# Les **Filtres Plantés de Roseaux** à écoulement vertical en **climat froid (montagne)**

**Pascal Molle**
**Stéphanie Prost-Boucle**
**Olivier Garcia**

***Janvier 2017***

***Les Agences de l'Eau***

***Les Conseils Départementaux***

# Sommaire

**Sommaire** ..... **2**
**Liste des illustrations** ..... **3**
**Liste des abréviations, unités et sigles** ..... **4**
**Synthèse opérationnelle** ..... **5**
**Introduction** ..... **7**
**I. Synthèse bibliographique et enquête nationale** ..... **8**
I.1. Synthèse bibliographique ..... 8
I.2. Enquête nationale ..... 9
*I.2.1. Protocole de recueil des données* ..... 10
*I.2.2. Nombre et caractéristiques des stations recensées* ..... 10
**II. Choix des stations et protocoles de suivi** ..... **12**
II.1. Sélection des stations, caractéristiques générales ..... 12
II.2. Suivi expérimental ..... 13
*II.2.1. Suivi en continu* ..... 13
*II.2.2. Bilans 24h* ..... 14
*II.2.3. Données complémentaires* ..... 14
**III. Résultats : performances globales, nitrification** ..... **15**
III.1. Caractéristiques des eaux ..... 15
III.2. Conditions de température et de gel en hiver ..... 16
III.3. Performances d'élimination des paramètres $DBO_5$, DCO et MES ..... 16
III.4. Capacités d'élimination de l'azote ..... 18
*III.4.1. Mesures de gaz* ..... 18
*III.4.2. Bilans 24h* ..... 19
*III.4.3. Mesures en continu : sondes spécifiques $NH_4$/$NO_3$* ..... 21
**IV. Résultats : facteurs d'influence pour l'isolation des filtres** ..... **23**
IV.1. Lien entre températures interne et externe ..... 23
IV.2. Pouvoir isolant de la boue et de la neige ..... 23
*IV.2.1. Scénario 1 : absence de boue et absence de neige (exemple de la station de Pont de Montvert)* ..... 24
*IV.2.2. Scénario 2a et 2b : très peu de boues (5 cm) et impact de la neige* ..... 25
*IV.2.3. Scénario 4 : présence de boue (10 cm) et absence de neige (exemple de la station du Reposoir)* ..... 27
**V. Préconisations de conception et d'exploitation** ..... **28**
V.1. Dimensionnement - Conception ..... 28
V.2. Exploitation ..... 29
**VI. Conclusion** ..... **30**
**VII. Bibliographie** ..... **32**

# Liste des illustrations

**Figures**

*Figure 1 : Représentation schématique du suivi expérimental in-situ* ..... 13
*Figure 2 : Liens entre température extérieure (air) et température du filtre : le filtre gèle-t-il ? (gauche) et Dynamiques de variation de température (droite)* ..... 24
*Figure 3 : Dynamiques de températures en absence de boues et de neige* ..... 24
*Figure 4 : Dynamiques de températures avec très peu de boues et en absence de neige* ..... 25
*Figure 5 : Dynamiques de températures avec très peu de boues et en présence de neige* ..... 26
*Figure 6 : Dynamiques de températures avec présence de boues et très peu de neige* ..... 27
*Figure 7 : 1ère bâchée d'alimentation d'un filtre enneigé (St Just Malmont, février 2013, photo C. Tscherter)* .. 29

**Tableaux**

*Tableau 1 : Répartition des stations en altitude par bassin hydrographique (le dpt. 42 a été arbitrairement attribué au bassin LB, et le dpt. 48 au bassin AG)* ..... 10
*Tableau 2 : Caractéristiques générales des stations sélectionnées* ..... 12
*Tableau 3 : Caractéristiques des filtres des stations sélectionnées* ..... 12
*Tableau 4 : Caractéristiques (concentrations) des eaux usées brutes et traitées sur les stations suivies* ..... 15
*Tableau 5 : Conditions de température relevées sur les stations suivies* ..... 16
*Tableau 6 : Performances de traitement (rendements) en DCO, DBO5 et MES* ..... 17
*Tableau 7 : Performances de traitement (rendements) en azote (nitrification)* ..... 19

**Graphiques**

*Graphique 1 : Répartition des stations en altitude par département* ..... 10
*Graphique 2 : Charge traitées en DCO et MES sur chaque étage, pour différentes gammes de températures* .... 18
*Graphique 3 : Mesures de gaz ($O_2$) sur le 1$^{er}$ étage (gauche) et le 2$^{ème}$ étage (droite) au cours du bilan 24h de février 2014 sur la station du Reposoir* ..... 19
*Graphique 4 : Charge traitées en NK (nitrification) sur le 1er étage, pour différentes gammes de températures du filtre* ..... 20
*Graphique 5 : Charge traitées en NK (nitrification) sur le 2ème étage, pour différentes gammes de températures du filtre* ..... 20
*Graphique 6 : Evolution des rendements en NK (nitrification) sur chaque étage selon la température du filtre* .. 21
*Graphique 7 : Rendements en NK (nitrification) selon 2 scénarii hivernaux* ..... 21
*Graphique 8 : Évolution des concentrations en N-NH4 (gauche) et N-NO3 (droite) en entrée et sortie de filtres au cours du bilan 24h de mars 2013 sur la station de St Pal de Mons* ..... 22
*Graphique 9 : Lien entre les températures moyennes journalières de l'air et du filtre en phase d'alimentation ?* 23
*Graphique 10 : Evolution des températures de l'air et du filtre de Pont de Montvert en hiver 2013* ..... 24
*Graphique 11 : Evolution des températures de l'air et du filtre d'Orelle en hiver 2013* ..... 25
*Graphique 12 : Evolution des températures de l'air et du filtre d'Issarlès en hiver 2013* ..... 26
*Graphique 13 : Evolution des températures de l'air et du filtre du Reposoir en hiver 2014* ..... 27

# Liste des abréviations, unités et sigles

| | |
|---|---|
| CH | Charge Hydraulique |
| CO | Charge Organique |
| CU | Coefficient d'Uniformité, rapport $d_{10}/d_{60}$ |
| $DBO_5$ | Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours |
| DCO | Demande Chimique en Oxygène |
| DN | Diamètre Nominal |
| $d_x$ | Diamètre de tamis laissant passer x % (x appartenant à l'intervalle ]0;100]) de la masse totale de l'échantillon |
| EH | Equivalent Habitant |
| EPNAC | Evaluation des Procédés Nouveaux d'Assainissement des petites et moyennes Collectivités |
| FPR | Filtres Plantés de Roseaux |
| IWA | International Water Association |
| MES | Matières en Suspension |
| $NH_4$ | Ammonium |
| NK | Azote Kjeldahl |
| $NO_2$ | Nitrites |
| $NO_3$ | Nitrates |
| $O_2$ | Oxygène |
| ONEMA | Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques |
| pH | Potentiel Hydrogène |
| $P_t$ | Phosphore total |
| $PO_4$ | Orthophosphate |
| SATESE | Service d'Assistance Technique aux Exploitants de Stations d'Epuration |

# Synthèse opérationnelle

Les Filtres Plantés de Roseaux à écoulement vertical (FPRv) sont très largement implantés en France, avec plus de 4 000 stations en fonctionnement. Lorsque développés en zone de montagne, la problématique du froid pose des questions vis à vis du fonctionnement des filtres (gel) ainsi que vis-à-vis des performances, notamment la nitrification.

Fin 2012, une enquête nationale a été menée par le biais d'un questionnaire envoyé aux Conseils Départementaux (SATESE) : 341 stations ont été recensées entre 500 et 1 500 m d'altitude. Les exigences de rejet des stations sont respectées, mais les bilans 24h sont souvent réalisés en été : les conditions de fonctionnement des stations exposées au froid et au gel sont donc peu connues. Ainsi, les Agences de l'Eau Adour-Garonne, Loire-Bretagne et Rhône Méditerranée Corse, et les SATESE des départements 05, 07/26, 15, 43, 48, 66, 73 et 74 ont participé au financement et à la réalisation d'un programme de recherche national dans le but de déterminer le comportement des filtres à écoulement vertical en zone de montagne et leurs limites associées. Cette étude a été conduite sur 4 ans (2013-2016) et menée sur 12 stations sélectionnées en montagne (capacité 70-1900 EH, altitude 680-1500 m). Le suivi de terrain a inclus des mesures hydrauliques et de températures (air extérieur et intérieur de filtre) en continu, ainsi que des bilans 24h exhaustifs (38 bilans au total, dont 23 bilans hivernaux). Les caractéristiques granulométriques des matériaux ont été analysées sur chaque station et pour chaque étage. De plus, des mesures de teneurs en oxygène au sein des filtres ont été menées. Les mesures ont été renforcées vis-à-vis du paramètre azote, étant donné sa sensibilité aux conditions de faibles températures (biomasse nitrifiante), via des sondes de mesures en continu ($NH_4$ et $NO_3$) lors des bilans 24h.

Les résultats de cette étude mettent en évidence que les performances de traitement hivernales concernant la DCO, la DBO5 et les MES ne semblent pas impactées par les faibles températures. Elles restent excellentes et similaires à celles relevées en été, globalement > 90 %.

Les performances de nitrification en hiver restent très honorables (87 % en moyenne) au regard des conditions de température hivernales fortement défavorables en montagne, contre 94 % en période estivale ($T_{filtre}$ > 15°C). Toutefois, cette perte de moins de 10 points de rendement est en partie due à des effluents plus dilués en hiver. L'impact de la température sur l'activité nitrifiante s'observe uniquement au 2$^{ème}$ étage pour des charges appliquées > 10gNK/m²/j. De plus, malgré des teneurs en $O_2$ très correctes au sein des massifs filtrants en plein hiver, la nitrification chute lorsque la température moyenne journalière du massif est < 6°C (mesurée à -15 cm). Ainsi, la fiabilité de la nitrification est affectée dans ces conditions de fonctionnement.

Le pouvoir isolant de la neige et de la couche de dépôt a pu être mis en évidence dès une épaisseur de 10 cm. Par exemple, avec seulement 5 cm de boues et en l'absence de neige, une chute de la température moyenne journalière du filtre de l'ordre de 0.5 °C/jour est observée lorsqu'il gèle à l'extérieur. En l'absence totale de boue et de neige, le filtre n'est alors pratiquement pas isolé et les températures suivent celles de l'air en période de repos. En revanche le pouvoir calorifique des eaux usées permet de dégeler rapidement le filtre en phase d'alimentation. Aucun problème de prise en masse des filtres n'a été observé : les filtres fonctionnent correctement y compris pour de fortes périodes de gel (7 jours consécutifs sans dégel).

Ainsi, la rotation des filtres 2 fois par semaine est fortement recommandée. Cela pourrait permettre de limiter les risques de gel, en particulier sur les stations récentes (< 5 ans d'âge) où la hauteur de boues est insuffisante. La neige maintien des températures positives au sein du filtre même en cas de gel extérieur prolongé (pouvoir isolant) et elle ne gêne pas l'infiltration des bâchées. La capacité

d'isolation de la couche de boue ou de la neige a démontré la nécessité de favoriser leur présence en surface des filtres.

Si aucun problème de fonctionnement n'a été observé dans le cadre de cette étude, la conception de la station requiert de respecter certaines règles de bon sens : exposition sur un versant ensoleillé de la montagne, enterrer au maximum les canalisations et les éventuels regards et vannes. De même, la mise sous abris des dégrilleurs automatiques, et la couverture des systèmes gravitaires de bâchées en hiver facilitent la fiabilité et l'exploitation des ouvrages. Les stations sont souvent difficilement accessibles pour les exploitants lors de fortes intempéries (neige, éboulements...) : il convient donc de penser à créer des voies d'accès adéquates.

La limite de « 1000 m d'altitude » est souvent citée en référence pour le seuil maximal d'implantation d'une station à filtres plantés de roseaux. Or l'altitude n'est pas le seul paramètre en lien avec le froid hivernal : versant, conception, ou exploitation sont à prendre en considération. Ainsi, dès lors que toutes les préconisations citées dans le présent rapport sont respectées, il semble tout à fait possible d'implanter une station de type FPRv au-delà de 1000 m d'altitude.

Toutefois, les limites du système n'ont pas été atteintes lors de l'étude. Des données complémentaires acquises lors d'hivers plus rigoureux seraient nécessaires.

**Auteurs / Correspondants Irstea**

Pascal Molle, *pascal.molle@irstea.fr*
Stéphanie Prost-Boucle, *stephanie.prost-boucle@irstea.fr*
Olivier Garcia*, olivier.garcia@irstea.fr*

**Mots-clés**

Altitude, climat froid, Filtres Plantés de Roseaux verticaux (FPRv), nitrification, performances hivernales.

**Remerciements**

Les auteurs remercient les Agences de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Adour-Garonne et Loire-Bretagne pour leur support financier, et les SATESE des départements des Hautes-Alpes, Ardèche/Drôme, Cantal, Haute-Loire, Lozère, Pyrénées-Orientales, Savoie et Haute-Savoie pour leur contribution à cette étude (malgré les conditions de mesures de terrain parfois difficiles !), ainsi que toutes les collectivités impliquées dans cette étude pour leur coopération.

# Introduction

Les systèmes de Filtres Plantés de Roseaux, et en particulier la filière à écoulement vertical (FPRv), sont largement établis en France. Ils résultent de nombreuses années de recherches qui ont abouti, en 2005, à la publication d'un guide de prescriptions et de recommandations pour la conception et la réalisation des filtres plantés de roseaux (Agence de l'Eau RMC, 2005). Sur une base de 2 à 2,5 m²/EH, la filière permet notamment d'atteindre une nitrification quasiment complète sur 2 étages de FPRv.

Ce procédé est également développé en régions montagneuses. Dans ce contexte, la question des faibles températures en hiver est d'une grande importance sur le fonctionnement (gel des filtres, du système de distribution des effluents, des ouvrages de chasse...) et les performances des stations. En effet, l'élimination de l'azote, et en particulier la nitrification, est un paramètre sensible à la température.

Cette étude a été initiée et financée par les Agences de l'eau Adour-Garonne, Loire-Bretagne et Rhône Méditerranée Corse, et les Conseils Départementaux (SATESE) des Hautes-Alpes (05), Ardèche/Drôme (07/26), Cantal (15), Haute-Loire (43), Lozère (48), Pyrénées-Orientales (66), Savoie (73) et Haute-Savoie (74). Elle se base sur une enquête nationale auprès des SATESE de France, puis d'un suivi détaillé de 12 stations par les SATESE précités et le centre Irstea de Lyon-Villeurbanne. Ce rapport faisant la synthèse de 4 ans d'étude (2013-2016), il se veut une **première étape de retour d'expérience**.

Les objectifs de cette étude sont de :

- Préciser les performances atteignables par ce type de filière lorsque les températures sont faibles voire négatives, en particulier sur de traitement de l'azote ;
- Déterminer le rôle de la couche en surface des filtres (boue, neige) ;
- Préciser les règles de dimensionnement associées aux niveaux de rejets et aux limites hydrauliques du système ;
- Emettre des recommandations de conception/construction d'une station en climat froid (zone montagneuse) ;
- Définir les contraintes d'exploitation associées aux conditions climatiques hivernales.

# I. Synthèse bibliographique et enquête nationale

Une première synthèse bibliographique des éléments recueillis en France et à l'international quant au fonctionnement des filtres plantés de roseaux en climat froid a été réalisée. En parallèle, une enquête nationale a permis de recenser les stations situées en zone dite « de montagne » (altitude > 500 m) et de sélectionner des stations représentatives (altitude suffisante, taux de charge important, conceptions variées) pour un suivi plus détaillé par les SATESE et Irstea.

L'objectif de cette étude est de répondre à différentes interrogations :

- quel impact du froid/gel sur les performances (notamment la nitrification) ?
- quel rôle des couches isolant le filtre (neige, boues) ?
- quelles recommandations pour l'implantation et la conception des stations ?
- quelles préconisations d'exploitation ?

## I.1. Synthèse bibliographique

Les Filtres Plantés de Roseaux à écoulement vertical (FPRv) sont très largement implantés en France, avec plus de 4 000 stations en fonctionnement (Morvannou et al, 2014 b). Cette filière a été développée par Irstea (anciennement Cemagref) au cours des années 90. Cette spécificité française provient du fait que ces stations d'épuration traitent des eaux usées brutes directement appliquées en surface du 1er étage (Molle et al, 2005). La filière verticale consiste en 2 étages successifs de FPRv garnis de graviers au 1er étage (3 filtres en parallèle) et de sable au 2nd étage (2 filtres). Les filtres sont alimentés en alternance 2 fois par semaine (tous les 3-4 jours) à chaque étage.

Lorsque développés en zone de montagne, la problématique du froid pose des questions vis à vis du fonctionnement des filtres (gel du filtre, de la couche de dépôt, des systèmes de distribution, des ouvrages de chasse…) ainsi que vis-à-vis des performances, notamment la nitrification.

En effet, en climat froid, la formation de glace est possible si la température de l'eau approche 2°C (Kadlec 2001). Cela est minimisé en milieu rural par la présence d'un réseau généralement court minimisant les pertes de chaleur des eaux usées domestiques. En théorie, une congélation rapide et intense de sols humides pourra geler la surface voire le massif filtrant. Un gel lent, quant à lui, aura tendance à provoquer une migration de l'humidité non gelée vers la zone gelée (c'est-à-dire la surface du filtre) et induire une accumulation de glace ainsi qu'un soulèvement du sol vers le haut (Bronfenbrener 2010). En effet, les échanges thermiques (gains et pertes) dans les massifs filtrants ont principalement lieu verticalement et sont négligeables de manière latérale (Kadlec 2001). Par ailleurs, la présence d'eau libre favorise les pertes calorifiques par évapotranspiration (Wallace 2011). En conséquence de quoi, si une couverture de glace s'installe, sa conductivité thermique, près de 4 fois supérieure à celle de l'eau liquide, augmente davantage les pertes de chaleur et les risques de gel du filtre.

Toutefois, la formation de gel est limitée en présence de neige ou de paillis (Kadlec 2001). En effet, une couche de neige apporte une isolation certaine, à condition que son épaisseur ne soit pas trop faible. McCarthy et al 1997 (USA, Northern Minesota) ont observé un gel de filtres sans couverture neigeuse alors qu'ils n'avaient pas gelé les années précédentes lorsque recouverts de neige. Face à ce constat, des tests ont été effectués avec des couches de chaume et des paillis pour isoler les filtres en surface (Smith 1997 et Wallace 2011). Une couche de chaume de 20 cm permet effectivement de limiter les pertes calorifiques. Cependant, le transfert d'oxygène au sein du massif, et donc les

performances de traitement (notamment sur la nitrification), sont réduits. La difficulté majeure réside dans le choix du bon mulch. La formation de la couche de dépôt, lorsque l'on traite des eaux usées brutes, peut être également vue comme un isolant dont il faut évaluer l'impact.

S'il manque des règles claires pour dimensionner les ouvrages en zone froide, il est important d'appliquer des règles de bon sens pour le dimensionnement des filtres plantés (Wallace 2011) afin d'éviter les pertes de chaleur vers l'atmosphère. Tout d'abord, la conception de la station d'épuration doit être correctement pensée afin de limiter l'impact du froid (gel notamment) sur le fonctionnement des ouvrages en hiver. Les points de conception à regarder concernent des aspects liés aussi bien à l'aménagement des prétraitements, postes de bâchées que des matériaux choisis ou les systèmes de distribution. Par exemple, une faible porosité du média filtrant permet de limiter le refroidissement du filtre (Smith 1997). La granulométrie des matériaux mis en place pourrait éventuellement être spécifiquement adaptée aux FPR situés en climat froid.

D'autre part, des préconisations d'exploitation peuvent également limiter l'impact du froid. Il convient de garder à l'esprit qu'en village de montagne, outre des problèmes d'accessibilité dus au verglas et à la neige parfois abondante en hiver, la station d'épuration est souvent le dernier des soucis des employés communaux (priorité au déneigement des voiries par exemple). De plus, les contraintes d'exploitation sont plus importantes en période froide. Par exemple, en cas de manœuvre manuelle de vannes, l'alternance des filtres n'est pas toujours effective du fait des risques de casse dus au gel. De même, un volume trop important de déchets accumulés sur le dégrilleur peuvent geler et s'agglomérer jusqu'à provoquer un by-pass de cette étape de prétraitement en risquant d'endommager les ouvrages suivants.

En France, lors de cette étude, nous avons recensé 341 stations de 20 à 1950 EH, implantées de 500 à 1 500 m d'altitude. Les exigences de rejet de ces stations sont respectées, mais les bilans 24h sont souvent réalisés en été. Ainsi, les conditions de fonctionnement des stations françaises exposées au froid et au gel sont peu connues. L'impact de la rigueur des conditions hivernales et les performances limites des stations doivent être précisés, notamment en termes d'oxygénation et de traitement de l'azote. Ainsi, les Agences de l'eau Adour-Garonne, Loire-Bretagne et Rhône Méditerranée Corse, et les Conseils Départementaux (SATESE) des départements 05, 07/26, 15, 43, 48, 66, 73 et 74 ont participé au financement et à la réalisation d'un programme de recherche dans le but de déterminer le comportement des filtres à écoulement vertical en zone de montagne et leurs limites associées.

Ce rapport présente les résultats d'une étude nationale en France menée sur 12 stations en montagne (voir parties III et suivantes). La capacité des stations sélectionnées se situe entre 70 et 1900 EH, et de 680 à 1500 m d'altitude. Il s'agit d'une étude spécifique conduite sur 4 ans (2013-2016). Les faibles températures et le gel pouvant affecter différemment les systèmes selon l'âge des stations (hauteur de la couche de boues), les systèmes de distribution, les charges appliquées ou les caractéristiques du réseau (séparatif, unitaire), la sélection des stations suivies pour cette étude a été réalisée selon un large panel de situations. Le suivi de terrain mené a inclus des mesures hydrauliques et de température en continu, en lien avec les caractéristiques granulométriques des matériaux, et des bilans 24h exhaustifs (49 bilans au total, dont 34 bilans hivernaux). Le traitement des données est accentué vis-à-vis du paramètre azote étant donné la sensibilité de ce paramètre aux conditions de faible température (biomasse nitrifiante), tel que développé par Molle et al (2008) : un gel du filtre peut induire un gel de la biomasse (en particulier durant les phases de repos des filtres) et instaurer ainsi un risque non négligeable de réduction voire inhibition des capacités de traitement des particules azotées.

## I.2. Enquête nationale

Les premiers retours d'expérience sur les performances des FPRv en climat froid ont été recueillis en 2012 sur la station du Reposoir (par le SATESE 74) suite à 8 années de données analytiques qui indiquaient :

- Les rendements sur le 1er étage :
  - ne semblent pas significativement différents entre hiver/été,
  - paraissent inférieurs aux rendements classiques sur ce type de station.
- Les performances sur le 2ème étage présenteraient davantage de dispersion, en partie du fait des faibles concentrations (incertitudes de mesures).
- La nitrification semble nettement plus faible en hiver qu'en été (baisse de 20 points de rendement sur chaque étage).

Toutefois, ces données sont à relativiser. En effet, les différences hiver/été sont à affiner en fonction de la température relevée, des modifications du mode d'alimentation (ou recirculation). De plus, ces éléments nécessitent d'être confirmés par d'autres données comprenant des configurations/conditions différentes (hauteur de la couche filtrante, granulométrie, durée de la période de gel, historique de la station, type d'alimentation, etc.). C'est pourquoi une étude à l'échelle nationale a été initiée en 2012.

### *I.2.1. Protocole de recueil des données*

Fin 2012, un questionnaire-type a été envoyé aux SATESE concernés par les stations exposées au froid et notamment situées en altitude : les départements concernés sont cités sur le Graphique 1.
Il s'agissait de recueillir des informations sur la station :

- généralités : commune, altitude, capacité, âge ;
- dimensionnement : constructeur, nombre de filtres, surfaces ;
- fonctionnement : nature du réseau, charges hydrauliques et organiques, faisabilité et existence de bilans 24h.

C'est sur la base de cette collecte d'informations que le choix des stations à suivre au cours de cette étude a été fait.

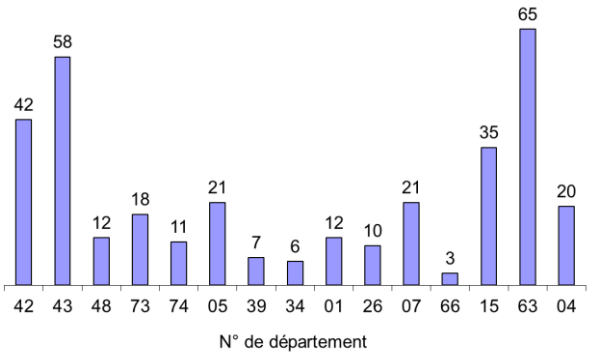
### *I.2.2. Nombre et caractéristiques des stations recensées*

Au total, 341 stations dont l'altitude est supérieure à 500 m ont été recensées. Voici leur répartition par bassin hydrographique :

| | |
|---|---|
| Rhône-Méditerranée-Corse | 126 |
| Adour-Garonne | 50 |
| Loire-Bretagne | 165 |
| **Total** | **341** |

*Tableau 1 : Répartition des stations en altitude par bassin hydrographique (le dpt. 42 a été arbitrairement attribué au bassin LB, et le dpt. 48 au bassin AG)*

Leur répartition par département est la suivante :




*Graphique 1 : Répartition des stations en altitude par département*

La capacité moyenne est de 750 EH (70 à 1900 EH).
Les statistiques font également état de :

- 25 % des stations sont à une altitude > 900 m,
- 75 % des stations ont une capacité nominale < 500 EH.

Les constructeurs sont variés et la moitié sont locaux (22 % dits « locaux », 24 % dits « sans information » supposés locaux).

# II. Choix des stations et protocoles de suivi

## II.1. Sélection des stations, caractéristiques générales

Les critères de sélection des stations pour cette étude ont été d'ordres :

- techniques : charge organique > 50 % (la charge hydraulique étant en général déjà > 50 %), altitude > 650 m,
- sociaux : constructeurs différents.

Il s'agit de stations de conception typiquement française, comprenant 2 étages successifs de filtres à écoulement vertical, avec 3 lits alimentés en alternance au 1er étage et 2 lits au second étage. Les FPR sont alimentés directement en eau usée brute (dégrillage grossier), par bâchées.

| Station | Dpt. | Bassin hydrographique | Constructeur | Mise en service | Capacité (EH) | Altitude (m) | Réseau |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| St Pal de Mons * | 43 | Loire-Bretagne | Epur Nature | 2010 | 1900 | 780 | Mixte |
| St Bonnet le Froid | 43 | Loire-Bretagne | Epur Nature | 2011 | 835 | 1050 | Unitaire |
| St Just Malmont | 43 | Loire-Bretagne | TPCF | 2011 | 500 | 790 | Mixte |
| Le Pont de Montvert * | 48 | Adour-Garonne | SEVIGNE | 2008 | 1500 | 860 | Séparatif |
| Roffiac | 15 | Adour-Garonne | SOAF | 2006 | 600 | 810 | Mixte |
| Valette | 15 | Adour-Garonne | SEVIGNE | 2009 | 230 | 890 | Unitaire |
| Le Lac d'Issarlès * | 07 | Rhône-Méditerranée Corse | SOVETRA | 2010 | 1200 | 1000 | Unitaire |
| Issarlès | 07 | Rhône-Méditerranée Corse | SOVETRA | 2008 | 450 | 950 | Séparatif |
| Orelle * | 73 | Rhône-Méditerranée Corse | 'Local' | 2005 | 1200 | 835 | Séparatif |
| Le Reposoir * | 74 | Rhône-Méditerranée Corse | MSE | 2004 | 1200 | 980 | Séparatif |
| Trescléoux | 05 | Rhône-Méditerranée Corse | SCIRPE | 2012 | 600 | 680 | Unitaire |
| Mantet | 66 | Rhône-Méditerranée Corse | SADE/SIMBIO | 2011 | 73 | 1500 | Séparatif |

* : suivi Irstea complémentaire au suivi SATESE

*Tableau 2 : Caractéristiques générales des stations sélectionnées*

| | 1er étage | | | | 2ème étage | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Filtres | | Granulo. | | Filtres | | Granulo. | |
| Station | Surface (m²/EH) | Epaisseur couche de filtration (cm) | $d_{10}$ | $d_{60}$ | Surface (m²/EH) | Epaisseur couche de filtration (cm) | $d_{10}$ | $d_{60}$ |
| St Pal de Mons * | 1.2 | 60 | 2.0 | 3.1 | 0.8 | 30 | 0.3 | 1.3 |
| St Bonnet le Froid | 1.1 | 60 | 2.1 | 3.4 | 0.7 | 30 | 0.4 | 1.2 |
| St Just Malmont | 1.2 | 60 | 2.4 | 4.4 | 0.8 | 30 | 0.4 | 1.1 |
| Le Pont de Montvert * | 1.2 | 40 | 3.0 | 5.7 | 0.8 | 40 | 0.4 | 1.8 |
| Roffiac | 1.3 | 30 | 1.5 | 3.7 | 0.9 | 30 | 0.3 | 1.1 |
| Valette | 1.2 | 40 | 3.6 | 5.5 | 0.8 | 30 | 0.3 | 1.4 |
| Le Lac d'Issarlès * | 0.6 | 50 | 3.5 | 5.4 | 0.4 | 65 | 0.3 | 1.0 |
| Issarlès | 0.6 | 50 | 4.8 | 8.2 | 0.4 | 65 | 0.3 | 1.7 |
| Orelle * | 1.0 | 60 | 3.0 | 5.4 | 0.8 | 30 | 0.3 | 2.5 |
| Le Reposoir * | 1.3 | 30 | 4.6 | 10.3 | 0.7 | 40 | 0.2 | 1.1 |
| Trescléoux | 1.3 | -25 | 2.1 | 3.1 | 0.7 | -30 | 0.2 | 0.8 |
| Mantet | 1.1 | 80 | - | - | - | *pas de 2ème étage* | - | - |

* : suivi Irstea complémentaire au suivi SATESE

*Tableau 3 : Caractéristiques des filtres des stations sélectionnées*

La capacité moyenne sur les 12 stations est de 860 EH, l'altitude moyenne est de 930 m (680 à 1500 m). Fin 2012, les stations sont âgées de 0.5 à 8 années de fonctionnement. Les constructeurs sont différents, et on relève la présence du système d'alimentation RégulFluid (Sévigné – distribution

par des rampes à débordement) sur Le Pont de Montvert et Valette. Les réseaux sont aussi différents (7 séparatifs, 3 semi-séparatifs, 4 unitaires).

*Nota :*

- La station de Roffiac possède 4 lits au 1er étage.
- Sur Orelle le 2ème étage n'est en fonctionnement qu'en été.
- La station de Trescléoux est à basse altitude (680 m) mais située dans un lieu encaissé et très peu ensoleillé, et sa mise en service est récente (mars 2012).
- La station de Mantet est en haute altitude (1500 m) et sur un versant ensoleillé, mais son accès est très difficile en hiver. Elle reçoit des eaux de source (impact sur l'hydraulique en cas de gel) et n'est composée que d'un seul étage.

## II.2. Suivi expérimental

Chacune des 12 stations suivies a été équipée de mesures de températures extérieure/intérieure filtre et d'une mesure de débit en continu (cf partie II.2.1 suivante). De même, chaque station a fait l'objet d'un prélèvement de matériaux (cf partie II.2.3). Sur les stations suivies par Irstea, des mesures de gaz au sein des différents filtres ont été effectuées lors des bilans 24h (cf partie II.2.2).

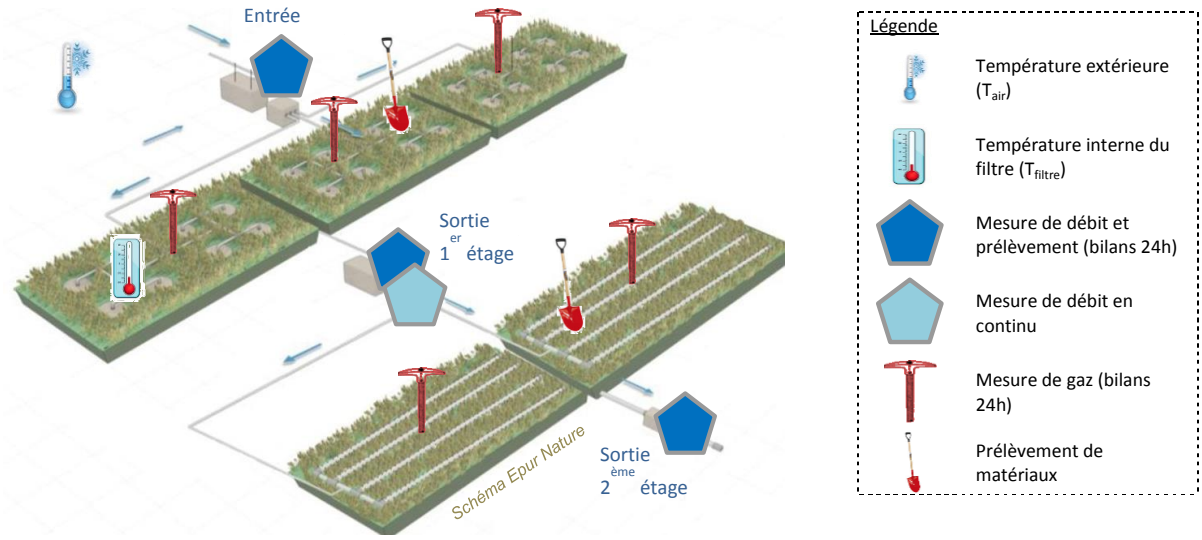



*Figure 1 : Représentation schématique du suivi expérimental in-situ*

### *II.2.1. Suivi en continu*

- *Suivi hydraulique*

Les charges hydrauliques reçues quotidiennement par chaque station sont connues grâce à l'implantation d'une sonde pression dans le poste de relevage (ou siphon) intermédiaire de sortie de 1er étage. Le pas de temps d'enregistrement est de 1 min. Les dates d'alternance d'alimentation des filtres sont également notées par le chargé d'exploitation de la station, pour connaitre les périodes d'alimentation et de repos de chaque filtre et à chaque étage.

- *Suivi des températures*

Deux sondes de température sont implantées : extérieur (air), et intérieur du filtre du 1er étage (à 1.5 m d'un point d'alimentation du filtre et 15 cm de profondeur). L'enregistrement a lieu toutes les 15 min. L'objectif est de connaitre les amplitudes de variation de températures internes au filtre vis-à-vis des températures externes, ainsi que les périodes et durées de gel.

### *II.2.2. Bilans 24h*

- *Evaluation des performances de traitement*

L'historique du fonctionnement de chaque station (bilans 24h antérieurs à l'étude) a été recueilli. Le suivi a été réalisé sur une période de 4 ans (2013-2016). Un à deux bilans 24h sont réalisés chaque hiver, selon les stations, afin de mesurer les performances atteignables en conditions froides. En été 2013, 1 bilan 24h de référence (conditions optimales) permet de comparer les performances estivales vis-à-vis de la base de données Irstea nationale : cela juge du fonctionnement correct des stations sélectionnées. Les prélèvements sont implantés en entrée station et en sortie de chaque étage. Irstea a réalisé un focus sur 5 stations très différentes, avec des mesures spécifiques (mesures en continu, prélèvements de gaz, etc.) : St Pal de Mons, Le Pont de Montvert, Le Lac d'Issarlès, Orelle et Le Reposoir.

Tous les bilans 24h sont proportionnels au débit. Les préleveurs sont implantés en 3 points de mesures : entrée brute et sortie de chaque étape de traitement afin d'évaluer les performances et limites de chaque étage. Les paramètres chimiques analysés sont : $DBO_5$, DCO, MES, NK, $N\text{-}NH_4$, $N\text{-}NO_2$, $N\text{-}NO_3$, Pt, $P\text{-}PO_4$. Les bilans sont réalisés sur le lit où est implantée la sonde de mesure de température interne afin de connaitre les conditions de température de réalisation des prélèvements.

- *Mesures en continu : sondes spécifiques*

Durant chaque campagne de mesures Irstea, certains paramètres physicochimiques sont enregistrés en continu en entrée, sortie 1$^{er}$ étage et sortie station. Il s'agit de pH, redox, conductivité, $NH_4$-N et $NO_3$-N (sondes spécifiques VARION AN/A WTW-Secomam), débit (sondes pression dans postes de relevage, débitmètres bulle-à-bulle sur canal venturi). Le pas de temps d'enregistrement est de 1 minute. L'objectif est d'identifier l'impact des faibles températures sur la nitrification, et notamment d'évaluer les cinétiques d'élimination/transformation de l'azote au cours de la journée (impact des bâchées, de la température, etc.).

- *Mesures de gaz*

Les teneurs en oxygène ($O_2$) au sein de chaque filtre ont été mesurées afin de connaitre les conditions d'oxygénation au sein du média filtrant, à différentes profondeurs, et pour évaluer les capacités de renouvellement en $O_2$ des filtres (bâchées et périodes d'alimentation/repos). La teneur en $O_2$ a été analysée (analyseur de gaz DräggerSensor X am 7000©) sur chaque filtre de chaque étage, et entre 0 et 40 cm de profondeur. La profondeur de 0 cm correspond à l'interface boues/graviers du massif filtrant. Les mesures de gaz sont effectuées à 2 m d'un point d'alimentation, et 20 min après l'envoi d'une bâchée sur le filtre en alimentation. Les résultats sont exprimés en pourcentage de la phase gazeuse avec une précision de ±0.2 %, dont la teneur maximale dans l'atmosphère est de 21 %.

### *II.2.3. Données complémentaires*

Outre des données hydrauliques et physicochimiques des effluents, d'autres informations ont été recueillies : conception de la station, hauteur de boues accumulées sur le 1$^{er}$ étage, neige (présence/absence), fréquentation touristique éventuelle, photos des ouvrages, alternance des filtres.

Des prélèvements de matériaux filtrants ont été réalisés sur chacune des 12 stations, sur les 30 premiers centimètres, et sur chaque étage. Ils ont ensuite été soumis à une analyse granulométrique (tamisage par voie sèche selon la référence normative NF X 11.507) en laboratoire, sur matériau sec non lavé. L'objectif est de comparer les différentes granulométries effectivement mises en place sur les stations (granulométries versus performances).

# III. Résultats : performances globales, nitrification

En été, les performances mesurées sont toutes excellentes excepté la station d'Orelle qui montre des problèmes sérieux d'oxygénation en raison d'une entrée des eaux usées brutes par les canalisations d'aération. Un colmatage interne du 1er étage a donc été mis en évidence. Cette station ne peut donc pas être considérée comme une station de référence, contrairement aux autres. Les bilans hivernaux réalisés sur Issarlès mettent en évidence des eaux usées brutes extrêmement diluées (DCO < 50 mg/L) et sont exclus de l'analyses des performances. De même, le bilan hivernal 2014 sur Valette (DCO < 50 mg/L) doit être retiré du jeu de données. Pour Le Reposoir, le dysfonctionnement du 2ème étage nous autorise à utiliser uniquement les données du 1er étage.

Pour les autres stations, les données recueillies au cours des hivers 2013, 2014, 2015 et 2016 sont similaires quels que soient les paramètres. L'analyse est donc réalisée sans distinction des hivers et des stations.

## III.1. Caractéristiques des eaux

Le E.T. : **écart-type**

***Tableau 4*** résume les concentrations moyennes, minimales et maximales relevées au cours de l'étude sur les stations suivies, en hivers et été.

| Concen-trations (mg/L) | Eau brute | | | | | | | Sortie 1er étage | | | | | Sortie 2ème étage | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | DCO | $DBO_5$ | MES | $N\text{-}NH_4$ | NK | DCO/ $DBO_5$ | NK/ DCO | DCO | $DBO_5$ | MES | $N\text{-}NH_4$ | NK | DCO | $DBO_5$ | MES | $N\text{-}NH_4$ | NK |
| **Hivers 2013-2016** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Moy. | **509** | **239** | **228** | **33** | **49** | **2,21** | **0,11** | **109** | **37** | **26** | **20** | **24** | **40** | **5** | **5** | **4,9** | **6,4** |
| E.T. | 285 | 142 | 173 | 15 | 22 | 0,45 | 0,04 | 52 | 27 | 13 | 12 | 13 | 18 | 4 | 4 | 6,3 | 7,0 |
| Min. | 146 | 46 | 50 | 9 | 18 | 1,31 | 0,05 | 40 | 9 | 7 | 3 | 7 | 20 | 2 | 1 | 0,0 | 1,0 |
| Max. | 1530 | 760 | 960 | 58 | 91 | 3,17 | 0,20 | 241 | 108 | 59 | 54 | 61 | 88 | 22 | 18 | 17,8 | 24,4 |
| Nb | 31 | 31 | 31 | 30 | 30 | 31 | 30 | 31 | 31 | 31 | 30 | 30 | 24 | 24 | 23 | 24 | 24 |
| **Eté 2013** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Moy. | **711** | **306** | **293** | **48** | **70** | **2,29** | **0,11** | **131** | **38** | **52** | **22** | **27** | **45** | **5** | **9** | **2,3** | **3,9** |
| E.T. | 410 | 147 | 140 | 18 | 24 | 0,36 | 0,04 | 51 | 21 | 30 | 9 | 11 | 18 | 5 | 6 | 2,8 | 2,4 |
| Min. | 220 | 130 | 93 | 17 | 29 | 1,61 | 0,05 | 59 | 15 | 15 | 7 | 12 | 24 | 1 | 2 | 0,1 | 1,0 |
| Max. | 1987 | 700 | 608 | 73 | 99 | 2,84 | 0,17 | 236 | 71 | 120 | 31 | 46 | 78 | 18 | 22 | 9,5 | 9,5 |
| Nb | 15 | 15 | 15 | 13 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| **Valeurs classiques** (Mercoiret *et al*, 2010; Molle *et al*, 2005) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Moy | 650 | 267 | 288 | 59 | 68 | 2.62 | 0.12 | 145 | - | 33 | - | 35 | 66 | - | 14 | - | 13 |

E.T. : écart-type

*Tableau 4 : Caractéristiques (concentrations) des eaux usées brutes et traitées sur les stations suivies*

Les eaux usées brutes sont caractéristiques d'effluents domestiques. Elles sont légèrement diluées en hiver (509 mg/L de DCO en moyenne, 49 mg/L de NK), du fait de la sensibilité de certains réseaux à la pluviométrie, aux intrusions d'eau de nappe ou à la fonte des neiges (intrusion d'eaux claires). En été les eaux usées brutes sont correctement concentrées, et davantage en azote (711 mg/L de DCO, 70 mg/L de NK). Malgré cela, le test statistique de Student ne met pas en évidence de différence significative (p-value > 0.05) entre les concentrations d'eaux usées brutes d'hiver et celles d'été (excepté sur l'azote).

Les concentrations moyennes en sortie station sont excellentes quelle que soit la saison. Toutefois, les concentrations maximales mesurées sont plus élevées en hiver sur les paramètres DCO, $DBO_5$ et azote, mettant en exergue une éventuelle sensibilité du système en conditions moins favorables à la biodégradation.

## III.2. Conditions de température et de gel en hiver

Les gammes de températures relevées au cours de l'étude sont consignées dans le Tableau 5. La durée maximale de gel consécutif correspond au nombre maximal de jours d'affilée pour lesquels la température de l'air était constamment inférieure à 0°C.

| | Température minimale de l'air (°C) | | Durée maximale de gel consécutif (jours) |
|---|---|---|---|
| Stations | Ponctuelle | Moyenne journalière (°C) | |
| St Pal de Mons | -12 | -7 | 7 |
| St Bonnet le Froid | -7 | 2 | 2 |
| St Just Malmont | -12 | -7 | 6 |
| Le Pont de Montvert | -11 | -7 | 4 |
| Roffiac | -17 | -7 | 5 |
| Valette | -15 | -8 | 5 |
| Le Lac d'Issarlès | -19 | -9 | 5 |
| Issarlès | -16 | -8 | 6 |
| Orelle | -11 | -7 | 5 |
| Le Reposoir | -19 | -10 | 7 |
| Trescléoux | -13 | -8 | 3 |
| Mantet | -12 | -7 | 4 |

*Tableau 5 : Conditions de température relevées sur les stations suivies*

## III.3. Performances d'élimination des paramètres $DBO_5$, DCO et MES

Sur les graphiques de charge entrante/traitée présentés dans le Graphique 2, la charge classique est représentée par un trait vertical. Elle est établie pour une charge hydraulique de dimensionnement de 37 cm/j et une charge organique de 300 gDCO/m²/j sur le filtre en fonctionnement du 1$^{er}$ étage. Pour le 2$^{ème}$ étage, il s'agit davantage d'une charge de fonctionnement classique basée sur des rendements minimaux attendus sur un 1$^{er}$ étage sur ce type de filière, fixés ici à 75 % en DCO, 80 % en MES, 55 % en NK, au vu des valeurs publiées par Molle et al (2005).

| Rendements (%) | 1er étage | | | 2ème étage | | | Global | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | DCO | $DBO_5$ | MES | DCO | $DBO_5$ | MES | DCO | $DBO_5$ | MES |
| **Hivers 2013-2014** | | | | | | | | | |
| Moy. | **76** | **84** | **85** | **61** | **81** | **83** | **89** | **96** | **97** |
| E.T. | 10 | 8 | 9 | 12 | 11 | 13 | 10 | 7 | 3 |
| Min. | 53 | 67 | 57 | 32 | 46 | 46 | 44 | 65 | 88 |
| Max. | 93 | 96 | 97 | 90 | 96 | 100 | 98 | 100 | 100 |
| Nb | 31 | 31 | 31 | 23 | 24 | 24 | 28 | 28 | 28 |
| **Eté 2013** | | | | | | | | | |
| Moy. | **80** | **87** | **80** | **64** | **85** | **79** | **93** | **98** | **97** |
| E.T. | 7 | 6 | 11 | 16 | 9 | 16 | 3 | 2 | 2 |
| Min. | 69 | 72 | 61 | 20 | 67 | 44 | 86 | 93 | 91 |
| Max. | 91 | 94 | 94 | 86 | 97 | 94 | 98 | 100 | 100 |
| Nb | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| **Gain entre l'été et l'hiver (en points de rendement)** | | | | | | | | | |
| Moy. | 4 | 3 | 0 | 3 | 4 | 0 | 4 | 2 | 0 |
| **Valeurs classiques (Molle *et al*, 2005)** | | | | | | | | | |
| Moy. | 79 | - | 86 | 56 | - | 65 | 91 | - | 95 |

E.T. : écart-type

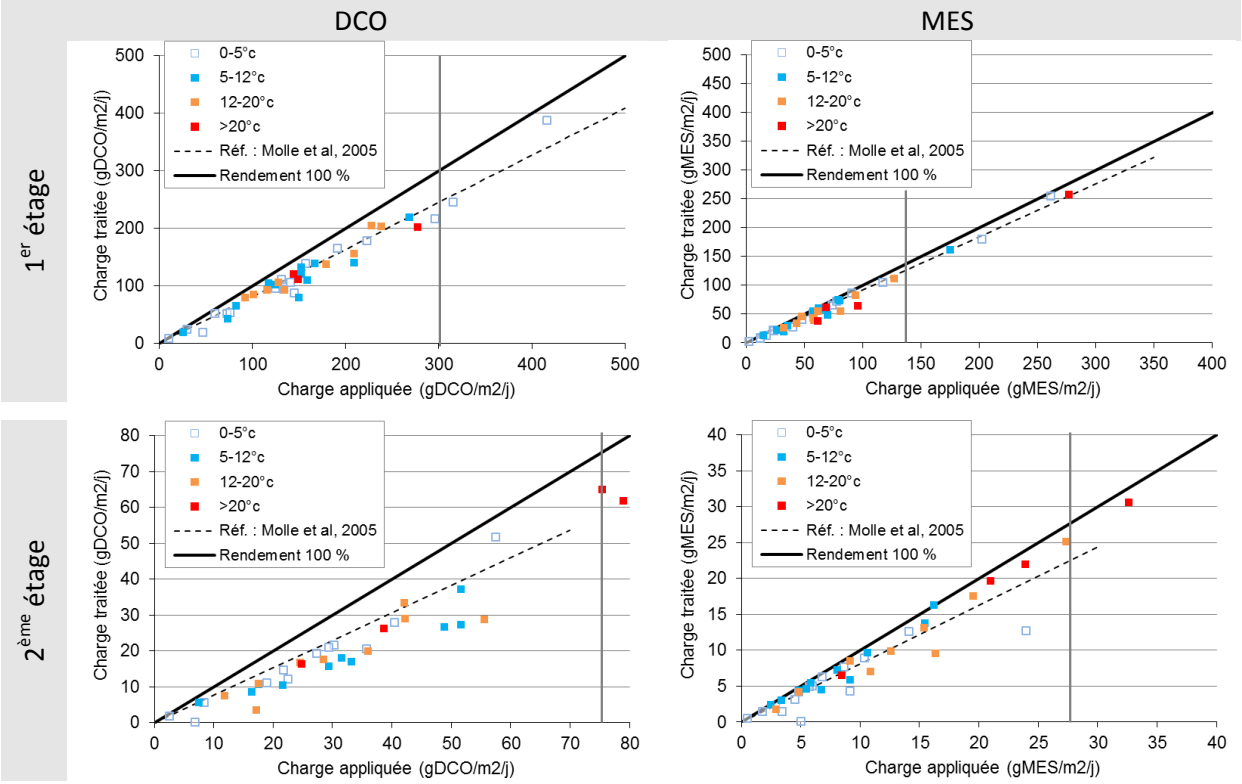
*Tableau 6 : Performances de traitement (rendements) en DCO, DBO5 et MES*

Les rendements en hiver sont globalement très bons et cohérents à ceux observés sur système classique : ils sont quasiment identiques à ceux relevés par Molle et al (2005) sur des stations de 0 à 1000 m d'altitude.

Les performances semblent légèrement inférieures en hiver qu'en été, tant sur le 1er que sur le 2ème étage (E.T. : **écart-type**
***Tableau 6***, Graphique 2). On relève par exemple 4 et 2 points de rendement additionnels en été sur la DCO et la $DBO_5$ respectivement (E.T. : **écart-type**
***Tableau 6***). Malgré tout, cet impact négatif est modéré car :

- cet éventuel gain en performances ne peut être affirmé au regard des forts écarts-types ;
- l'effluent étant plus dilué en hiver, cela peut contribuer à baisser les rendements sans impacter les niveaux de rejet.

Globalement, les basses températures ne semblent donc pas impacter le traitement des paramètres carbonés et particulaires classiques.




*Graphique 2 : Charge traitées en DCO et MES sur chaque étage, pour différentes gammes de températures*

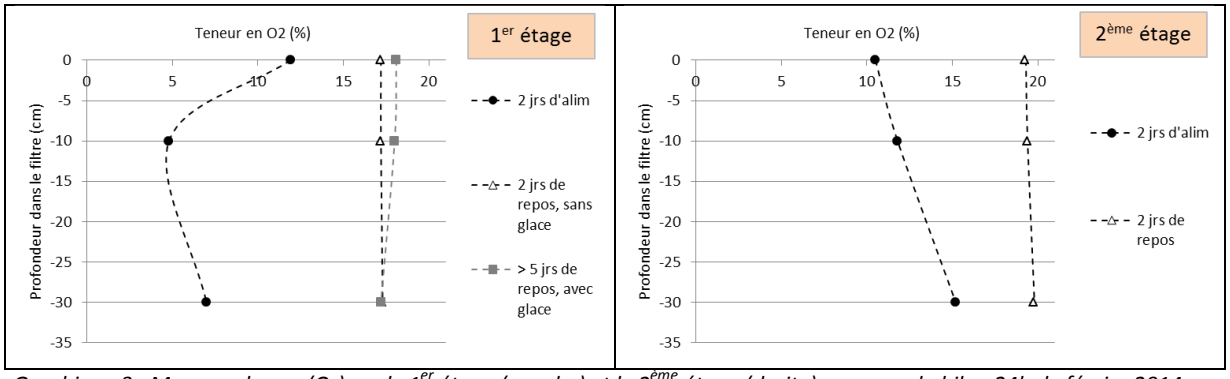
## III.4. Capacités d'élimination de l'azote

### *III.4.1. Mesures de gaz*

Le manque d'oxygène ($O_2$) est souvent un paramètre explicatif des baisses de performances sur la nitrification. Son renouvellement se fait non seulement pendant la période de repos mais aussi entre les bâchées. Globalement, ces systèmes de traitement voient leur concentration en $O_2$ diminuer pendant les périodes d'alimentation car la charge appliquée demande plus d'oxygène que les apports convectifs et diffusifs ne peuvent fournir. Ceci est d'autant plus vrai en cas de surcharge hydraulique, induisant une diminution du temps de dénoyage du filtre entre 2 bâchées. En conditions hivernales (forte humidité constante) et particulièrement lors d'épisodes de gel, la diffusion de l'$O_2$ au sein des massifs filtrants s'avère plus difficile. A ce titre, la gestion des périodes d'alimentation/repos est de première importance, au même titre que le réglage du nombre de bâchées quotidiennes.

Des mesures de gaz au sein du massif filtrant de chaque étage ont été effectuées sur les stations spécifiquement suivies par Irstea. A titre d'exemple, celles relevées sur la station du Reposoir en février 2014 sont détaillées, pour les conditions suivantes : gel ($T_{air}$ = -0.3°C, $T_{filtre}$ = +3°C), charge hydraulique de 0.23 m/j (nominal : 0.37 m/j) et charge organique de 132 gDCO/m²/j (nominal : 300 gDCO/m²/j) appliquées sur le filtre en fonctionnement du 1er étage, 2ème jour d'alimentation, hauteur de boues de 10 cm. Les teneurs en $O_2$ relevées sur cette station sont révélatrices de la sensibilité du système en phase d'alimentation, avec moins de 10 % d'$O_2$ au sein du massif sur le 1er étage. Cela confirme l'intérêt d'une rotation 2 fois par semaine (alternance alimentation/repos tous les 3-4 jours). Les filtres possèdent des facultés de récupération rapides, avec des teneurs proches de la saturation maximale (17 à 20 %) dès 2 jours de repos. On note aussi que l'aération par le fond de filtre est efficace sur chacun des étages. Ces valeurs sont similaires à celles relevées sur d'autres

stations en hiver tout comme en été. Cela confirme l'absence de problème d'oxygénation sur ces stations.




*Graphique 3 : Mesures de gaz ($O_2$) sur le 1er étage (gauche) et le 2ème étage (droite) au cours du bilan 24h de février 2014 sur la station du Reposoir*

### *III.4.2. Bilans 24h*

| Rendements (%) | 1er étage | | 2ème étage | | Global | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | N-$NH_4$ | NK | N-$NH_4$ | NK | N-$NH_4$ | NK |
| **Hivers 2013-2016** | | | | | | |
| Moy. | **41** | **50** | **78** | **75** | **81** | **84** |
| E.T. | 21 | 19 | 22 | 19 | 21 | 16 |
| Min. | 4 | 0 | 20 | 27 | 27 | 43 |
| Max. | 85 | 83 | 100 | 96 | 100 | 99 |
| Nb | 29 | 31 | 24 | 24 | 28 | 27 |
| **Eté 2013** | | | | | | |
| Moy. | **55** | **61** | **88** | **84** | **93** | **93** |
| E.T. | 14 | 13 | 12 | 11 | 9 | 6 |
| Min. | 31 | 32 | 67 | 66 | 68 | 76 |
| Max. | 85 | 83 | 100 | 97 | 100 | 99 |
| Nb | 13 | 15 | 13 | 13 | 13 | 14 |
| **Gain entre l'été et l'hiver (en points de rendement)** | | | | | | |
| Moy. | 14 | 11 | 10 | 9 | 13 | 9 |
| **Valeurs classiques (Molle *et al*, 2005)** | | | | | | |
| Moy. | - | 58 | - | 71 | - | > 85 |

*Tableau 7 : Performances de traitement (rendements) en azote (nitrification)*

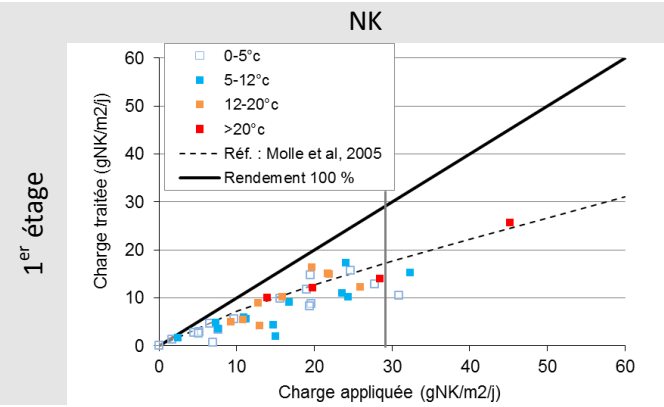
On relève des rendements légèrement supérieurs en été qu'en hiver. Toutefois, le gain total estival reste en moyenne d'une dizaine de points de rendement sur les paramètres N-$NH_4$ et NK (Tableau 7). Les performances de nitrification semblent donc peu ou légèrement affectées au cours de la période hivernale, et les résultats (Graphique 4, Graphique 5) sont très proches de ceux relevés par Molle et al (2005, 2008). Par contre, la fiabilité du traitement de l'azote est affectée au regard de la forte variabilité des données collectées.

Pour le 1er étage (Tableau 7, Graphique 4), une différence de performances (rendements) est relevée au regard des différentes gammes de températures ($T_{filtre}$). Cependant, sur le Graphique 4, une dispersion des valeurs est certes visible mais on ne remarque pas de chute nette des performances. Ainsi, cette différence de rendements été/hiver constatée sur le 1er étage est-elle :

- *liée aux températures ?* Le test statistique de Student met en évidence une différence significative (p-value = 0.02) entre les rendements en NK d'hiver et ceux d'été.

- *liée à des concentrations d'entrée plus faibles couplées à des charges hydrauliques plus fortes en hiver ?* Le test statistique de Student n'indique pas de différence significative (p-value = 0.47) entre les rendements associés à « des concentrations d'entrée faibles (< 49 mgNK/L, moyenne hivernale) et charges hydraulique fortes (> 0.37 m/j) » et « les autres valeurs » de rendements.

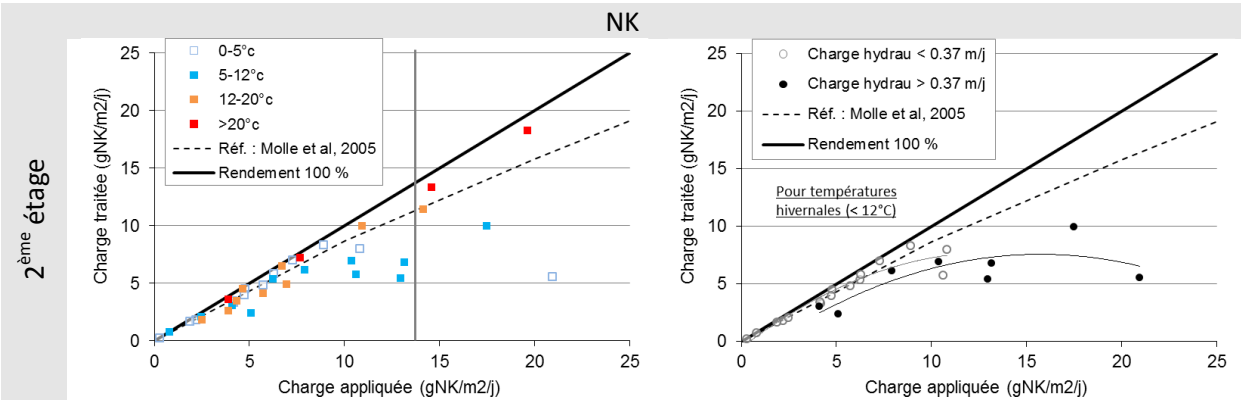
- *liée à la dispersion des valeurs ?* La comparaison des écarts par rapport à la référence « Molle et al 2005 » indique que la charge traitée en hiver est nettement différente de la charge traitée en été (p-value = 0.003).




*Graphique 4 : Charge traitées en NK (nitrification) sur le 1er étage, pour différentes gammes de températures du filtre*

En revanche, sur le 2ème étage les performances de traitement apparaissent visiblement plus faibles en hiver qu'en été uniquement pour des charges appliquées > 10 gNK/m²/j environ (Graphique 5). Le test de Student indique en effet une différence très marquée entre les rendements d'hiver et d'été lorsque les charges appliquées sont > 10 gNK/m²/j (p-value = 0.001), contre aucune différence significative pour des charges < 10 gNK/m²/j (p-value = 0.68).

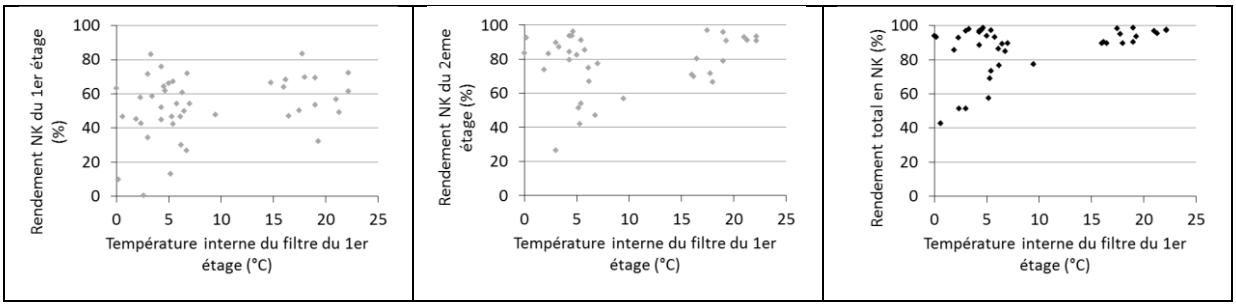
Au regard des concentrations, les 11 bilans réalisés à des charges appliquées > 10 gNK/m²/j ne semblent pas liés à des « concentrations d'entrée station faibles et charges hydrauliques fortes » (seuls 2 cas sur 7 ont été recensés). Ainsi, au-delà de 10 g/m²/j de NK appliqués sur le 2ème étage, la température serait le facteur prépondérant dans la chute des performances en hiver, voire la surcharge hydraulique dans une moindre mesure.




*Graphique 5 : Charge traitées en NK (nitrification) sur le 2ème étage, pour différentes gammes de températures du filtre*

Lorsque la température interne du filtre est basse, la variabilité des résultats apparait plus importante (Graphique 6), et cet impact semble plus marqué sur le 2ème étage que sur le 1er étage. La

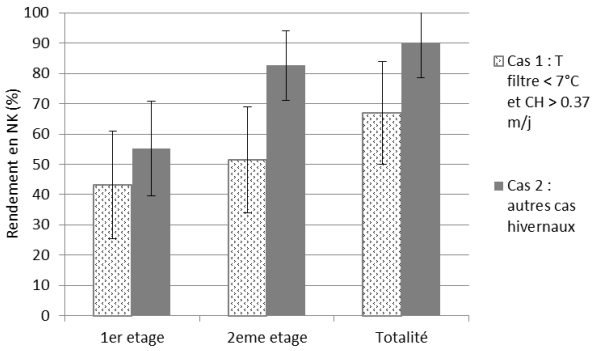
variabilité observée sur le paramètre azote est récurrente car liée à l'activité de la biomasse nitrifiante sensible aux variations de température, et à différents facteurs concomitants tels que l'hydraulique du système (passages préférentiels), le jour d'alimentation du filtre (teneur en $O_2$), la capacité d'adsorption du filtre (Morvannou et al, 2014 a), l'âge du système, la concentration d'entrée, etc.




*Graphique 6 : Evolution des rendements en NK (nitrification) sur chaque étage selon la température du filtre*

En période hivernale, on note une tendance à une légère chute des rendements pour des charges hydrauliques supérieures aux recommandations de dimensionnement (> 0,37 m/j, Graphique 5). Cette tendance mérite d'être confirmée par des données complémentaires.

Par ailleurs, considérons par exemple dans une première catégorie les bilans 24h avec une température interne ($T_{filtre}$) < 7°C associés à une charge hydraulique supérieure à 0.37 m/j (« cas 1 », 10 bilans), et dans une seconde catégorie on place les autres bilans (« cas 2 », 20 bilans). Seuls les bilans hivernaux sont ici pris en compte. Le cas 1 est le plus défavorable (valeurs significativement plus faibles selon le test de Student : p-value = 0.01), mais visiblement susceptible d'être rencontré un tiers du temps en hiver. Les performances en NK paraissent nettement impactées par cette situation doublement défavorable au fonctionnement optimal du système, surtout sur le 2$^{ème}$ étage (Graphique 7), et ce malgré les fortes amplitudes de variations.



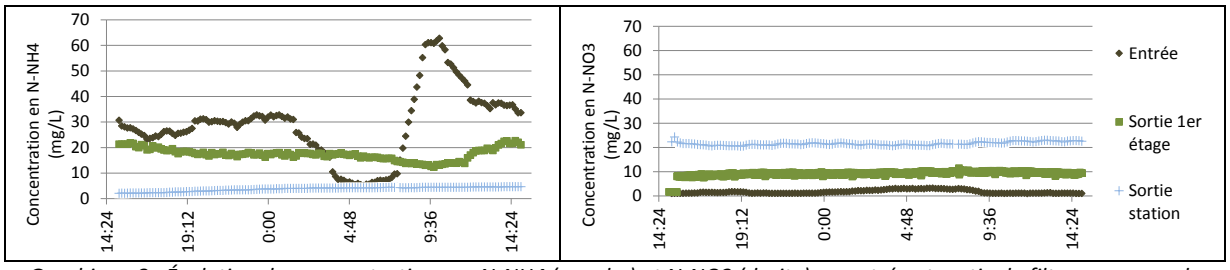

*Graphique 7 : Rendements en NK (nitrification) selon 2 scénarii hivernaux*

### *III.4.3. Mesures en continu : sondes spécifiques $NH_4$/$NO_3$*

La Graphique 8 représente l'évolution des concentrations en N-$NH_4$ (gauche) et N-$NO_3$ (droite) en entrée et sortie de filtres au cours du bilan 24h de mars 2013 de la station de St Pal de Mons. Les conditions de réalisation des mesures étaient les suivantes : charge hydraulique de 0.38 m/j, température interne du filtre du 1$^{er}$ étage de 7 °C, 2$^{ème}$ jour d'alimentation. Pour les autres stations suivies par Irstea et pour l'année 2014, les courbes sont similaires.

On observe l'efficacité du filtre par un pouvoir tampon lors de fortes fluctuations de concentrations d'entrée brutes vis-à-vis de la sortie station. L'effet tampon du filtre permet de lisser les niveaux de sortie, ce qui est positif lors d'augmentations de concentrations mais négatif dans le cas contraire.

L'ammonium N-$NH_4$ est lissé dès la sortie du 1er étage (12 à 23 mg/L) malgré les très fortes amplitudes de variation en entrée (5 à 60 mg/L). Quant aux nitrates N-$NO_3$, la concentration est stable au cours de la journée : les ions N-$NH_4$ sont en majorité stockés dans le filtre avant d'être plus lentement nitrifiés. Ce phénomène induit un lissage des concentrations en N-$NH_4$ et en N-$NO_3$.

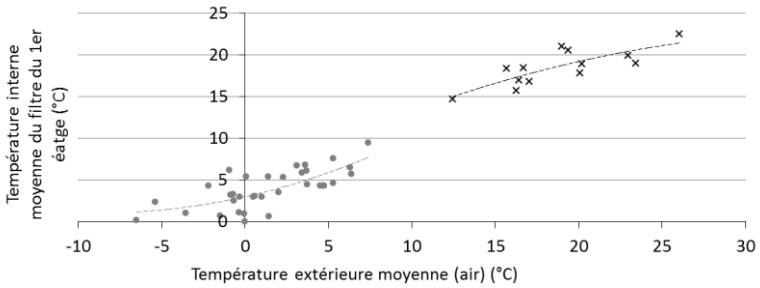



*Graphique 8 : Évolution des concentrations en N-NH4 (gauche) et N-NO3 (droite) en entrée et sortie de filtres au cours du bilan 24h de mars 2013 sur la station de St Pal de Mons*

# IV. Résultats : facteurs d'influence pour l'isolation des filtres

## IV.1. Lien entre températures interne et externe

Le lien entre la température de l'air et celle du filtre en alimentation est établi sur le Graphique 9 pour l'ensemble des données disponibles, c'est-à-dire au cours de 49 bilans 24h (dont 34 bilans en hivers). Lorsque la température moyenne journalière extérieure est négative (jusqu'à -6°C), les filtres suivis au cours de cette étude n'ont pas gelé.




*Graphique 9 : Lien entre les températures moyennes journalières de l'air et du filtre en phase d'alimentation ?*

Les températures d'effluents relevées sont de +5 à +8°C en moyenne en plein hiver. Ainsi, dès que le filtre est alimenté, le pouvoir réchauffant de l'effluent est nettement visible. Il maintient par exemple le filtre au-delà de +1°C même s'il gèle à l'extérieur.

## IV.2. Pouvoir isolant de la boue et de la neige

Le pouvoir isolant est analysé au regard du suivi en continu des températures. Quatre scenarios sont étudiés. Les Graphique 10, Graphique 11, Graphique 12 et Graphique 13 illustrent le suivi en continu des températures interne ($T_{filtre}$) et externe ($T_{air}$). Les courbes en pointillés précisent les amplitudes maximales et minimales de variations.

A partir de ces données, on peut analyser la relation entre les températures moyennes journalières internes et externes du filtre ainsi que la dynamique de refroidissement du filtre en fonction de la différence de température moyenne journalière interne et externe. Les Figure 3, Figure 4, Figure 5 et Figure 6 détaillent les dynamiques de températures relevées pour chaque situation (avec boues/neige, sans boues/neige). Ces figures sont représentées et interprétables tels que présentées dans sur la Figure 2 :

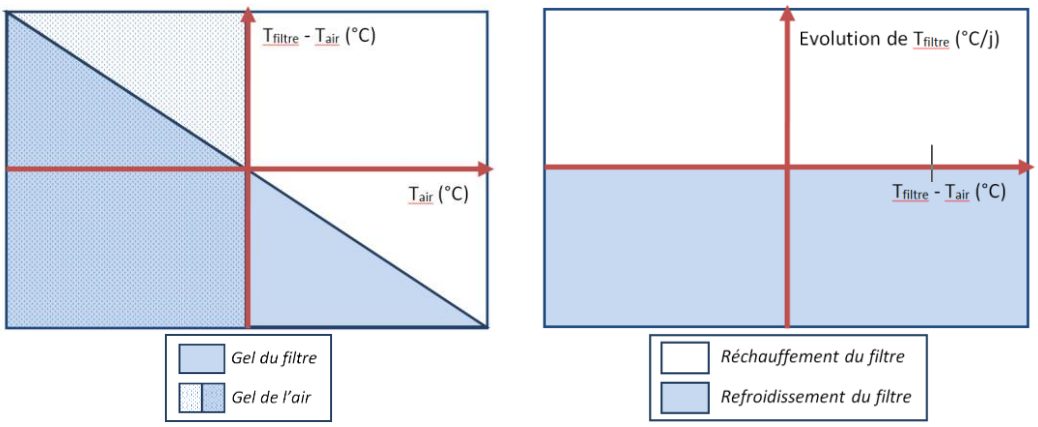
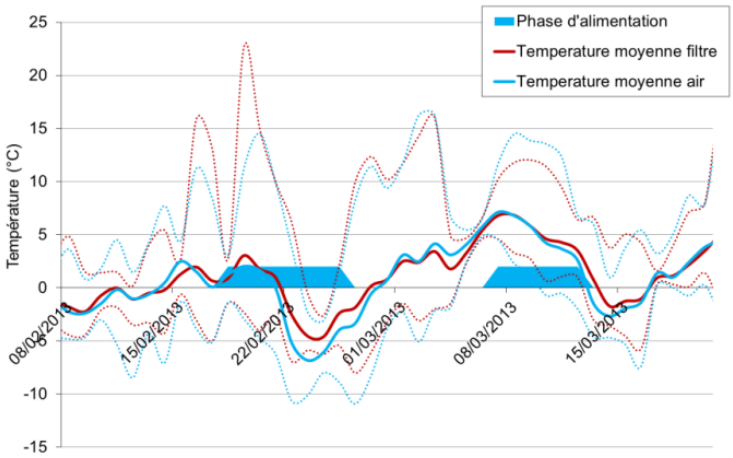



*Figure 2 : Liens entre température extérieure (air) et température du filtre : le filtre gèle-t-il ? (gauche) et Dynamiques de variation de température (droite)*

### *IV.2.1. Scénario 1 : absence de boue et absence de neige (exemple de la station de Pont de Montvert)*

Il est précisé que la sonde de température du filtre n'était pas en contact avec l'effluent. Dans le cas d'une absence de couche isolante et du réchauffement des eaux usées, le filtre est très sensible aux chutes de température extérieures.




Dès qu'il gèle dans l'air (jusqu'à -7°C en moyenne journalière), la température du filtre diminue jusqu'à -5°C de manière simultanée. Le gel récurrent du filtre est confirmé par des visites de terrain au cours des 2 hivers. L'absence de neige et de boues (< 4 cm) ne permet pas l'isolation du filtre. On ne relève aucune différence entre les phases de repos et les phases d'alimentation.

*Graphique 10 : Evolution des températures de l'air et du filtre de Pont de Montvert en hiver 2013*

Ce cas est typique d'une station jeune dont la charge n'est pas suffisante pour permettre à la couche de boues de se former. En conséquence, la sensibilité du filtre est accrue d'autant que la distribution de l'effluent en surface n'est pas forcément homogène.

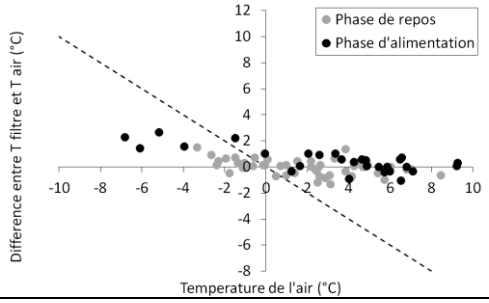
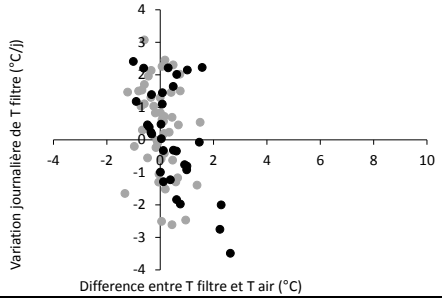
| Scénario 1 | Liens entre $T_{air}$ et $T_{filtre}$ : le filtre gèle-t-il ? | Dynamiques de variation de température |
|---|---|---|
| Sans boue<br>Sans neige |  |  |



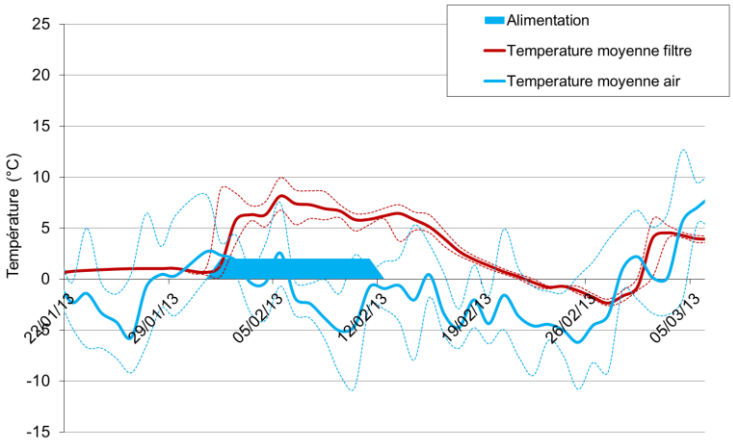
*Figure 3 : Dynamiques de températures en absence de boues et de neige*

### *IV.2.2. Scénario 2a et 2b : très peu de boues (5 cm) et impact de la neige*

Dès qu'une couche de boue est présente, même de faible épaisseur, la distribution de l'effluent en surface du filtre est optimisée, et on relève de vraies différences entre $T_{filtre}$ et $T_{air}$. Le pouvoir isolant de la couche de boue est encore limité, raison pour laquelle la présence ou non de la neige a de l'importance. Cet impact peut être illustré par deux exemples : la station d'Orelle pour laquelle l'alternance n'est pas faite régulièrement, et la station d'Issarlès.

- *Scenario 2a : très peu de boues (5 cm) et peu de neige (5 cm) : exemple de la station d'Orelle (dpt 73)*

La neige est présente fin janvier 2013 ; elle tamponne les basses températures extérieures (-6°C à +0.5°C en moyenne) et maintient le filtre hors-gel (+ 1°C). Le filtre est ensuite alimenté pendant 10 jours et se réchauffe nettement sous l'impact de l'effluent (+7°C) tandis qu'il gèle en dehors (0 à -5°C). Pendant cette période d'alimentation, et compte tenu du colmatage du filtre, la neige a fondu en surface du filtre. En conséquence de quoi, durant la période de repos suivante, la température interne du filtre chute. Tandis qu'il gèle dans l'air (de 0 à -5°C en moyenne journalière), le filtre perd 0.6°C par jour, passant de +6.4 à -2.4°C en 14 jours (jusqu'à 8°C de différence entre $T_{filtre}$ et $T_{air}$).




L'absence de neige, malgré une faible couche de boue, n'apporte plus l'isolation nécessaire. Ces données confirment l'intérêt d'une rotation des filtres 2 fois par semaine afin d'éviter les pertes de chaleur sur une trop longue durée et limiter les risques de gel des massifs filtrants.

*Graphique 11 : Evolution des températures de l'air et du filtre d'Orelle en hiver 2013*

La Figure 4 permet non seulement de voir l'impact du réchauffement des eaux usées sur le filtre (gauche) mais aussi qu'une chute de température moyenne journalière du filtre de l'ordre de 0.5°C par jour est enregistré jusqu'à des différences air-filtre de 8 °C.

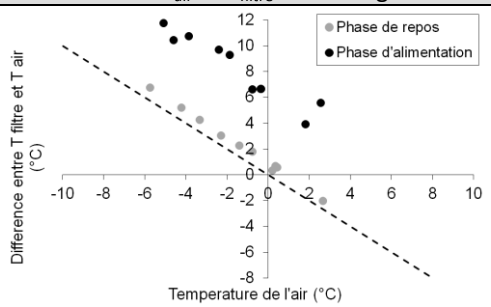
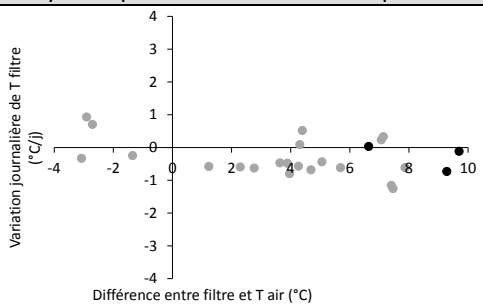
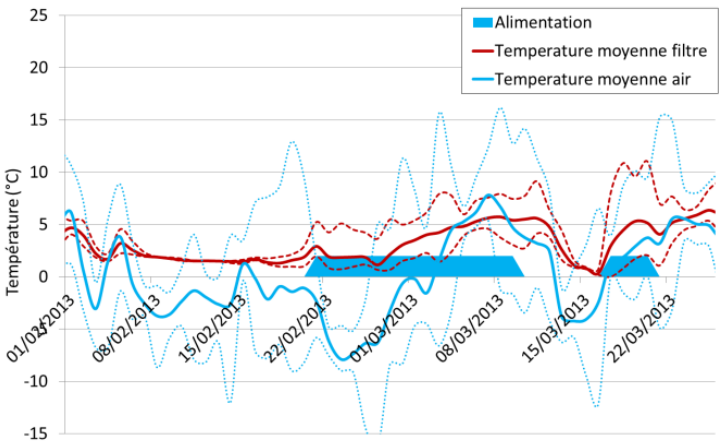
| Scénario 2 | Liens entre $T_{air}$ et $T_{filtre}$ : le filtre gèle-t-il ? | Dynamiques de variation de température |
|---|---|---|
| Peu de boues (< 5 cm)<br><br>Sans neige |  |  |



*Figure 4 : Dynamiques de températures avec très peu de boues et en absence de neige*

- *Scenario 2b : très peu de boues (5 cm) et neige importante (15 cm) : exemple de la station d'Issarlès (dpt 07)*

Lorsque la couche de neige est plus importante (15 cm dans ce cas), une meilleure isolation du filtre est observée.




En février 2013, le filtre est au repos et tamponne très bien (+2°C) malgré les fortes chutes de températures extérieures (entre 0 et -5°C en moyenne journalière, et jusqu'à -12°C en ponctuel). Sur une autre station identique et localisée non loin de celle-ci, les mêmes valeurs de températures sont relevées dans les mêmes conditions (neige, filtre au repos) : maintien du filtre à +1°C tandis que la température extérieure est négative (-7°C) durant 3 jours consécutifs.

*Graphique 12 : Evolution des températures de l'air et du filtre d'Issarlès en hiver 2013*

Là encore, dès que le filtre est alimenté, le pouvoir réchauffant de l'effluent est nettement visible. Il maintient le filtre entre +1 et +5°C tandis qu'à l'extérieur il gèle en continu durant 4 jours (-5 à -10°C en moyenne).

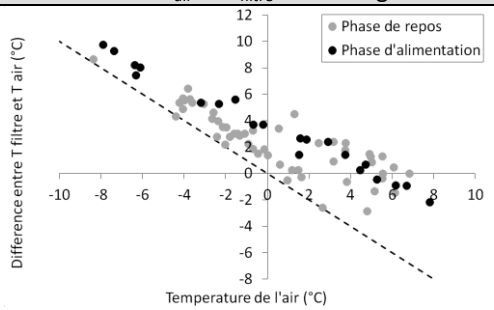
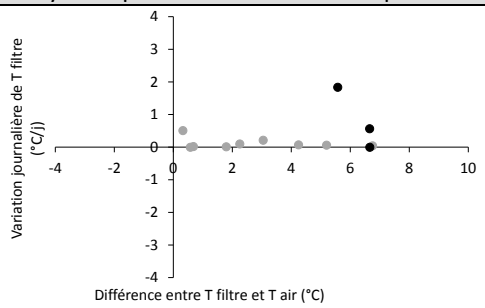
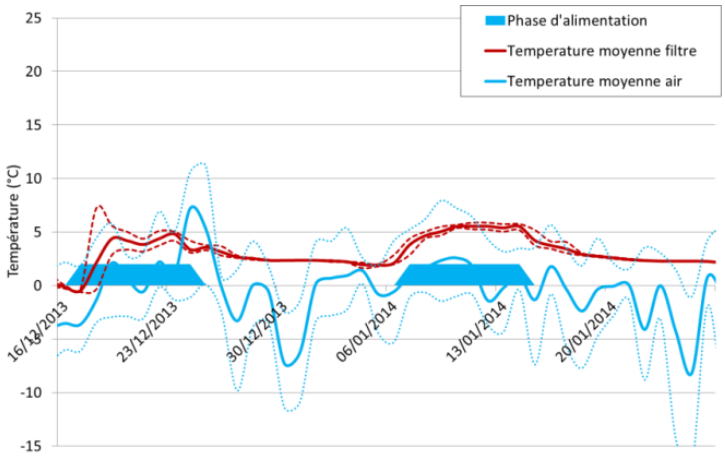
| Scénario 3 | Liens entre $T_{air}$ et $T_{filtre}$ : le filtre gèle-t-il ? | Dynamiques de variation de température |
|---|---|---|
| Peu de boues (< 5 cm)<br><br>Avec neige (> 10 cm) |  |  |



*Figure 5 : Dynamiques de températures avec très peu de boues et en présence de neige*

### *IV.2.3. Scénario 4 : présence de boue (10 cm) et absence de neige (exemple de la station du Reposoir)*

Sur cette station, la neige était absente ou très peu présente (< 5 cm). Par contre, la hauteur de la couche de dépôt de surface est conséquente : 10 cm.




Ainsi, chaque année du suivi, les filtres n'ont pas gelé tandis que la température de l'air extérieur était souvent très faible (-10°C). Même si la différence entre la température de l'air et la température du filtre est importante durant une phase de repos (jusqu'à 8°C d'écart), le filtre tamponne et la température du filtre reste positive (+2 à +3°C). En période d'alimentation, le réchauffement du filtre est nettement visible (+5°C).

*Graphique 13 : Evolution des températures de l'air et du filtre du Reposoir en hiver 2014*

Une couche de boues de 10 cm permet une bonne isolation du filtre même en l'absence de neige. Aucune chute notable de température n'est observé (Figure 6, à droite) jusqu'à des écarts moyens journaliers de 9°C entre l'air et le filtre.

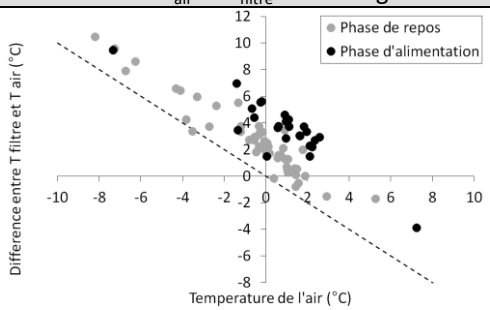
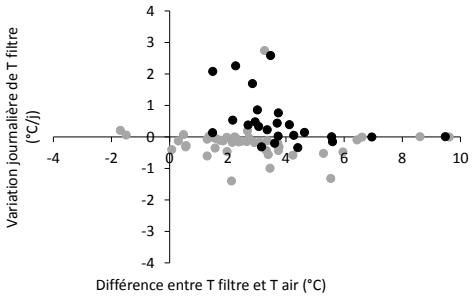
| Scénario 4 | Liens entre $T_{air}$ et $T_{filtre}$ : le filtre gèle-t-il ? | Dynamiques de variation de température |
|---|---|---|
| Avec boues (> 10 cm)<br><br>Peu de neige (< 5 cm) |  |  |



*Figure 6 : Dynamiques de températures avec présence de boues et très peu de neige*

# V. Préconisations de conception et d'exploitation

## V.1. Dimensionnement - Conception

Même si les systèmes étudiés n'ont pas posé de problème particulier pendant ces deux hivers, quelques règles de bonne pratique peuvent être établies pour limiter l'impact du froid sur le fonctionnement des ouvrages et la fiabilité des performances.

- ***L'emplacement***

En premier lieu il est préférable, lorsque possible, d'installer ce type de station sur des terrains favorisant l'exposition au soleil. Cela permet de réchauffer régulièrement les filtres et les ouvrages de prétraitement ou de bâchées. Cela permet d'éviter des gels prolongés des ouvrages.

- ***Les prétraitements et ouvrages de bâchées***

Les périodes de froid intenses peuvent poser des problèmes de fonctionnement sur les dégrilleurs automatiques et sur les ouvrages gravitaires de bâchées. Le gel peut aussi bien bloquer le dégrilleur que le système de bascule des chasses. Il est donc opportun de mettre en place les dégrilleurs dans des locaux fermés afin de limiter la problématique du gel et de faciliter également les tâches d'exploitation. De même, les systèmes de chasse ou de siphon doivent pouvoir être couverts en période hivernale pour éviter leur blocage grâce à la chaleur des eaux usées.

- ***Les filtres***

En ce qui concerne les systèmes de distributions (enterrés, aération, par point d'alimentation, 'régulfuid') aucun problème de gel n'a été observé sur ces deux ans d'étude. Si un système de distribution enterrés parait plus isolé du froid, le point majeur est une vidange complète des canalisations entre les bâchées et pendant les périodes de repos.
En ce qui concerne les filtres, leur conception peut être adaptée pour limiter les baisses de performances. Si l'impact de la granulométrie sur les performances n'a pas pu être mis en évidence dans le cadre de cette étude (d'autres facteurs prédominent), il a clairement été montré l'intérêt de la mise en place de la couche de dépôt comme couche isolante. En conséquence de quoi il est préférable de mettre en place des granulométries de type 2/4 mm sur la couche filtrante du filtre du premier étage pour favoriser la mise en place de cette couche isolante. De même, un fractionnement des filtres (alimentation d'une partie des lits seulement) peut être une bonne solution en cas de sous-charge de la station. Cela permet de favoriser également le développement de la couche de dépôt sur les cellules utilisées, et limiter les surfaces exploitées en termes de gestion des végétaux.
Pour garantir une meilleure isolation du filtre, la mise en place d'un compost en surface du premier étage de traitement est une solution envisageable. Non testé, cela mériterait un suivi pour évaluer son efficacité. Cela va dans le même sens que de laisser les roseaux coupés en place en début de vie (voir paragraphe VI.2).

## V.2. Exploitation

- ***Alternance des filtres***

Lors de l'envoi d'une bâchée, la répartition des effluents en surface des filtres ne semble pas être particulièrement impactée par la présence d'un manteau neigeux. La chaleur de l'effluent fait rapidement fondre la neige dès la première bâchée lors de la réalimentation d'un filtre après une période de repos. Toutefois, la fonte de cette neige peut être problématique par la suite en phase de repos car elle n'apporte plus sa protection isolante.

*Figure 7 : 1ère bâchée d'alimentation d'un filtre enneigé (St Just Malmont, février 2013, photo C. Tscherter)*

Compte-tenu de la chute d'oxygène en période d'alimentation ainsi que la chute possible de température dans le filtre en cas d'absence de neige en période de repos, il est préférable de maintenir des rotations classiques, tous les 3-4 jours, afin de maintenir les filtres hors gel.

- ***Roseaux***

Compte tenu du faible niveau de dépôt en début de vie des filtres, il peut être envisagé de ne pas évacuer les roseaux coupés afin d'accélérer la mise en place de ce dépôt et donc renforcer l'isolation du filtre. Pour cela les roseaux pourraient être uniquement broyés par une épareuse.
Par la suite, dès lors que la couche de boues est bien formée en surface, le faucardage sera réalisé classiquement (à l'automne pour davantage de facilité), avec exportation des végétaux hors des filtres.

# VI. Conclusion

Les données collectées sont très nombreuses et variées. Les variations, parfois simultanées, des conditions de fonctionnement (couverture neigeuse, alimentation/repos, gel, etc.) rendent difficile une définition précise des limites du système en climat froid. Des données supplémentaires seraient nécessaires pour cela. Cependant plusieurs éléments peuvent être mentionnés.

Les performances de traitement hivernales concernant la DCO, la $DBO_5$ et les MES ne semblent pas être impactées par les faibles températures (jusqu'à des minima ponctuels de -19 °C, des températures moyennes journalières de -10 °C et des gels continus pendant 10 jours). Elles restent excellentes et similaires à celles relevées en été, globalement supérieures à 90 % sur chacun de ces paramètres.

Le traitement de l'azote, sensible aux conditions d'oxygénation et de température, a été étudié plus en détails. Malgré des teneurs en $O_2$ très correctes au sein des massifs filtrants en plein hiver, la nitrification chute dans certaines conditions : une température moyenne journalière du massif inférieure à +6°C (mesurée à -15 cm) ainsi que des charges importantes. Les performances de nitrification (NK) sont de 84 % en moyenne, contre 93 % en période estivale ($T_{filtre}$ > 15°C). Toutefois, cette perte de moins de 10 points de rendement est en partie due à des effluents plus dilués en hiver. L'impact de la température sur l'activité nitrifiante s'observe surtout au deuxième étage de traitement pour des charges appliquées supérieures à 10 gNK/m²/j. Ainsi, la fiabilité de la nitrification est affectée dans ces conditions de fonctionnement. Malgré tout, les performances de traitement de l'azote ammoniacal ($N\text{-}NH_4$) en hiver restent très honorables (81 % en moyenne) au regard des conditions de température hivernales fortement défavorables en montagne.

Le problème de prise en masse des filtres en cas de gel n'est pas observé en raison du pouvoir isolant de la neige et de la couche de dépôt. Ce pouvoir isolant a pu être mis en évidence dès une épaisseur de boues de 10 cm. A partir de 5 cm de boues, et en l'absence de neige, une chute de la température moyenne journalière du filtre de l'ordre de 0.5 °C par jour est observée lorsqu'il gèle à l'extérieur. En l'absence totale de boue et de neige, le filtre n'est alors pratiquement pas isolé et les températures suivent celles de l'air en période de repos. En revanche le pouvoir calorifique des eaux usées permet de dégeler rapidement le filtre.

Ainsi, en termes de gestion de la station, la rotation des filtres 2 fois par semaine est fortement recommandée. Même si aucune relation n'a été mise en évidence entre les performances et la fréquence de rotation des filtres, cela permet de limiter les risques de gel, en particulier sur les stations récentes (< 5 ans d'âge) où la hauteur de boues est insuffisante. La neige n'est pas un facteur négatif pour le traitement car elle maintient des températures positives au sein du filtre même en cas de gel extérieur prolongé (pouvoir isolant) et elle ne gêne pas l'infiltration des bâchées. La capacité d'isolation de la couche de boue ou de la neige a démontré la nécessité de favoriser leur présence en surface des filtres.

Concernant la conception de la station, certaines règles de bon sens sont à privilégier telles que l'exposition du site sur un versant ensoleillé de la montagne, le fait d'enterrer au maximum les canalisations d'alimentation des filtres ainsi que les éventuels regards et vannes. De même, la mise sous abris des dégrilleurs automatiques, et la couverture des systèmes gravitaires de bâchées en hiver permettent de limiter les pertes de chaleurs et faciliter la fiabilité et l'exploitation des ouvrages. Concrètement, les stations sont souvent difficilement accessibles pour les exploitants lors de fortes intempéries (neige, éboulements...) : il convient donc de penser à créer des voies d'accès adéquates.

La limite de « 1000 m d'altitude » est souvent citée en référence pour le seuil maximal d'implantation d'une station à filtres plantés de roseaux. Or l'altitude n'est pas le seul paramètre en lien avec le froid hivernal : le versant d'exposition (sud/nord), la conception (cf paragraphe précédent), l'exploitation (fréquences d'alimentation/repos des filtres) sont autant de paramètres importants à prendre en considération. Ainsi, dès lors que toutes les préconisations précitées sont respectées, il est tout à fait possible d'implanter une station de type FPRv au-delà de 1000 m d'altitude tout en assurant une nitrification poussée.

S'il a été possible de confirmer le bon fonctionnement de ces stations même en période de gel intense, les limites du système n'ont toutefois pas été atteintes lors de l'étude. Des données complémentaires acquises lors d'hivers très rigoureux seraient nécessaires.

# VII. Bibliographie


Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (2005). Épuration des eaux usées par filtres plantés de macrophytes : recommandations techniques pour la conception et la réalisation. http://epnac.irstea.fr

Bronfenbrener L., Bronfenbrener R. (2010). Modeling frost heave in freezing soils. Cold Regions Sci. Tech., 61, 43-64.

Kadlec R.H. (2001). Thermal environments of subsurface treatment wetlands. Wat. Sci. Tech., 44(11-12), 251-258.

McCarthy B., Axler R., Monson-Geerts S., Henneck J., Crosby J., Nordman D., Weidman P., Hagen T. (1997) Development of Alternative On-site Treatment Systems for Wastewater Treatment: A Demonstration Project for Northern Minnesota: Final Report Submitted to Minnesota Technology Inc., Legislative Commission for Minnesota Resources, Electric Research Power Institute. Natural Resources Research Institute, University of Minnesota, Duluth, Minnesota.

Mercoiret L. (2010) Qualité des eaux usées domestiques produites par les petites collectivités : Application aux agglomérations d'assainissement inférieures à 2 000 Equivalent Habitants. 55p. Site web : http://epnac.irstea.fr.

Molle P., Liénard A., Boutin C., Merlin G., Iwema A. (2005). How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. Wat. Sc. Tech., 51(9), 11-21.

Molle P., Prost-Boucle S., Liénard A. (2008). Potential for total nitrogen removal by combining vertical flow and horizontal flow constructed wetland: A full-scale experiment study. Ecol. Eng., 34(1), 23-29.

Morvannou A., Choubert J.-M. Vanclooster M., Molle P. (2014) Modelling nitrogen removal in a vertical flow constructed wetland treating directly domestic wastewater. Ecol. Eng., 70, 379-386.

Morvannou A., Forquet N., Michel S., Troesch S., Molle P. (2014) Treatment performances of French constructed wetlands results from a database collected over the last 30 years. IWA 14th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control (ICWS2014), proceedings, 635-643. Prost-Boucle S., Molle P. (2012). Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: Treatment limits and operation modes. Ecol. Eng., 43, 81-84.

Smith I. D., Bis G. N., Lemon E. R., Rozema L. R. (1997). A thermal analysis of a sub-surface Vertical Flow Constructed Wetland. Wat. Sci. Tech., 35(5), 55-62.

Wallace S., Parkin G., Cross C. (2011). Cold climate wetlands: design and performance. Wat. Sci. Tech., 44(11-12), 259-265.