



HAL
open science

Mesure in situ des émissions de N₂O. Rapport de campagne n°3 (filtres plantés de roseaux).

J. Bollon, Ahlem Filali, Y. Fayolle, Sylvie Gillot

► To cite this version:

J. Bollon, Ahlem Filali, Y. Fayolle, Sylvie Gillot. Mesure in situ des émissions de N₂O. Rapport de campagne n°3 (filtres plantés de roseaux).. [Rapport de recherche] irstea. 2015, pp.31. hal-02605271

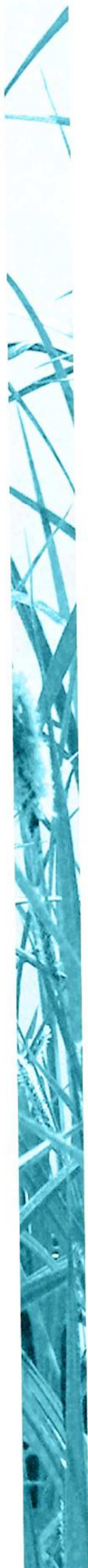
HAL Id: hal-02605271

<https://hal.inrae.fr/hal-02605271>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Mesure *in situ* des émissions de N₂O dans les procédés de traitement des ERUs par filtres plantés de roseaux à écoulement vertical

Rapport de campagne n°3

Final

Julien BOLLON	(Irstea)
Ahlem FILALI	(Irstea)
Yannick FAYOLLE	(Irstea)
Sylvie GILLOT	(Irstea)

Décembre 2015

- **AUTEURS**

Julien BOLLON, Ingénieur de recherche (Irstea), julien.bollon@irstea.fr

Ahlem FILALI, Chargée de recherche (Irstea), ahlem.filali@irstea.fr

Yannick FAYOLLE, Ingénieur de recherche (Irstea), yannick.fayolle@irstea.fr

Sylvie Gillot, Directrice de recherche (Irstea), sylvie.gillot@irstea.fr

- **CORRESPONDANT**

Lauriane Vasseur, Chargée de mission sur l'eau et les aménagements urbains (Onema), lauriane.vasseur@onema.fr

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : France

Niveau de lecture : professionnels

• RESUME

Des mesures d'émission de protoxyde d'azote (N₂O) ont été réalisées sur deux stations d'épuration (stations 3 et 4), situées dans le Loiret et fonctionnant selon le procédé des filtres plantés de roseaux à écoulement vertical. Pour ces deux systèmes, un suivi poussé des émissions de protoxyde d'azote, a été réalisé sur les phases gazeuse et liquide. En plus du N₂O, les émissions gazeuses du méthane (CH₄) et du dioxyde de carbone (CO₂) ont été caractérisées. Parallèlement à cela, une analyse des paramètres de fonctionnement de chaque station (charges en azote entrante et traitée, concentration des formes de l'azote dans le liquide, ...) a été réalisée afin de caractériser les principaux facteurs favorisant la production de N₂O.

Les conclusions majeures de ce travail sont :

- Les facteurs d'émission de N₂O_{gazeux} mesurés sont respectivement de 0,46 % et de 0,64 % de la charge en azote entrant pour les stations 3 et 4. Ces facteurs sont 22 et 28 fois supérieurs à ceux estimés par la méthode du GIEC (pour les émissions directes) ;
- En tenant compte des émissions gazeuses et liquides, le facteur d'émission mesuré sur la station 4 atteint 0,78 %, ce qui est 2,4 fois supérieur à celui estimé par la méthode du GIEC (pour les émissions directes et indirectes) ;
- De fortes dynamiques des émissions ont été observées ce qui indique une variabilité temporelle importante. Dans la pratique, une mesure continue des émissions sur au minimum un cycle de filtration (alimentation + repos) est nécessaire pour caractériser les émissions de ce type de procédé pour une période donnée de l'année ;
- Une variabilité spatiale des émissions a aussi été observée et indique l'importance de l'échantillonnage dans la caractérisation pertinente des émissions de N₂O ;
- L'oxygénation du massif filtrant semble être un facteur important influençant les émissions de N₂O et CH₄ dans les deux stations étudiées ;
- De fortes émissions de méthane (CH₄) ont été mesurées dans la station 3 (2,64 %, kgC-CH₄/kgDCO_{entrante}). Ces fortes émissions ont été imputées à la mauvaise oxygénation du filtre due à son colmatage important.

• **MOTS CLES : PROTOXYDE D'AZOTE, N₂O, GAZ A EFFET DE SERRE, FILTRES PLANTES DE ROSEAUX, DENITRIFICATION, STATION D'EPURATION.**

- **GREENHOUSE GASES EMISSIONS FROM VERTICAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS**
- **ABSTRACT**

Nitrous oxide emissions have been investigated in two different WWTPs using vertical subsurface flow constructed wetlands for water treatment. N₂O emissions have been monitored in both gaseous and liquid phases. In addition, CH₄ and CO₂ gaseous emissions were characterized. Operational parameters of the wastewater treatment plants (such as nitrogen load, concentration and forms of nitrogen) have been followed in order to highlight the main parameters inducing N₂O emissions.

The main results of the measurement campaigns are:

- Gaseous N₂O emission factors measured represented 0.46 % and 0.64 % of inlet nitrogen load in WWTP 3 and 4. These factors are more than 22 and 28 times higher than those proposed by IPCC ;
- In WWTP4, total N₂O emission factor (gaseous + liquid) was estimated to be 0.78 %; which is 2.4 times higher than the one obtained with the IPCC accounting approach (taking into account both direct and indirect emissions);
- High dynamics of GHG emissions have been observed. Practically, this implies that measurements must be performed during at least one total cycle of the studied filter (feeding + resting period) for to be relevant;
- A spatial variability has also been observed showing the importance of the sampling strategy on emission evaluation ;
- The oxygen content of the filter media has been evaluated as an important factor governing N₂O and CH₄ emissions.
- High CH₄ emissions have been measured in WWTP 3 (2.64 %, kgCH₄-C/kgCOD_{inlet}) and linked to the poor oxygenation of the filter due to its important clogging.

- **KEY WORDS: NITROUS OXIDE, N₂O, GREENHOUSE GAS, VERTICAL SUBSURFACE FLOW, CONSTRUCTED WETLANDS, FULL-SCALE.**

- **SOMMAIRE**

1. Contexte et objectifs	6
2. Matériel et méthodes	6
2.1. Caractéristiques des stations étudiées	6
2.1.1. Station 3.....	6
2.1.2. Station 4.....	7
2.2. Méthode de détermination des flux gazeux de gaz à effet de serre	8
2.3. Autres mesures	9
2.4. Plan d'échantillonnage pour la mesure des émissions gazeuses	9
3. Résultats	11
3.1. Station 3	11
3.1.1. Fonctionnement de l'installation	11
3.1.1.1. Caractéristiques de l'influent et de l'effluent.....	11
3.1.1.2. Charges et rendements.....	12
3.1.2. Emissions de gaz à effet de serre (GES)	13
3.1.2.1. Emissions sur les deux lits de filtration.....	13
3.1.2.2. Variabilité spatiale des émissions.....	14
3.1.2.3. Variabilité temporelle des émissions.....	14
3.1.3. Facteurs d'émission mesurés	15
3.2. Station 4	16
3.2.1. Fonctionnement de l'installation	16
3.2.1.1. Caractéristiques de l'influent et de l'effluent.....	16
3.2.1.2. Charges et rendements.....	17
3.2.2. Analyse des concentrations gazeuses dans le massif filtrant	19
3.2.2.1. Premier étage de filtration.....	19
3.2.2.2. Second étage de filtration.....	20
3.2.3. Emissions de GES	21
3.2.3.1. Emissions sur les deux lits de filtration.....	21
3.2.3.2. Variabilité spatiale des émissions.....	22
3.2.3.3. Variabilité temporelle des émissions.....	23
3.2.4. Emissions de N₂O dissous	24
3.2.5. Facteurs d'émission	25
4. Discussion	25
4.1. Analyse des émissions de GES	25
4.1.1. Protocole de mesure.....	25
4.1.2. Comparaison avec les facteurs par défaut du GIEC.....	26
4.1.3. Contribution des trois GES au bilan carbone.....	26
4.2. Lien entre les émissions de GES et les conditions opératoires des procédés	27
5. Conclusion et perspectives	27
6. Table des illustrations	29
7. Liste des tableaux	29
8. Remerciements	30

• MESURE IN SITU DES EMISSIONS DE N₂O : RAPPORT DE CAMPAGNE N°3

1. Contexte et objectifs

Dans le cadre de la convention Onema-Irstea de 2013-2015, sous action 2 de l'action 39 « collecte de données pour l'ACV : facteurs d'émission du N₂O », des mesures d'émission de gaz à effet de serre ont été réalisées en 2014 et 2015 sur deux sites traitant les eaux usées par le procédé de filtres plantés de roseaux à écoulement vertical. Les objectifs de ces deux campagnes des mesures étaient :

- La caractérisation des facteurs d'émission de N₂O pour les stations étudiées ;
- L'évaluation des principaux facteurs opératoires des procédés favorisant la production et l'émission de N₂O ;
- Les mesures réalisées associaient :
 - le suivi des émissions gazeuses et liquides de protoxyde d'azote à différentes positions des filtres sur les étages 1 et 2;
 - le suivi des émissions gazeuses de méthane et de dioxyde de carbone à différentes positions des filtres sur les étages 1 et 2;
 - la caractérisation des performances épuratoires des procédés par des bilans entrée / sortie et un suivi en ligne des formes de l'azote (NH₄⁺, NO₃⁻ et N₂O dissous) ;
 - l'instrumentation des procédés (lorsque cela était possible) en divers capteurs afin d'évaluer l'influence de certains paramètres opératoires sur les émissions observées.

Ces mesures ont été réalisées par l'équipe Irstea d'Antony (Julien Bollon, David Delage, Yannick Fayolle, Ahlem Filali, Pierre Mauricrace et Sylvain Pageot).

2. Matériel et méthodes

2.1. Caractéristiques des stations étudiées

2.1.1. Station 3

La station 3 a été construite en Janvier 2001. Sa capacité de traitement est de 270 EH avec un débit nominal par temps sec de 54 m³/j. Le schéma de fonctionnement de cette station est détaillé sur la Figure 1.

L'influent (issu d'un réseau séparatif) passe par un dégrilleur sommaire puis entre dans un poste de relèvement composé de deux cuves cylindriques. Une fois ces cuves remplies d'un volume maximal d'environ 3,80 m³, une pompe d'alimentation injecte l'influent sur le premier étage de filtration sous forme d'une bâchée (injection rapide de la totalité du volume des cuves). Ce premier étage est constitué de trois lits à écoulement vertical de 9 m de large par 12 m de long (soit une surface de 108 m² par lit). La superficie totale du premier étage est de 324 m² ce qui implique une surface de traitement par habitant de 1,2 m²/EH. Chaque lit est alimenté par une rampe aérienne en « H » composée de 4 points d'alimentation. Chaque lit comporte un substrat d'épaisseur de 90 cm composé de haut en bas de gravillons (4/8, 40 cm), de graviers (10/20, 25 cm) et de galets (30/80, 25 cm). Le premier étage est planté de roseaux (*Phragmites Australis*) à raison de 4 plants par m². Lors de cette étude, la hauteur de boues sur le premier étage était comprise entre 5 et 10 cm.

La rotation entre les filtres est réalisée une fois par semaine, ce qui implique un fonctionnement de chaque filtre sur une semaine et deux semaines de repos. Lors des alimentations par bâchées, l'eau est drainée par le filtre puis dirigée vers le poste d'injection du second étage constitué d'une unique cuve cylindrique d'un volume maximal de 1,87 m³.

L'étage 2 est constitué de trois lits à écoulement vertical de 7 m de large par 10 m de long (soit une surface de 70 m² par lit). La superficie totale du deuxième étage est de 210 m² ce qui implique une surface de traitement par habitant de 0,78 m²/EH. Les caractéristiques du substrat filtrant (empilement des couches, granulométrie) sont similaires à celles du premier étage. Chaque lit est alimenté par une rampe aérienne droite composée de 7 points d'alimentation. Le second étage est lui aussi planté de roseaux (*Phragmites Australis*) à raison de 4 plants par m².

La rotation entre les filtres est réalisée, comme pour l'étage 1, une fois par semaine suivie de deux semaines de repos. Lors des alimentations par bâchées, l'eau est drainée par le filtre puis dirigée vers le canal de sortie. L'eau de sortie est alors acheminée vers un fossé.

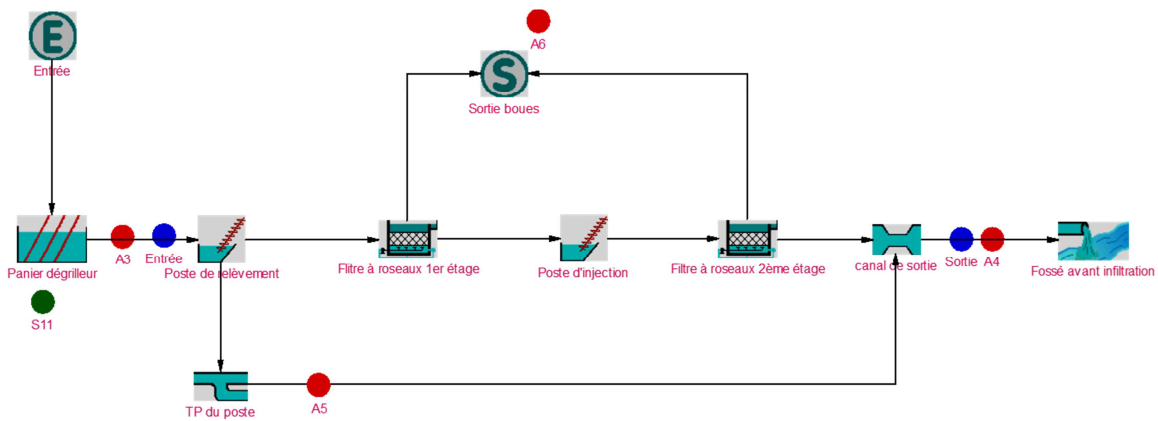


Figure 1 : Schéma de fonctionnement de la station 3

2.1.2. Station 4

La station 4 a été construite en 2010. Sa capacité nominale de traitement est de 800 EH avec un débit nominal de 120 m³/j. Le schéma de fonctionnement de cette station est détaillé sur la

Figure 2.

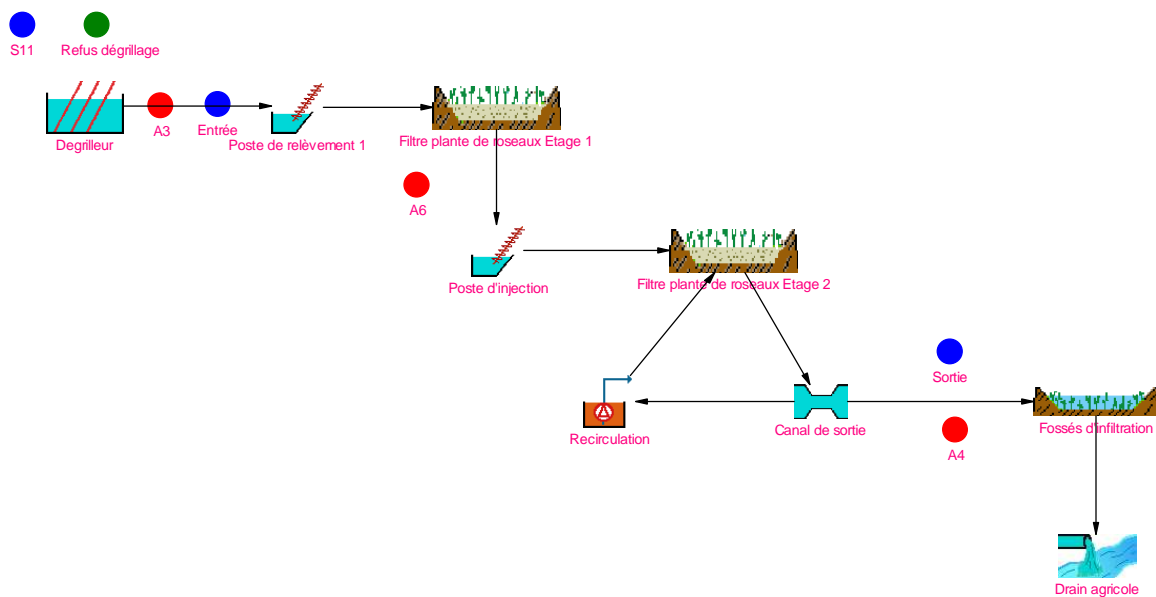


Figure 2 : Schéma de fonctionnement de la station 4

L'influent (issu d'un réseau séparatif) passe par un dégrilleur sommaire puis entre dans un poste de relèvement composé d'une cuve cylindrique. Une fois cette cuve remplie d'un volume d'environ 4,5 m³, une pompe d'alimentation injecte l'influent sur le premier étage de filtration sous forme d'une bûchée (injection rapide de la totalité du volume de la cuve). Ce premier étage est constitué de trois couples de lits (un couple est formé d'un lit « droit » et d'un lit « gauche ») à écoulement vertical. Chaque lit est formé d'un carré de 12,7 m de côté (soit une surface d'environ 322 m² par couple de lits). La superficie totale du premier étage est de 968 m² ce qui implique une surface de traitement par habitant de 1,2 m²/EH. Chaque lit est planté de roseaux (*Phragmites Australis*) à raison de 4 plants par m² et est alimenté en influent par une rampe aérienne en « H » composée de 4 points d'alimentation. Lors de l'étude, la hauteur de boues sur le premier étage était comprise entre 0 et 5 cm.

La rotation entre les filtres est réalisée une fois par semaine, ce qui implique un fonctionnement de chaque couple de lits pendant une semaine suivi d'une période de repos de deux semaines. Pour un couple en fonctionnement donné, l'alimentation se fait de manière alternée entre les deux lits « droit et

gauche ». Lors des alimentations par bâchées, l'eau est drainée par le filtre et est dirigée vers le poste d'injection du second étage constitué d'une unique cuve cylindrique d'un volume d'environ 3,9 m³.

L'étage 2 est constitué de trois lits à écoulement vertical carrés de 14,6 m de côté (soit une surface de 212,5 m² par lit). La superficie totale du second étage est de 637,5 m² ce qui implique une surface de traitement par habitant de 0,80 m²/EH. Chaque lit est alimenté en influent par douze rampes de surface, chaque rampe étant constituée d'un tube percé à espacement régulier d'orifices circulaires. Le second étage est lui aussi planté de roseaux (*Phragmites Australis*) à raison de 4 plants par m².

La rotation entre les filtres est réalisée une fois par semaine ce qui implique, comme pour le premier étage un fonctionnement de 1 semaine par filtre suivi d'une période de repos de 2 semaines.

Lors des alimentations par bâchées, l'eau est drainée par le filtre et est dirigée vers le canal de sortie. Puis vers un fossé d'infiltration. Un dispositif permettant la recirculation de l'effluent de sortie sur le second étage est présent mais n'était pas utilisé lors de notre campagne de mesure.

2.2. Méthode de détermination des flux gazeux de gaz à effet de serre

Les flux de gaz ont été déterminés selon la méthode de la boîte d'accumulation. Deux types de boîtes d'accumulation ont été utilisés durant chaque campagne de mesure.

Des boîtes d'accumulation à prélèvement automatique ont été utilisées pour mesurer en ligne les flux gazeux émis par les filtres et évaluer la variabilité temporelle des émissions de gaz à effet de serre. Ces boîtes, de dimensions 80 cm x 80 cm x 20 cm (longueur x largeur x hauteur), possèdent un système d'ouverture par vérin servocommandé par un automate programmable. Les boîtes sont reliées à un analyseur de gaz (Proceas, AP2E) par un réseau de tubes et d'électrovannes. Avant chaque mesure, l'automate ouvre les électrovannes permettant de relier la boîte à l'analyseur, réalise une purge du gaz présent initialement dans la boîte (pendant une durée de 2 minutes) puis commande la fermeture de la boîte pour permettre l'accumulation du gaz (en circuit fermé entre l'analyseur de gaz et la boîte). Après 10 minutes de mesure, l'automate bascule la mesure vers une autre boîte automatique. L'analyseur employé permet également la mesure des concentrations gazeuses en méthane et en dioxyde de carbone.

Les boîtes d'accumulation à prélèvement manuel ont été utilisées en complément des boîtes automatiques afin de caractériser la variabilité spatiale des émissions. Ces boîtes sont des parallélépipèdes en fer (largeur 20 cm, longueur 40 cm, hauteur 20 cm). Chaque boîte est enfoncée de 4 cm dans le massif filtrant à différentes positions du filtre. Un couvercle amovible en plexiglas est solidarisé à celle-ci à l'aide de pinces. Ce couvercle dispose d'un septum ce qui permet d'accéder au ciel gazeux à l'intérieur de la boîte par le biais d'une seringue.

Des prélèvements gazeux sont réalisés manuellement à intervalle de temps connu (de l'ordre du quart d'heure) par le septum. Pour cela un volume de 30 mL de gaz est prélevé dans une seringue étanche au gaz puis introduit dans un flacon de 10 mL serti manuellement. L'analyse de gaz étant réalisée le soir même par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur par spectrométrie de masse GC/MS (Thermo Scientific). La méthode développée permet également la mesure des concentrations gazeuses en méthane et en dioxyde de carbone.

La détermination du flux gazeux est réalisée selon l'équation suivante :

$$F = \frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt}$$

Avec : F représente le flux de N₂O (mgN₂O/m²/j), V le volume gazeux de la boîte d'accumulation (m³), A la surface recouverte par la boîte (m²) et dC/dt la variation de la concentration gazeuse au cours du temps (mgN₂O/m³/j).

Dans le cas des boîtes manuelles, le terme dC/dt est calculé en rapportant l'augmentation de la concentration des échantillons prélevés à la durée séparant les prélèvements. Pour les boîtes automatiques, la concentration instantanée est directement mesurée (toutes les 30 secondes) par l'analyseur. Le terme dC/dt peut alors être calculé avec un pas de temps plus rapproché.

2.3. Autres mesures

Les principaux paramètres sont listés ci-dessous :

- Les concentrations en azote ammoniacal (NH_4^+) et nitrique (NO_3^-) en sortie des deux étages ont été mesurées en continu par une sonde de mesure combinée $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ de la marque WTW (technologie Varion[®]). La vérification des sondes a été réalisée chaque jour de mesure en comparant ses données avec des mesures réalisées en laboratoire (Norme AFNOR) ou par kit (Hach Lange). Les résultats obtenus ont permis le traitement a posteriori du signal des sondes.
- Des cinétiques ont régulièrement été réalisées en sortie des deux étages pour l'analyse de la concentration en ions nitrite.
- La concentration en N_2O dissous a été mesurée en entrée et en sortie des deux étages. Les sondes utilisées sont des sondes spécifiques au N_2O de type Clark (Unisense A/S) calibrées tous les jours (grâce à des solutions saturées en N_2O dissous à partir de bouteilles de gaz étalon). Ces sondes sont développées pour une application laboratoire et leur utilisation sur le terrain s'est parfois avérée très compliquée, notamment lors du suivi de la station 3.
- pH, température et conductivité ont été mesurés en continu en entrée des procédés étudiés.
- Les débits en entrée et en sortie de chaque étage de filtration ont été mesurés avec des techniques différentes adaptées aux contraintes de chaque site. Pour les débits d'entrée du premier et du second étage des sondes de pression (Hendress+Hauser) ont été employées. Connaissant l'évolution de la pression, et donc la hauteur d'eau sur une période donnée, il est possible de remonter au débit par le biais des dimensions des réservoirs de stockage. Pour le débit sortant du second étage, une sonde de niveau à ultrasons (Cometec) a été utilisée pour mesurer la hauteur d'eau dans le venturi présent sur le canal de sortie. Dans cet organe, la hauteur d'eau mesurée est proportionnelle au débit.
- Des mesures de hauteur d'eau sur la station 3, présentant un colmatage important, ont été réalisées.
- Des mesures de la concentration gazeuse en oxygène à différentes hauteurs du massif de la station 4 ont été réalisées lors de la période de repos du filtre.
- Pour finir, des préleveurs automatiques ont été installés en entrée et en sortie des deux étages afin de réaliser des bilans 24 h. L'analyse des échantillons a été réalisée en laboratoire (Norme AFNOR) et/ou par kit (Hach Lange).

2.4. Plan d'échantillonnage pour la mesure des émissions gazeuses

Le suivi de la station 3 a été réalisé entre le 15/06/2014 et le 08/07/2014 (soit 23 jours en période estivale). La station 4 a quant à elle été suivie entre le 07/04/2015 et le 30/04/2015 (soit 23 jours en période printanière).

Pour les deux stations étudiées, le suivi des flux de N_2O a été réalisé simultanément sur les deux étages de filtration (étages 1 et 2). Un filtre (2 pour la station 4) de chaque étage a été suivi durant la première semaine d'alimentation, puis durant les deux semaines de repos consécutives et enfin durant les deux premiers jours de la seconde période d'alimentation.

L'emplacement des différents points d'échantillonnage réalisés sur les stations 3 et 4 est schématisé sur les Figures 3 et 4, respectivement. La présence d'axes de symétries à l'intérieur des lits ainsi que le positionnement des points d'alimentation en eau ont permis un échantillonnage restreint de chacun des étages de filtration. Dans le cas de la station 4, le protocole d'échantillonnage a été modifié afin de prendre en compte la présence d'un filtre supplémentaire en activité sur l'étage 1 « filtre droit et gauche ». Pour cette campagne, nous avons positionné les boîtes automatiques sur le filtre « droit » et les boîtes manuelles sur le filtre « gauche ». Ce mode d'échantillonnage avait été choisi afin de permettre la comparaison des flux émis par le filtre droit et gauche.

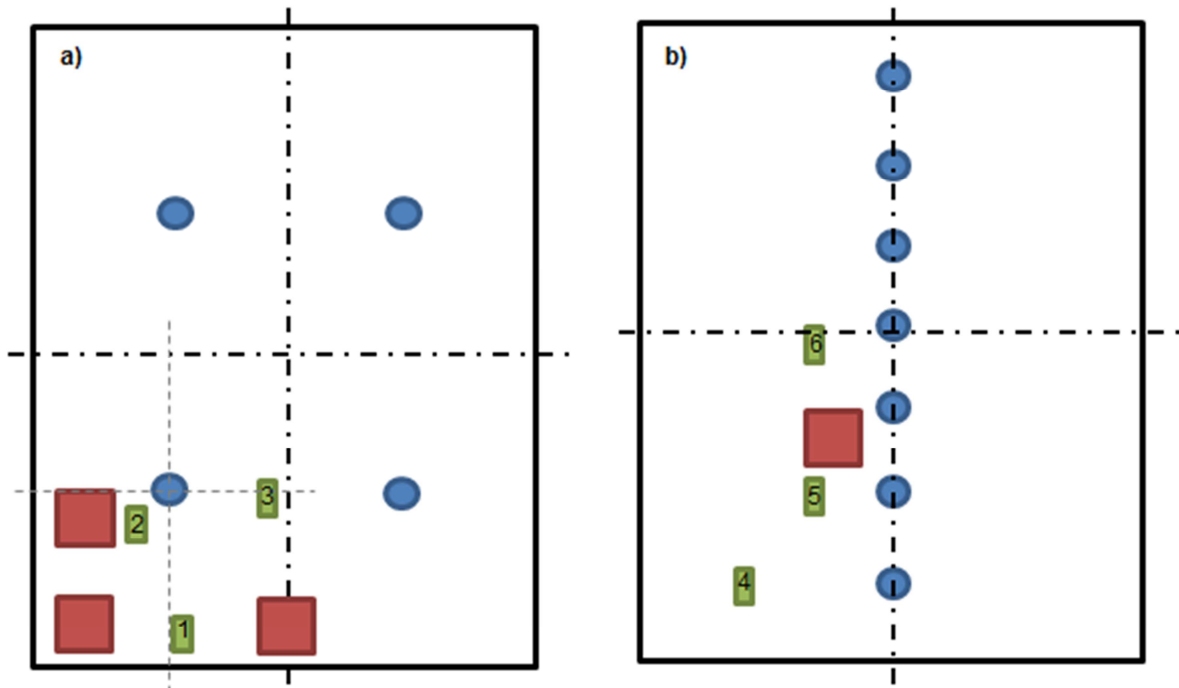


Figure 3 : Positionnement des dispositifs de mesure des flux gazeux sur la station 3 : a) étage 1, b) étage

2

■ = Boîtes automatiques, ■ = boîtes manuelles, ● = points d'alimentation de l'influent, - - - = axes de symétrie principaux, - - - = axes de symétrie secondaire

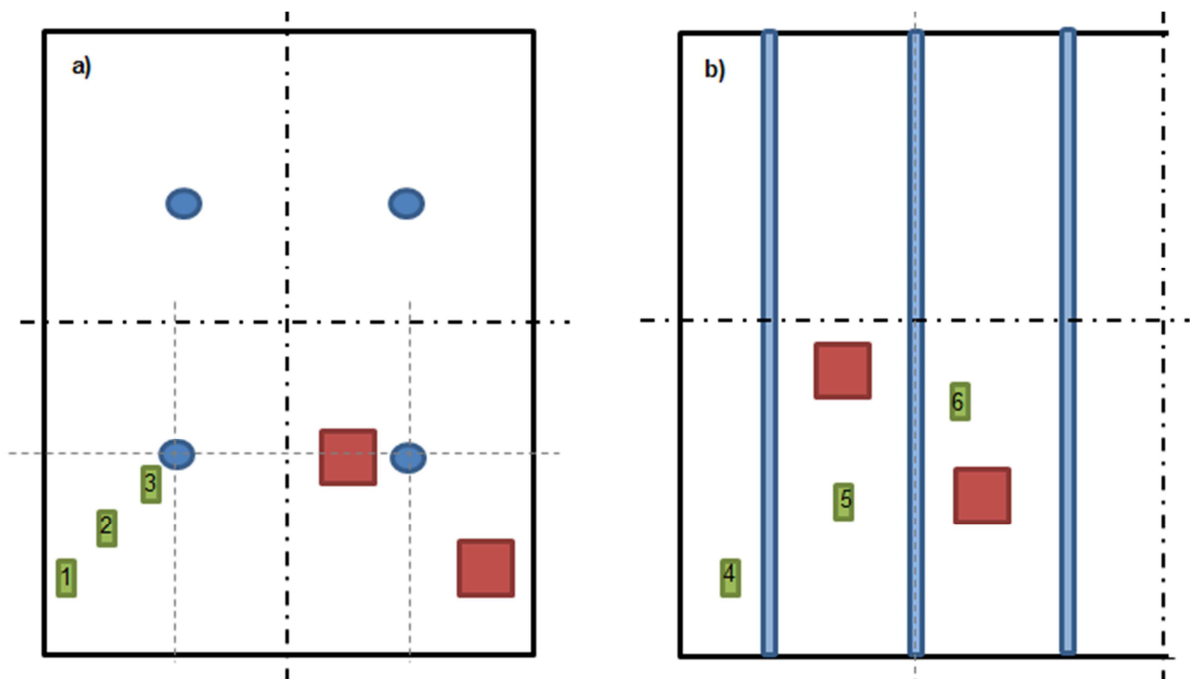


Figure 4 : Positionnement des dispositifs de mesure des flux gazeux sur la station 4: a) étage 1 (les boîtes automatiques sont positionnées sur le filtre « droit » et les boîtes manuelles sur le filtre « gauche »), b) demi-lit d'étage 2

■ = Boîtes automatiques, ■ = boîtes manuelles, ● = points d'alimentation de l'influent, ■ = rampes d'alimentation, - - - = axes de symétrie principaux, - - - = axes de symétrie secondaires

3. Résultats

3.1. Station 3

Le suivi de la station 3 a été réalisé entre le 15/06/2014 et le 08/07/2014, soit en période estivale. Lors de la campagne de mesure, cette station connaissait un grave dysfonctionnement.

Le premier étage de filtration présentait un colmatage important pour une hauteur de boue acceptable d'environ 10 cm. Celui-ci a considérablement ralenti la vitesse d'infiltration dans le massif du premier étage causant une accumulation progressive de l'influent au-dessus du filtre après seulement un jour d'alimentation. Ce colmatage a été en partie imputé à la présence importante de textiles sanitaires due aux faibles performances du dégrilleur placé en entrée de station. De plus, l'analyse des débits reçus par la station lors de la période de suivi (§ 3.1.1.1) indique que celle-ci fonctionnait au-dessus de sa charge hydraulique nominale par temps sec (présence d'eau claire parasite).

Lors de cette campagne un certain nombre de coupures électriques sont survenues et ont perturbé les mesures. Ces coupures ont principalement affecté les mesures de débits et les préleveurs automatiques. De fait, nous ne disposons pas de la totalité des échantillons moyens 24 h sur la durée d'alimentation du filtre. Seulement trois échantillons moyens (sur les six initialement prévus) ont pu être réalisés durant la première semaine d'alimentation. Durant la seconde période d'alimentation, les deux échantillons moyens prévus ont pu être réalisés comme prévu.

Du fait de l'accumulation rapide d'eau libre sur les lits de filtration, la mesure automatique de gaz n'a été mise en place que lors de la seconde semaine de repos et des deux premiers jours de la seconde phase d'alimentation des filtres.

3.1.1. Fonctionnement de l'installation

3.1.1.1. Caractéristiques de l'influent et de l'effluent

Le débit en entrée de station lors de la première semaine de suivi des filtres est sensiblement constant avec une moyenne de $67,0 \pm 2,8 \text{ m}^3/\text{j}$ ($n=4$), ce qui correspond à 127 % du débit nominal de temps sec. Le détail des débits journaliers est présenté dans le Tableau 1. Cependant, bien que le débit moyen journalier soit stable, des variations journalières importantes ont été observées. Nous observons globalement une forte diminution du débit d'entrée durant la nuit puis une augmentation progressive de ce dernier à partir de 05h00. Cela induit un espacement des bâchées sur le premier étage plus important durant la nuit (environ 2h00) que durant la journée (environ 1h15). Les débits de sortie du premier et second étage présentent des dynamiques moins prononcées mais nous observons néanmoins des variations journalières liées aux dynamiques des bâchées appliquées sur les deux étages. Durant une journée, l'espacement moyen entre deux bâchées du premier étage est de 1h30 alors qu'il n'est que de 45 minutes sur le second étage. Cet écart est dû à la différence de volume entre les cuves de stockage de l'influent du premier et du second étage.

Les caractéristiques de l'influent et de l'effluent en sortie des deux étages sont reportées sur le Tableau 1. Du fait des problèmes techniques exposés précédemment, tous les échantillons moyens n'ont pu être réalisés. Pour les jours 5 et 6 de la première semaine d'alimentation, nous disposons des prélèvements automatiques, mais pas des données de débit. Les différents prélèvements automatiques ayant été analysés au pas de temps horaire (NH_4 , NO_3 , NTK, DCO_s) en entrée et en sortie de l'étage 1, un post-traitement a été réalisé afin de recalculer les concentrations journalières moyennes, par reconstitution mathématique de l'échantillon moyen.

Pour cela, nous avons considéré que la distribution des débits en entrée de la station et en sortie de l'étage 1 ainsi que la valeur moyenne de ces débits était similaire à celles des jours précédents. Cette hypothèse est plausible car l'analyse des données de débits moyens mesurés montre une faible variabilité (coefficient de variation de 4,2% et de 3,4% sur les débits d'entrée station et de sortie d'étage 1, respectivement). L'hypothèse de profils horaires similaires est validée par la comparaison des profils sur les 4 journées disponibles montrant un coefficient de variation moyen sur les débits horaires de 10,0% et 13,4% pour l'entrée et la sortie d'étage 1, respectivement.

Tableau 1 : Principales caractéristiques de l'influent et de l'effluent de la station 3. Les journées dont les valeurs sont issues d'un calcul sont grisées. Le nombre de jours écoulés depuis la reprise de l'alimentation des filtres étudiés est donné entre parenthèse. Sortie 1 et sortie 2 correspondent à l'effluent de l'étage 1 et étage 2, respectivement.

Date	Type	NH ₄	NO ₃	NO ₂	NTK	DCO _t	DCO _s	DBO ₅	P _t	PO ₄	MES	Débit
		mgN/L				mgO ₂ /L			mgP/L		mg/L	m ³ /j
16-17/07	Entrée	44,0	3,6	1,4	46,7	431,0	135,8	130,0	6,7	0,7	192,3	66,6
(2)	Sortie 1	53,0	0,4	0,0	43,4	154,0	106,4	30,0	8,6	2,1	35,0	67,8
	Sortie 2	50,4	0,4	0,0	37,5	85,0	62,6	12,0	11,2	2,5	31,0	68,5
17-18/07	Entrée	43,2	2,6	1,4	47,2	501,0	125,0	130,0	6,3	0,8	208,0	64,3
(3)	Sortie 1	47,7	0,5	0,0	40,1	103,0	79,1	27,0	7,7	2,2	12,3	63,6
	Sortie 2	45,2	0,4	0,0	37,0	59,7	52,8	5,0	10,9	3,0	13,1	63,5
19-20/07	Entrée	44,3	2,3		58,2		146,2					67,0
(5)	Sortie 1	56,2	0,4		47,5		104,1					66,9
	Sortie 2											
20-21/07	Entrée	47,6	2,6		69,2		155,1					67,0
(6)	Sortie 1	51,6	0,6		43,1		91,7					66,9
	Sortie 2											
21-22/07	Entrée	36,8	5,3	1,0	41,3	415,0	135,0	180,0	5,3	2,5	147,6	70,9
(7)	Sortie 1	50,3	0,5	0,2	41,0	107,0	92,1	30,0	7,8	7,0	17,0	68,5
	Sortie 2	49,0	0,4	0,0	36,3	55,2	30,6	13,0	11,3	9,6	19,7	69,7
05-06/08	Entrée	32,6	6,2	1,0	48,20	435,0	152,0	100,00	6,12	2,46	249,0	66,3
(1)	Sortie 1	35,1	1,4	0,8	38,10	88,0	76,0	30,00	5,44	4,08	19,5	67,9
	Sortie 2	29,3	1,5	0,3	29,00	60,0	45,0	6,00	4,00	1,63	24,0	67,1
06-07/08	Entrée	28,5	5,8	0,9	47,1	496,0	135,0	64,0	6,2	2,5	315,0	66,5
(2)	Sortie 1	52,1	0,3	0,0	38,8	194,2	176,6	17,0	6,4	5,2	20,0	62,3
	Sortie 2	20,0	0,9	0,1	22,7	156,2	45,6	<3	2,6	0,6	21,7	64,2

3.1.1.2. Charges et rendements

Le Tableau 2 présente les charges reçues par les deux étages ainsi que leurs rendements.

Tableau 2 : Charges et rendements de la station 3

Date	Etage	Charge						Rendement				
		NH ₄	NO ₃	NGL	DCO*	P _t	PO ₄	NH ₄	NGL	DCO*	P _t	PO ₄
		kgN/j	kgN/j	kgN/j	kgO ₂ /j	kgP/L	kgP/L	%	%	%	%	%
16-17/07	1	2,9	0,24	3,4	28,7 9,0	0,4	0,05	-22,9	13,6	63,6 20,2	-30,6	-187,5
(2)	2	3,6	0,02	3,0	10,4 7,2	0,6	0,14	4,1	12,6	44,3 40,6	-31,3	-21,7
17-18/07	1	2,8	0,16	3,3	32,2 8,0	0,4	0,05	-9,3	21,6	79,7 37,4	-20,4	-188,0
(3)	2	3,0	0,03	2,6	6,5 5,0	0,5	0,14	5,3	8,0	42,1 33,3	-41,7	-36,8
21-22/07	1	2,6	0,38	3,4	29,4 9,6	0,4	0,18	-31,8	15,6	75,1 34,2	-42,0	-173,3
(7)	2	3,4	0,03	2,9	7,3 6,3	0,5	0,48	0,8	10,3	47,5 66,2	-47,5	-38,9
05-06/08	1	2,2	0,41	3,7	28,9 10,1	0,4	0,16	-0,9	31,9	81,0 53,1	16,7	-55,4
(1)	2	2,2	0,09	2,5	5,5 4,7	0,3	0,25	14,3	21,1	29,8 38,5	24,3	58,8
06-07/08	1	2,0	0,41	3,9	35,6 9,7	0,4	0,18	-82,5	27,4	61,0 43,4	-2,9	-109,3
(2)	2	3,7	0,02	2,8	13,9 5,5	0,5	0,37	61,3	39,0	19,0 40,0	59,4	87,7

* DCO totale, DCO soluble

Les charges reçues par le premier étage sont relativement constantes durant la première semaine d'alimentation. Pour le second étage, l'analyse des charges est plus complexe car elle met en jeu l'efficacité épuratoire du lit du premier étage. Cette efficacité peut être mesurée par l'analyse des rendements détaillés dans le Tableau 2.

Premier étage de filtration :

Du fait de son colmatage, le filtre présentait des performances très dégradées sur la plupart des paramètres analysés et particulièrement sur l'azote. En effet, on observe un rendement moyen sur l'azote global de seulement 22 % et un rendement négatif sur l'ammonium. Ce résultat indique que le flux d'ammonium sortant du filtre est supérieur au flux entrant, ce qui suggère un relargage d'ammonium et indique que les conditions favorables à la nitrification (i.e. conditions aérobies) n'étaient pas réunies dans ce lit de filtration du fait d'un colmatage important. Le relargage des orthophosphates est quant à lui cohérent avec l'âge de l'installation.

Second étage de filtration :

L'abattement en ammonium sur le second étage de filtration durant la première semaine d'alimentation du filtre était faible mais positif, ce qui indique la présence d'une faible activité de nitrification qui diminue avec la durée de filtration. Durant la seconde semaine d'alimentation, l'abattement en ammonium est supérieur avec des valeurs de 14,3% et 61,3% et nous observons de nouveau un relargage de nitrate par le filtre. Comme pour le premier étage, nous observons une forte variabilité des abattements en DCO sur le second étage avec des valeurs proches de 40% lors de la première semaine d'alimentation alors qu'elles varient entre 30 et 70% lors de la seconde semaine d'alimentation.

3.1.2. Emissions de gaz à effet de serre (GES)

3.1.2.1. Emissions sur les deux lits de filtration

Le détail des émissions de GES sur les deux lits de filtration est présenté dans le Tableau 3 (premier étage) et le Tableau 4 (second étage).

Tableau 3 : Emissions de GES sur les trois positions de l'étage 1 et variabilité interposition (les émissions sont exprimées en mgC(N)/m²/h) – échantillonnage manuel sur la station 3

	Alimentation + repos			Alimentation			Repos semaine 1			Repos semaine 2		
	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O
P1+P2+P3 (moy)	100,9	512,9	1,5	52,2	406,1	3,3	163,1	617,6	0,5	105,0	593,7	0,4
ET (P1+P2+P3)	154,2	381,2	2,4	140,5	265,1	3,2	194,5	522,4	0,7	107,4	245,8	0,6
P1 (moy)	190,2	698,4	1,8	71,5	430,7	4,2	280,8	916,5	2,2	222,7	817,6	0,2
ET (P1)	219,4	501,6	2,9	189,8	340,8	3,8	274,4	639,7	4,0	106,1	215,7	0,1
P2 (moy)	39,7	492,4	1,4	13,2	411,5	2,6	82,5	594,0	0,3	26,4	528,1	1,0
ET (P2)	52,4	319,1	2,0	11,7	263,6	2,7	70,0	407,0	0,2	19,1	228,9	0,9
P3 (moy)	71,0	347,8	1,4	68,5	376,0	3,2	82,1	333,8	0,3	65,8	435,2	0,2
ET (P3)	95,4	178,9	2,3	151,0	194,0	3,0	64,1	190,5	0,3	39,7	89,5	0,1
CV interpositions (%)	82,7	44,0	77,8	72,4	37,9	78,6	60,3	52,8	76,2	102,2	35,9	82,9
ET (CV interpositions, %)	36,5	18,6	30,3	42,3	19,7	33,9	39,3	13,5	32,3	22,3	16,3	30,0

Tableau 4 : Emissions de GES sur les trois positions de l'étage 2 et variabilité interposition (les émissions sont exprimées en mgC(N)/m²/h) – échantillonnage manuel sur la station 3

	Alimentation + repos			Alimentation			Repos semaine 1			Repos semaine 2		
	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O
P4+P5+P6 (moy)	11,9	618,1	3,0	15,9	828,1	5,4	19,4	534,8	1,7	0,5	404,4	0,6
ET (P4+P5+P6)	18,6	471,0	7,4	19,9	669,7	12,1	23,3	362,0	1,8	0,4	130,1	0,4
P4 (moy)	10,4	752,8	3,6	20,3	1038,6	7,6	13,4	621,2	1,3	0,7	497,6	0,4
ET (P4)	15,7	492,1	9,6	25,0	660,8	17,1	10,7	385,4	1,5	0,5	122,9	0,2
P5 (moy)	11,1	628,4	2,4	16,5	883,8	2,6	13,0	546,7	1,8	0,4	348,2	0,8
ET (P5)	15,7	549,2	4,7	22,2	837,1	4,3	13,9	367,2	2,2	0,2	115,5	0,5
P6 (moy)	15,0	504,5	3,2	11,0	561,9	6,0	30,8	438,6	2,0	0,3	367,5	0,5
ET (P6)	24,3	338,7	7,3	11,0	432,8	12,9	33,6	343,7	1,8	0,2	108,1	0,4
CV interpositions (%)	59,7	37,4	48,5	48,2	59,3	41,1	71,3	37,7	58,0	54,3	22,1	46,3
ET (CV interpositions, %)	32,1	25,7	30,1	33,4	25,0	37,8	30,6	30,6	34,2	15,7	16,1	20,4

Nous observons des différences notables entre les émissions du premier et du second étage de filtration. En moyenne, les valeurs des émissions mesurées en CH₄ sont plus importantes sur le premier étage de filtration (100,9 ± 154,2 mgC/m²/h et 11,9 ± 18,6 mgC/m²/h pour le premier et second étage, respectivement), en lien avec la présence importante de matière organique dégradable à la surface du filtre et son colmatage. Les émissions moyennes de CO₂ mesurées sont équivalentes sur les deux étages de filtration (512,9 ± 383,1 mgC/m²/h et 618,1 ± 471,0 mgC/m²/h pour le premier et second étage, respectivement). Pour le N₂O, les émissions moyennes sont supérieures sur le second étage de filtration (3,0 ± 7,6 mgN/m²/h) comparées au premier étage (1,5 ± 2,4 mgN/m²/h).

3.1.2.2. Variabilité spatiale des émissions

La variabilité spatiale des émissions de N₂O a pu être approchée en comparant les flux gazeux aux différentes positions de mesure sur les deux étages de filtration.

Premier étage de filtration :

La variabilité spatiale des émissions gazeuses sur le premier étage est présentée dans le Tableau 3. Nous observons de fortes disparités entre les valeurs observées aux trois positions d'une part, et entre les différentes semaines de suivi d'autre part. Ce second point sera discuté plus tard.

Les émissions de CH₄ sur l'ensemble des 3 semaines de suivi peuvent se classer comme suit P1>P3>P2 (pour rappel la position des boîtes sur le filtre est donnée sur la Figure 3). Le coefficient de variation (CV) interposition (calculé comme la moyenne des CV sur l'ensemble de points de mesure) illustre cette variabilité spatiale et indique que globalement, l'écart-type entre les flux d'émission de chaque position représente 82,7% ± 36,5% de la moyenne des émissions.

Les émissions de CO₂ sur l'ensemble des 3 semaines de suivi montrent que P1>P2>P3. Comme pour le méthane, le CV interposition (44,0% ± 18,6%) indique une variabilité spatiale importante.

Les émissions de N₂O présentent aussi des variations interpositions importantes avec un CV interposition de 78,5% ± 28,8%. En moyenne les émissions mesurées sur les positions 2 et 3 sont similaires et inférieures aux valeurs observées sur la position 1 (P1>P2~P3).

Second étage de filtration :

La variabilité spatiale des émissions gazeuses sur le second étage est présentée dans le Tableau 4.

Les émissions de CH₄ sur les positions 4 et 5 sont équivalentes et inférieures aux émissions mesurées sur la position 6 (au centre du filtre). Le coefficient de variation interposition (59,7% ± 32,1%) illustre l'importante variabilité spatiale des émissions.

Les émissions de CO₂ sur l'ensemble des 3 semaines de suivi montrent que P4>P5>P6. Comme pour le méthane, le coefficient de variation moyen de 35,4% ± 25,7% montre une variabilité interposition importante.

Les émissions de N₂O présentent aussi des variations interpositions importantes avec un coefficient de variation interposition moyen de 48,5% ± 30,1%. En moyenne les émissions mesurées sur les positions 4 et 6 sont similaires et supérieures aux valeurs observées sur la position 5 (P4~P6>P5).

Ces résultats montrent que les différentes émissions de GES varient sur la surface des lits. Plusieurs pistes d'explication de ce phénomène peuvent être suggérées. Tout d'abord, l'hypothèse de la présence d'hétérogénéités dans la répartition de l'influent sur le massif filtrant peut être mise en avant. Cela causerait une accumulation localisée de matière organique induisant une disparité des flux gazeux issus de leur dégradation. Une autre hypothèse concerne la présence probable de chemins préférentiels à l'infiltration de l'eau induisant la présence de flux plus importants dans certaines zones et favorisant indirectement les flux gazeux issus de la dégradation de ces composés dans ces zones ciblées.

3.1.2.3. Variabilité temporelle des émissions

La variabilité temporelle des émissions a pu être évaluée à plusieurs niveaux : à l'échelle de l'heure, de la journée et du cycle complet de filtration.

Variations horaires :

Les variations horaires sont difficiles à observer avec les boîtes automatiques à cause du faible nombre de mesure (2 par jour sur chaque position). Cependant, les boîtes automatiques installées lors de la seconde semaine de repos du filtre nous permettent d'en discuter plus précisément. Le suivi du 31/07 au 2/08 des flux de N₂O, CH₄ et CO₂ est présenté sur la Figure 5.

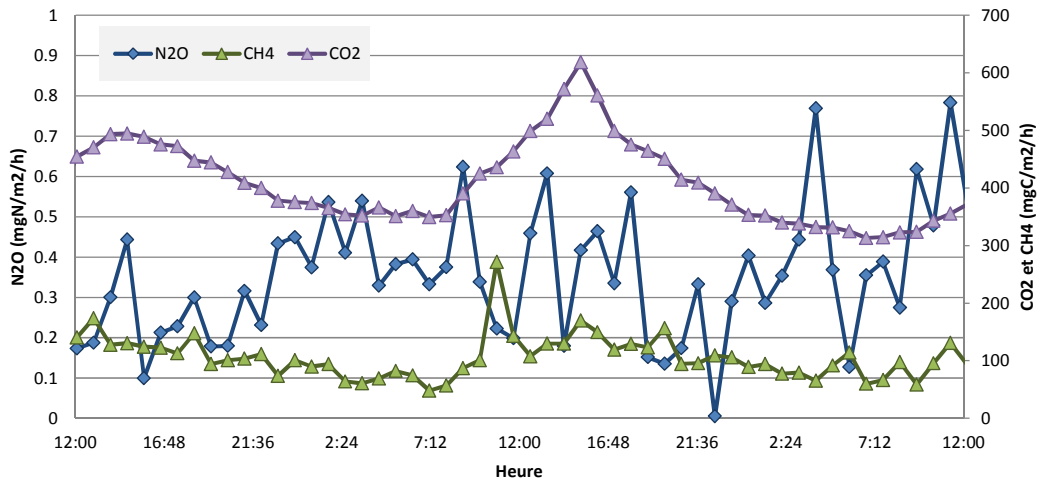


Figure 5 : Suivi continu des flux gazeux surfaciques entre 31/07 et le 02/08 sur une boîte automatique de l'étage 1 (station 3)

Les flux de CH₄ et CO₂ suivent des tendances similaires avec (sur la période présentée) une diminution progressive des flux émis durant la nuit puis une augmentation de ces derniers durant la matinée. Pour le N₂O, les flux observés sont largement plus variables avec des dynamiques très importantes sur l'heure. Des tendances similaires sont observées sur les deux autres boîtes automatiques installées sur l'étage 1. Bien que les tendances horaires ne suivent pas toujours celles présentées sur cet exemple, il est important de noter qu'un échantillonnage régulier lors de la journée est nécessaire pour prendre en compte la variabilité des émissions.

Variations journalières :

Les variations journalières peuvent être observées dans les Tableaux 3 et 4. Les écarts types importants observés sur les différentes positions lors de la semaine d'alimentation et des deux semaines de repos reflètent en effet les effets cumulatifs des variations journalières. Une illustration de ces variations hebdomadaires (dernière semaine de repos d'un filtre du premier étage et sa réalimentation à partir du 5/08) est présentée sur la Figure 6.

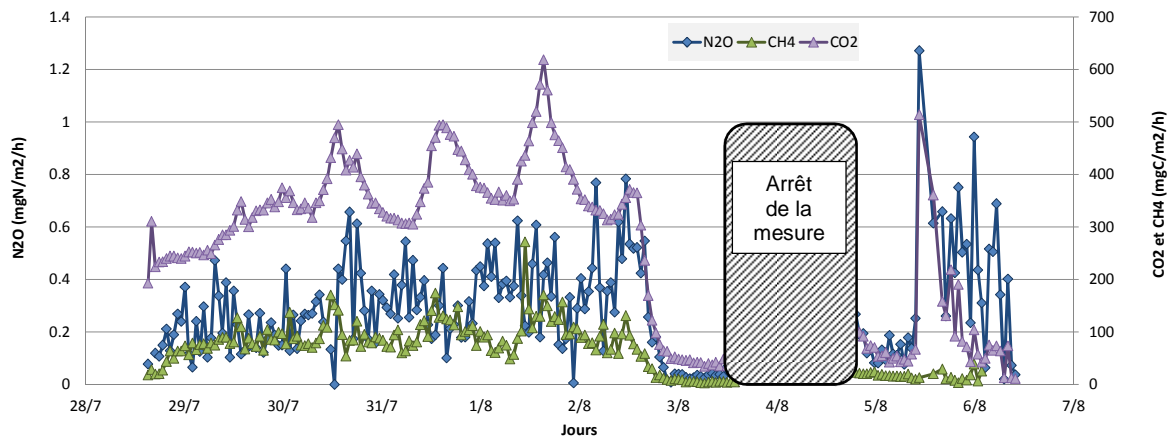


Figure 6: Suivi continu des flux gazeux surfaciques sur une boîte automatique de l'étage 1 (station 3)

Sur cette figure nous observons des dynamiques importantes, de l'ordre de la journée et de la semaine. Ceci indique qu'un suivi continu des émissions sur un cycle complet de fonctionnement des filtres (alimentation et repos) est nécessaire si l'on désire capturer cette variabilité.

3.1.3. Facteurs d'émission mesurés

Les facteurs d'émission mesurés sont calculés en rapportant le cumul des émissions sur les trois semaines du cycle (1 semaine d'alimentation et deux semaines de repos) au flux d'azote total (dans le

cas du N₂O) ou de la DCO totale (dans le cas du CO₂ et du CH₄) reçus sur le filtre du premier étage lors de la semaine d'alimentation.

Le calcul des flux émis par le filtre prend en compte l'ensemble des points de mesure réalisés. Pour chaque point d'échantillonnage, la moyenne des valeurs obtenues sur les 3 boîtes manuelles a tout d'abord été calculée. Ensuite, le cumul des émissions entre les deux points d'échantillonnage sur la journée a été calculé en utilisant la valeur moyenne des émissions entre ces points. Cette méthode, qui peut être discutable compte tenu des variations journalières mises en avant précédemment, semble être la plus adaptée au vu du nombre restreint d'échantillons dont on dispose. Les flux gazeux mesurés sur les deux étages ainsi que les facteurs d'émissions calculés sont détaillés dans le Tableau 5. Ces résultats seront discutés plus loin dans ce document en comparaison avec les valeurs obtenues sur la station 4.

Tableau 5 : Flux de GES et facteurs d'émission mesurés sur la station 3 (à partir des boîtes manuelles)

	Alimentation			Repos			Total		
	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂
Flux Etage 1 (mgN(C)/m ² /h)	3,9	19,4	385,6	0,3	133,0	599,4	1,5	95,1	528,1
Flux étage 2 (mgN(C)/m ² /h)	0,9	18,5	993,7	1,2	8,6	498,7	1,1	11,9	663,7
Facteur d'émission*							0,46	2,64	24,64

* FE exprimés en % (kgN/kgNT_{entrant} pour N₂O et kgC/kgDCO_{entrante} pour CH₄ et CO₂).

3.2. Station 4

Le suivi de la station 4 a été réalisé entre le 07/04/2015 et le 30/04/2015, soit en période printanière.

Lors de la campagne de mesure, aucun dysfonctionnement n'a été observé sur cette station. L'installation était bien entretenue (curage annuel du lit du premier étage, désherbage des deux étages de filtration) et le faucardage des roseaux avait été réalisé avant la venue de notre équipe.

Cependant, deux événements mineurs ont perturbé les mesures sur site. L'analyseur gazeux a subi une avarie mécanique durant le premier week-end (panne du ventilateur de l'unité centrale de l'analyseur). Ce matériel a pu être réparé dans la journée du lundi. Le jeu de données souffre donc d'un manque de deux jours de mesure sur les flux gazeux. En second lieu, la mesure de N₂O dissous des deux premiers jours de mesure n'a pu être exploitée à cause de la mauvaise qualité du signal obtenu. Ce problème a ensuite été résolu lors du troisième jour de mesure en modifiant la position des sondes.

3.2.1. Fonctionnement de l'installation

3.2.1.1. Caractéristiques de l'influent et de l'effluent

Le débit en entrée de station lors de la première semaine de suivi des filtres est sensiblement constant avec une moyenne de 60,4 ± 4,5 m³/j (n=5), ce qui correspond à 50 % du débit nominal de temps sec. Le détail des débits journaliers est présenté dans le Tableau 6. Cependant, bien que le débit moyen journalier soit stable, des variations journalières importantes ont été observées. Comme pour la station 3, une diminution du débit d'entrée durant la nuit et une augmentation progressive en matinée est observée.

Aussi, nous observons une augmentation sensible du débit entrant durant le week-end (11/04 et 12/04). Le débit de sortie de l'étage 1 (en moyenne 61,0 ± 3,1 m³/j) suit les tendances du débit d'entrée avec un décalage dû au stockage de l'influent dans la cuve avant bâchée et au temps de passage dans le filtre. Le débit de sortie du second étage (en moyenne de 57,2 ± 0,8 m³/j) est quant à lui beaucoup plus stable. Les faibles dynamiques observées sur ce débit peuvent en partie être attribuées à la précision de la technique de mesure employée (mesure de hauteur par ultrason dans un Venturi).

Les caractéristiques de l'influent et de l'effluent en sortie des deux étages sont données dans le Tableau 6. Les valeurs recalculées grâce à un post-traitement pour les jours 4 et 5 en utilisant les

données des capteurs en ligne, les données de débit et les ratios caractéristiques de l'influent sont aussi présentées.

Tableau 6 : Principales caractéristiques de l'influent et de l'effluent de la station 4. Le nombre de jours écoulés depuis la reprise de l'alimentation des filtres étudiés est donné entre parenthèse

Date	Type	NH ₄	NO ₃	NO ₂	NTK	DCO _t	DCO _s	DBO ₅	P _t	PO ₄	MES	MVS	Débit m ³ /j
		mgN/L				mgO ₂ /L			mgP/L		mg/L		
07-08/04 (1)	entrée	70,8	0,5	0,1	100,6	748,0	357,0	250,0	12,0	6,3	362,0	344,0	58,3
	sortie1	32,7	60,3	1,0	29,5	97,8	57,8	14,0	7,1	7,1	14,8	17,4	57,6
	sortie 2	2,5	83,6	0,1	3,0	58,0	51,8	<3	10,7	10,4	7,6	9,0	57,6
08-09/04 (2)	entrée	69,1	0,6	0,1	93,6	773,0	368,0	280,0	9,6	5,1	206,0	208,0	59,3
	sortie1	27,3	39,7	0,4	30,7	91,6	67,6	12,0	8,3	3,4	10,2	12,6	61,2
	sortie 2	2,9	86,4	0,1	3,4	39,4	39,8	<3	9,1	6,4	9,6	11,0	56,3
09-10/04 (3)	entrée	73,8	0,9	0,1	103,0	937,7	401,7	290,0	10,5	5,6	341,0	305,0	59,9
	sortie1	31,3	32,5	0,6	35,6	82,9	60,7	8,0	9,5	8,4	15,2	14,2	61,0
	sortie 2	3,3	51,1	0,2	4,0	40,5	34,9	<3	8,9	8,0	5,2	5,4	56,6
10-11/04 (4)*	entrée	63,8	0,8	0,1	93,4	715,7							53,5
	sortie1	37,1	7,1	0,2	41,6	122,9							56,4
	sortie 2	4,0	44,8	0,2	4,6	41,9							56,8
11-12/04 (5)*	entrée	67,1	0,8	0,1	95,8	759,3							55,7
	sortie1	46,9	6,5	0,2	51,5	152,0							59,5
	sortie 2	5,6	46,4	0,2	6,0	43,4							57,0
12-13/04 (6)	entrée	85,4	1,0	0,1	107,6	898,7	401,0	350,0	11,7	6,1	324,0	282,0	68,1
	sortie1	51,6	10,8	0,3	55,4	156,5	120,6	33,0	16,1	14,3	23,6	17,6	65,9
	sortie 2	6,1	42,5	0,1	6,4	44,7	44,1	<3	11,1	10,2	5,4	5,8	58,5
13-14/04 (7)	entrée	82,7	0,7	0,1	110,7	1085,0	410,0	380,0	13,6	5,8	390,0	346,0	56,3
	sortie1	62,3	6,7	0,2	67,6	208,7	175,1	71,0	18,0	14,6	56,0	47,5	59,1
	sortie 2	8,1	43,1	0,3	8,3	46,4	43,6	<3	13,9	13,0	7,6	7,4	57,1
28-29/04 (1)	entrée	64,0	1,0	0,1	95,9	796,0	373,4	290,0	11,2	5,3	265,0	250,4	54,2
	sortie1	23,1	50,6	1,1	28,8	89,0	72,2	15,0	7,8	5,6	15,2	15,1	58,3
	sortie 2	1,9	78,7	0,1	3,2	37,0	36,0	5,0	11,7	8,9	5,1	5,4	59,7
29-30/04 (2)	entrée	70,5	1,0	0,1	95,1	703,0	360,8	260,0	10,6	5,0	234,6	226,6	56,0
	sortie1	41,2	45,8	1,1	23,9	75,0	56,9	7,0	7,9	7,0	9,6	10,8	55,5
	sortie 2	1,0	86,8	0,1	2,1	43,0	40,7	<3	9,0	8,4	4,7	4,9	55,5

*Données issues de calcul à partir des sondes et de corrélations.

3.2.1.2. Charges et rendements

Le Tableau 7 présente les charges reçues par les deux étages ainsi que leurs rendements.

Les charges reçues par la station sont relativement stables durant les trois premiers jours de la première semaine d'alimentation. Ensuite nous notons des valeurs plus élevées lors de l'échantillon du dimanche 12 au lundi 13 Avril. Cette hausse de charge s'explique par la hausse de débit lors du week-end accompagnée d'une augmentation de la concentration des formes de l'azote (Tableau 6). Pour le second étage, l'analyse des charges est plus complexe car elle met en jeu l'efficacité épuratoire du lit du premier étage. Cette efficacité peut être mesurée par l'analyse des rendements détaillés dans le Tableau 7.

Premier étage de filtration :

L'abattement en ammonium sur le premier étage de filtration est en moyenne de 46,6% ± 14,3% (n=5) durant la première semaine de filtration. Nous remarquons une tendance à la diminution de cet abattement avec la durée de filtration, ce qui indiquerait une diminution progressive des performances de nitrification en lien probablement avec la teneur en oxygène dans le massif. Néanmoins, les charges azotées appliquées en fin de période d'activité du filtre étant plus élevées qu'en début de semaine, il est difficile de déterminer la cause réelle de cette baisse des performances.

Le ratio NO₃ produit/NH₄dégradé était supérieur ou très proche de 100% lors des deux premiers jours d'activité du filtre (cycle 1 et cycle 2), ce qui suggère un relargage des nitrates accumulés durant la précédente phase de repos du filtre et/ou une adsorption de l'ammonium sur le massif filtrant. Ensuite, ce ratio chute pour atteindre environ 30% durant les deux derniers jours.

Comme pour l'ammonium, nous observons une progressive diminution de l'abattement de la DCO avec la durée de filtration puisque celui-ci passe de quasiment 90% durant les trois premiers jours à moins de 80% durant le dernier jour de filtration. Néanmoins, comme pour l'ammonium les charges DCO appliquées étant supérieures en fin de période d'activité, il est difficile de conclure sur les mécanismes responsables de cette baisse de performances.

Pour les orthophosphates l'abattement est quasiment toujours négatif, ce qui est compte tenu de l'âge de cette installation classique.

Second étage de filtration :

L'abattement en ammonium durant la première semaine d'alimentation est important avec un rendement proche de 90%. Comme pour le filtre du premier étage, une tendance à la diminution de cet abattement avec la durée de fonctionnement du filtre est observée. Les concentrations de sortie en ammonium restent faibles avec une moyenne de $4,6 \pm 0,2$ mgN-NH₄/L. De même qu'observé sur le premier étage, un relargage de nitrate apparait, c'est-à-dire que nous observons un flux de nitrate produit plus important que la quantité d'ammonium dégradée. Ce phénomène, qui peut être expliqué lors des premiers jours d'alimentation par un lessivage de nitrates produits durant la phase de repos, apparait de manière surprenante lors du quatrième jour de mesure.

Contrairement à ce qui a été observé sur le premier étage de filtration, l'abattement en DCO (totale et soluble) semble augmenter avec la durée de filtration, passant pour la DCO totale de 41% lors du premier jour d'alimentation du filtre à 79% lors du dernier jour.

Dans le cas du phosphore, l'analyse des rendements est très complexe car aucune tendance nette ne se dessine. Globalement, nous observons un relargage de phosphore durant les premiers jours d'alimentation puis un abattement durant les derniers jours d'alimentation.

Contrairement à la station 3, la station 4 présente des performances épuratoires classiques du parc Français des stations de filtres plantés de roseaux.

Tableau 7 : Charges et rendements de la station 4

Dates	Etage	Charges						Rendements					
		NH ₄ kgN/j	NO ₃ kgN/j	NGL kgN/j	DCO* kgO ₂ /j	P _t kg/j	PO ₄ kgP/j	NH ₄ %	NGL %	PO ₄ %	P _t %	DCO* %	NO ₃ produit/ NH ₄ degradé %
07-08/04 (1)	1	4,1	0,0	5,9	43,6 20,8	0,7	0,4	54,4	71,0	-11,5	41,7	87,1 84,0	153,3
	2	1,9	3,5	5,2	5,6 3,3	0,4	0,4	92,3	89,8	-45,1	-51,4	40,7 10,4	77,3
08-09/04 (2)	1	4,1	0,0	5,6	45,8 21,8	0,6	0,3	59,2	66,1	30,9	10,8	87,8 81,0	98,8
	2	1,7	2,4	4,3	5,6 4,1	0,5	0,2	90,3	89,8	-74,2	-0,9	60,4 45,9	161,3
09-10/04 (3)	1	4,4	0,1	6,2	56,1 24,0	0,6	0,3	56,8	64,8	-52,8	7,7	91,0 84,6	76,6
	2	1,9	2,0	4,2	5,1 3,7	0,6	0,5	90,2	89,6	11,7	12,9	54,6 46,7	52,9
10-11/04 (4)**	1	3,4	0,0	5,0	38,3 19,3			38,6	52,9			81,9	27,2
	2	2,1	0,4	2,8	6,9 5,3			89,2	88,9			65,7	114,8
11-12/04 (5)**	1	3,7	0,0	5,4	42,3 20,5			25,3	42,6			78,6	36,4
	2	2,8	0,4	3,5	9,0 7,2			88,6	88,8			72,6	91,2
12-13/04 (6)	1	5,8	0,1	7,4	61,2 27,3	0,8	0,4	41,6	50,2	-126,2	-33,1	83,2 70,9	26,6
	2	3,4	0,7	4,4	10,3 7,9	1,1	0,9	89,5	89,7	36,7	38,7	74,6 67,5	58,4
13-14/04 (7)	1	4,7	0,0	6,3	61,1 23,1	0,8	0,3	21,0	35,9	-163,5	-38,5	79,8 55,2	36,8
	2	3,7	0,4	4,4	12,3 10,4	1,1	0,9	87,5	88,1	14,3	25,0	78,5 75,9	64,1
28-29/04 (1)	1	3,5	0,1	5,3	43,2 20,3	0,6	0,3	61,2	67,7	-14,7	25,2	88,0 79,2	136,2
	2	1,3	2,9	4,7	5,2 4,2	0,5	0,3	91,5	88,6	-62,8	-53,6	57,4 48,9	141,7
29-30/04 (2)	1	4,0	0,1	5,4	39,4 20,2	0,6	0,3	42,2	75,1	-38,7	26,2	89,4 84,4	149,3
	2	2,3	2,5	3,9	4,2 3,2	0,4	0,4	97,5	91,2	-19,9	-13,9	42,7 28,5	102,1

* DCO totale, DCO soluble

** Données issues de calcul à partir des sondes et de corrélations.

3.2.2. Analyse des concentrations gazeuses dans le massif filtrant

Le massif filtrant des deux étages de filtration a fait l'objet d'un suivi spécifique. Les formes gazeuses de CO_2 et O_2 ont été régulièrement mesurées à plusieurs profondeurs du massif afin de faire le lien entre les conditions opératoires et les émissions de GES. Ces mesures devaient en particulier nous informer sur la disponibilité de l'oxygène nécessaire à la nitrification. Les teneurs mesurées par cette technique représentent les teneurs gazeuses dans le massif filtrant et en aucun cas les concentrations dissoutes. Néanmoins, nous pouvons considérer qu'elles sont de bons indicateurs, les concentrations gazeuses et dissoutes formant un couple en équilibre dynamique. Les mesures de profils gazeux n'ont pu être réalisées qu'à partir de la première semaine de repos.

3.2.2.1. Premier étage de filtration

Les profils typiques observés sur le premier étage de filtration sont illustrés sur la Figure 7.

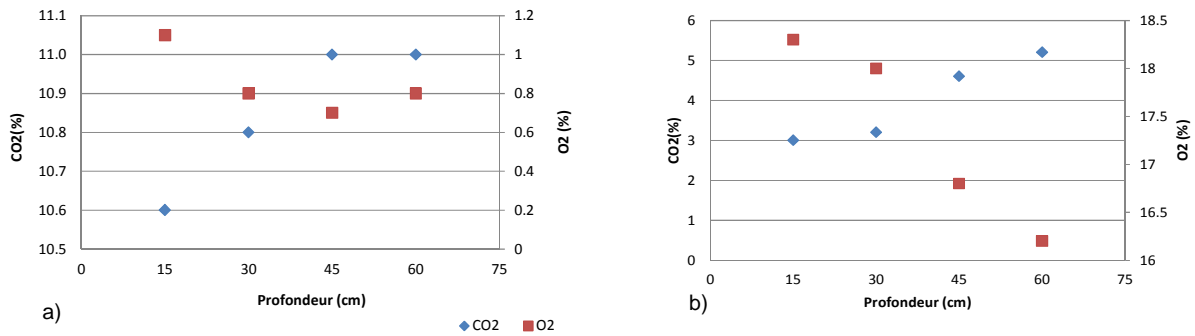


Figure 7 : Profils de gaz sur l'étage 1 : a) fin de la phase d'alimentation, b) fin de la phase de repos (station 4)

Nous observons des profils inversés pour le dioxyde de carbone et l'oxygène. A la fin de la semaine d'alimentation, le taux d'oxygène dissous dans le massif filtrant est très faible (ce qui s'explique par la demande en oxygène importante pour la dégradation de la matière organique et la nitrification) et diminue progressivement avec la profondeur, passant de 1,1 % à 0,6 % entre 15 et 45 cm de profondeur. Pour le CO_2 , nous observons un taux élevé proche de 11% avec une augmentation de cette teneur avec la profondeur. Il est à noter que ces très faibles teneurs en oxygène sont en dessous des valeurs classiques observées sur des filtres plantés alimentés pendant 3,5 jours et laissés au repos pendant 7 jours consécutifs. De fait, la faible oxygénation du massif observée sur cette station peut être liée à la très forte demande en oxygène due à l'alimentation continue sur une semaine complète. Elle peut également indiquer un dysfonctionnement des drains d'aération.

A la fin de la période de repos (la mesure du 24/04 est ici présentée car un épisode pluvieux survenu le 26/04 a modifié l'allure des profils typiques observés les jours précédents), nous observons une oxygénation du filtre avec des teneurs supérieures à 16%, et ce à toutes les profondeurs. Pour le CO_2 , les teneurs ont aussi fortement diminué avec des teneurs variant de 3 à 6% aux différentes profondeurs.

L'évolution dans le temps des teneurs moyennes dans le massif est illustrée sur la Figure 8. Sur cette figure on peut observer une augmentation progressive de la teneur moyenne en O_2 dans le massif filtrant concomitante à une diminution de la teneur en CO_2 durant la phase de repos, ce qui indique la ré-oxygénation du massif.

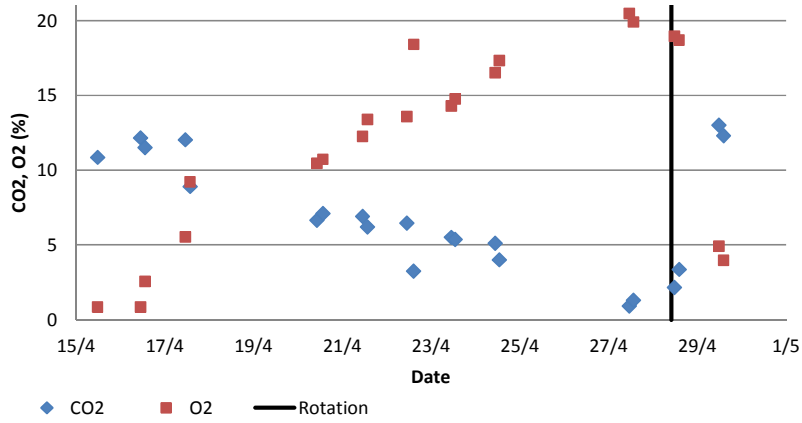


Figure 8 : Evolution au cours d'un cycle repos/alimentation des teneurs moyennes en gaz dans le massif filtrant du premier étage (station 4)

3.2.2.2. Second étage de filtration

Les profils typiques observés sur le second étage de filtration sont illustrés sur la Figure 9.

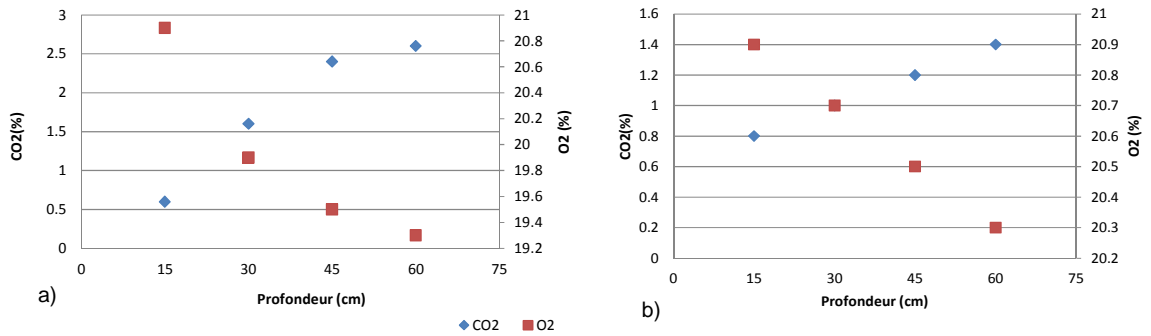


Figure 9 : Profils de gaz sur l'étage 2: a) fin de la phase d'alimentation, b) fin de la phase de repos

Les profils présentés sont similaires à ceux observés sur le premier étage de filtration avec globalement une diminution de la teneur en O₂ et une augmentation de la teneur en CO₂ avec la profondeur. Néanmoins, les valeurs moyennes observées sont différentes, notamment en fin de la semaine d'alimentation. Les valeurs moyennes en CO₂ et O₂ sur le premier étage sont respectivement de 10,9% et 0,9% alors qu'elles sont de 1,8 et 19,9% pour le second étage. Cela montre que le second étage est globalement mieux oxygéné durant la période d'alimentation (du fait d'une demande en oxygène plus faible pour la dégradation de la matière organique). A la fin de la phase de repos, les valeurs moyennes en CO₂ et O₂ sur les deux étages sont similaires (1,1% et 20,2% pour le premier étage et 0,1 et 20,9% pour le second étage).

L'évolution dans le temps des teneurs moyennes dans le massif est illustrée sur la Figure 10.

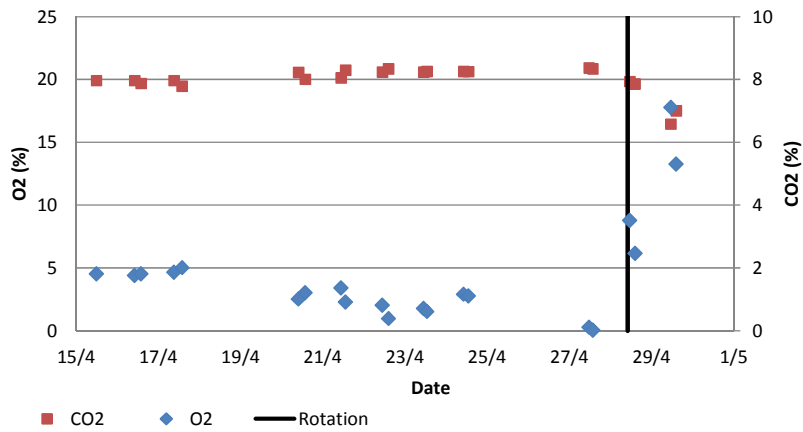


Figure 10 : Evolution au cours d'un cycle repos/alimentation des teneurs moyennes en gaz dans le massif filtrant du second étage

Durant la période de repos, les teneurs moyennes en O₂ dans le massif filtrant du second étage fluctuent entre 20 et 21%. Lors des deux premiers jours de la réalimentation, la teneur moyenne en O₂ diminue rapidement à 17% ce qui indique une consommation rapide pour l'oxydation des substrats azotés et carbonés. Pour le CO₂, nous observons globalement une diminution de sa teneur durant la période de repos jusqu'à une valeur proche de zéro après les 2 semaines de repos. Lors de la réalimentation, la teneur en CO₂ augmente rapidement en même temps que la teneur en O₂ diminue.

Les différents comportements introduits ici seront discutés plus loin en lien avec les émissions de GES observées.

3.2.3. Emissions de GES

Les émissions de GES ont été mesurées durant la semaine d'alimentation des filtres et les deux semaines de repos. Le positionnement des boîtes d'accumulation a été présenté dans la partie 2.4.

Lors de cette campagne de mesure, les émissions de GES ont été quantifiées avec la méthode des boîtes automatiques et celle des boîtes manuelles. Seul le premier week-end d'alimentation n'a pu être suivi à cause d'un souci technique ayant affecté la mesure automatique.

3.2.3.1. Emissions sur les deux lits de filtration

Le détail des émissions de GES mesurés avec les boîtes manuelles sur les deux lits de filtration est présenté dans le Tableau 8 (premier étage) et le Tableau 9 (second étage).

Tableau 8 : Emissions de GES sur les trois positions de l'étage 1 et variabilité interposition (les émissions sont exprimées en mgC(N)/m²/h) – échantillonnage manuel sur la station 4

	Alimentation + repos			Alimentation			Repos S1			Repos S2		
	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O
P1+P2+P3 (moy)	1,0	598,7	1,9	1,2	360,2	1,0	0,7	578,3	1,1	1,2	806,7	3,4
ET (P1+P2+P3)	0,7	336,6	1,9	1,1	304,9	1,3	0,4	279,7	0,8	0,6	297,0	2,2
P1 (moy)	1,2	740,3	2,4	2,0	480,2	1,4	0,7	738,6	1,4	1,1	944,5	4,2
ET (P1)	1,8	529,2	3,0	3,1	526,2	2,4	0,3	535,8	1,7	0,7	454,8	3,8
P2 (moy)	0,9	601,2	2,0	0,9	273,7	0,7	0,8	520,1	0,8	1,1	946,1	4,0
ET (P2)	0,6	385,0	2,2	0,7	239,5	0,9	0,6	235,4	0,7	0,6	342,0	2,4
P3 (moy)	0,7	437,0	1,4	0,7	367,9	1,1	0,6	476,4	1,2	1,0	439,5	1,9
ET (P3)	0,5	215,0	1,2	0,7	274,8	1,2	0,4	234,6	1,1	0,3	123,1	1,4
CV interpositions (%)	38,5	43,7	68,7	63,3	61,5	68,3	36,7	35,3	81,1	16,2	39,1	55,3
ET (CV interpositions, %)	34,5	22,4	26,1	47,3	27,4	28,8	19,8	17,3	24,9	20,7	14,7	20,0

Tableau 9 : Emissions de GES sur les trois positions de l'étage 2 et variabilité interposition (les émissions sont exprimées en mgC(N)/m²/h) – échantillonnage manuel sur la station 4

	Alimentation + repos			Alimentation			Repos S1			Repos S2		
	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O
P4+P5+P6 (moy)	0,5	426,3	4,8	0,7	853,1	11,1	0,3	125,7	0,2	0,8	433,0	1,6
<i>ET (P4+P5+P6)</i>	0,5	531,5	9,3	0,8	660,8	12,6	0,3	121,5	0,4	1,0	378,0	1,4
P4 (moy)	0,4	453,7	3,7	0,5	662,0	6,6	0,3	107,0	0,2	3,5	1007,5	3,0
<i>ET (P4)</i>	0,4	521,3	4,8	0,5	607,8	5,6	0,3	91,6	0,5	1,9	513,8	3,0
P5 (moy)	0,7	443,0	3,4	1,0	866,4	9,9	0,5	171,4	0,2	1,0	338,9	1,4
<i>ET (P5)</i>	0,8	568,8	9,3	1,1	764,4	15,8	0,4	148,5	0,3	1,1	297,7	1,0
P6 (moy)	0,4	408,6	6,7	0,8	988,6	19,4	0,1	139,0	0,2	0,8	347,2	0,7
<i>ET (P6)</i>	0,6	499,2	14,7	0,7	565,0	21,0	0,2	134,0	0,4	1,0	327,1	0,7
CV interpositions (%)	49,0	39,7	48,1	36,6	30,6	39,1	56,9	50,4	46,9	51,6	30,5	57,2
<i>ET (CV interpositions, %)</i>	26,8	31,9	33,4	23,1	25,3	38,6	33,1	37,4	24,5	25,1	39,5	38,6

Sur l'ensemble des mesures ponctuelles réalisées, les valeurs des émissions mesurées en CH₄ sont supérieures sur le premier étage de filtration que sur le second ($1,0 \pm 0,7$ mgC/m²/h et $0,5 \pm 0,5$ mgC/m²/h pour le premier et second étage, respectivement). Les émissions moyennes de CO₂ mesurées suivent la même tendance ($598,7 \pm 336,6$ mgC/m²/h et $426,3 \pm 531,5$ mgC/m²/h pour le premier et second étage, respectivement). Pour le N₂O, les émissions moyennes sont supérieures sur le second étage de filtration ($4,8 \pm 9,3$ mgN/m²/h) comparées au premier étage ($1,9 \pm 1,9$ mgN/m²/h).

3.2.3.2. Variabilité spatiale des émissions

La variabilité spatiale des émissions de GES peut être discutée en comparant les flux gazeux aux différentes positions de mesure sur les deux étages de filtration.

Premier étage de filtration :

La variabilité spatiale des émissions gazeuses sur le premier étage est présentée dans le Tableau 8. Comme pour la station 3, de fortes disparités entre les valeurs d'émission aux différentes positions ont été observées.

Les émissions de CH₄ sur l'ensemble des 3 semaines de suivi peuvent se classer comme suit : P1>P2>P3 (pour rappel la position des boîtes sur le filtre est donnée sur la Figure 4), c'est-à-dire que les émissions sont (avec les mesures réalisées sur les boîtes manuelles) en moyennes plus élevées à la périphérie du filtre par rapport à la position centrale. Le coefficient de variation interposition est en moyenne de $38,5\% \pm 34,5\%$.

Les émissions de CO₂ sur l'ensemble des 3 positions suit la même tendance que celle du méthane avec P1>P2>P3. Le CV interposition moyen est de $43,7\% \pm 22,4\%$.

Les émissions de N₂O présentent aussi des variations interpositions importantes avec un CV interposition de $68,7\% \pm 26,1\%$. Les émissions mesurées aux bords des filtres sont globalement plus importantes que celles mesurées en milieu de filtre.

Second étage de filtration :

La variabilité spatiale des émissions gazeuses sur le second étage est présentée dans le Tableau 9.

Les émissions de CH₄ sont en moyenne plus faibles sur le second étage que sur le premier étage. Néanmoins, les différences entre les flux mesurés aux trois positions sont importantes puisque le CV interposition moyen est de $49,0\% \pm 26,8\%$, illustrant une forte variabilité spatiale. Les flux moyens mesurés sur les positions 4 et 6 sont équivalentes et inférieures aux émissions mesurées sur la position 5.

Les émissions de CO₂ sur l'ensemble des 3 semaines de suivi montrent que P6<P5<P4. Le coefficient de variation moyen de $39,7\% \pm 31,9\%$.

Les émissions de N₂O présentent aussi des disparités interpositions importantes avec un coefficient de variation interposition moyen de $48,1\% \pm 31,4\%$. En moyenne les émissions mesurées sur la position 6 sont similaires et supérieures aux valeurs observées sur la position 4 et 5 (P6>P4>P5).

Ces résultats montrent que les différentes émissions de GES varient sur la surface des lits. Plusieurs pistes d'explication de ce phénomène peuvent être suggérées. Tout d'abord, l'hypothèse de la

présence d'hétérogénéités dans la répartition de l'influent sur le massif filtrant peut être mise en avant. Cela causerait une accumulation localisée de matières organiques induisant une disparité des flux gazeux issus de leur dégradation. Une autre hypothèse concerne la présence probable de chemins préférentiels à l'infiltration de l'eau induisant la présence de flux plus importants dans certaines zones et favorisant indirectement les flux gazeux issus de la dégradation de ces composés dans ces zones ciblées.

3.2.3.3. Variabilité temporelle des émissions

La variabilité temporelle des émissions a pu être évaluée à plusieurs niveaux : à l'échelle de l'heure, de la journée et du cycle complet de filtration.

Variations horaires :

Les variations horaires sont analysées en détaillant le suivi des flux de N_2O , CH_4 et CO_2 avec les boîtes automatiques. L'exemple d'une journée de mesure est présenté sur la Figure 11. Les flux de CH_4 , CO_2 et N_2O suivent des tendances similaires avec, sur la période présentée, une augmentation progressive des flux émis en journée jusqu'à 16 h suivi d'une diminution lors de la nuit. Des tendances similaires sont observées sur la seconde boîte automatique présente sur l'étage 1. Bien que les tendances horaires ne suivent pas toujours celles présentées sur cet exemple, cette figure illustre les dynamiques importantes qui peuvent se produire sur une journée de mesure en un point donné. Pour l'étage 2, des comportements similaires sont observés avec des dynamiques qui peuvent être importantes et parfois moins prononcées.

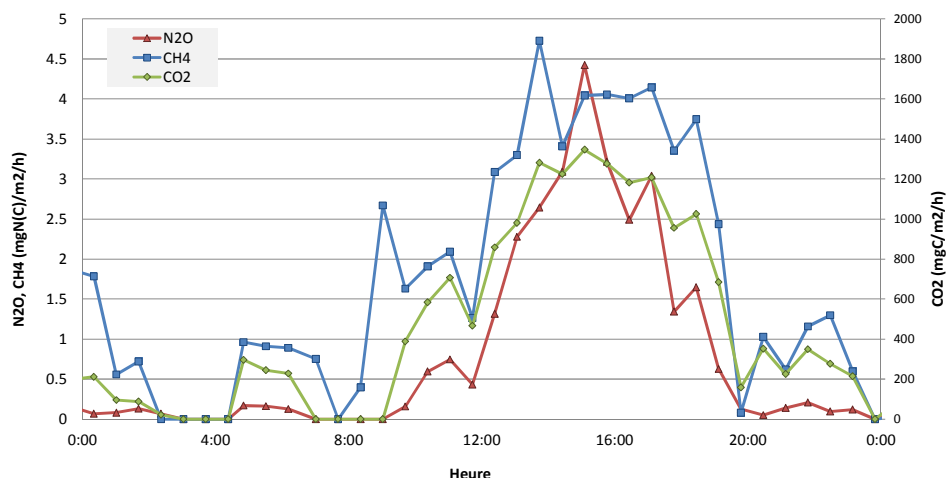


Figure 11 : Suivi continu des flux gazeux surfaciques sur une boîte automatique de l'étage 1 (station 4)

Variations journalières :

Les variations journalières peuvent être observées dans les Tableaux 8 et 9 (écart type élevé). Ces écarts observés sur les différentes positions lors de la semaine d'alimentation et des deux semaines de repos reflètent en effet les effets cumulatifs des variations journalières. Une illustration de ces variations hebdomadaire est présentée sur la Figure 12. Sur cette figure nous observons des dynamiques importantes de l'ordre du jour et de la semaine. Sur l'ensemble du cycle (alimentation/repos) du premier étage, nous observons des dynamiques similaires entre les flux de CH_4 et les flux de N_2O . Les mêmes comportements sont retrouvés sur le filtre du second étage.

Sur le premier étage, nous observons d'importantes émissions de CH_4 et CO_2 au début de la période de repos alors que les flux de N_2O sont très faibles. Ensuite, les émissions de CH_4 et CO_2 diminuent et nous observons alors des pics d'émission de faible amplitude pour les trois gaz.

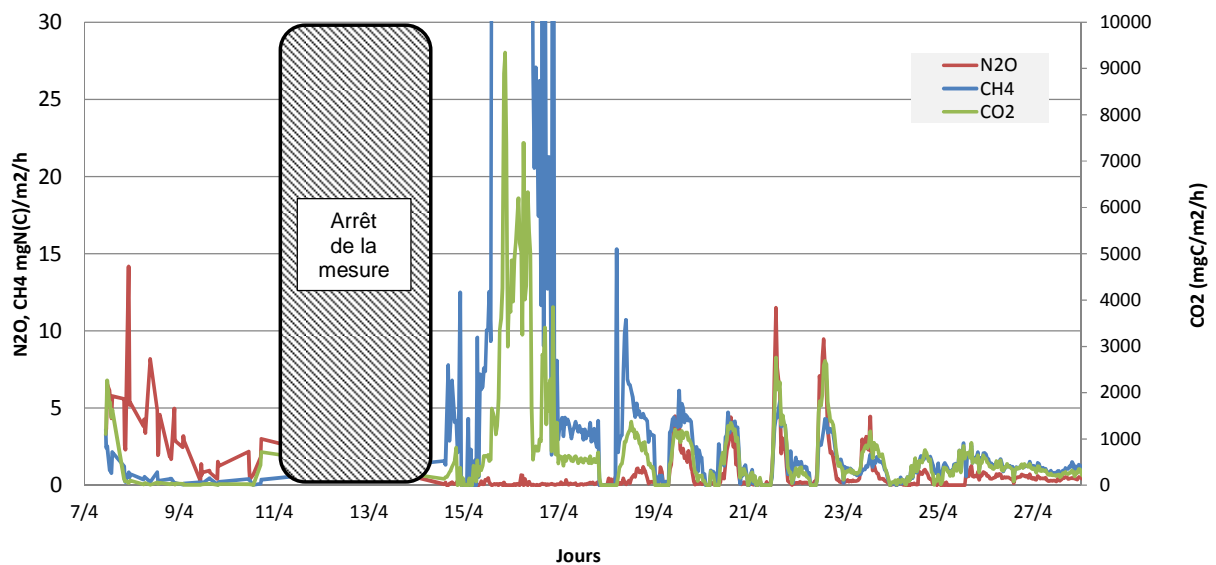


Figure 12 : Suivi continu des flux gazeux surfaciques durant le cycle alimentation/repos sur une boîte automatique de l'étage (station 4)

3.2.4. Emissions de N_2O dissous

Le suivi de N_2O dissous a été réalisé en sortie du premier et second étage (Figure 13). Le suivi n'a pu être réalisé durant les deux premiers jours de mesure à cause de la mauvaise qualité du signal comme expliqué précédemment.

Le cycle 1 (jour 07/4 au jour 14/4) correspond au filtre dont les performances épuratoires et les émissions gazeuses ont été caractérisées. Les autres cycles (à partir du 14/4) correspondent aux autres filtres des deux étages dont les émissions gazeuses n'ont pas été étudiées.

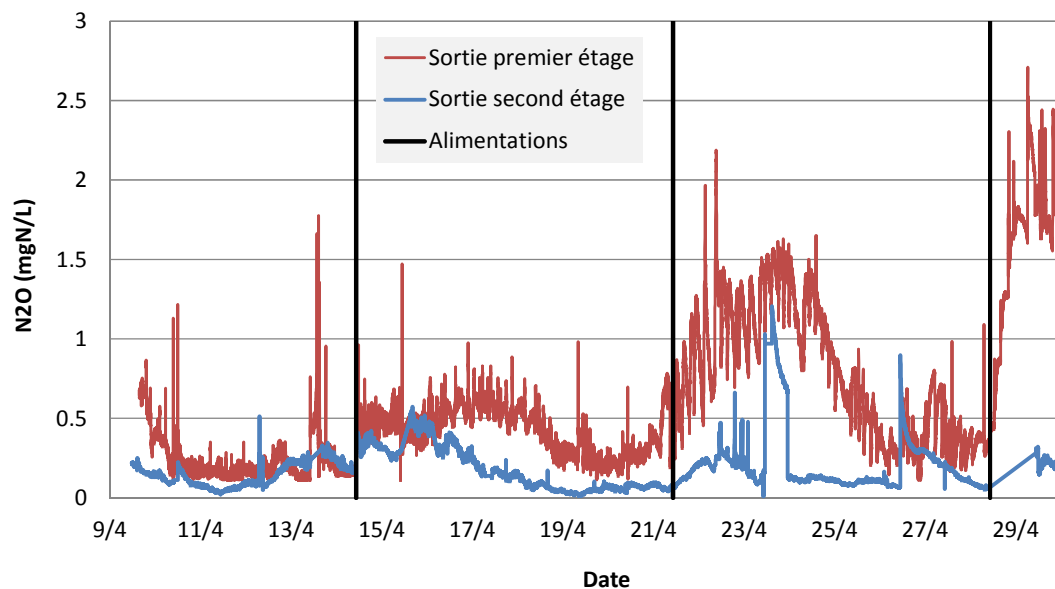


Figure 13 : Concentrations en N_2O dissous en sortie des deux étages de filtration de la station 4

Le suivi des concentrations en N_2O dissous en sortie du premier étage montre une augmentation de la production de N_2O lors des premiers jours de l'alimentation des filtres puis une diminution durant la seconde partie de la semaine d'alimentation. Cependant, les valeurs de concentrations mesurées sont très variables. Nous observons ainsi des concentrations similaires entre le premier cycle (09-14/04) et le second cycle (14-21/04). Par contre les concentrations observées sur le troisième (21-28/04) et le début du quatrième cycle (28-30/004) sont largement supérieures. Les concentrations mesurées en sortie de second étage suivent les mêmes dynamiques que celles en sortie de premier étage mais sont plus faibles.

3.2.5. Facteurs d'émission

Les facteurs d'émission mesurés sont calculés en rapportant le cumul des émissions sur les trois semaines du cycle (1 semaine d'alimentation et deux semaines de repos) au flux d'azote total (dans le cas du N₂O) ou de la DCO totale (dans le cas du CO₂ et du CH₄) reçus sur le filtre du premier étage lors de la semaine d'alimentation. Pour le N₂O, le flux liquide en sortie du second étage durant la semaine d'alimentation du filtre est additionné aux flux gazeux mesurés sur les deux étages pour le calcul du facteur d'émission.

Le calcul des émissions de GES a été réalisé en utilisant les valeurs des flux mesurés sur les boîtes automatiques car la fréquence d'échantillonnage est plus importante que sur les boîtes manuelles. Les flux gazeux et liquides mesurés sur les deux étages ainsi que les facteurs d'émission calculés sont détaillés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Flux de GES et facteurs d'émission mesurés sur la station 4 (à partir des boîtes automatiques)

	Gaz									Gaz + liquide	
	Alimentation			Repos			Cycle			Alimentation	Cycle
	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	N ₂ O
Flux Etage 1 (mgN(C)/m ² /h)	1,78	0,34	222,60	0,39	5,07	523,80	0,85	3,49	423,40	3,70	1,50
Flux Etage 2 (mgN(C)/m ² /h)	2,92	0,39	525,20	0,33	0,92	293,98	1,20	0,74	371,05	4,61	1,76
Facteur d'émission*							0,64	0,19	31,16		0,78

* FE exprimés en % (kgN/kgNTentrant pour N₂O et kgC/kgDCOentrante pour CH₄ et CO₂).

4. Discussion

4.1. Analyse des émissions de GES

4.1.1. Protocole de mesure

Les résultats obtenus sur les deux stations étudiées mettent en évidence une très forte variabilité spatiale et temporelle des émissions de méthane et de protoxyde d'azote.

Les coefficients de variation interposition pour le CH₄ et le N₂O étaient pour chaque point d'échantillonnage bien au-dessus de 30%, atteignant parfois même 80% dans le cas de l'étage 1 de la station 3. Cette variabilité peut s'expliquer par une répartition non homogène de l'influent et de la matière organique sur les filtres créant des gradients de concentrations en substrat et en oxygène dans le massif. L'échantillonnage des filtres doit donc prendre en compte cette variabilité interposition afin de caractériser rigoureusement les flux de GES de ces systèmes complexes.

Le suivi en ligne des émissions gazeuses des deux stations montre une forte dynamique temporelle des émissions avec d'importants pics de GES lors des premiers jours de l'alimentation du filtre et des pics d'amplitude variable lors des semaines de repos. Ces résultats indiquent qu'une mesure en continu sur au moins un cycle complet (alimentation et repos) est nécessaire si l'on désire caractériser rigoureusement les émissions de GES pour une période donnée de l'année. Les fortes dynamiques observées montrent qu'une mesure ponctuelle peut difficilement aboutir à une estimation correcte des émissions. Aussi, les résultats obtenus sur la station 3, sur la base de données ponctuelles, doivent être considérés avec précaution.

En dernier lieu, il semble évident au vu des résultats obtenus sur la station 4 que le N₂O dissous en sortie de station est loin d'être négligeable, constituant quasiment 20% du flux total (gaz + liquide). Celui-ci doit donc être caractérisé au même titre que les émissions gazeuses.

Il est à noter que les mesures de GES sur les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical sont très rares et il n'existe à notre connaissance aucune publication traitant à la fois de leur variabilité spatiale et temporelle sur les deux étages des filtres plantés. Les résultats présentés dans ce rapport permettent de préciser les protocoles de mesure à adopter sur site pour une quantification pertinente des émissions ainsi que les ordres de grandeur des facteurs d'émission. Cependant, du fait de la

complexité méthodologique (échantillonnage spatial et temporel), ces mesures n'ont pu être déployées que sur un nombre restreint de stations. Un travail complémentaire est nécessaire afin de mettre en œuvre les outils développés dans le cadre de cette étude sur d'autres stations afin de consolider ces résultats et permettre leur extrapolation.

4.1.2. Comparaison avec les facteurs par défaut du GIEC

Les deux campagnes de mesures réalisées dans des conditions opératoires contrastées ont montré que les flux de GES n'étaient pas négligeables sur les sites étudiés. De plus, **les émissions de N₂O quantifiées sont bien supérieures à celles estimées avec les facteurs par défaut du GIEC.**

Pour rappel, la méthode de calcul des émissions de N₂O proposée par le GIEC considère qu'une fraction de l'azote entrant est émise sous forme gazeuse au sein du procédé (émission directe correspondant à 0,023% du flux de NTK entrant), le N₂O dissous en sortie de station est négligé et il est considéré qu'une fraction de l'azote total contenu dans les eaux traitées sera émise sous forme de N₂O lors de sa transformation dans les rivières et estuaires (émission indirecte correspondant à 0,5% du flux d'azote total sortant).

Cependant, le N₂O dissous dans l'effluent pouvant représenter une part importante du N₂O produit par les stations et être potentiellement émis sous forme gazeuse dans le milieu naturel (par transfert gaz-liquide s'il n'est pas dénitrifié dans le milieu naturel), celui-ci a été comparé au facteur d'émission indirecte. La fraction additionnelle d'azote total qui serait potentiellement transformée en N₂O dans le milieu naturel n'a pas été intégrée, en l'absence de données chiffrées sur cette possible transformation en rivière.

Si l'on compare les émissions mesurées à celles estimées avec les facteurs d'émission par défaut du GIEC pour le N₂O, les différences sont significatives. Pour la station 3, les émissions directes de N₂O mesurées sont 22 fois plus importantes que celles estimées. Pour la station 4, les émissions directes mesurées sont 28 fois supérieures à celles estimées alors que les émissions indirectes sont deux fois inférieures. Notons que les émissions indirectes sont sous-estimées dans nos résultats puisqu'on n'intègre pas les émissions potentielles liées à la transformation de l'azote total dans le milieu naturel. Un faible facteur d'émission sur ces importants flux d'azote en sortie de station (car la dénitrification est limitée dans les filtres plantés de roseaux) aura donc pour conséquence d'augmenter fortement le facteur d'émission total de la station. De fait, si l'on totalise les flux de N₂O gazeux et dissous mesurés, les émissions de la station 4 ne sont plus alors que 2,4 fois supérieures à celles estimées avec les facteurs d'émission directe et indirecte du GIEC.

4.1.3. Contribution des trois GES au bilan carbone

En comptabilisant les flux des trois gaz mesurés, le bilan carbone réalisé en utilisant un facteur de 265 kgCO₂/kgN₂O et de 25 kgCO₂/kgCH₄ pour le N₂O et le CH₄ respectivement (GIEC 2013) nous montre que le N₂O gazeux représente 7% et 16% du bilan pour les stations 3 et 4, respectivement. Le méthane compte dans ce bilan pour 68% pour la station 3 alors qu'il ne représente que 5% pour la station 4, le reste étant dû aux émissions directes de CO₂ (Figure 14).

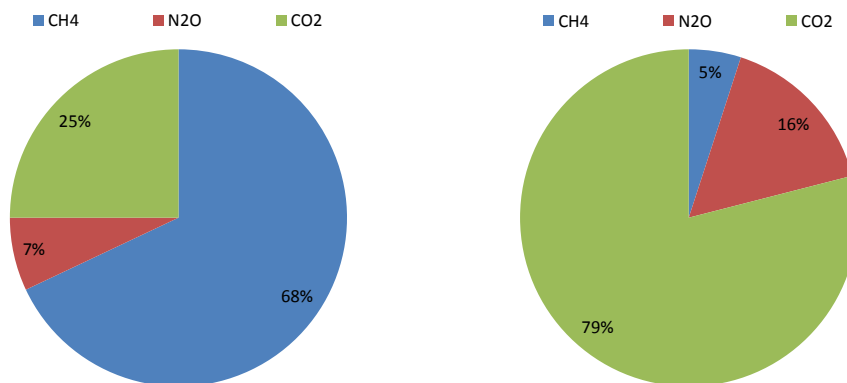


Figure 14 : Contribution respective des émissions directes de CO₂, CH₄ et N₂O au bilan CO₂ pour la station 3 (gauche) et 4 (droite)

En rajoutant dans ce bilan les émissions de CO₂ liées à l'utilisation des pompes pour le relevage des influents, et en utilisant la valeur de 0,14kWh/m³ d'eau (moyenne 2013 issue de la mesure par les services du SATESE du Loiret sur cette station) et l'équivalent CO₂ liée à la consommation énergétique en France (114g CO₂/kWh, GIEC 2013), nous remarquons que le bilan CO₂ lié au relevage constitue moins de 1% du bilan total. Cela souligne notamment le poids des GES dans le bilan carbone de cette filière et montre la nécessité de la recherche pour mettre en avant des stratégies de réduction de ces émissions en optimisant le fonctionnement des procédés.

4.2. Lien entre les émissions de GES et les conditions opératoires des procédés

L'analyse du fonctionnement des filtres étudiés permet de donner quelques indications sur les conditions opératoires favorisant les émissions de GES.

Pour la station 3, qui connaissait un colmatage important des deux étages, les mesures réalisées soulignent **l'importance de l'oxygénation du massif** pour i) maintenir une bonne activité de nitrification et ii) limiter les émissions de GES. En effet, les résultats montrent que les performances épuratoires de ce filtre étaient fortement dégradées avec des abattements en ammonium extrêmement faibles, ce phénomène étant directement lié à l'insuffisance d'oxygène nécessaire à la nitrification dans le massif. Dans le même temps, les émissions surfaciques en méthane étaient très élevées, ce qui suggère la prédominance de conditions anaérobies.

L'analyse fine des flux dissous et gazeux de N₂O durant la semaine d'alimentation de la station 4 montre que les émissions, rapportées à la quantité d'ammonium dégradée sur chaque étage de filtration, sont plus importantes sur le premier étage (1,56 % kgN-N₂O/kgN-NH₄^{degradé}) que sur le second (1,06 % kgN-N₂O/kgN-NH₄^{degradé}). Les mesures d'oxygénation du massif ayant montré que le premier étage était, en période d'alimentation, beaucoup moins oxygéné que le second étage, cela tend à montrer que des conditions de faible oxygénation sont susceptibles de favoriser les émissions de N₂O. De plus, les dynamiques observées sur les émissions de CH₄ et N₂O durant la période de repos semblent aller dans le même sens. Durant les premiers jours de la période de repos du filtre, l'oxygénation du massif est faible. Nous pouvons penser que l'oxygène entrant dans le massif - principalement par diffusion- est rapidement utilisé pour l'oxydation de la matière carbonée et azotée. Cela induit des conditions anaérobies dans le massif ce qui expliquerait les fortes émissions de CO₂ et CH₄ rencontrées durant les premiers jours de repos. Ensuite, une fois la majeure partie de la matière carbonée dégradée, l'oxygénation du massif est plus rapide et nous observons, à ce moment-là des pics d'émission de N₂O. Ceci, couplé au relargage important de nitrate lors des premiers jours de réalimentation du filtre -qui montre que la nitrification a bien lieu dans le massif lors de la période de repos-, tend à montrer que des conditions d'aération modérées pourraient favoriser les émissions de N₂O.

5. Conclusion et perspectives

Une campagne de mesure a été réalisée sur deux procédés fonctionnant sur le principe des filtres plantés de roseaux à écoulement vertical. La première campagne de mesure mise en place en condition estivale (station 3) a été réalisée sur un filtre subissant un colmatage important. La seconde campagne, réalisée en période printanière (station 4) a permis l'étude d'un filtre ayant des performances épuratoires classiques. Les conclusions de ce travail sont nombreuses :

- Les facteurs d'émission de N₂O_{gazeux} mesurés sont respectivement de 0,46 % et de 0,64 % de la charge en azote entrant pour les stations 3 et 4. Ces facteurs sont 22 et 28 fois supérieurs à ceux estimés par la méthode du GIEC (pour les émissions directes) ;
- En tenant compte des émissions gazeuses et liquides, le facteur d'émissions mesuré sur la station 4 atteint 0,78 %, ce qui est 2,4 fois supérieur à celui estimé par la méthode du GIEC (pour les émissions directes et indirectes) ;
- De fortes dynamiques des émissions ont été observées ce qui indique une variabilité temporelle importante. Dans la pratique, une mesure continue des émissions sur au minimum un cycle de filtration (alimentation + repos) est nécessaire pour caractériser les émissions de ce type de procédé pour une période donnée de l'année ;
- De fortes variabilités spatiales des émissions ont aussi été mises en avant et montrent l'importance de l'échantillonnage dans la caractérisation pertinente des émissions de N₂O ;
- L'oxygénation du massif filtrant semble être un facteur important influençant les émissions de N₂O et CH₄ dans les deux stations étudiées ;

- De fortes émissions de méthane (CH_4) ont été mesurées dans la station 3 (2,64 %, $\text{kgC-CH}_4/\text{kgDCO}_{\text{entrante}}$). Ces fortes émissions ont été imputées à la mauvaise oxygénation du filtre due à son colmatage important.

Dans l'avenir, des efforts doivent être fournis pour mieux documenter les émissions de gaz à effet de serre par ce type de procédés largement utilisé en France pour les petites collectivités. Les conditions favorisant les émissions de GES doivent également être mieux définies. Des mesures complémentaires sur des filtres ayant des conditions de fonctionnement contrastées, couplées à une analyse fine des conditions d'oxygénation du massif, permettraient de préciser les résultats préliminaires de cette étude indiquant un lien entre les émissions de GES et les conditions d'oxygénation des filtres. Ces mesures devront également intégrer les éventuelles variabilités saisonnières des émissions en lien avec la température et le cycle de croissance des filtres plantés ainsi que l'étude de l'influence de l'âge des installations sur les émissions de GES.

6. Table des illustrations

Figure 1 : Schéma de fonctionnement de la station 3.....	7
Figure 2 : Schéma de fonctionnement de la station 4.....	7
Figure 3 : Positionnement des dispositifs de mesure des flux gazeux sur la station 3 : a) étage1, b) étage 2.....	10
Figure 4 : Positionnement des dispositifs de mesure des flux gazeux sur la station 4: a) étage1 (les boîtes automatiques sont positionnées sur le filtre « droit » et les boîtes manuelles sur le filtre « gauche »), b) demi-lit d'étage 2.....	10
Figure 5 : Suivi continu des flux gazeux surfaciques entre 31/07 et le 02/08 sur une boîte automatique de l'étage 1 (station 3).....	15
Figure 6: Suivi continu des flux gazeux surfaciques sur une boîte automatique de l'étage 1 (station 3).....	15
Figure 7 : Profils de gaz sur l'étage 1 : a) fin de la phase d'alimentation, b) fin de la phase de repos (station 4).....	19
Figure 8 : Evolution au cours d'un cycle repos/alimentation des teneurs moyennes en gaz dans le massif filtrant du premier étage (station 4).....	20
Figure 9 : Profils de gaz sur l'étage 2: a) fin de la phase d'alimentation, b) fin de la phase de repos..	20
Figure 10 : Evolution au cours d'un cycle repos/alimentation des teneurs moyennes en gaz dans le massif filtrant du second étage.....	21
Figure 11 : Suivi continu des flux gazeux surfaciques sur une boîte automatique de l'étage 1 (station 4).....	23
Figure 12 : Suivi continu des flux gazeux surfaciques durant le cycle alimentation/repos sur une boîte automatique de l'étage (station 4).....	24
Figure 13 : Concentrations en N ₂ O dissous en sortie des deux étages de filtration de la station 4.....	24
Figure 14 : Contribution respective des émissions directes de CO ₂ , CH ₄ et N ₂ O au bilan CO ₂ pour la station 3 (gauche) et 4 (droite).....	26

7. Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques de l'influent et de l'effluent de la station 3. Les journées dont les valeurs sont issues d'un calcul sont grisées. Le nombre de jours écoulés depuis la reprise de l'alimentation des filtres étudiés est donné entre parenthèse. Sortie 1et sortie 2 correspondent à l'effluent de l'étage 1 et étage 2, respectivement.....	12
Tableau 2 : Charges et rendements de la station 3.....	12
Tableau 3 : Emissions de GES sur les trois positions de l'étage 1 et variabilité interposition (les émissions sont exprimées en mgC(N)/m ² /h) – échantillonnage manuel sur la station 3.....	13
Tableau 4 : Emissions de GES sur les trois positions de l'étage 2 et variabilité interposition (les émissions sont exprimées en mgC(N)/m ² /h) – échantillonnage manuel sur la station 3.....	13
Tableau 5 : Flux de GES et facteurs d'émission mesurés sur la station 3 (à partir des boîtes manuelles).....	16
Tableau 6 : Principales caractéristiques de l'influent et de l'effluent de la station 4. Le nombre de jours écoulés depuis la reprise de l'alimentation des filtres étudiés est donné entre parenthèse.....	17
Tableau 7 : Charges et rendements de la station 4.....	18
Tableau 8 : Emissions de GES sur les trois positions de l'étage 1 et variabilité interposition (les émissions sont exprimées en mgC(N)/m ² /h) – échantillonnage manuel sur la station 4.....	21
Tableau 9 : Emissions de GES sur les trois positions de l'étage 2 et variabilité interposition (les émissions sont exprimées en mgC(N)/m ² /h) – échantillonnage manuel sur la station 4.....	22
Tableau 10 : Flux de GES et facteurs d'émission mesurés sur la station 4 (à partir des boîtes automatiques).....	25

8. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le personnel Irstea Antony pour sa contribution au travail présenté dans ce document.

Nous remercions aussi les personnes qui nous ont permis de réaliser les mesures sur site, et notamment les maires des deux communes dans lesquelles se sont déroulées les campagnes de mesure ainsi que leur équipe. Merci également à M. Chevalier du conseil général du Loiret pour son aide dans le choix et le suivi des procédés.

Onema
Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes

01 45 14 36 00

www.onema.fr

Irstea
1 rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex

0 1 40 96 60 02

www.irstea.fr