travail a été de calibrer les capteurs dans l'optique de pouvoir utiliser les données fournies par la station de mesure monEAU. J'ai donc réalisé des analyses hebdomadaires à l'affluent et au niveau de l'effluent du pilote et du co-pilote pour pouvoir obtenir les données réelles. En pratique, je prélevais 3 échantillons (affluent, effluent pilote, effluent co-pilote) et au moment du prélèvement, je notais les données fournies par les capteurs. Après analyse au laboratoire, je comparais les différences entre les données obtenues au laboratoire (données réelles) et les données des capteurs. Je réalisais donc une validation des capteurs. En fonction des résultats obtenus, je calibrais différents capteurs si nécessaires dans le but de minimiser les erreurs.

Pour comprendre concrètement le rôle d'une calibration, voici un exemple d'une calibration réalisée sur l'ammonylyser. On observe uniquement l'impact de la calibration sur deux paramètres calculés par le capteur (la température et le pH).

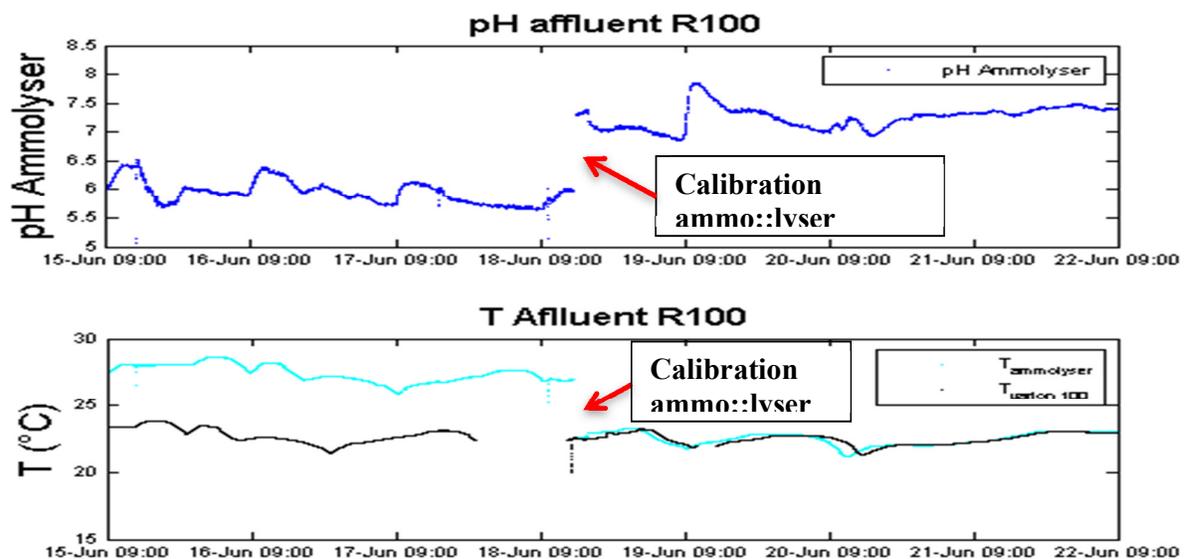


Figure 5 : Les conséquences d'une calibration sur un capteur

Je vais expliquer pourquoi est-ce que j'ai réalisé une calibration de l'ammo::lyser et qu'est ce qui m'a incité à le faire. J'ai réalisé un prélèvement à l'affluent ainsi que des analyses au laboratoire. Voici les résultats que j'ai obtenus.

Tableau 1 : Validation de deux paramètres de l'ammo::lyser, la température et le pH

| 18/08/15 | pH ammo::lyser | T°C ammo::lyser |
|-----------------|----------------|-----------------|
| données labo | 7,3 | 22,5 |
| données capteur | 5,8 | 27 |

En constatant une grosse différence entre les données obtenus au laboratoire et les données en ligne de l'ammo::lyser, j'ai réalisé une calibration pour corriger cette erreur. Une petite particularité pour la calibration de l'ammo::lyser est que ce capteur détermine quatre paramètres (T°C, pH, K⁺, NH₄⁺), mais il y a une dépendance entre les paramètres. En effet, le pH dépend de la T°C, le potassium dépend de la T°C et du pH et l'azote ammoniacal dépend de la T°C, du pH et du potassium. Par conséquent si vous voulez calibrer la température de l'ammo::lyser, il faut calibrer les quatre paramètres même si les résultats obtenus pour le pH, K⁺ et NH₄⁺ sont corrects. Après calibration, voici les résultats que j'ai obtenus pour la température et le pH.

Tableau 2 : Calibration de deux paramètres de l'ammo::lyser, la température et le pH

| 18/08/15 | pH ammo::lyser | | T°C ammo::lyser | |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Avant calibration | Après calibration | Avant calibration | Après calibration |
| données labo | 7,3 | 7,3 | 22,5 | 22,5 |
| données capteur | 5,8 | 7,3 | 27 | 22,5 |

J'ai montré uniquement les conséquences de la calibration sur deux paramètres de l'ammo::lyser pour pouvoir illustrer avec un graphique les résultats obtenus, mais en pratique les quatre paramètres ont été calibrés pour la raison que j'ai expliqué au-dessus (dépendance des paramètres). On comprend aisément que la validation et la calibration sont indispensables pour pouvoir obtenir des données représentatives de la réalité.

3. Exploitation des données de la station de mesure monEAU

L'une des premières informations que nous avons tirée de l'exploitation des données récoltées par la station de mesure monEAU est un décalage hydraulique entre le pilote et le co-pilote (voir Figure 6). En sachant que les deux lignes de traitement sont censées être identiques, il a fallu déterminer la source de ce décalage. Nous avons identifié deux sources potentielles pouvant générer ce décalage. Soit les débits d'alimentation du pilote et du co-pilote sont différents ce qui voudrait dire que les pompes n'envoient pas le débit indiqué sur le débitmètre, soit il y a une différence de volume des cuves du pilote et du co-pilote. Je me suis occupé de vérifier la première hypothèse.

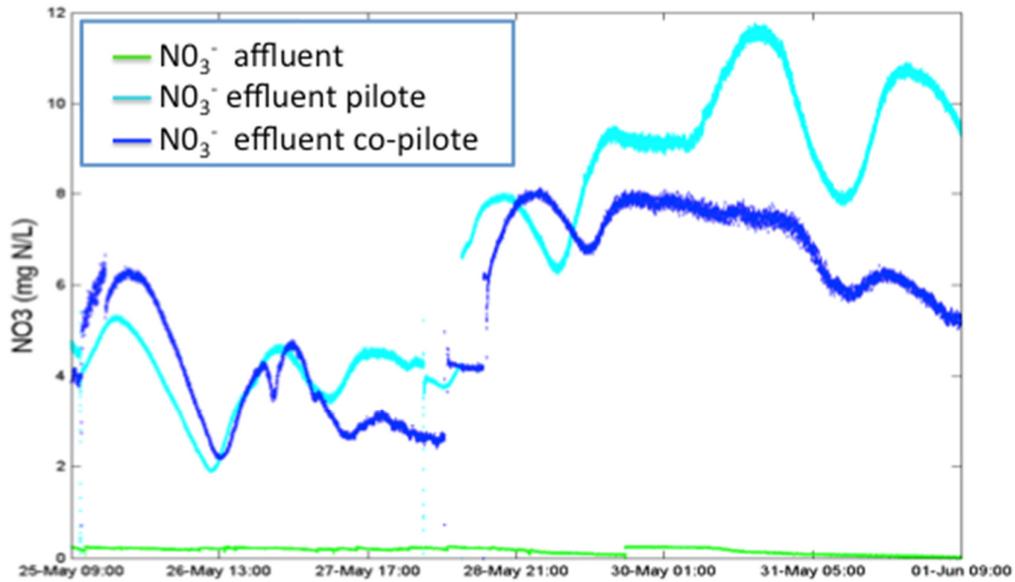


Figure 6 : Comparaison de la concentration en NO_3^- à l'affluent et à l'effluent du pilote et du co-pilote

3.1. Vérification des débits d'alimentation du pilote et du co-pilote

Pour pouvoir mesurer le plus précisément possible la valeur des débits d'alimentation du pilote et du co-pilote, nous avons établi un protocole expérimental.

Nous avons utilisé une partie du décanteur secondaire comme volume de référence. En fixant un volume, et en déterminant la durée de remplissage de ce volume nous obtenons un débit. En pratique voici comment nous avons réalisé l'expérience.

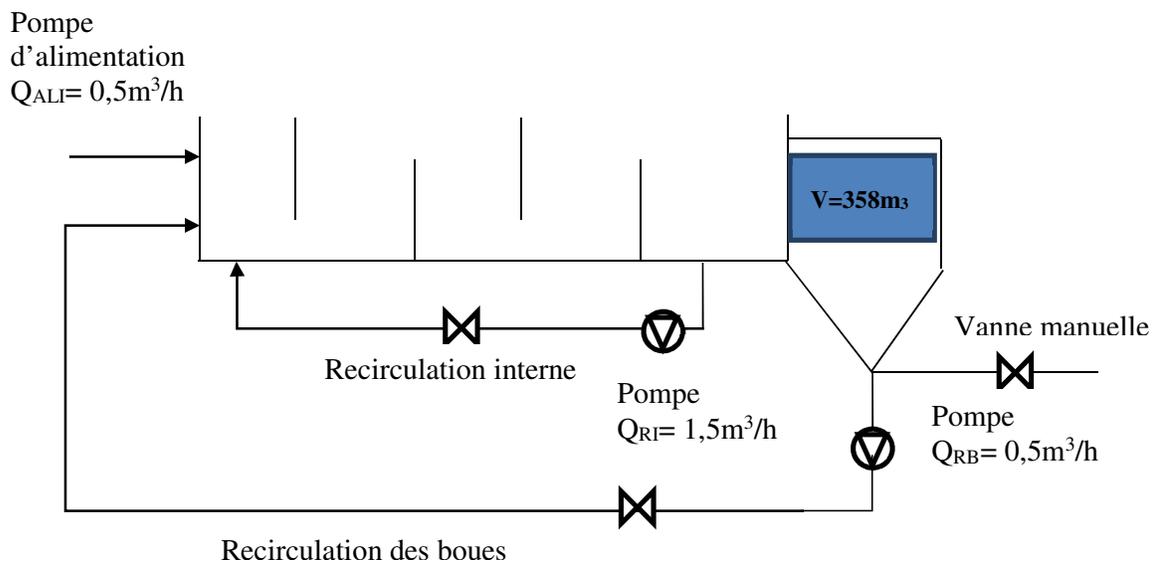


Figure 7 : Schématisation du traitement secondaire (bassin biologique + décanteur secondaire)

Nous avons réalisé deux tests afin de tester deux débits d'alimentation différents (0,5m³/h et 1m³/h).

Tableau 3 : Tests pour vérifier les débits d'alimentation du pilote et du co-pilote

| | Q _{ALI} pilote (m ³ /h) | Q _{ALI} co-pilote (m ³ /h) |
|--------|---|--|
| Test 1 | 1,0 | 0,5 m ³ /h |
| Test 2 | 0,5 | 1,0 m ³ /h |

J'ai commencé par délimiter le volume d'étude à l'aide d'une perche (voir Annexe 6). J'ai ensuite réalisé plusieurs manipulations dans le but de vider le décanteur secondaire jusqu'à un niveau inférieur au volume de référence choisi. Une fois ces étapes réalisées, j'ai mesuré le temps de remplissage du décanteur secondaire avec un débit d'alimentation fixé (0,5 m³/h ou 1m³/h). En détail, voici les étapes que nous avons réalisées.

Tableau 4 : Liste des étapes réalisées lors d'un test de détermination du débit d'alimentation

| Temps | Pilote | Co-pilote |
|----------------|---|--|
| 0 min | Arrêt aération du dernier bassin | |
| 15 min | Arrêt pompe d'alimentation | |
| 30 min | | Arrêt aération du dernier bassin |
| 45 min | Arrêt pompe recirculation des boues Ouverture vanne manuelle | Arrêt pompe d'alimentation |
| 75 min | Fermeture vanne manuelle Pompe d'alimentation à 1 m ³ /h | Arrêt pompe recirculation des boues Ouverture vanne manuelle |
| 105 min | Rétablissement du débit à 0,5m ³ /h Démarrage pompe recirculation des boues | Fermeture vanne manuelle Pompe d'alimentation à 0,5 m ³ /h |
| 120 min | Démarrage aération | |
| 165 min | | Démarrage pompe recirculation des boues |
| 180 min | | Démarrage aération |

L'arrêt de l'aération dans le dernier bassin (3^{ème} bassin aérobie) permet d'éviter l'impact de l'air sur le débit. En effet, les bulles d'air peuvent entraîner une petite variation du débit. Par mesure de sécurité, j'ai arrêté l'aération durant la mesure. Avec ce protocole, la mesure de débit s'effectue entre le moment où l'on ferme la vanne manuelle, on démarre la pompe d'alimentation à un débit fixé et que le niveau d'eau dans le décanteur secondaire est arrivé au bas du volume de référence jusqu'à ce que le niveau arrive en haut du volume de référence.

Après avoir réalisé les deux tests, le tableau 5 résume les résultats obtenus pour le détail des calculs).

Tableau 5 : Résultats des tests de vérification des débits d'alimentation du pilote et du co-pilote

| | | Débit d'entrée supposé (m3/h) | Temps (h) | Débit mesuré (m3/h) |
|--------|-----------|----------------------------------|--------------|------------------------|
| Test1 | Pilote | 1 | 0,79 | 0,96 |
| | Co-pilote | 0,5 | 0,37 | 0,45 |
| Test 2 | Pilote | 0,5 | 0,38 | 0,47 |
| | Co-pilote | 1 | 0,76 | 0,95 |

Avec les résultats obtenus, on peut donc conclure que le décalage hydraulique observé grâce aux données de la station de mesure ne provient pas d'une différence des débits d'alimentation. En effet, la différence entre les débits d'entrée supposés et les débits mesurés est faible (environ 5% qui peut être expliquée par des erreurs de manipulation). En plus d'avoir une faible différence, l'écart est constant sur les quatre mesures ce qui écarte définitivement le dysfonctionnement des pompes d'alimentation.

Pour connaître la source de ce décalage, un test traceur va être réalisé, mais il sera effectué après la fin de mon stage. Je peux donc seulement certifier que le décalage n'est pas induit par une différence des débits d'alimentation.

3.2. Traitement des données de la station de mesure monEAU suite à l'installation des lignes d'air pour le nettoyage automatique des capteurs

Suite à la connexion des lignes d'air pour effectuer un nettoyage automatique des capteurs, j'ai constaté un impact sur les données récoltées par la station de mesure. J'ai remarqué qu'à chaque insufflation d'air, il y avait du bruit au niveau du capteur (voir Figure 8). Pour que cela soit plus facile à comprendre, voici les conséquences du nettoyage automatique sur les données brutes.

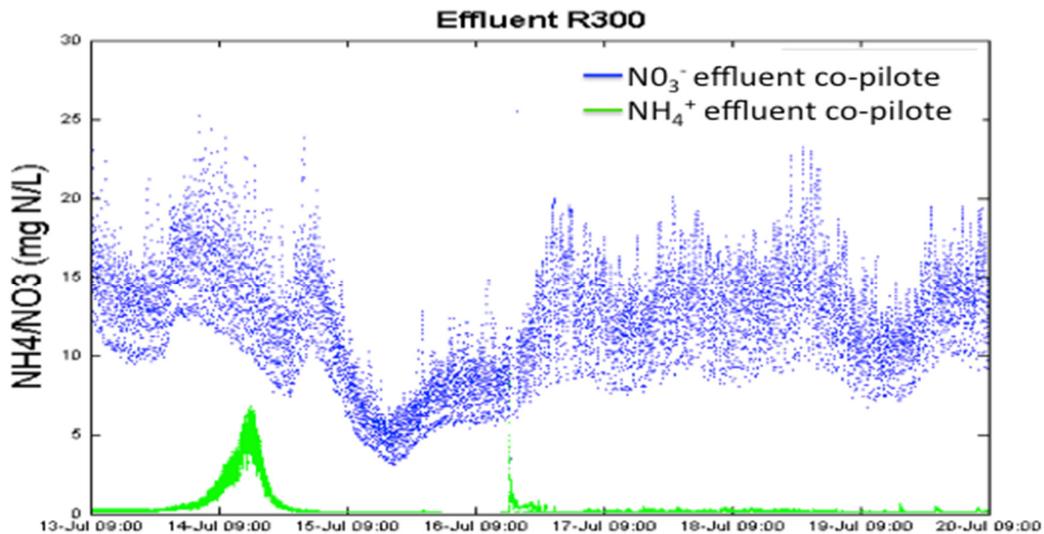


Figure 8 : L'impact du nettoyage automatique des capteurs sur les données brutes à l'effluent du co-pilote

Avec le nettoyage automatique, les données brutes sont inexploitable car trop bruitées. Pour résoudre ce problème, j'ai créé un code informatique sur MATLAB afin de réaliser un lissage des données. J'ai testé deux méthodes. La première consiste à prendre toutes les données dans une fenêtre choisie (15 ou 30 minutes) et d'en faire la moyenne. Je commence avec les données du début (par exemple du 13/07/2015 09:00 au 13/07/2015 9:30), et j'exécute cette tâche en avançant sur ma plage de données à un pas de temps fixe (la durée entre deux mesures du capteur, ici c'est 5 secondes) jusqu'à lisser toutes mes données. J'ai donc programmé le lissage des données sur MATLAB car il faut traiter énormément de données chaque semaine. La deuxième méthode est semblable à la première mais au lieu de faire la moyenne des données je fais la médiane. Voici le résultat du lissage des données.

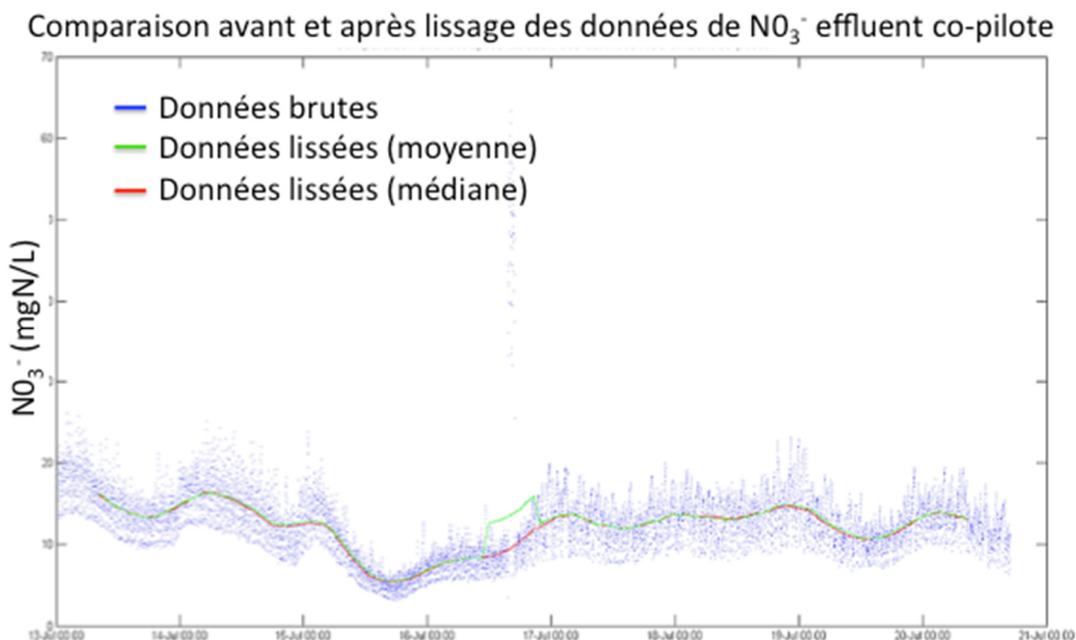


Figure 9 : Comparaison avant et après lissage des données NO_3^-

On constate que les deux méthodes (moyenne et médiane) de lissage des données sont pratiquement équivalentes lorsque les données sont comprises dans une gamme assez rapprochée. Par contre lorsque l'on a des données plus éloignées (avec des valeurs aberrantes), la méthode utilisant la médiane est bien plus efficace (voir Figure 9). Il faut donc lisser les données brutes avec la méthode utilisant la médiane car elle permet d'obtenir les résultats les plus représentatifs (autre exemple voir les Annexes 7 et 8).

V. Campagne de mesure de 24h sur le projet pilEAUte en temps sec

Afin d'améliorer nos connaissances sur la station de traitement des eaux usées du projet pilEAUte, une campagne de mesure détaillée a été conçue pour évaluer les dynamiques à différents endroits clés de la station :

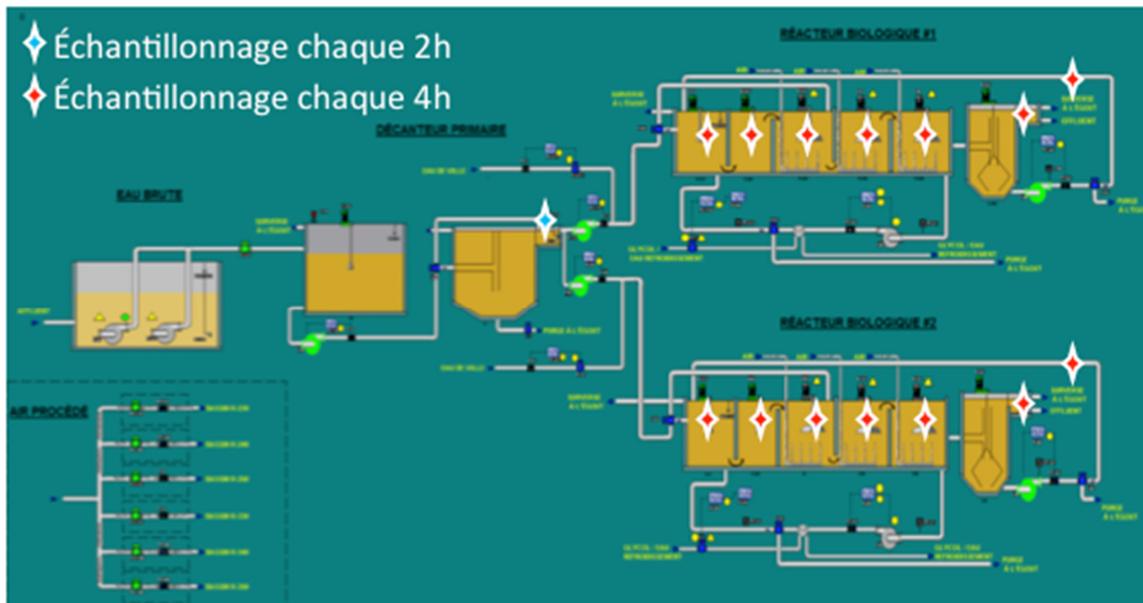


Figure 10 : Points d'échantillonnages de la campagne de mesure de 24h

Comme la dynamique est plus prononcée à l'entrée de la station, la fréquence d'échantillonnage est plus élevée (chaque 2h) qu'ailleurs dans le pilEAUte (4h). Pour une bonne compréhension du comportement de la station, il est important d'évaluer les concentrations des différents paramètres importants (MeS, MVeS, DCO_{tot}, DCO_{sol}, TN_{tot}, TN_{sol}, NH₄, (NO₂), NO₃, pH, Oxygène dissous).

La campagne de mesure de 24h c'est un véritable travail d'équipe. C'était la première fois que l'équipe de recherche réalisait une campagne aussi importante. Il faut être vraiment rigoureux et être bien organisé pour ne pas se laisser déborder par le nombre d'analyses à réaliser. Le passage entre les équipes est également très important pour garantir un travail de qualité. Le passage doit être rapide mais complet. L'équipe qui reprend les analyses doit être au courant de tout pour ne pas perdre des données.

Un autre facteur que nous ne contrôlons pas et qui est également très important c'est la météo. En effet, on voulait réaliser une campagne en temps sec, et au Québec, la météo est assez capricieuse. Donc après avoir changé plusieurs fois de date à cause de la météo, nous avons réalisé la campagne de mesure de 24h en temps sec. Je ne peux pas présenter l'intégralité de la campagne car il y a beaucoup trop de choses à dire, mais je vais essayer de ressortir les informations importantes que nous avons obtenues.

Comme je l'ai mentionné au-dessus, nous avons réalisé cette campagne en temps sec. Durant cette campagne, la recirculation interne du pilote était arrêtée pour cause de panne (moteur de la pompe hors service). L'échangeur de chaleur était donc arrêté ce qui signifie que la température de l'eau du pilote (environ 23°C) était supérieure à celle du co-pilote (fixée à 17°C).

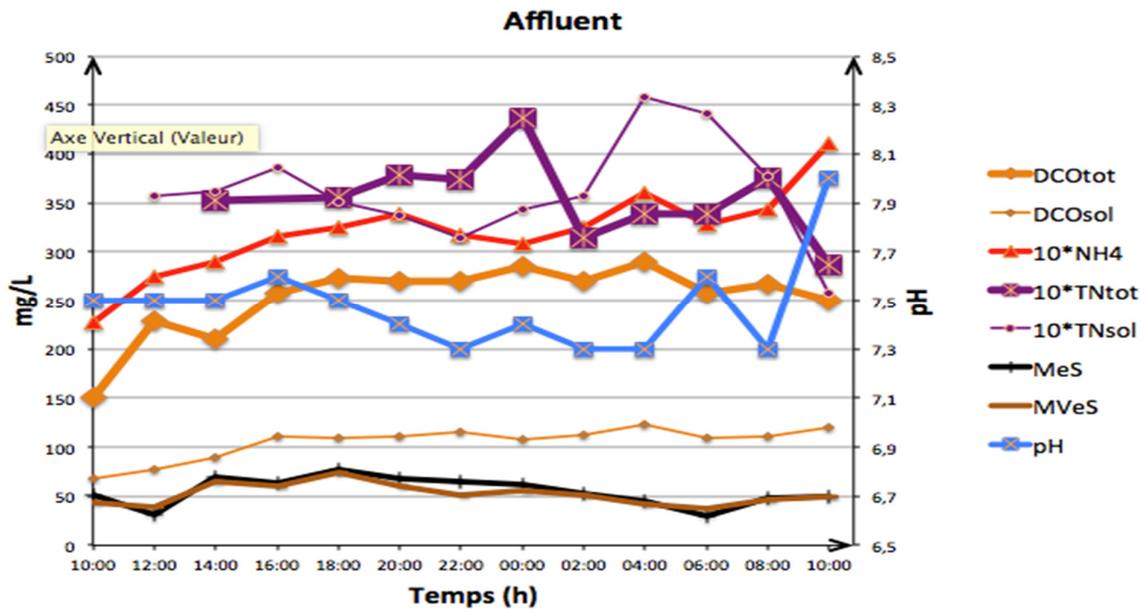


Figure 11 : Graphique des données de la campagne de mesure de 24h à l'affluent

À l'affluent (voir Figure 11), on constate que la concentration en MES ou MVeS est presque constante sur la journée. On peut voir que l'eau usée est très organique (le rapport MVeS/MES = 0,9). En ce qui concerne la DCO (totale et soluble), elle est plus faible au début et devient constante par la suite. On va voir par la suite que cette variation de DCO va se ressentir également en entrée de bassin biologique. Le pH de l'affluent est légèrement basique avec une forte augmentation vers 8h du matin. On a pu conclure que les mesures de l'azote total (totale et soluble) sont erronées. Déjà parce qu'il y a une incohérence entre TN_{TOT} et TN_{SOL} car c'est impossible que la partie soluble soit au-dessus du total. De plus en sachant que l'azote total est la somme de l'azote organique et de l'azote ammoniacal, l'azote total doit toujours être au-dessus de la valeur en NH_4^+ . Je ne peux donc pas exploiter ces résultats à ce moment.

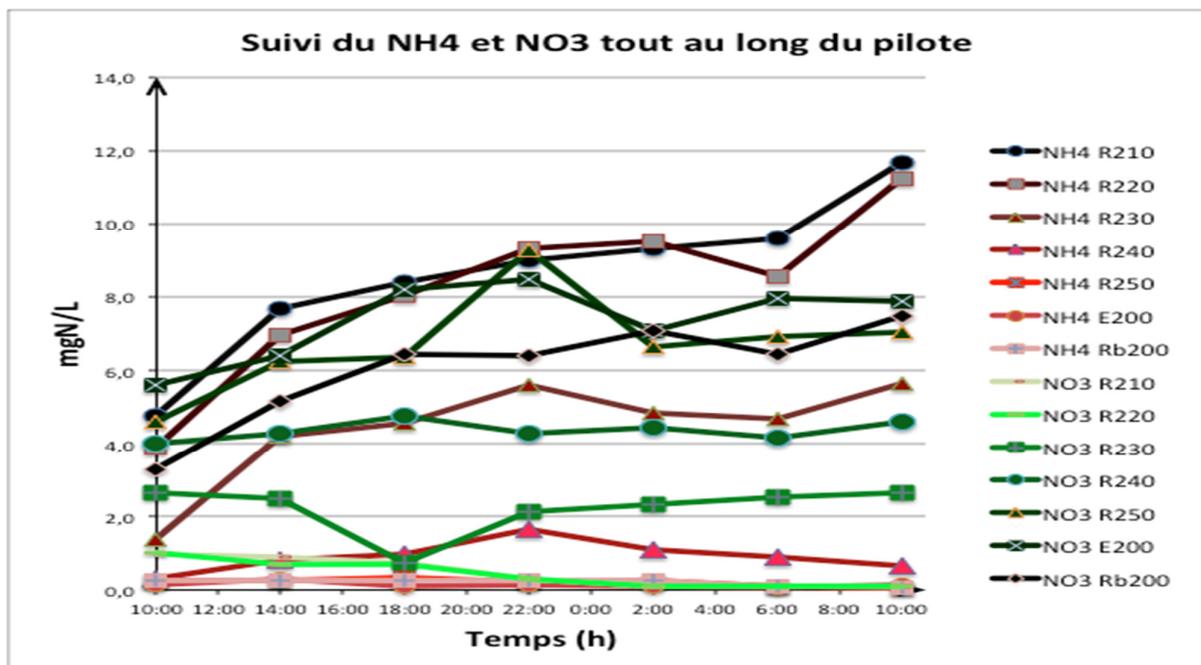


Figure 12 : Suivi de NH_4^+ et des NO_3^- tout au long du traitement secondaire du pilote

Les données concernant le suivi de l'azote ammoniacal et des nitrates tout au long du traitement secondaire (bassin biologique + décanteur secondaire) sur le pilote (voir Figure 12) apportent beaucoup d'informations.

On constate au sein des deux premiers bassins anoxiques que la concentration en NH_4^+ est quasiment constante ce qui est normal car en absence d'oxygène la nitrification n'est pas réalisée. Ensuite au sein des trois bassins aérobies, on observe une diminution de la concentration en NH_4^+ . En effet, en présence d'oxygène les bactéries autotrophes réalisent la nitrification. Les deux premiers bassins aérobies ont le même rendement de nitrification. À eux deux ils éliminent environ 80% de l'azote ammoniacal. Le troisième bassin aéré élimine le reste pour atteindre une concentration pratiquement nulle en sortie du bassin biologique. La nitrification fonctionne donc correctement au sein du pilote.

Pour les nitrates, la concentration est pratiquement nulle au sein des deux bassins anoxiques. En effet, en absence d'oxygène, les bactéries hétérotrophes réalisent la dénitrification. Pour ce faire, elles ont besoin de matières organiques. On constate qu'au début de la campagne, la concentration en NO_3^- n'est pas tout à fait nulle à la fin des zones anoxiques. Ceci peut s'expliquer en regardant les résultats de l'affluent. En effet, la DCO était plus faible en début de campagne ce qui à jouer le rôle de facteur limitant pour la dénitrification. Dès que la DCO est remontée, le rendement de la dénitrification s'est amélioré. La concentration en nitrates est pratiquement nulle car sur le pilote, la recirculation interne était arrêtée. Par conséquent, il n'y a pratiquement pas de nitrates qui sont renvoyés en tête de filière. Ensuite au niveau des trois bassins aérobies, les concentrations en nitrates augmentent proportionnellement à la décroissance de la concentration en azote ammoniacal. Comme je l'ai expliqué au-dessus, la nitrification est réalisée au sein des trois bassins aérés. Il y a donc une production de nitrates au sein de ses bassins. On retrouve la corrélation entre l'élimination de l'azote ammoniacal et la production de nitrates en regardant la figure 12.

Normalement on devrait obtenir la même concentration en NO_3^+ entre le dernier bassin aérobie et la sortie du décanteur secondaire car les nitrates sont majoritairement solubles. On constate que pour certaines heures, la concentration en nitrates au niveau du dernier bassin aérobie est inférieure à celle en sortie du décanteur primaire. Cette différence peut être expliquée par le fait que certains échantillons ont eu une durée d'entreposage trop importante (supérieure à 4h). Dans ces conditions, les bactéries ont consommé l'oxygène de l'échantillon ce qui a permis de réaliser un début de dénitrification au sein de l'échantillon. Donc la vraie concentration en NO_3^+ du dernier bassin aéré est celle de l'effluent (sortie du décanteur secondaire) du pilote car les bactéries ont décanté au sein du décanteur secondaire.

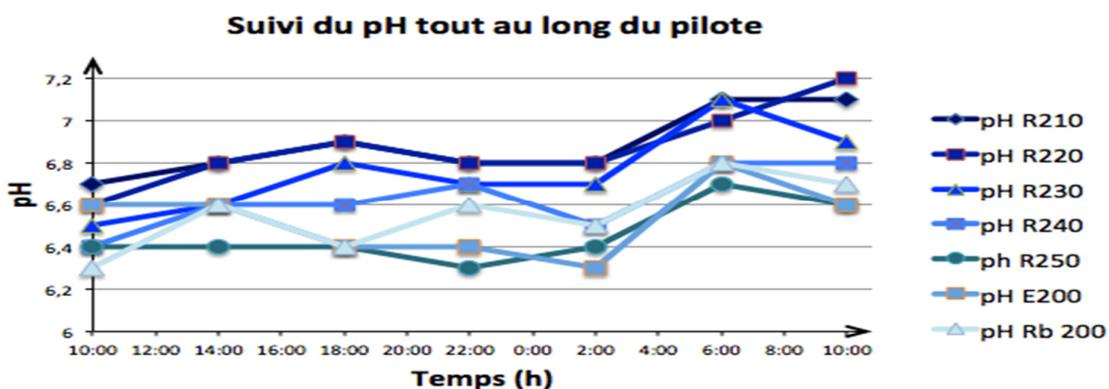


Figure 13 : Suivi du pH tout au long du traitement secondaire du pilote

Dans les deux premiers bassins anoxiques, le pH est constant (Figure 13). En effet la dénitrification n'apporte pas d'acidification du milieu. Par contre au sein des trois bassins aérobies, le pH chute. Cette diminution du pH provient de la production d'ions hydrogènes lors de la nitrification.

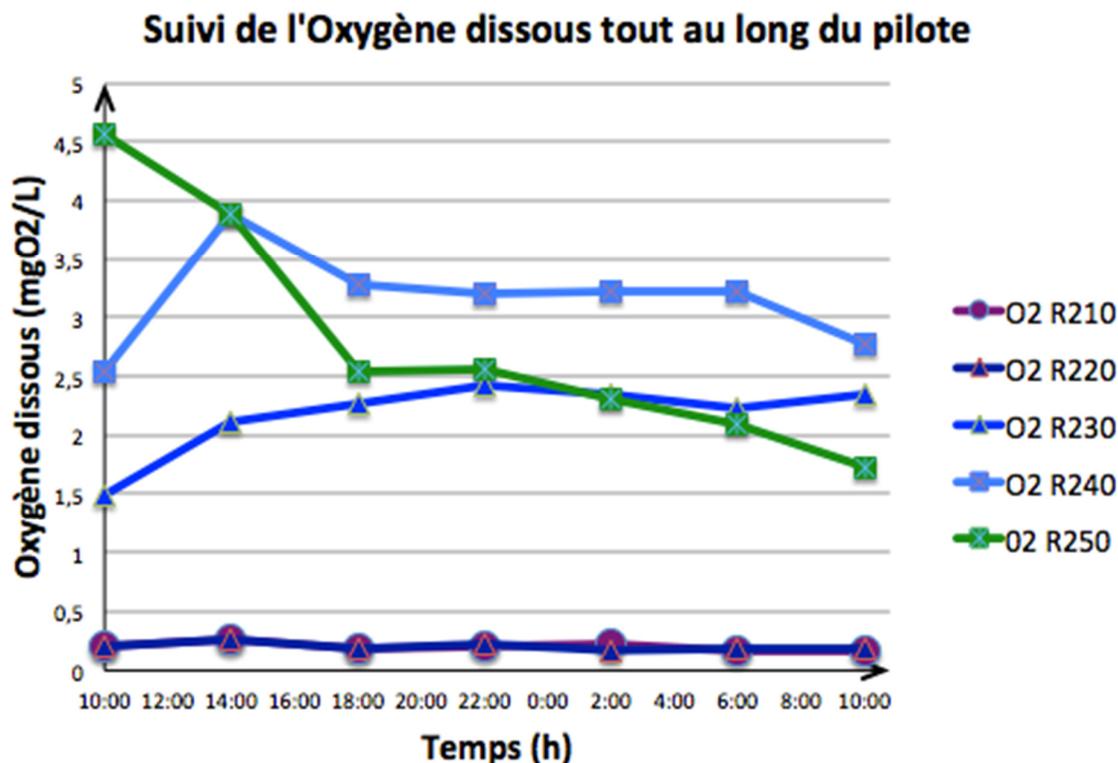


Figure 14 : Suivi de l'oxygène dissous tout au long du bassin biologique

La mesure de l'oxygène dissous a été effectuée à l'aide d'une sonde à oxygène dissous. En pratique, ça a été difficile d'obtenir des bonnes valeurs car le temps de stabilisation est très long et les variations sont importantes. De plus pour pouvoir effectuer les mesures, il faut sortir le capteur d'un bassin pour le remettre dans un autre. Il y a donc un passage dans l'air ce qui n'aide pas à stabiliser le capteur. De plus, le passage d'un bassin aérobie vers un bassin d'anoxie rallonge encore la durée de stabilisation.

Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas de contamination du deuxième bassin d'anoxie par le premier bassin aéré. Toutefois, on observe que la teneur en oxygène dissous n'est pas tout à fait de 0mgO₂/L. Cela provient du seuil de détection du capteur. En effet, la limite de détection du capteur est de 0,2mgO₂/L. On peut donc dire que la concentration en oxygène dissous est quasiment de 0mgO₂/L au sein des deux bassins d'anoxies.

Par soucis de place je ne peux pas faire l'analyse des résultats obtenus pour le co-pilote, mais sachez que nous avons réalisé les mêmes analyses. Je mets les graphiques illustrant les données du co-pilote en annexe (voir Annexe 9, 10 et 11).

Avec le nombre d'analyses réalisées au laboratoire, j'ai décidé de comparer ces données avec les valeurs obtenues par les capteurs afin d'affiner les réglages des capteurs. Voici les résultats obtenus pour certains capteurs.

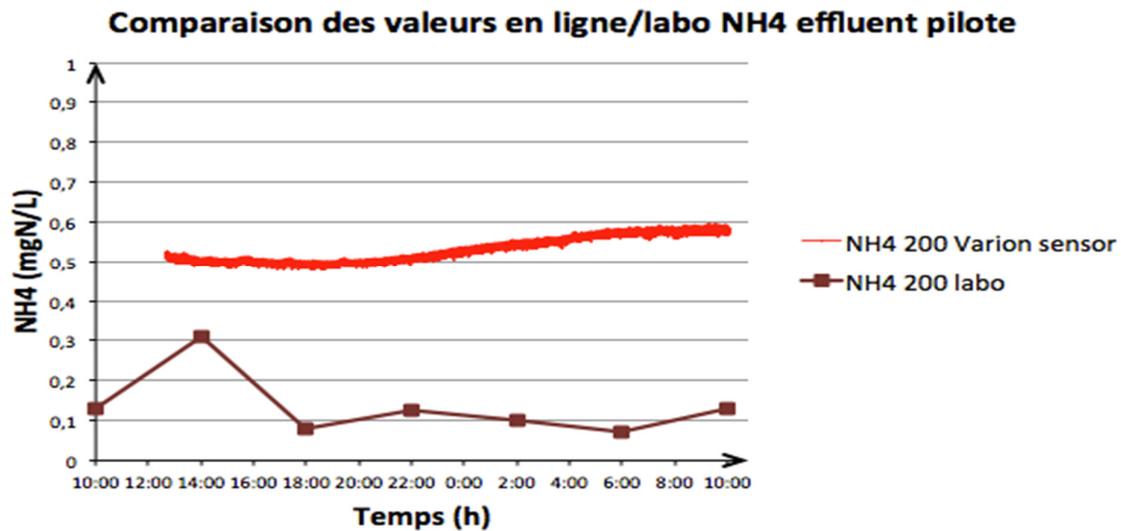


Figure 15 : Graphique comparant le suivi de l'azote ammoniacal à l'effluent du pilote par les capteurs et avec les données du laboratoire

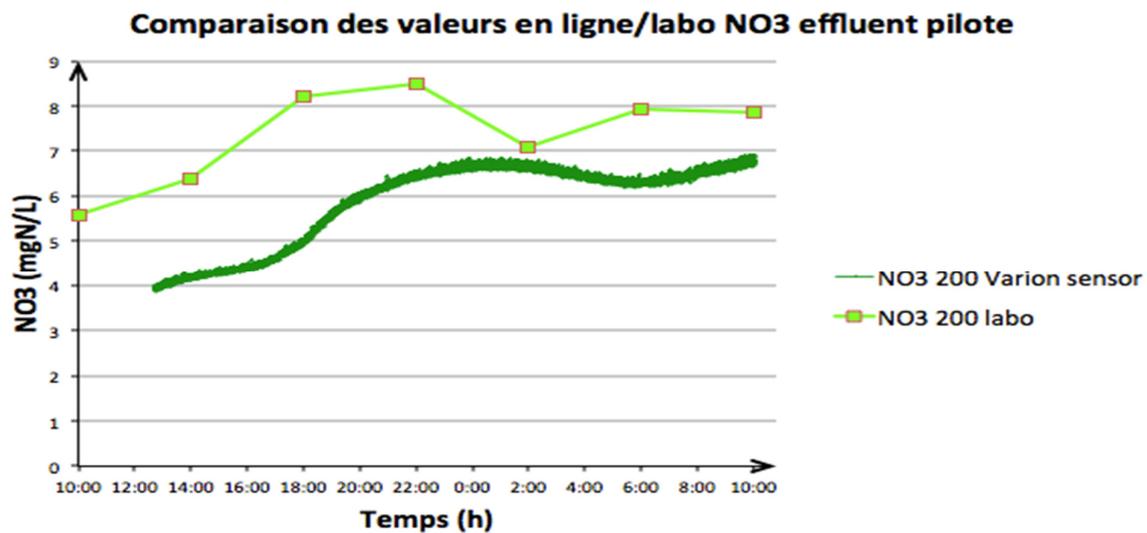


Figure 16 : Graphique comparant le suivi des nitrates à l'effluent du pilote par les capteurs et avec les données du laboratoire

Pour le capteur Varion R200, situé à l'effluent du pilote, les résultats sont cohérents mais il faut encore améliorer les réglages (validation, calibration) surtout pour les nitrates. En effet, pour l'azote ammoniacal, comme l'échelle est petite, l'erreur est assez faible. Pour les nitrates, l'erreur est plus importante mais l'allure est intéressante car les variations sont similaires.

Comparaison des valeurs en ligne/labο NH4 effluent co-pilote

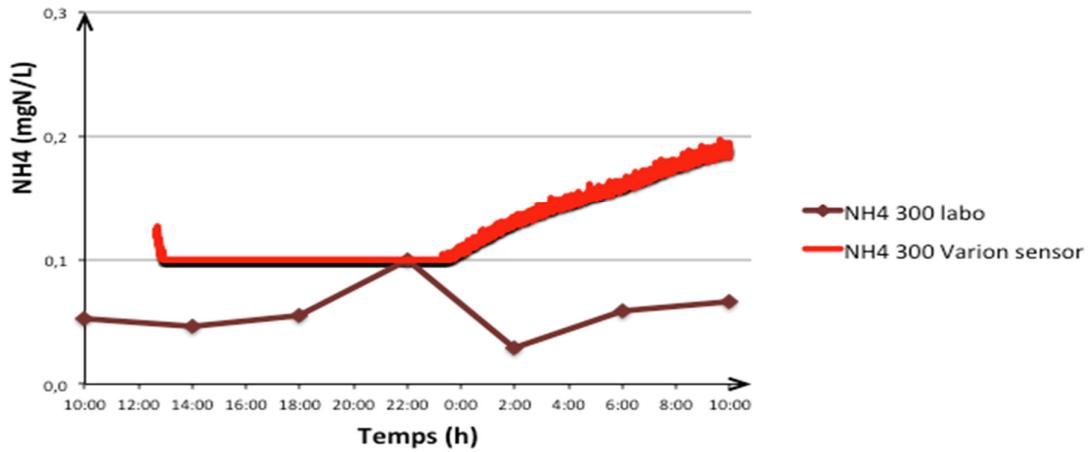


Figure 17 : Graphique comparant le suivi de l'azote ammoniacal à l'effluent du co-pilote par les capteurs et avec les données du laboratoire

Comparaison des valeurs en ligne/labο NO3 effluent co-pilote

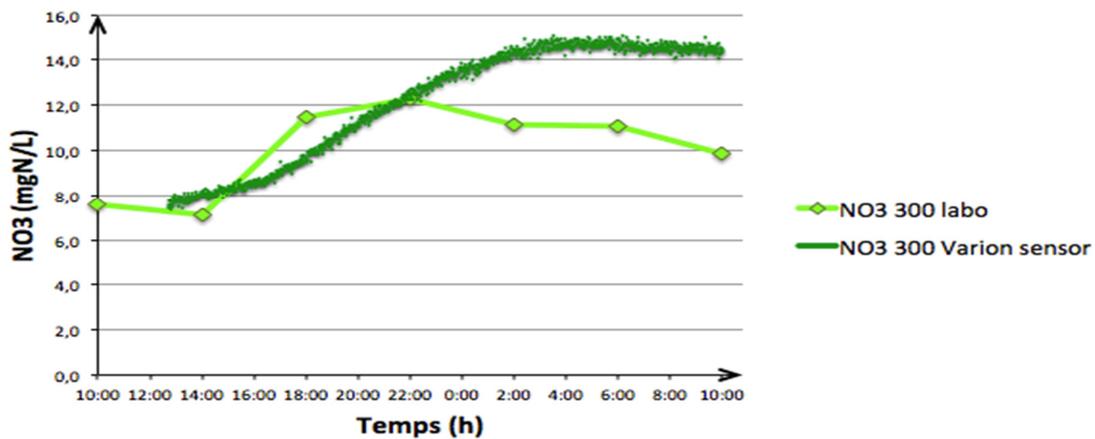


Figure 18 : Graphique comparant le suivi des nitrates à l'effluent du co-pilote par les capteurs et avec les données du laboratoire

En ce qui concerne le capteur Varion R300, situé à l'effluent du co-pilote, les résultats sont satisfaisants pour le suivi de l'azote ammoniacal mais un peu moins bon pour le suivi des nitrates. En effet, en sachant que le seuil de détection du capteur est de 0,1mgN/L, l'erreur est minimale pour l'azote ammoniacal. Pour les nitrates, il faut continuer à calibrer le capteur pour réduire les erreurs.

Conclusion

Ce stage a été enrichissant dans tous les domaines. Tout d'abord, j'ai acquis énormément de connaissances (théoriques et pratiques) sur le traitement des eaux usées.

J'ai renforcé ma capacité à travailler en équipe et j'ai compris l'importance d'avoir une équipe soudée dans les moments importants (recherche de solution face à d'éventuels problèmes, réaliser une campagne de mesure sur 24h,...).

En sachant que le projet est très jeune, j'ai pris énormément de plaisir à travailler à l'élaboration de celui-ci. En effet, je trouve que j'ai eu de la chance de travailler sur le lancement du projet car il faut faire face à différentes problématiques (réglages du pilote, problèmes divers). La résolution des problèmes permet d'améliorer nos connaissances sur le fonctionnement de la station.

Avec ce stage, j'ai pu faire le lien entre les connaissances théoriques que j'ai acquies en cours et la pratique.

J'ai également réalisé l'importance de travailler avec des stations de mesure mais également l'importance de l'entretien et des réglages des capteurs pour pouvoir obtenir de bonnes données.

Pour conclure, ce stage s'inscrit dans la continuité de ma formation, j'en ressors grandi et je suis fière d'avoir participé à un tel projet.

Bibliographie

Beaupré, M, (2010). *Characterization of on-line sensors for water quality monitoring and process control*. Mémoire.

L. Rieger, P. V, (2008). monEAU : a platform for water quality monitoring networks. *Water science and technology* , 57, pp. 1079-1086.

M. Thomann, L. R, (2002). An efficient monitoring concept with control charts for on-line sensors . *Water Science and Technology* , 46, pp. 107-116.

Paul Lessard, P. V, (2014). *traitement des eaux usées*. Cours.

Plana, Q. (2013). *Efficient on-line monitoring of river water quality using automated measuring stations*. Mémoire.

S::can, (2007). *Ammo::lyser probe V1*. Manuel d'utilisation.

S::can, (2011). *Spectrometer probe V2*. Manuel d'utilisation.

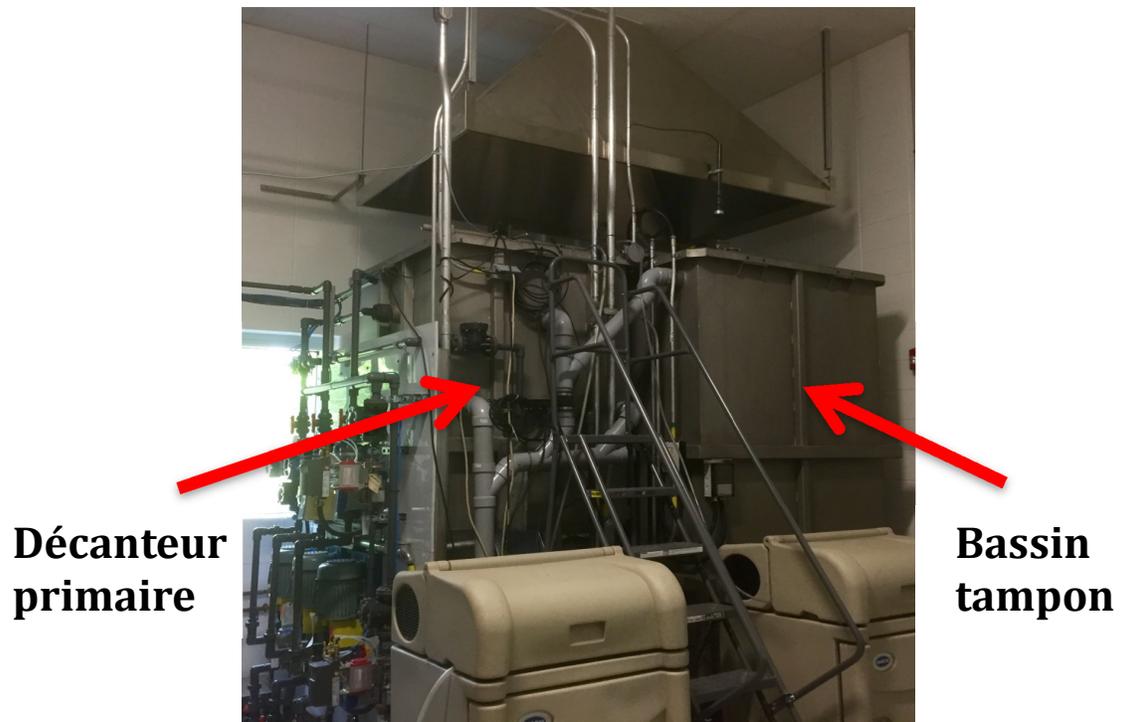
Sadowski, A.-G. (2015). *Traitement des eaux résiduaires urbaines*. Cours .

Wissenschaftlich-Technische Werkstätten, (2009). *pH 700 IQ*. Manuel d'utilisation.

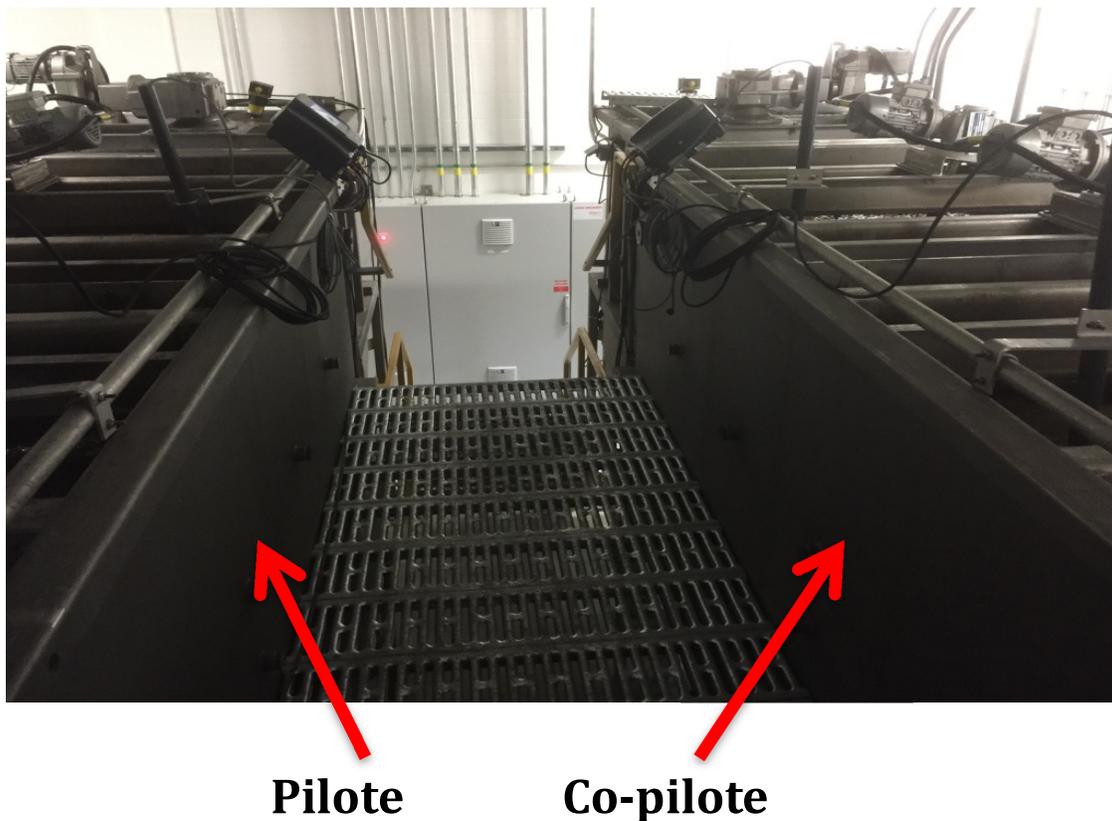
Wissenschaftlich-Technische Werkstätten, (2009). *Varionplus 700 IQ*. Manuel d'utilisation.

Wissenschaftlich-Technische Werkstätten, (2003). *Visoturb 700 IQ* . Manuel d'utilisation.

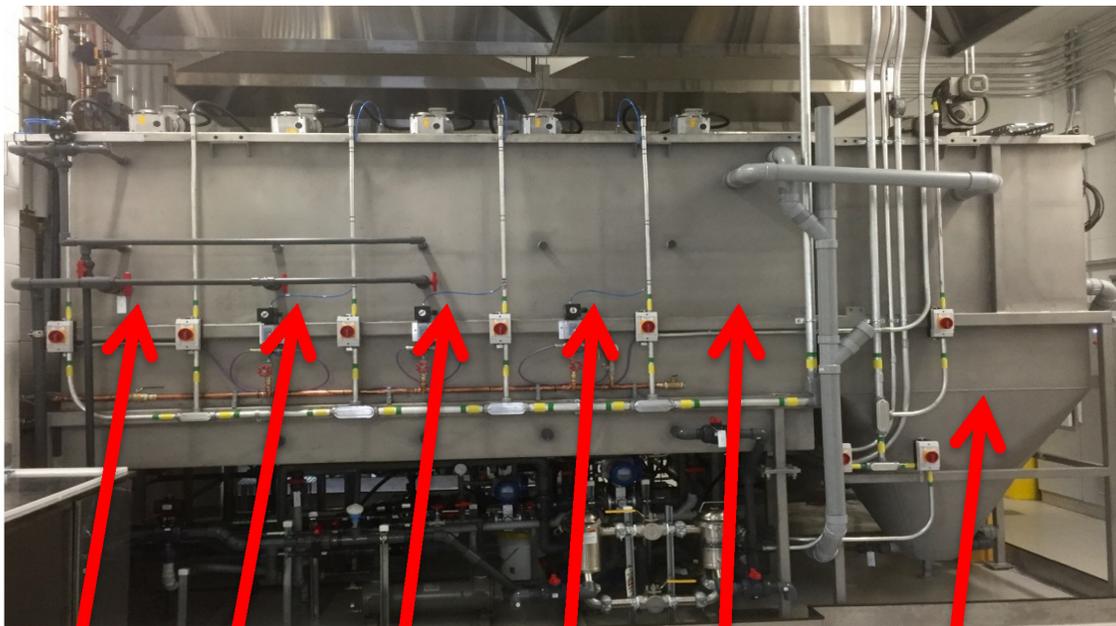
Annexes



Annexe 1 : Photo du bassin tampon et du décanteur primaire du projet pilEAUte

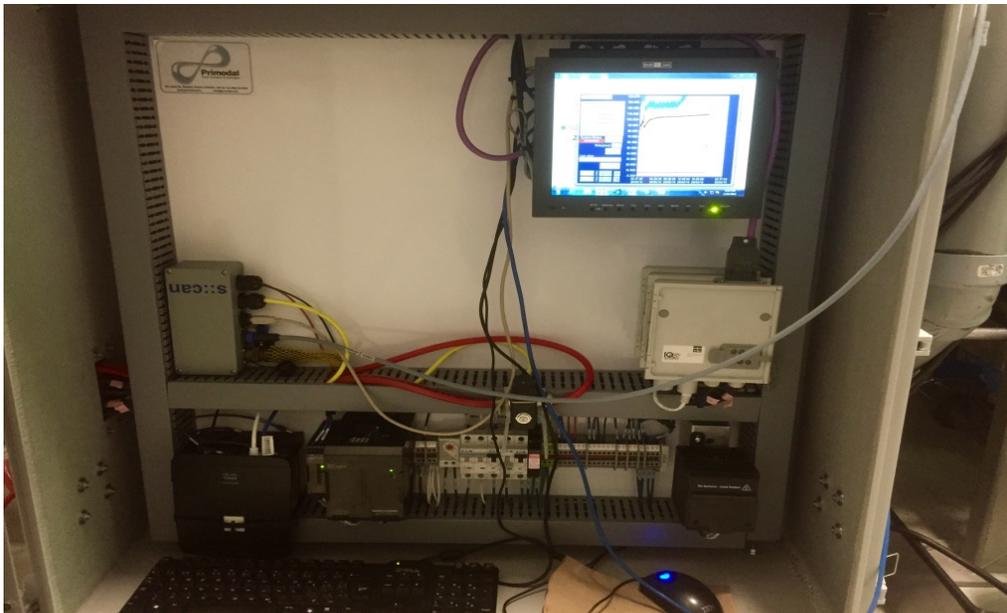


Annexe 2 : Photo des deux lignes de traitement secondaires (pilote et co-pilote)



1^{er} bassin anoxie
2^{ème} bassin anoxie
1^{er} bassin aérobie
2^{ème} bassin aérobie
3^{ème} bassin aérobie
Décanteur secondaire

Annexe 3 : Description détaillée d'une ligne de traitement secondaire

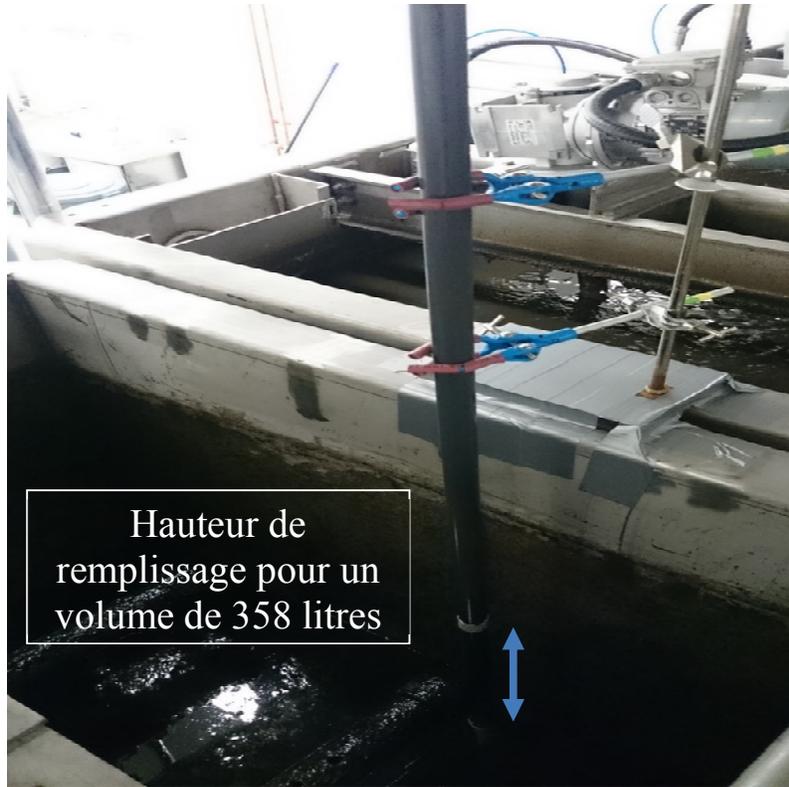


Annexe 4 : Photo de la station de mesure monEAU permettant de récolter les données des capteurs

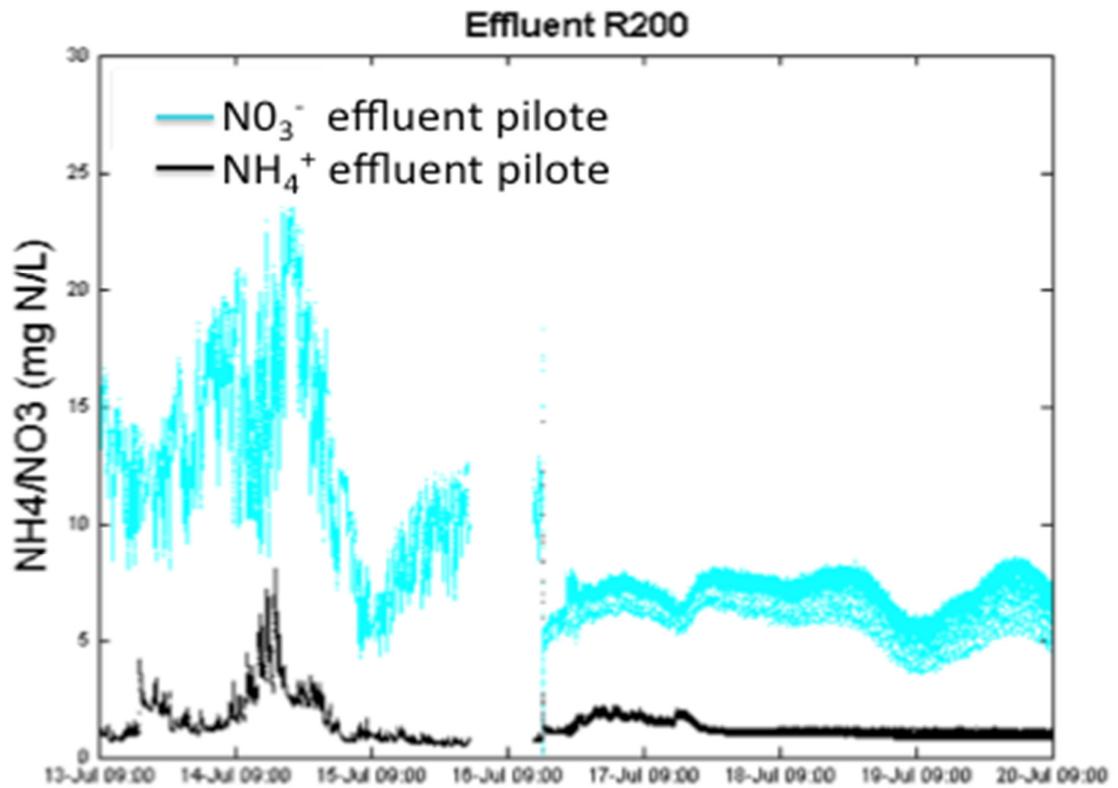


Ligne d'air **Tête de nettoyage**

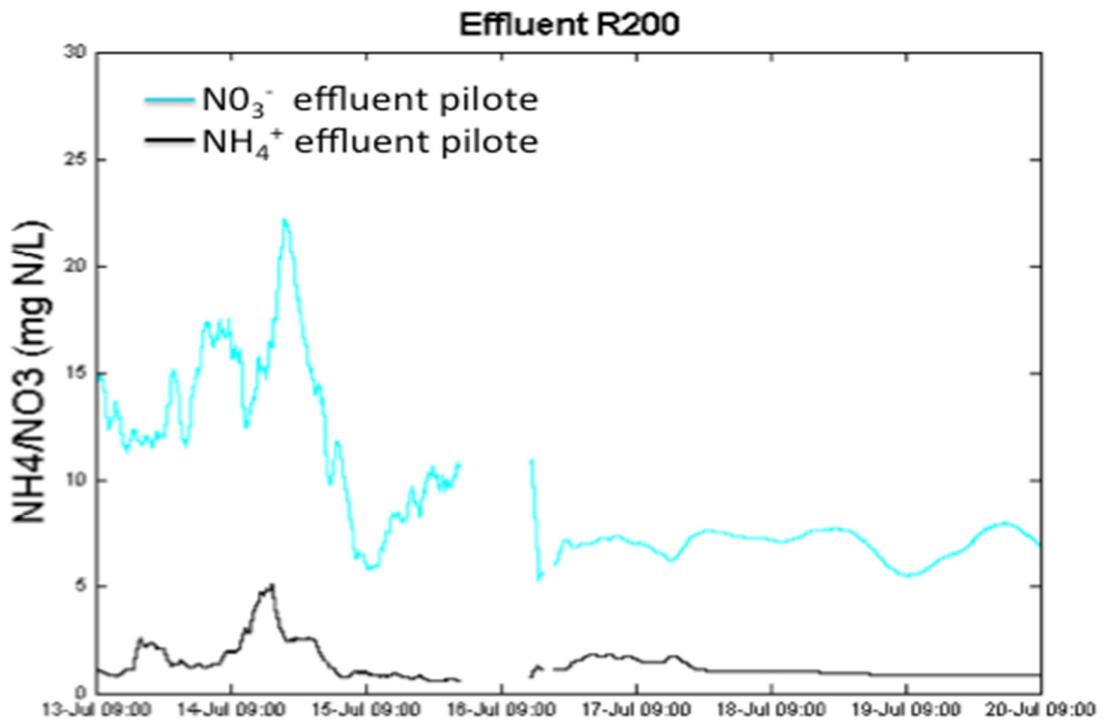
Annexe 5 : Dispositif de nettoyage automatique par insufflation d'air d'un capteur



Annexe 6 : Délimitation du volume d'étude dans le décanteur secondaire

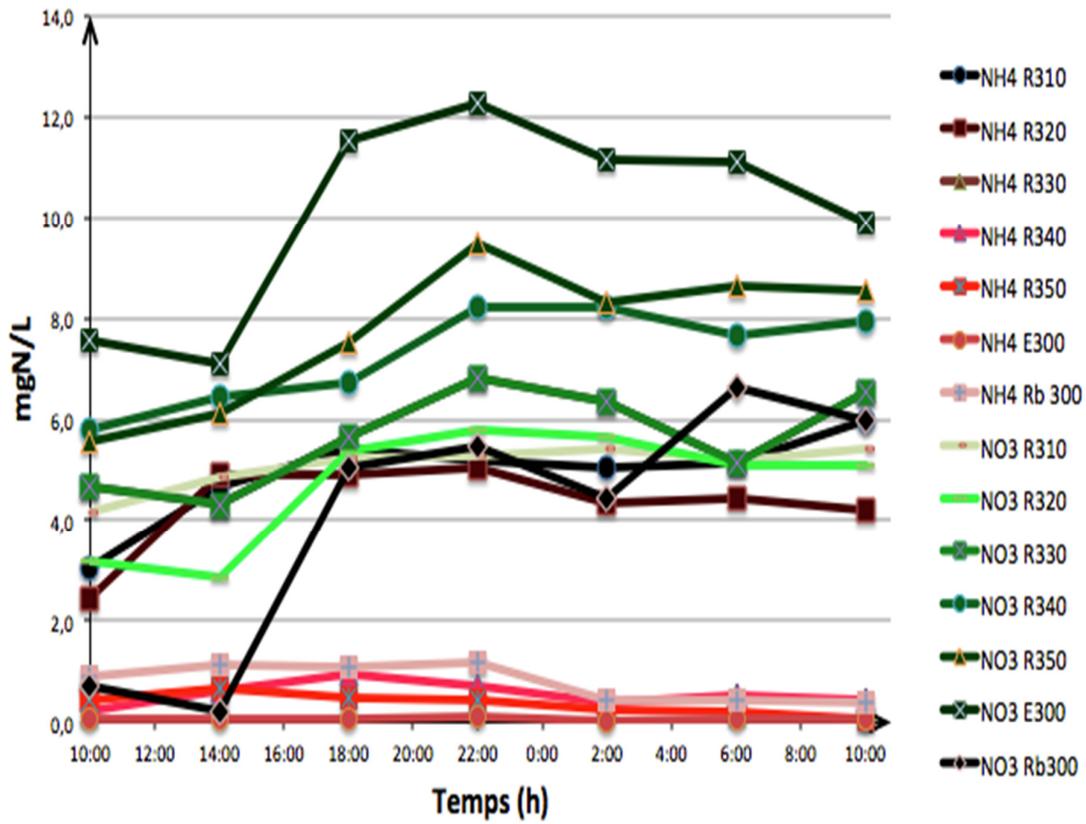


Annexe 7 : Suivi de l'azote ammoniacal et des nitrates à l'effluent du pilote avant lissage des données



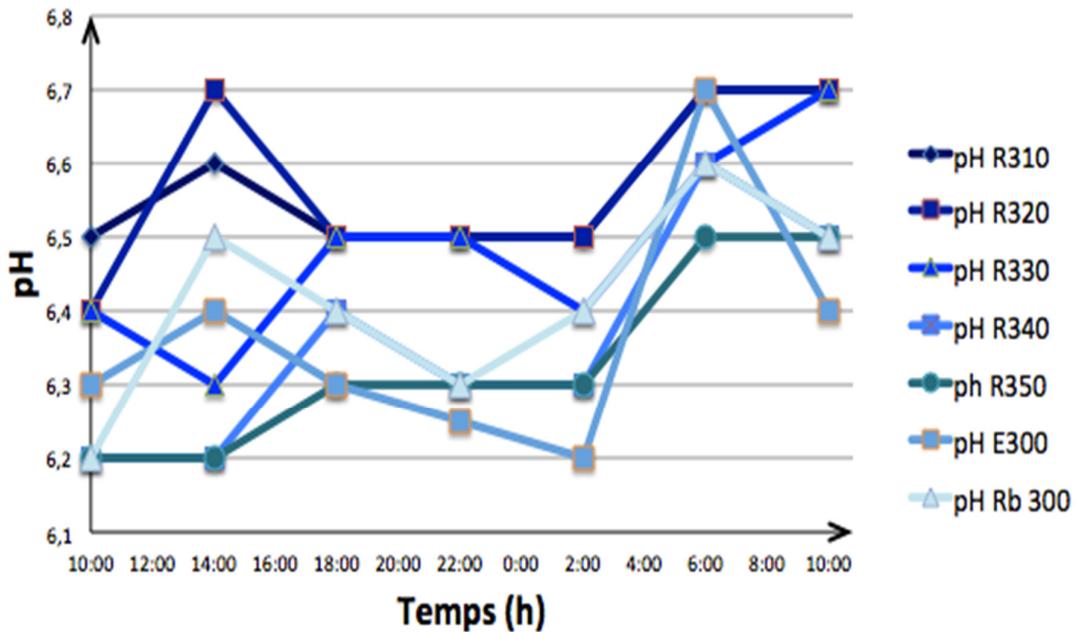
Annexe 8 : Suivi de l'azote ammoniacal et des nitrates à l'effluent du pilote après lissage des données

Suivi du NH4 et NO3 tout au long du co-pilote



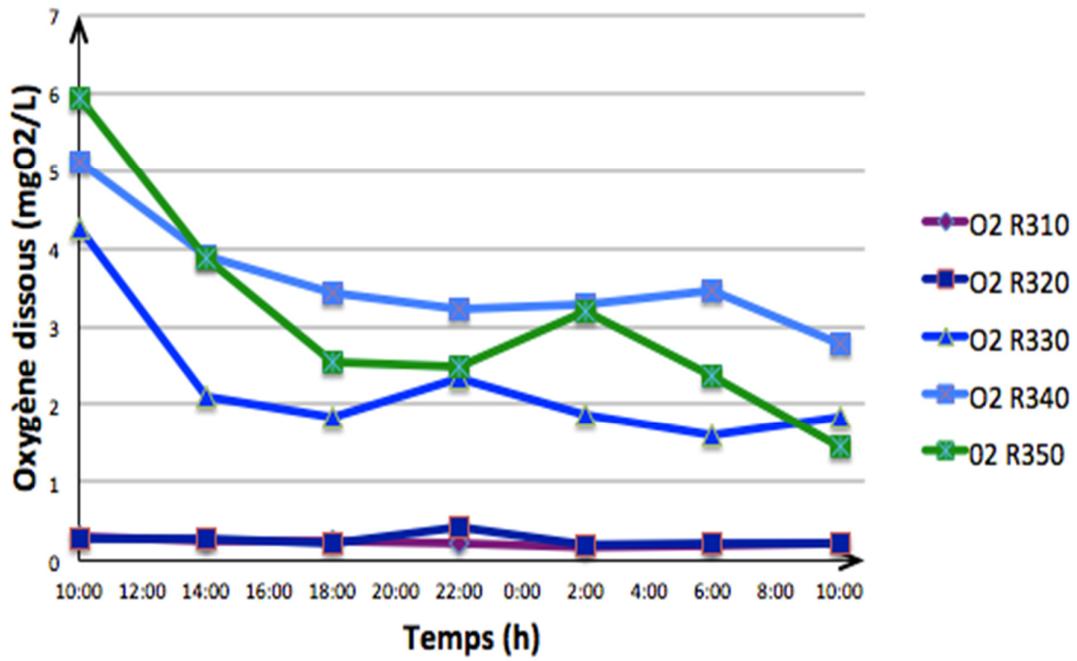
Annexe 9 : Graphique montrant le suivi de l'azote ammoniacal et des nitrates sur le co-pilote réalisé durant la campagne de mesure de 24h

Suivi du pH tout au long du co-pilote



Annexe 10 : Graphique montrant le suivi du pH sur le co-pilote réalisé durant de la campagne de mesure de 24h

Suivi de l'oxygène dissous tout au long du co-pilote



Annexe 11 : Graphique montrant le suivi de l'oxygène dissous sur le co-pilote réalisé durant la campagne de mesure de 24h