



HAL
open science

Mesure in situ des émissions de N₂O dans les procédés de traitement des ERUs. Synthèse des résultats des campagnes de mesure in situ

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 dans les procédés de traitement des ERUs. Synthèse des résultats des campagnes de mesure in situ. [Rapport de recherche] irstea. 2015, pp.18. hal-02605269

HAL Id: hal-02605269

<https://hal.inrae.fr/hal-02605269>

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.



Emissions de N₂O des procédés de traitement des ERUs. Synthèse des campagnes de mesure *in situ*

Synthèse

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 ont été réalisées sur quatre stations d'épuration des eaux résiduaires urbaines afin de quantifier les facteurs d'émission de protoxyde d'azote (N₂O) de trois procédés de traitement des ERUs : boue activée, biofiltration et filtres plantés de roseaux verticaux. Pour chacun de ces procédés, les principaux paramètres opératoires influençant ces facteurs d'émission ont été identifiés.

L'ensemble des mesures réalisées a permis de mettre en évidence la forte disparité des émissions de N₂O d'un procédé à l'autre (de 0,19 % de N-N₂O/N_{entrant} à 4,86 % de N-N₂O/NH₄ dégradé) mais également de la variabilité temporelle de ces émissions pour un même procédé.

Cette hétérogénéité des résultats démontre (i) la nécessité de définir à minima un facteur d'émission par procédé, en tenant compte des spécificités de chacun et (ii) le manque de pertinence de l'approche actuelle du GIEC basée sur l'utilisation de facteurs d'émission déterministes, pouvant conduire à une forte sous-estimation du poids de ces émissions sur l'impact environnemental des stations, et la nécessité de la remplacer par une approche stochastique intégrant incertitude et variabilité au fur et à mesure des avancées des connaissances scientifiques.

- **MOTS CLES : PROTOXYDE D'AZOTE, N₂O, GAZ A EFFET DE SERRE, FILTRES PLANTES DE ROSEAUX, BIOFILTRATION, BOUE ACTIVEE, STATION D'EPURATION.**

- **N₂O EMISSIONS IN WASTEWATER TREATMENT PROCESSES. SYNTHESIS OF IN-SITU MEASUREMENTS.**

- **ABSTRACT**

Measurements have been conducted in four full-scale wastewater treatment plants in order to characterize the N₂O emission factor from three biological nitrogen removal processes: activated sludge, biofilters and vertical subsurface flow constructed wetlands. For each process the operational conditions favoring N₂O emissions were investigated.

Our measurements highlighted the wide discrepancy of N₂O emissions from one process to another (from 0.19 % N₂O-N_{influent} to 4.86 % of N₂O-N/N_{treated}) and their high temporal variability for a given process.

These results indicates (i) the need to define a process specific N₂O emission factor taking into account the operating conditions of each process, (ii) the lack of accuracy of the current IPCC accounting approach based on the use of deterministic emissions factors and the necessity of replacing it by a stochastic approach that takes into account uncertainty and variability of reported results.

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

- **SOMMAIRE**

- **EMISSIONS DE N₂O DES PROCÉDES DE TRAITEMENT DES ERUs. SYNTHÈSE DES RESULTATS DE CAMPAGNES DE MESURE *IN SITU* 6**
 - 1. Contexte et objectifs 6**
 - 2. Sites étudiés et positionnement des campagnes de mesure..... 7**
 - 3. N₂O : facteurs d'émission et conditions opératoires 7**
 - 4. Mise en perspectives des résultats de cette étude vis-à-vis des pratiques actuelles 10**
 - 4.1 Comparaison avec les facteurs du GIEC.....10**
 - 4.2 Effet des nouveaux facteurs d'émissions de N₂O sur les résultats d'empreinte carbone et d'ACV.....11**
 - 5. Conclusions et perspective..... 13**
 - 6. Table des illustrations 15**
 - 7. Liste des tableaux 15**
 - 8. Remerciements 16**
 - 9. ANNEXE : Liste des documents Irstea-ONEMA publiés dans le cadre de ce projet 17**

- **EMISSIONS DE N₂O DES PROCÉDES DE TRAITEMENT DES ERUS. SYNTHÈSE DES RESULTATS DE CAMPAGNES DE MESURE *IN SITU*.**

1. Contexte et objectifs

Le protoxyde d'azote (N₂O) est un puissant gaz à effet de serre (GES) dont le potentiel de réchauffement est équivalent à 320 fois celui du dioxyde de carbone. Il joue également un rôle important dans la destruction de la couche d'ozone.

Bien que les activités anthropiques liées à l'agriculture, l'industrie ou la production d'énergie soient responsables de la majeure partie de ses émissions, le N₂O peut également être produit et émis lors du traitement des eaux usées par les processus biologiques de nitrification et dénitrification impliqués dans le traitement de l'azote.

Les processus biologiques majeurs de production de N₂O sont l'oxydation de l'hydroxylamine, la dénitrification autotrophe et la dénitrification hétérotrophe. Les émissions de N₂O sont soumises à de nombreux facteurs d'influence : conditions d'oxygénation, concentrations en nitrite, ratio C/N, pH, température, variations transitoires des conditions opératoires. Dans le cas des procédés de traitement extensifs, des paramètres d'influences supplémentaires sont à considérer. Les principaux sont la saturation en eau du massif, les variations saisonnières, les conditions hydrologiques et le type de plantes.

Les données de la littérature portant sur les émissions *in situ* de N₂O sont dispersées, indiquant des taux compris entre 0,001 – 4,0% de la charge d'azote entrante pour les procédés intensifs et 0,006 – 1,83% de la charge d'azote entrante pour les procédés extensifs. La dispersion de ces résultats est en partie liée à la diversité des méthodes de prélèvement et d'analyse des gaz. D'autre part, les caractéristiques des effluents et les paramètres de fonctionnement des stations de traitement qui engendrent de multiples conditions de traitement ont également un impact sur le taux d'émission mesuré.

En France, l'article 75 de la loi Grenelle II du 12 Juillet 2010 et le décret d'application n° 2011-829 du 11 juillet 2011, rendent obligatoires pour les collectivités territoriales de plus de 50 000 habitants, le rendu de bilans d'émission des GES et la mise en place de démarches visant à leur réduction. Lors de l'élaboration de ces bilans, l'estimation des émissions de GES repose principalement sur l'utilisation de facteurs d'émission fixes connus. Actuellement, le facteur d'émission directe (3,2 g N₂O/EH/an équivalent à 0,037% de la charge entrante en azote), utilisé pour quantifier les émissions directes du secteur du traitement biologique des eaux résiduaires urbaines et recommandé par le GIEC, provient de données acquises sur une seule station d'épuration à boues activées d'Amérique du Nord traitant le carbone (Czepiel et al. 1995). Les émissions indirectes de N₂O ayant lieu dans les estuaires et rivières, recevant les eaux traitées, sont quantifiées grâce à un facteur d'émission fixe provenant d'études réalisées sur des sols (0,5% de N-N₂O/N-total rejeté). Récemment le GIEC (2013) a adopté un facteur d'émission directe pour les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical plus faible que celui employé pour les procédés intensifs (FE = 0.023% de la charge entrante en azote).

Compte tenu de la forte dispersion des facteurs d'émission de N₂O et du faible nombre de mesures réalisées en France, il est primordial d'acquies plus de données *in situ* et de préciser le lien entre les émissions observées et les paramètres opératoires des procédés.

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 protoxyde d'azote ont été réalisées entre 2013 et 2015 sur plusieurs types de procédés de traitement des eaux usées. Vu le grand nombre de technologies existantes, et étant donné les contraintes techniques fortes liées à la mise en place de campagnes de mesure pertinentes, notre étude s'est focalisée sur les procédés les plus utilisés en France : les boues activées, la biofiltration et la filtration par lits plantés de roseaux représentant des procédés intensifs et extensifs.

Les objectifs de ces campagnes des mesures étaient :

- La caractérisation des facteurs d'émission de N₂O pour les procédés étudiés ;
- L'évaluation des principaux facteurs opératoires des procédés favorisant la production et l'émission de N₂O ;
- L'évaluation, si possible de la variabilité saisonnière des émissions.

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

Plusieurs documents ont été publiés (voir la liste en ANNEXE) afin de (i) dresser un état des lieux des connaissances scientifiques sur les émissions de N_2O de différents procédés de traitement des eaux résiduaires urbaines, (ii) préciser les protocoles expérimentaux utilisés lors des diverses campagnes de mesure et (iii) détailler les résultats obtenus dans le cadre de ce projet. Le lecteur intéressé pourra s'y référer pour plus de précision. Le présent document synthétise les différents résultats de cette étude.

2. Sites étudiés et positionnement des campagnes de mesure

Les différents sites suivis, leurs principales caractéristiques ainsi que les périodes de suivi sont présentés dans le Tableau 1.

Toutes les campagnes de mesure ont été réalisées sur des procédés fonctionnant en régime opérationnel, c'est-à-dire qu'aucune modification n'a été apportée dans la conduite des procédés. Les campagnes de mesure réalisées en STEU 1, 2 et 4 se sont déroulées sur des procédés fonctionnant de manière correcte et efficace aux vues des rendements épuratoires et des paramètres de conduites des procédés. Par contre la STEU 3 (filtre planté de roseaux à écoulement vertical, remplacé par la suite par STEU 4) connaissait des dysfonctionnements lors de la campagne de mesure avec un colmatage important des deux étages de filtration. Cela explique les faibles rendements de nitrification observés en moyenne durant la semaine d'activité des filtres étudiés.

3. N_2O : facteurs d'émission et conditions opératoires

Les émissions de N_2O ont été mesurées sur l'ensemble des procédés étudiés. Les valeurs moyennes mesurées lors des campagnes de mesure sont récapitulées dans le Tableau 1.

Nous remarquons que les facteurs d'émission mesurés sont très dispersés, que ce soit pour un même procédé (par exemple pour les biofiltres) en fonction des périodes de l'année ou entre les différents procédés. Les valeurs mesurées ainsi que les écarts-types importants montrent la forte variabilité des émissions et suggèrent l'influence des conditions opératoires et sur la production de N_2O .

Les messages principaux dégagés lors de l'étude des différents procédés sont synthétisés dans le tableau 1 et récapitulés ci-après.

Boues activées : L'étude réalisée sur les boues activées (STEU 1) a permis de mettre en évidence plusieurs phénomènes liés aux émissions de N_2O :

- Le suivi en continu des émissions, sur une période de deux semaines, a montré une faible variabilité temporelle des émissions journalières avec des émissions similaires, malgré des conditions de traitement variables (temps de pluie), de l'ordre de 0,19 % de $N-N_2O/N_{\text{entrant}}$.
- La variabilité spatiale des émissions a été observée en lien avec la position du collecteur de gaz au sein de la zone aérée du bassin. D'un point de vue méthodologique, ce résultat souligne l'importance d'un échantillonnage adapté à ces procédés afin de quantifier le flux moyen de N_2O émis.
- La période d'aération est identifiée comme étant la source majoritaire d'émission de N_2O . Cependant, l'analyse de la dynamique d'émission de N_2O suggère que la production de N_2O est induite par les processus de dénitrification hétérotrophe et les processus de nitrification autotrophe.
- Les principaux facteurs favorisant la production de N_2O dans l'installation étudiée sont l'accumulation de nitrites durant les phases aérées et une carence en substrat carboné entraînant une dénitrification incomplète durant les phases non aérées.

Biofiltres nitrifiants : Les deux campagnes de mesure réalisées sur les biofiltres nitrifiants (STEU 2) dans des conditions contrastées ont permis de mettre en avant :

- Le fort potentiel de production de N_2O de ce système intensif de traitement de l'azote (de 2,26 à 4,86 % de $N-N_2O/N-NH_4$ dégradé).
- La dynamique importante des émissions au cours des périodes de suivi. D'un point de vue méthodologique, la mesure en continu sur au moins un cycle de filtration (période entre deux

cycles de lavage) est nécessaire pour caractériser correctement les facteurs d'émission sur une période donnée.

- Bien que la majorité des flux de N_2O soit émise sous forme gazeuse, l'étude des flux de matière a souligné qu'une partie non négligeable (entre 20 et 45%) de N_2O pouvait être émise en phase liquide. D'un point de vue méthodologique, le suivi du N_2O dissous dans l'effluent est primordial pour caractériser globalement les émissions.
- Les paramètres principaux influençant la production de N_2O dans le système étudié sont : le flux d'azote entrant, la température, la durée de filtration et le débit d'aération. La concentration en nitrites a elle-aussi été indirectement mise en cause comme favorisant la production de N_2O .
- Des stratégies de réduction des émissions de N_2O incluant le contrôle de l'aération et le contrôle de l'épaisseur du biofilm ont été proposées.

Biofiltres dénitrifiants : De même que pour les biofiltres nitrifiants, les deux campagnes de mesure réalisées sur les biofiltres dénitrifiants (STEU 2) ont permis de mettre en évidence :

- Le fort potentiel d'abattement du N_2O dissous émis lors de l'étape amont de nitrification. Lors de la campagne hivernale, 86% de réduction de N_2O issus de la nitrification a été mesuré en moyenne sur la période de suivi de 15 jours.
- Le facteur d'émission mesuré (de 0,22 à 1,28 % de $N-N_2O/N-NO_3$ dégradé) illustre alors la fraction de N_2O non réduite lors de l'étape de dénitrification.
- La grande majorité du flux de N_2O émis en dénitrification est rejetée sous forme dissoute dans le milieu récepteur (plus de 99%).
- Dans les conditions d'exploitation rencontrées lors de nos mesures, le ratio C/N a été mis en avant comme étant le principal paramètre influençant l'efficacité de la dénitrification et la réduction de N_2O . En conditions de carence forte en carbone ($DBO/N < 0,5$), des émissions nettes de N_2O ont été mesurées parallèlement à un effondrement du rendement de dénitrification.
- Le contrôle de l'ajout de substrat carboné en dénitrification (maintien d'un ratio DBO/N supérieur à 3) a donc été suggéré pour maximiser la consommation de N_2O et les performances épuratoires du procédé.

Filtres plantés de roseaux : L'étude des deux stations équipées de filtres plantés de roseaux à écoulement vertical (STEU 3 et 4) a permis de mettre en avant :

- Un facteur d'émission compris entre 0,46 et 0,78 % $N-N_2O/N_{entrant}$. Il est à noter que ce facteur inclut les émissions liées au traitement de l'eau usée et des boues (ce qui n'est pas le cas pour les autres procédés).
- La forte variabilité spatiale des émissions. Cette variabilité, a été liée en partie à (i) la répartition non homogène de l'influent et de la matière organique, (ii) la présence de passages préférentiels dans le massif filtrant et (iii) l'oxygénation hétérogène du massif filtrant. D'un point de vue méthodologique, l'échantillonnage constitue un point important pour une quantification rigoureuse des émissions dans ces systèmes complexes.
- Les variabilités temporelles importantes des émissions de N_2O potentiellement observables sur ces systèmes. Ces dynamiques mesurées de l'ordre de la journée mais aussi de l'ordre de la semaine et du cycle complet (alimentation + repos) montrent qu'encre une fois un suivi en continu sur au moins un cycle complet (alimentation + repos) est nécessaire pour caractériser les émissions de ce type de procédé à une période donnée.
- Sur la STEU 4, les émissions mesurées en phase liquide durant la période d'alimentation du filtre constituent une part non négligeable (quasiment 20% dans notre cas d'étude) des émissions totales mesurées sur le cycle complet (alimentation / repos), soulignant la nécessité de mesurer les flux de N_2O dissous pour caractériser au mieux les émissions.
- L'oxygénation du massif est un paramètre important contrôlant les émissions de GES (N_2O et CH_4).

Tableau 1 : Caractéristiques principales des sites étudiés et facteurs d'émissions de N₂O

Site (département)	STEU 1 (91)	STEU 2 (78)		STEU 3 (45)	STEU 4 (45)		
Capacité de traitement nominale (EH)	22 000	5 000 000		270	800		
Volume nominal (m ³ /j)	4800	1 700 000		54	120		
Procédé	Boue activée	Biofiltres		Filtres plantés de roseaux à écoulement vertical	Filtres plantés de roseaux à écoulement vertical		
Spécifications	Aération prolongée C _m = 0,085 kgDBO ₅ / kgMVS/j	Biofiltres nitrifiants C _v = 1,2 -1,5 kgN/m ³ de matériaux/j	Biofiltres dénitrifiants C _v =2,26 - 2,76 kgN/m ³ de matériaux/j	Etage 1, 3 filtres 324 m ² Etage 2, 3 filtres 210 m ² Par filtre : Alimentation (1 semaine) et repos (2 semaines)	Etage 1, 6 filtres 986 m ² Etage 2, 3 filtres 637 m ² Par filtre : Alimentation (1 semaine) et repos (2 semaines)		
Période de mesure	Eté (Mai – Juin 2013)	Eté (Septembre 2014)	Hiver (Janvier 2015)	Eté (Septembre 2014)	Hiver (Janvier 2015)	Eté (Juillet 2014)	Printemps (Avril 2015)
Aération Forcée	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non
Débit entrant (m ³ /j)	4208	19564 par filtre	20426 par filtre	45363 par filtre	59521 par filtre	67,3	58,7
Abattement de l'azote (%)	NH ₄ : 99 NGL : 83	NH ₄ : 83	NH ₄ : 82	NO ₃ : 99	NO ₃ : 93	NH ₄ : 3,4 NGL : 25	NH ₄ : 94 NGL : 34
Facteur d'émission de N₂O (%) (moyenne ± écart type)	0,19 ± 0,06³	2,26 ± 0,46¹	4,86 ± 0,54¹	1,28 ± 2,0²	0,22 ± 0,31²	0,46^{3*} (écart-type non applicable – mesure sur un seul cycle)	0,64^{3*} 0,78³ (incluant le liquide) (écart-type non applicable mesure sur un seul cycle)
Facteurs de variabilité identifiés	- Accumulation de nitrite pendant les phases aérées - Carence en substrat carboné - Variabilité spatiale au niveau de la surface aérée	- Flux d'azote entrant - Température - Durée de filtration - Débit d'air - Nitrite, épaisseur biofilm - Concentration en nitrate de l'influent		- Ratio C/N (gestion de l'ajout de méthanol) - Concentration en oxygène dissous lors du lavage du filtre		- Variabilité spatiale (hétérogénéités du filtre) - Fonctionnement du filtre (alimentation/repos) - Oxygénation du massif filtrant - Température ambiante	

¹kgN-N₂O/kg N-NH₄ dégradé,

²kgN-N₂O/kg N-NO₃ dégradé,

³kgN-N₂O/kg N_{entrant}, *Facteur d'émission gazeux uniquement.

4. Mise en perspectives des résultats de cette étude vis-à-vis des pratiques actuelles

4.1 Comparaison avec les facteurs du GIEC

La Figure 1 compare les facteurs d'émission mesurés lors de cette étude à ceux utilisés par le GIEC.

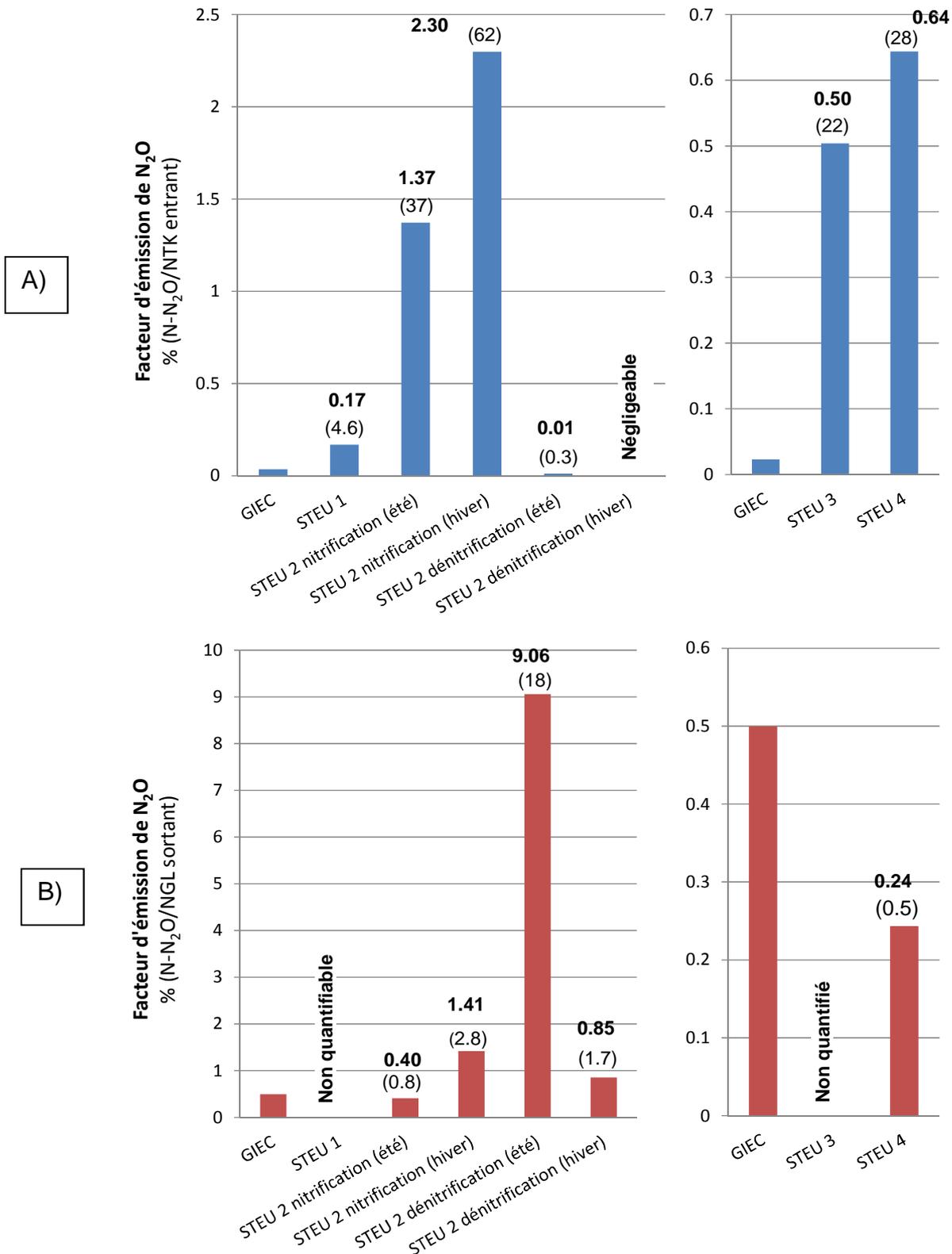


Figure 1 : Comparaison entre émissions mesurées et estimations avec les facteurs du GIEC : A) émissions directes, B) émissions indirectes sous forme de N₂O dissous. Entre parenthèses le rapport entre la valeur mesurée et la valeur du GIEC et en gras la valeur du facteur mesuré.

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 0,037% du flux de NTK entrant pour les procédés intensifs et 0,023% pour les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical), 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 différents procédés étudiés 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 (Figure 1 B). 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.

Une très forte disparité des facteurs d'émission est observée que ce soit entre les procédés mais aussi pour un même procédé, comme le montrent les résultats obtenus sur les biofiltres nitrifiants et dénitrifiants à différentes périodes de l'année. Cette figure ne vise pas à comparer les émissions de N₂O entre les différents procédés car : (i) compte tenu de la très forte variabilité des émissions, l'échantillonnage restreint réalisé lors de **cette étude ne permet pas de proposer un facteur d'émission spécifique à chaque procédé** et (ii) les procédés étudiés n'ont pas les mêmes performances d'épuration. En effet, alors que les boues activées en aération prolongée et les biofiltres permettent un traitement poussé de l'azote, les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical sont principalement mis en place pour traiter l'ammonium (dénitrification limitée dans ce type de procédé).

Cette figure vise donc à (i) résumer les facteurs d'émission de N₂O mesurés sur différentes installations dans des conditions d'exploitation et environnementales spécifiques et (ii) comparer ces facteurs à ceux estimés avec la méthode proposée par le GIEC.

Excepté les procédés purement dénitrifiants (biofiltres dénitrifiants) pour lesquels la quasi-totalité du flux de N₂O se retrouve dans l'effluent, les **émissions gazeuses des autres procédés (nitrifiant/dénitrifiant) sont bien supérieures à celles estimées avec le facteur d'émission directe du GIEC**. Lorsqu'il a été possible de le mesurer, le flux de N₂O dissous dans l'effluent représente une part importante du N₂O produit *in situ*. Ce flux est du même ordre de grandeur que celui estimé avec le facteur d'émission indirecte (sauf pour les biofiltres) et cela sans prendre en compte les éventuelles émissions supplémentaires de N₂O liées à la transformation de l'azote en milieu naturel.

L'hétérogénéité des résultats obtenus démontre (i) la **nécessité de définir à minima un facteur d'émission par procédé, en tenant compte des spécificités de chacun** et (ii) le manque de pertinence de l'approche actuelle du GIEC basée sur l'utilisation de facteurs d'émission fixes pouvant conduire à une forte sous-estimation du poids de ces émissions sur l'impact environnemental des stations d'épuration et l'identification des éventuelles solutions de réduction à mettre en place.

4.2 Effet des nouveaux facteurs d'émissions de N₂O sur les résultats d'empreinte carbone et d'ACV

Pour finir, nous avons voulu évaluer les effets des nouveaux facteurs d'émissions non seulement sur les résultats d'empreinte carbone de stations d'épuration mais aussi les mettre en perspective dans les approches ACV multicritères (ou le réchauffement climatique n'est qu'un impact parmi d'autres).

Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel d'ACV mis au point dans le cadre des travaux Onema-Irstea (logiciel ACV4E qui a obtenu le Trophée Ademe 2015 de la recherche publique « Energie Environnement Climat »). Deux systèmes contrastés ont été comparés (Boue Activée et Filtre Planté) ainsi que 3 facteurs d'émissions (cf. Tableau 2). A noter que les calculs d'impacts correspondent au traitement des effluents d'un équivalent habitant pendant un jour (ce qui permet de comparer des STEU ayant des capacités différentes).

Tableau 2: Facteurs d'émission de N₂O utilisés pour la comparaison

Type de STEP	Facteurs d'émission de N ₂ O utilisés pour la comparaison (% NTK entrant)		
	N2O ACV4E (1)	N2O GIEC	N2O Etude ONEMA
FPRv (Filtre Planté de Roseaux vertical) 800 équivalents habitants	0,500 %	0,023 %	0,780 %
BA (Boue activée) 5200 équivalents habitants	0,290 %	0,037 %	0,190 %
Commentaires	Empirique, à partir de la littérature et de dires d'experts.	Emissions directes uniquement (gazeuses)	Emissions directes gazeuses + émissions directes dans l'effluent liquide (2) (3)

(1) Valeurs actuellement proposées dans le logiciel ACV4E Onema-Irstea
 (2) N₂O dissous, considéré comme émission gazeuse dans les milieux naturels après sa sortie de la STEP
 (3) négligeable a priori pour la STEP BA car non quantifiable (en dessous des seuils de détection)

Les figures suivantes (Figures 2 et 3) présentent l'indicateur d'ACV « changement climatique » pour les trois options de facteurs d'émissions de N₂O proposées dans le Tableau 2. La contribution du N₂O fait partie de la catégorie « Rejets et émissions » qui inclut aussi les rejets de CO₂ et de CH₄ de la STEP. Les autres contributeurs au réchauffement climatique correspondent à des émissions de gaz à effet de serre en lien avec les cycles de vie respectifs de (i) la fin de vie des boues, majoritairement épandues dans ce scénario, (ii) l'exploitation de la STEU (énergies, consommables et réactifs), (iii) la construction de l'infrastructure de la STEU (amortie sur 30 ans).

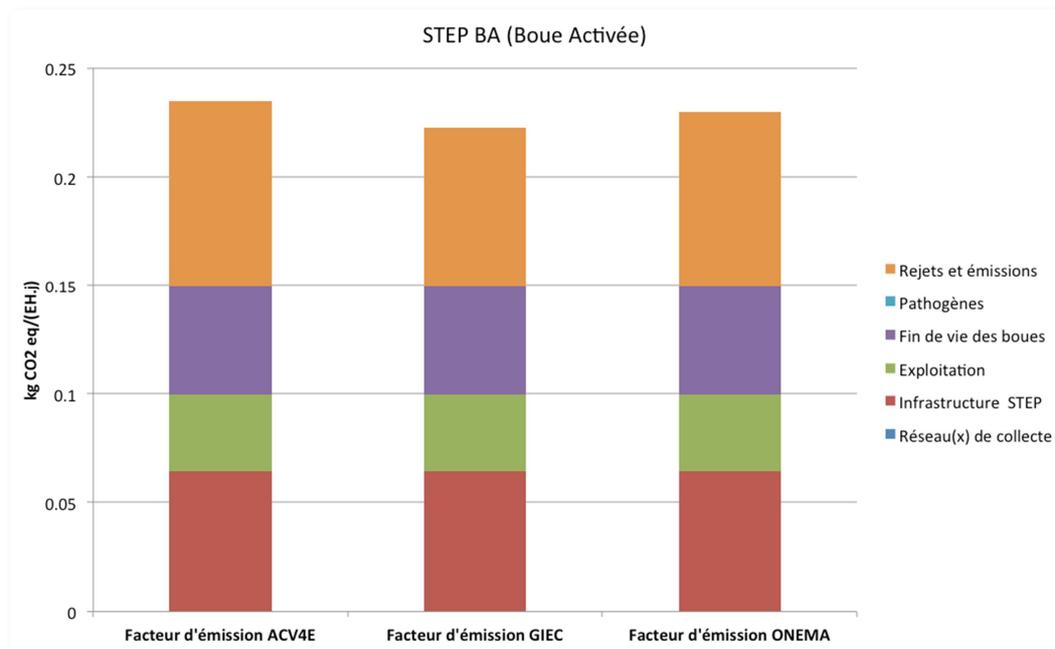


Figure 2 : Indicateur de changement climatique (ACV) pour une STEP à boue activée en fonction du facteur d'émission du N₂O

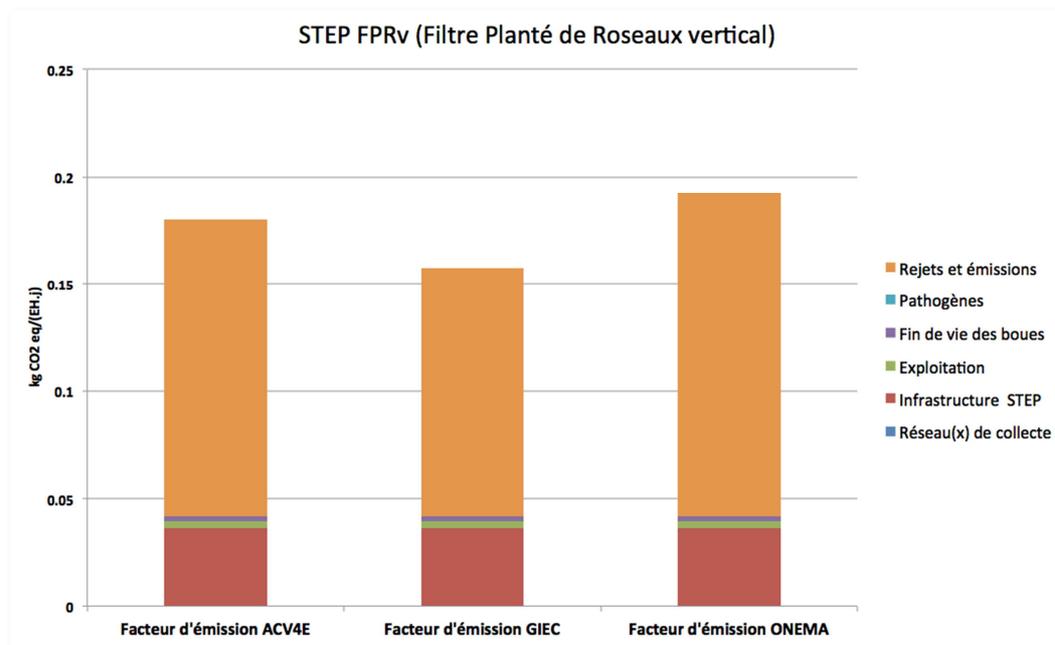


Figure 3 : Indicateur de changement climatique (ACV) pour une STEP à filtres plantés de roseaux en fonction du facteur d'émission du N₂O

D'autres indicateurs multicritères d'ACV autres que le réchauffement climatique ont aussi été calculés. Les conclusions sont les suivantes :

- Les effets des nouveaux facteurs d'émission de N₂O proposés sur l'indicateur « changement climatique » pour une STEP sont :
 - Assez faibles sur les filières intensives type BA en raison de l'effet de masque des autres contributeurs (fonctionnement, fin de vie des boues, infrastructure).
 - Plus important sur les filières extensives, l'écart pouvant aller au-delà de 10%.
- Si on considère le système d'assainissement dans son ensemble (STEP + réseau de collecte), l'effet de masque de l'infrastructure est encore plus grand et les différences liées aux nouveaux facteurs d'émission sont encore moins visibles.
- Si on calcule l'ensemble des indicateurs environnementaux autres que le réchauffement climatique et qu'on les agrège en indicateurs de dommages potentiels sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources naturelles, l'écart à l'avantage des filières extensives se réduit mais les conclusions ne sont pas changées.
- Attention cependant au fait que les émissions indirectes de N₂O (émissions dans les milieux naturels après la sortie de la STEP) n'étaient pas incluses dans la présente étude ONEMA. Suivant les calculs envisagés il faut noter que dans le logiciel ACV4E, pour un FPRv 80 % de l'azote en entrée se retrouve dans les effluents ... contre 12 % pour une boue activée ! Or les émissions indirectes sont proportionnelles à l'azote total rejeté. Il reste donc des travaux pour évaluer ces émissions indirectes.

5. Conclusions et perspective

Le travail réalisé dans le cadre de cette étude et synthétisé dans ce rapport a permis de quantifier les émissions de N₂O des trois principaux procédés de traitement des eaux sur le territoire français (boues activées, biofiltres et filtres plantés de roseaux à écoulement vertical) et de mettre en évidence les conditions opératoires favorisant ces émissions.

L'ensemble des données obtenues a souligné la forte variabilité des émissions de N₂O d'un procédé à l'autre et pour un même procédé (variabilité en lien avec les conditions opératoires et environnementales). D'un point de vue méthodologique, les résultats de cette étude montrent qu'un **suivi en ligne des flux de N₂O à différentes périodes de l'année est nécessaire** pour une

quantification rigoureuse des émissions. De plus, il apparaît que pour certains procédés, une **variabilité spatiale importante** est à considérer lors de l'échantillonnage. Le **flux de N₂O dissous** en sortie de station, négligé par la méthode du GIEC, représente une part importante des émissions *in situ* et **doit être caractérisé au même titre que les émissions gazeuses**.

L'hétérogénéité des résultats démontre (i) la nécessité de définir à minima un facteur d'émission par procédé, en tenant compte des spécificités de chacun et (ii) le manque de pertinence de l'approche actuelle du GIEC basée sur l'utilisation de facteurs d'émission fixes et simplistes qui ne tiennent pas compte de l'influence des conditions de gestion des procédés sur les émissions et qui peuvent conduire à une forte sous-estimation du poids de ces émissions sur l'impact environnemental des stations d'épuration.

Les facteurs d'émission proposés dans le présent rapport permettent de fournir des ordres de grandeur de ce paramètre pour différents types de procédés, dont certains pour lesquels très peu de données (filtres plantés de roseaux à écoulement vertical) ou même aucune donnée (biofiltres nitrifiants et dénitrifiants) n'étaient disponibles à ce jour. Cependant, du fait de la complexité méthodologique (échantillonnage spatial et temporel), ces mesures n'ont pas pu être déployées sur un nombre important de stations pour chaque type de procédés. Un travail complémentaire serait nécessaire afin de mettre en œuvre les outils développés dans le cadre de cette étude sur d'autres stations afin de consolider ces résultats, de quantifier la variabilité sur un échantillon plus large et plus représentatif et permettre ainsi leur extrapolation.

Afin de valoriser les résultats obtenus (malgré leurs limites en termes de quantification de la variabilité) nous proposons de les combiner aux derniers résultats disponibles dans la littérature. Ceci devrait permettre de mieux prendre en compte la variabilité et l'incertitude des facteurs d'émission pour les différents procédés de traitement et ainsi de passer d'UN facteur d'émission déterministe à DES facteurs stochastisés pour différentes technologies.

Ainsi, des analyses de cycles de vie (ACV) pourront être relancées en utilisant ces facteurs d'émissions pour les procédés conventionnels à boues activées et pour les procédés extensifs tels que les filtres plantés de roseaux. Ces ACV pourraient intégrer le niveau d'incertitude associé aux émissions de N₂O (simulations de Monte-Carlo) et apporter ainsi des éléments d'aide à la décision beaucoup plus pertinents et probablement moins tranchés.

A plus long terme, les données collectées sur site lors du présent projet devraient contribuer à caler et développer des modèles mathématiques (pour les boues activées et les biofiltres) permettant de décrire en dynamique le fonctionnement des procédés et les émissions associées de N₂O. Ces outils permettront une meilleure estimation des émissions et de leur variabilité en fonction des conditions de gestion des procédés et des conditions climatiques. Il sera ainsi possible de simuler de nombreuses situations et leurs sensibilités à de nombreux paramètres sans avoir recours à de coûteuses campagnes de mesures de terrain. Ces outils constituent donc une perspective essentielle aussi bien pour affiner encore l'estimation des facteurs d'émission de N₂O que pour l'identification de solutions de réduction de ces émissions afin de réduire l'impact environnemental des stations d'épuration.

6. Table des illustrations

Figure 1 : Comparaison entre émissions mesurées et estimations avec les facteurs du GIEC : A) émissions directes, B) émissions indirectes sous forme de N ₂ O dissous. Entre parenthèses le rapport entre la valeur mesurée et la valeur du GIEC.	10
Figure 2 : Indicateur de changement climatique (ACV) pour une STEP à boue activée en fonction du facteur d'émission du N ₂ O	12
Figure 3 : Indicateur de changement climatique (ACV) pour une STEP à filtres plantés de roseaux en fonction du facteur d'émission du N ₂ O	13

7. Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques principales des sites étudiés et facteurs d'émissions de N ₂ O.....	9
Tableau 2 : Facteurs d'émissions de N ₂ O utilisés pour la comparaison	12

8. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le personnel Irstea Antony (David Delage, Pierre Mauricrace et Sylvain Pageot) pour sa contribution au travail présenté dans ce document. Nous remercions aussi les personnes qui nous ont apporté leur soutien durant les campagnes de mesure. Merci également à Jean-Pierre Canler et Pascal Molles (Irstea – Lyon Villeurbanne) pour leur contribution à l'analyse du fonctionnement des procédés de biofiltration et des filtres plantés de roseaux.

9. ANNEXE : Liste des documents Irstea-ONEMA publiés dans le cadre de ce projet

Julien Bollon, Ahlem Filali, Yannick Fayolle et Sylvie Gillot, 2013. Emissions de N₂O dans les procédés de traitement des ERUs. Etat des connaissances. 27 pages. Disponible sur : http://www.onema.fr/IMG/pdf/2013_048.pdf

Julien Bollon, Ahlem Filali, Yannick Fayolle et Sylvie Gillot, 2013. Protocoles de mesure des émissions de N₂O dans les procédés de traitement des ERUs. Etat des connaissances. 19 pages. Disponible sur : http://www.onema.fr/IMG/pdf/2013_045.pdf

Julien Bollon, Ahlem Filali, Yannick Fayolle et Sylvie Gillot, 2013. Mesure *in situ* des émissions de N₂O. Rapport de campagne n°1 (boues activées). 33 pages. Non disponible en ligne

Julien Bollon, Ahlem Filali, Yannick Fayolle et Sylvie Gillot, 2015. Mesure *in situ* des émissions de N₂O. Rapport de campagne n°2 (biofiltres). 19 pages. Non disponible en ligne

Julien Bollon, Ahlem Filali, Yannick Fayolle et Sylvie Gillot, 2015. Mesure *in situ* des émissions de N₂O. Rapport de campagne n°3 (filtres plantés de roseaux). 29 pages. Non disponible en ligne

Julien Bollon, Ahlem Filali, Yannick Fayolle et Sylvie Gillot, 2015. Mesure *in situ* des émissions de N₂O dans les procédés de traitement des ERUs. Synthèse des résultats des campagnes de mesure *in situ*. 14 pages.

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