



**HAL**  
open science

## Résultats des six premiers mois de suivi de la plateforme lysimétrique de Mionnay (69)

Ania Morvannou, Sara Bisone, Nicolas Forquet

### ► To cite this version:

Ania Morvannou, Sara Bisone, Nicolas Forquet. Résultats des six premiers mois de suivi de la plateforme lysimétrique de Mionnay (69). INRAE. 2017, pp.1-50. hal-04564943

**HAL Id: hal-04564943**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04564943>**

Submitted on 1 May 2024

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Programme 2016/2018 - Thème « Eau, Biodiversité et Aménagements urbains » - Action n° 51 Les Zones de Rejet Végétalisées



## **Projet ROSEEV : ROle du Sol dans les zonEs de rEjets Végétalisées**

**Résultats des six premiers mois de  
suivi de la plateforme lysimétrique  
de Mionnay (69)**

**Rapport intermédiaire**

**Ania MORVANNOU (Irstea)  
Sara BISONE (Irstea)  
Nicolas FORQUET(Irstea)**

**Août 2017**

## Contexte de programmation et de réalisation

---

Ce travail a été réalisé dans le cadre des actions Irstea-ONEMA n°46 (2013-2015) et n°51 (2016-2018) (coordination C. Boutin (Irstea)) intitulées « les Zones de Rejet Végétalisées (ZRV) », domaine « L'eau en espace urbanisé » ([www.zrv.irstea.fr](http://www.zrv.irstea.fr)). Il fait partie de la sous-action ROSEEV qui vise à une meilleure compréhension des processus se produisant dans le sol des ZRV.

La sous-action ROSEEV de l'action ZRV implique Irstea Lyon-Villeurbanne (Sara Bisone, Claire Bertrand, Ania Morvannou, Catherine Boutin, Clément Crétollier, Vincent Bourgeois, Olivier Garcia, Jérémy Aubert, Matthieu Masson, Corinne Brosse, Loic Richard, Myriam Brand, Marina Coquery) et Bioforsk (Esther Bloem).

### AUTEURS

**Ania MORVANNOU**, Ingénieur de recherche (Irstea), [ania.morvannou@irstea.fr](mailto:ania.morvannou@irstea.fr)

**Sara BISONE**, post-doctorante (Irstea), [sara.bisone@irstea.fr](mailto:sara.bisone@irstea.fr)

**Nicolas FORQUET**, Ingénieur de recherche (Irstea), [nicolas.forquet@irstea.fr](mailto:nicolas.forquet@irstea.fr)

### CORRESPONDANTS

**Onema : Estérelle VILLEMAGNE**, Chargée de mission Innovation, [esterelle.villemagne@onema.fr](mailto:esterelle.villemagne@onema.fr)

**Irstea : Catherine BOUTIN**, Ingénieur de recherche, [catherine.boutin@irstea.fr](mailto:catherine.boutin@irstea.fr)

### AUTRES CONTRIBUTEURS

**Claire BERTRAND**, Assistante ingénieur (Irstea), [claire.bertrand@irstea.fr](mailto:claire.bertrand@irstea.fr)

**Catherine BOUTIN**, Ingénieur de recherche (Irstea), [catherine.boutin@irstea.fr](mailto:catherine.boutin@irstea.fr)

**Matthieu MASSON**, Ingénieur de recherche (Irstea), [matthieu.masson@irstea.fr](mailto:matthieu.masson@irstea.fr)

**Matthieu DOREL**, Assistant ingénieur (Irstea), [matthieu.dorel@irstea.fr](mailto:matthieu.dorel@irstea.fr)

**Raphael ANGULO-JARAMILLO**, Directeur de recherche (CNRS), [rafael.angulojaramillo@entpe.fr](mailto:rafael.angulojaramillo@entpe.fr)

**Eric MICHEL**, Chargé de recherche (INRA), [eric.michel@avignon.inra.fr](mailto:eric.michel@avignon.inra.fr)

**Pierre BREUL**, Professeur (UBP), [pierre.breul@univ-bpclermont.fr](mailto:pierre.breul@univ-bpclermont.fr)

**Jean-Jacques BESSOULE**, Directeur de recherche (CNRS), [jean-jacques.bessoule@biomemb.u-bordeaux2.fr](mailto:jean-jacques.bessoule@biomemb.u-bordeaux2.fr)

**Marina LE GUEDARD**, Ingénieur de recherche (ADERA), [marina.le-guedard@u-bordeaux.fr](mailto:marina.le-guedard@u-bordeaux.fr)

**Droits d'usage** : diffusion restreinte : AE et DEB

**Niveau géographique** : national

**Couverture géographique** : NA

**Niveau de lecture** : expert



## RÉSULTATS DES SIX PREMIERS MOIS DE SUIVI DE LA PLATEFORME LYSIMÉTRIQUE DE MIONNAY

### RÉSUMÉ

Ce rapport est consacré à la connaissance plus approfondie des trois sols retenus pour l'étude et du comportement des polluants entrants et sortants des lysimètres. Afin de connaître l'état initial des trois sols, la caractérisation de leurs propriétés texturales, hydrodynamiques et géochimiques a été effectuée grâce à des analyses en laboratoire. Un suivi hydraulique ainsi que le suivi des polluants majeurs et des éléments traces métalliques pendant les 6 premiers mois d'alimentation ont été réalisés grâce aux lysimètres. On peut retenir les éléments suivants :

la capacité d'infiltration du sol provenant d'Ars-sur-Formans est la plus faible des trois sols de l'étude. Le lysimètre correspondant à ce sol se draine peu pendant les périodes de repos entraînant une limitation du renouvellement en oxygène et par conséquent une nitrification faible. En revanche, la nature des argiles présentes dans ce sol n'indiquent pas de risques de gonflement. La capacité d'échange cationique ainsi que l'adsorption du phosphore peuvent être qualifiées de moyenne. A noter qu'aucune pollution particulière n'a été décelée lors de l'étude du contenu total de ce sol.

la capacité d'infiltration du sol provenant de Civrieux d'Azergues est plus importante que celle du sol d'Ars-sur-Formans. Pendant les périodes de repos le drainage se fait plus efficacement dans lysimètre contenant ce sol que le précédent. En revanche, le fait d'augmenter la valeur de la consigne à la base de ce lysimètre a conduit au développement d'une zone saturée épaisse qui maintient une teneur en eau élevée dans le monolithe durant les périodes d'alimentation. La teneur en argile dans ce sol est faible et comme précédemment, la capacité d'échange cationique ainsi que l'adsorption du phosphore peuvent être qualifiées de moyenne. A noter qu'aucune pollution particulière n'a été décelée lors de l'étude du contenu total de ce sol.

le sol provenant de Bègles présente la plus grande capacité de drainage (avec une très forte variation spatiale) des trois sols. De plus, la présence d'écoulements préférentiels dans le lysimètre correspondant a été démontrée grâce au suivi hydraulique et aux mesures de concentrations élevées en COT en sortie ; ces dernières mesures apportant aussi des informations quant à un phénomène de lixiviation se produisant au sein de ce lysimètre. D'autre part, les capacités d'adsorption du phosphore et d'échange cationique sont élevées et l'analyse du sol indique un risque notable de gonflement des argiles à travers la présence de Montmorillonite. L'analyse de la composition du contenu total des échantillons de ce sol signale des teneurs en carbone organique et en calcium anormalement élevées dans les horizons les plus profonds.

De manière générale pour les trois lysimètres, lors du suivi des concentrations des polluants majeurs il a été observé qu'en présence de fortes concentrations en COT et en ammonium, les rendements d'élimination sont très élevés grâce aux processus de filtration et de nitrification, respectivement. Les phosphates et certains éléments traces métalliques (Fe, Li, Al, Mn et Rb) sont retenus dans les trois sols alors que d'autres éléments traces métalliques sont relargués (Cd, As, Sb et U), notamment par le lysimètre correspondant au sol provenant de Bègles.

### MOTS CLÉS

Etat initial ; propriétés texturales, hydrodynamiques et géochimiques ; suivi hydraulique ;

suivi des polluants majeurs ; suivi des éléments traces métalliques ; capacité d'infiltration ; risques de gonflement des argiles ; capacité d'échange cationique ; adsorption du phosphore



## RESULTS OF THE SIX FIRST MONTHS OF MONITORING OF THE MIONNAY LYSIMETRIC PLATFORM

### ABSTRACT

This report provides in-depth description of the three soils selected for the study and the behavior of the pollutants flowing in and out the lysimeters. The initial textural, hydrodynamic and geochemical properties were determined by laboratory analyses and will serve as reference for later analyses carried out along the operation of the lysimeters. Results of flow in and out and pollutant concentrations (major and trace elements) monitoring during the first 6 months of feeding are presented. The following elements may be considered:

the infiltration capacity of Ars-sur-Formans soil is the lowest of the three soils of the study. The lysimeter corresponding to this soil drains a little during the rest periods causing limitation of the oxygen renewal and consequently low nitrification. On the other hand, the nature of the clays present in this soil does not indicate any risk of swelling. The cation exchange capacity is considered as medium as well as the phosphorus adsorption. No particular pollution was detected with the major physico-chemical characteristics and the elemental total contents of this soil.

the infiltration capacity of Civrieux d'Azergues soil is more important than the infiltration capacity of Ars-sur-Formans soil. During rest periods, drainage is more efficiently carried out in the lysimeter containing this soil than the previous one. On the other hand, increasing the value of the hydraulic head at this lysimeter basis has led to the development of a thick saturated zone which maintains a high water content in the monolith during the feeding periods. The clay content in this soil is low and as before, the cation exchange capacity as well as the phosphorus adsorption can be qualified as medium. As before, no particular pollution was detected with the major physico-chemical characteristics and the elemental total contents of this soil.

the soil from Bègles has the greatest drainage capacity of the three soils (with very high spatial variation). In addition, the presence of preferential flows in the lysimeter corresponding to this soil was demonstrated by the hydraulic monitoring and high TOC concentration measured at the outlet; these latter measurements also provide information about a leaching phenomenon occurring within this lysimeter. On the other hand, the phosphorus adsorption and cation exchange capacities are high and the soil analysis indicates a significant risk of clay swelling with the presence of Montmorillonite. The analysis of the elemental total contents of soil samples indicates abnormally high levels of organic carbon and calcium in the deepest horizons.

In general for the three lysimeters, in the presence of high TOC and ammonium concentrations, the removal efficiencies are very high thanks to the filtration and nitrification processes, respectively. Phosphates and some metallic trace elements (Fe, Li, Al, Mn and Rb) are retained in all three soils while other trace metallic elements are released (Cd, As, Sb and U), in particular by the lysimeter corresponding to the soil from Bègles.

### KEY WORDS

Initial state ; textural, hydrodynamic and geochemical properties; hydraulic monitoring; monitoring of major pollutants; metallic trace elements; infiltration capacity; risks of clay swelling; cation exchange capacity; phosphorus adsorption



## SOMMAIRE

1.	Introduction.....	8
2.	Caractérisation des trois sols retenus pour l'étude.....	8
2.1.	Description générale des 3 sols retenus pour l'étude.....	8
2.2.	Propriétés hydrodynamiques des 3 sols.....	9
2.2.1.	Conductivité hydraulique au champ.....	9
2.2.2.	Porosité.....	9
2.2.3.	Courbes de rétention.....	10
2.3.	Composition et propriétés géochimiques des 3 sols de l'étude.....	11
2.3.1.	Analyses de contenu total.....	11
2.3.2.	Capacité d'adsorption des phosphates et teneur initiale en phosphore	15
2.3.3.	Capacité d'échange cationique.....	17
2.3.4.	Caractérisation des argiles.....	17
3.	Suivi de l'infiltration des eaux usées traitées.....	19
3.1.	Charges appliquées et consignes.....	19
3.2.	Comportement hydrodynamique des 3 sols.....	20
3.3.	Paramètres majeurs.....	23
3.3.1.	Carbone organique total.....	24
3.3.2.	Azote total.....	25
3.3.3.	Phosphates.....	27
3.4.	Éléments traces métalliques.....	29
4.	Conclusion.....	30
5.	Bibliographie.....	31
6.	Table des illustrations.....	32
7.	Annexe 1 : Description pédologiques des fosses pédologiques.....	33
7.1.	Profil pédologique d'Ars-sur-Formans.....	33



7.2.	Profil pédologique de Civrieux d’Azergues.....	35
7.3.	Profil pédologique de Bègles.....	38
8.	Annexe 2 : Résultats des analyses de contenu total des 3 sols de l’étude.....	39
9.	Remerciements.....	41

# PROJET ROSEEV : ROLE DU SOL DANS LES ZONES DE REJETS VÉGÉTALISÉES – RÉSULTATS DES SIX PREMIERS DE SUIVI DE LA PLATEFORME LYSIMÉTRIQUE DE MIONNAY (69)

## 1. Introduction

Les objectifs finaux du projet ROSEEV sont de déterminer les capacités d'infiltration et les performances de traitement pour trois sols choisis dans des conditions similaires au fonctionnement d'une ZRV, d'étudier l'influence des modifications texturales et structurales de ces sols (colmatage), d'étudier l'influence des écoulements préférentiels et l'influence des modes d'alimentation.

Ce présent document fait suite au rapport portant sur le choix des trois sols étudiés et la description du site expérimental (rapport IRSTEA, ONEMA – Février 2016). Ce dernier a été conçu afin d'évaluer les capacités d'infiltration et les performances de traitement pour les trois sols de l'étude. Ainsi, il est composé de trois lysimètres instrumentés dont les différents capteurs, ainsi que les balances, permettront de suivre la capacité d'infiltration des trois sols, d'observer le développement du colmatage et d'établir les capacités épuratoires du sol. Concernant les capacités épuratoires, un focus a été prévu sur le phosphore, afin de déterminer le potentiel de ces systèmes dans sa rétention.

L'objectif de ce rapport porte sur la connaissance plus approfondie des trois sols retenus pour l'étude et du comportement des polluants entrants et sortants des lysimètres. Le rapport comprend (1) la caractérisation des propriétés texturales, hydrodynamiques et géochimiques des trois sols retenus pour l'étude, et (2) le suivi hydraulique, des polluants majeurs et des éléments traces métalliques pendant les 6 premiers mois d'alimentation des lysimètres.

## 2. Caractérisation des trois sols retenus pour l'étude

Les zones de rejet végétalisées se situant à proximité des stations d'épuration et proche du cours d'eau où le rejet s'effectue, le sous-sol de ces zones est un mélange entre le sol formé par la dynamique du cours d'eau (Fluvisol) et le remblai de la construction de la station (Anthroposol). Par conséquent, les sites d'implantation de ZRV présentent des textures et des conductivités hydrauliques variables. La présente étude portant sur le sol des ZRV, il a été décidé de choisir des sols très différents (texture et conductivité hydraulique différentes).

Le terme d'Anthroposol est apparu depuis quelques années pour décrire les sols transformés par l'activité humaine. Ce vocable regroupe différents cas allant d'un sol fortement modifié par l'activité rurale (Anthroposol transformé) à des sols formés par le dépôt de matériaux rapportés ou artificiels (Anthroposols artificiels ou construits). Dans la classification internationale (World Reference Base for Soil Resources), on emploie le terme de Technosol qui correspond plus spécifiquement aux Anthroposols artificiels et construits (Baize & Jabiol, 2011).

### 2.1. Description générale des 3 sols retenus pour l'étude

Les trois sites sélectionnés pour l'échantillonnage de sols pour les lysimètres sont :

A proximité de la station de traitement des eaux usées d'Ars-sur-Formans (01) : Fluvisol sablo-argileux

A proximité de la station de traitement des eaux usées de Civrieux d'Azergues (69) : Fluvisol limono-argileux

La biostation de Bègles (33) : Anthroposol (ou Technosol) argilo-sableux

Pour chacun des 3 sols, des échantillons remaniés et non remaniés ont été prélevés à différentes profondeurs (horizons 10-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm et 90-130 cm) et une fosse pédologique a été creusée dont la description pédologique des parois se trouve en Annexe 1.

Une analyse granulométrique a été effectuée (NF X31-107) pour chaque horizon. Les résultats sont présentés sur la Figure 1. Par rapport aux mesures réalisées préalablement à l'échantillonnage des lysimètres, les valeurs sont similaires à l'exception du site de Bègles, où la teneur en argile est en moyenne significativement moins importante (les anciennes mesures situent le taux d'argile entre 20% et 30% alors que les nouvelles mesures montrent un taux d'argile compris entre 10% et 20%) mais toujours avec une **forte dispersion des valeurs**.

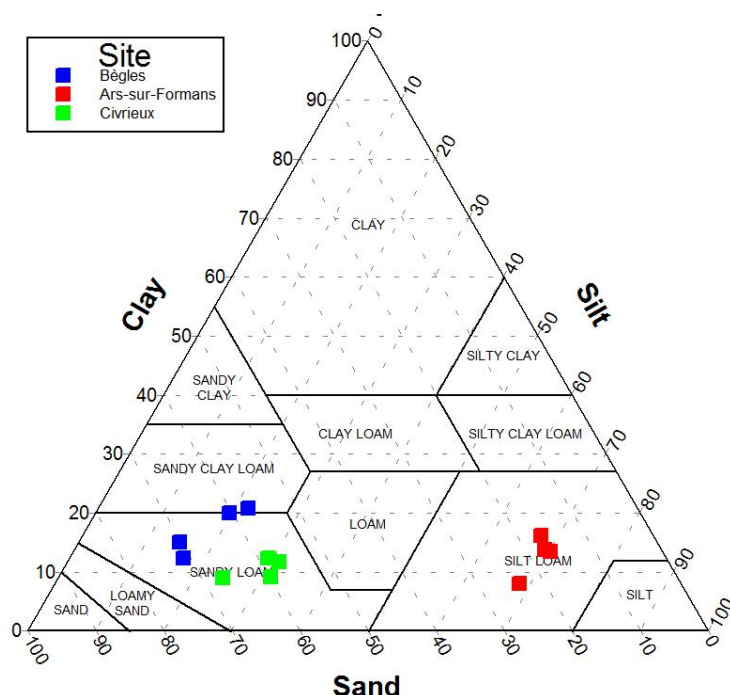


Figure 1. Positionnement sur le diagramme textural des échantillons prélevés dans les fosses pédologiques

## 2.2. Propriétés hydrodynamiques des 3 sols

### 2.2.1. Conductivité hydraulique au champ

Préalablement à l'échantillonnage des sols, des mesures de conductivité hydraulique au champ des 3 sols ont été effectuées (Tableau 1). La méthode employée est celle du Guelph (Chossat, 2005)<sup>1</sup>. On remarque que la plage de variation des données de conductivité au champ est plus réduite pour les Fluviosols (Ars-sur-Formans et Civrieux d'Azergues, valeurs de  $K_{fs}$  variant de 1 à 4) que pour l'Anthroposol (Bègles, valeurs de  $K_{fs}$  variant de 1 à 30).

Tableau 1. Conductivité hydraulique au champ ( $K_{fs}$ ) pour les 3 sols de l'étude

	Ars-sur-Formans	Civrieux d'Azergues	Bègles <sup>2</sup>
<b><math>K_{fs}</math> (mm/h)</b>	0.52-2.1 (3)*	22-45 (2)	1.1-33 (8)

\* Nombre de points de mesure

Suivant les ordres de grandeur de la conductivité hydraulique pour différents sols présentés par Musy et Soutter (1991), le sol d'Ars-sur-Formans est très peu perméable et ses possibilités d'infiltration sont considérées comme étant moyennes à faibles. Concernant le

<sup>1</sup> Pour une comparaison des différentes techniques de mesure *in situ* de la conductivité hydraulique des sols, le lecteur peut se référer au rapport final : Etudes préalables sur site : Une méthodologie pour décrire un site et choisir les points d'échantillonnage et/ou de mesure de capacité d'infiltration.

<sup>2</sup> Résultats obtenus par la méthode de Porchet, sondage à 40 cm.

sol de Civrieux d'Arzergues les possibilités d'infiltration sont moyennes à bonnes. Selon l'endroit où la conductivité hydraulique au champ a été mesurée pour le sol de Bègles, ce dernier présente des capacités d'infiltrations considérées comme faibles ou bonnes.

### 2.2.2. Porosité

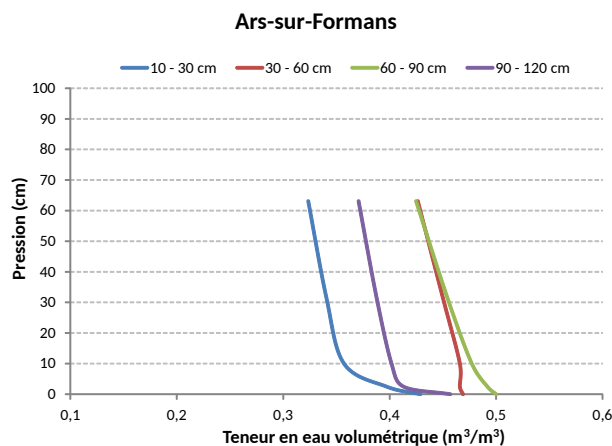
La densité particulaire a été mesurée en utilisant des pycnomètres à eau (Dane et Topp, 2002). À partir de ces mesures et de la masse volumique apparente mesurée à l'aide des échantillons non remaniés (échantillons de 100 cm<sup>3</sup>), nous avons pu en déduire la porosité (Tableau 2).

Tableau 2. Porosité des échantillons non remaniés

Porosité (%)			
Horizon	Ars-sur-Formans	Civrieux d'Azergues	Bègles
10-30 cm	42	39	34
30-60 cm	44	46	
60-90 cm	44	49	
90-120 cm	NA	43	

### 2.2.3. Courbes de rétention

Par la suite, pour chacun des 3 sols de l'étude les courbes de rétention ont été réalisées à partir des échantillons de 100 cm<sup>3</sup> non remaniés prélevés à différentes profondeurs (horizons 10-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm et 90-120 cm). Une courbe de rétention relie la teneur en eau à la tension hydrique d'un sol. Elle exprime la capacité du milieu à retenir ou drainer l'eau en fonction de son état énergétique et on peut ainsi déterminer la teneur en eau à l'équilibre en fonction d'une pression capillaire appliquée. Ainsi, les tensiomètres installés dans chacun des lysimètres enregistrant la tension du sol à différentes profondeurs (10 cm, 30 cm, 140 cm), grâce aux courbes de rétention tracées il sera possible de convertir ces tensions mesurées en teneurs en eau. Pour ce faire les échantillons préalablement saturés ont été introduits dans un bac à sable où des paliers de dépression sont réalisés afin de diminuer leur teneur en eau. Les couples teneur en eau/pression permettent alors de réaliser les courbes de rétention pour les 3 sols (Figure 2).



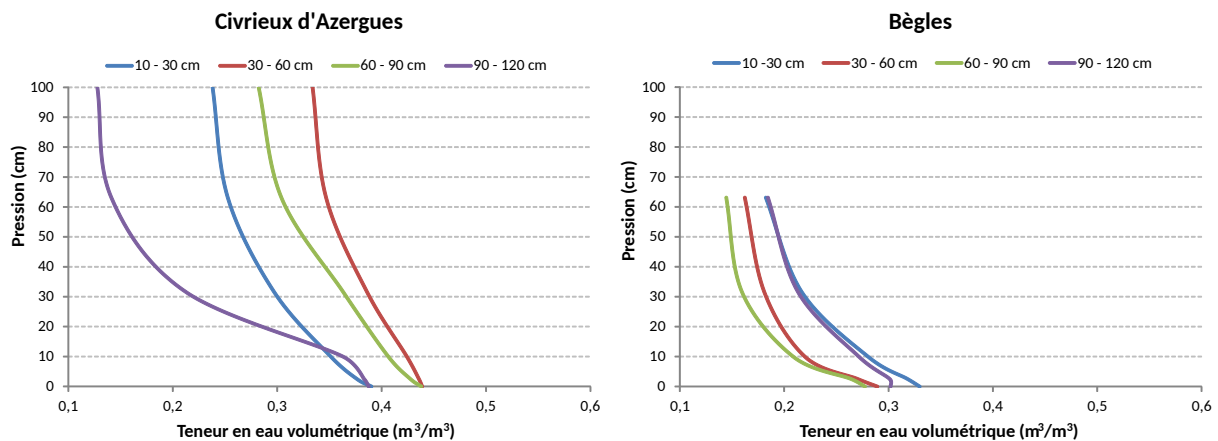


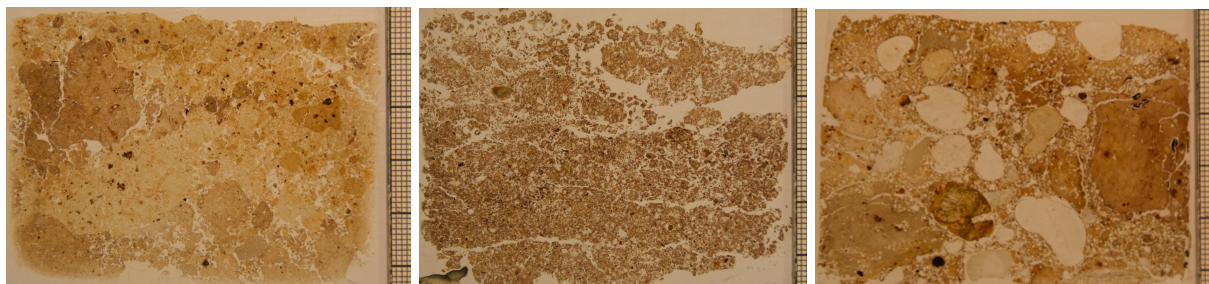
Figure 2. Courbes de rétention d'eau obtenues par bac à sable pour les 3 sols de l'étude

A partir de la Figure 2 il est possible de dire que le sol provenant d'Ars-sur-Formans est le moins drainant des 3 sols de l'étude. En effet, malgré les paliers de succion croissants appliqués les teneurs en eau varient très peu et restent par conséquent importantes ce qui est cohérent avec la faible teneur en sable au contraire de la forte teneur en limons dans ce sol (voir Figure 1) et la conductivité hydraulique au champ la plus faible des 3 sols de l'étude (Tableau 1). D'autre part, l'horizon supérieur (10-30 cm) est le plus drainant des 4 horizons échantillonnés dans ce sol alors que les deux horizons suivants (30-60 cm et 60-90 cm) sont très peu drainant, ce qui correspond à l'analyse pédologique des horizons 2 et 3 évoquant la présence de graviers et cailloux tandis que les éléments grossiers sont absents de l'horizon 4, respectivement (Annexe 1). Le dernier horizon (90 -120 cm) redevient plus drainant avec l'augmentation de la teneur en sable avec la profondeur.

Les courbes de rétention des différents horizons du sol de Civrieux-sur-Azergues suivent quasiment la même tendance pour les 3 premiers horizons que celle obtenue pour le sol d'Ars-sur-Formans, ce qui correspond aux observations de l'analyse pédologique (Annexe 1), mais dans une gamme de valeurs de teneurs en eau plus étendue (teneur en sable importante, Figure 1). En revanche, l'horizon 90-120 cm est le plus drainant des 4 horizons échantillonnés dans ce sol (présence de sables grossiers et de graviers observée dans l'analyse pédologique réalisée, Annexe 1).

Le sol de Bègles est le sol le plus drainant des 3 sols de l'étude. Pour les 3 premiers horizons plus la profondeur augmente moins le sol retient l'eau alors que pour l'horizon le plus profond (90-120 cm), du fait de la présence d'une couche d'argile, le drainage est plus faible (la courbe de rétention de cet horizon suit la tendance et les valeurs de la courbe de rétention du premier horizon).

Pour permettre d'observer les modifications micromorphologiques induites par le colmatage particulière de la surface, des lames minces seront réalisées chaque année et comparées entre elles. Un échantillon non remanié a été prélevé à la surface de chaque lysimètre à l'aide d'une boîte de Kubiena (7 cm x 6.5 cm x 5 cm) avant le début des alimentations. Après avoir été séchés à l'étuve à 50°C pendant 24 heures, les échantillons ont été expédiés à l'Université de Stirling (Royaume-Uni) où ils ont été imprégnés de résine afin de permettre de les découper et d'en extraire une coupe (30-40 µm d'épaisseur) qui est ensuite déposée sur une plaque de verre. La Figure 3 présente les coupes de chacune des surfaces des 3 lysimètres obtenues par cette méthode. Elles peuvent être considérées comme représentant un « état zéro » de la porosité de ces surfaces et en les comparant aux prochaines lames il sera possible d'observer l'évolution de ce colmatage.



Ars-sur-Formans

Civrieux-d'Azergues

Bègles

Figure 3. Coupes de la surface des lysimètres

## 2.3. Composition et propriétés géochimiques des 3 sols de l'étude

### 2.3.1. Analyses de contenu total

Des analyses de contenu total (ensemble des éléments chimiques composant le sol) ont été effectuées sur les trois sols auprès du Service d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM) au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPPG) de Nancy. Après digestion par fusion  $\text{LiBO}_2$ , les échantillons ont été analysés par ICP-OES pour les majeurs et par ICP-MS pour les éléments traces métalliques (ETM). Le carbone organique et le soufre total ont été analysés après séparation par un analyseur CS. La fluorine a été dosée par potentiométrie après fusion avec  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

L'ensemble des résultats sont présentés dans l'Annexe 2. La Figure 4 présente les résultats obtenus pour le carbone organique en fonction des différentes profondeurs échantillonnées.

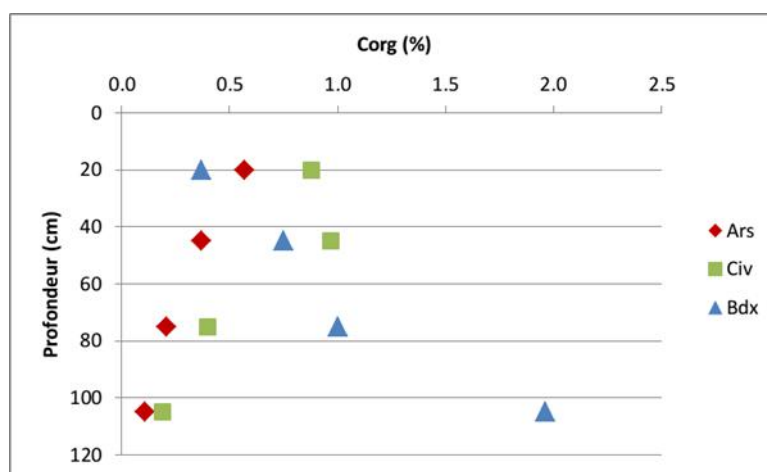


Figure 4. Teneurs en carbone organique des 3 sols de l'étude en fonction de la profondeur

Les quantités de carbone organique présentes dans les premiers centimètres des sols étudiés sont plus faibles que la valeur médiane mesurée au niveau européen pour des sols non plantés (1.05%, Brogniez et al., 2015). L'évolution de la fraction de carbone organique décroît avec la profondeur pour les échantillons prélevés à Ars-sur-Formans et à Civrieux d'Azergues ce qui est communément observé. En revanche, la teneur en carbone organique augmente avec la profondeur dans les échantillons prélevés à Bègles. Lors de l'échantillonnage du lysimètre, nous avons observé un dépôt goudronneux dans les couches les plus profondes de la fosse qui pourrait expliquer cette anomalie (Figure 5).





Figure 5. Profil avec dépôt goudronneux observé au fond de la fosse pédologique de Bègles

Les échantillons prélevés à Bègles présentent également des singularités au niveau de leur teneur en calcium (CaO) (Figure 6). Les fortes valeurs mesurées peuvent s'expliquer par les opérations de chaulage qui ont eu lieu durant la phase de construction de la station sur ce remblai afin de mettre en place des chaussées. Pour les sols provenant de Ars-sur-Formans et Civrieux d'Azergues, les teneurs en CaO sont constantes (0.76%+/- 0.08% et 1.30%+/- 0.15%, respectivement) le long du profil de profondeurs.

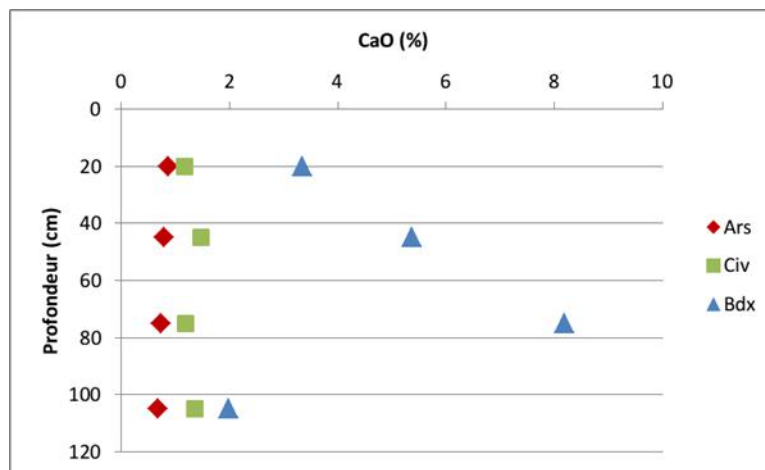


Figure 6. Teneurs en calcium des 3 sols de l'étude en fonction de la profondeur

Les profils des concentrations en oxyde d'aluminium et en oxyde de fer présentés sur la Figure 7 mettent en évidence l'influence des remontées de nappe sur la composition du sol d'Ars-sur-Formans. En effet, les concentrations en oxydes sont plus faibles en profondeur ce qui corroborent les observations faites par le pédologue (traces d'hydromorphie<sup>3</sup>). Cette

<sup>3</sup> "En conditions d'hydromorphie, le fer est généralement à l'état de sel peu soluble du type sidérite  $\text{FeCO}_3$  dans la partie saturée d'eau en permanence (horizon Gr). Dans une première phase, les précipitations atmosphériques arrivant au sol traversent la zone d'enracinement, se chargeant de  $\text{CO}_2$  ; au contact de la nappe, elles solubilisent le fer :  $\text{FeCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ . Dans un deuxième temps, l'ascension capillaire amène l'eau phréatique, avec le fer dissous, près de la surface où elle se mélange avec l'eau de pluie plus riche en

tendance à la diminution des concentrations d'oxyde d'aluminium et de fer en profondeur n'est pas visible sur les sites de Civrieux d'Azegues, même si il a été remarqué des signes d'hydromorphie à partir de 70 cm (nappe alluviale profonde, Annexe 1), et de Bègles.

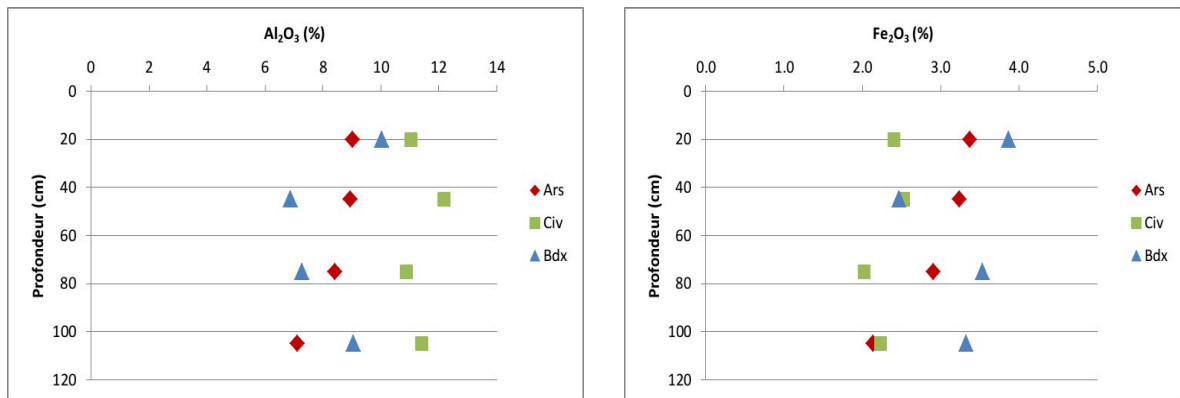


Figure 7. Concentrations en oxydes d'aluminium et de fer des 3 sols de l'étude en fonction de la profondeur

Enfin, l'analyse du contenu total a mis en évidence la présence d'un certain nombre d'éléments traces métalliques comme le cuivre, le cadmium et le plomb (Figure 8).

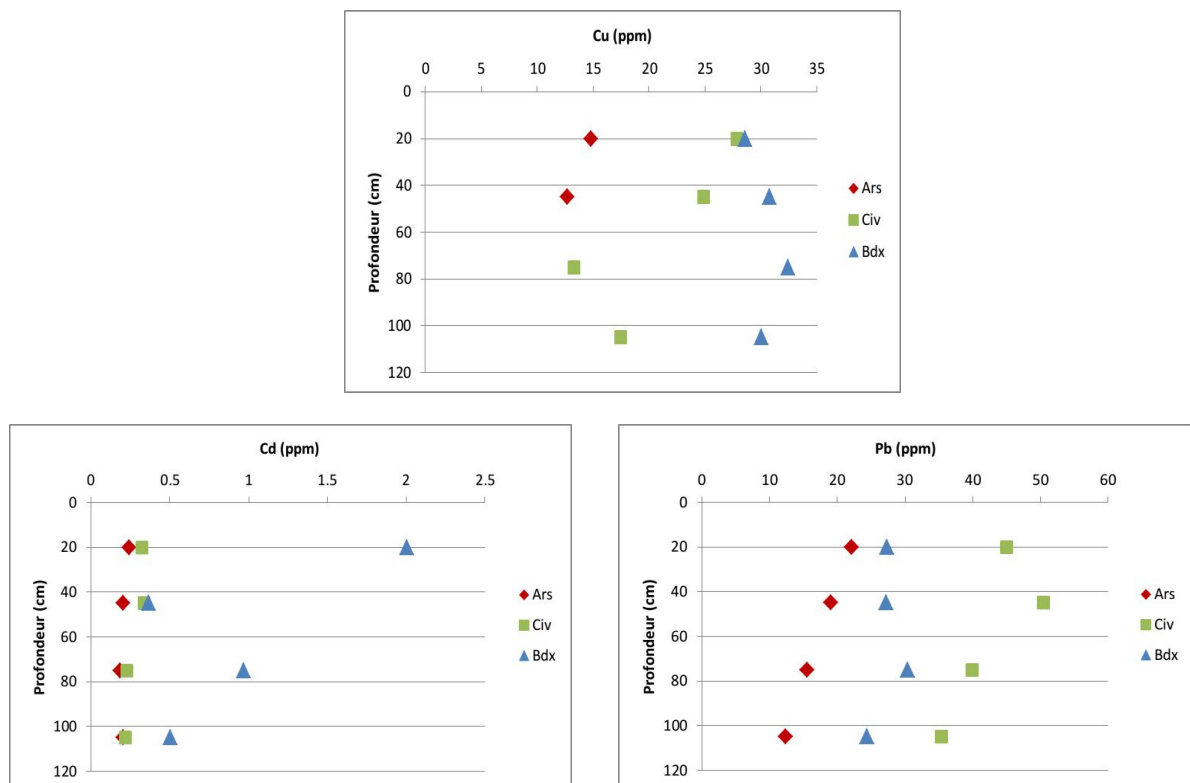


Figure 8. Concentrations en ETM des 3 sols de l'étude en fonction de la profondeur

oxygène. L'augmentation du potentiel redox qui en résulte provoque l'oxydation du fer, chimique ou biologique par des bactéries de type *Gallionella ferruginea* (ferrooxydation), et sa précipitation sous forme de limonite Fe(OH)<sub>3</sub>. Si l'assèchement est intense, la précipitation a lieu sous forme d'hématite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.» (Gobat et al., 2010).



Ces concentrations sont à mettre en comparaison avec celles du fond pédogéochimique naturel (FPGN) ainsi qu'avec les teneurs agricoles habituelles (TAH). Pour le cadmium et le cuivre, les valeurs mesurées du premier horizon des 3 sols peuvent être comparées à celles fournies par Baize (2009) (Tableau 3). Ainsi, le sol provenant du site d'Ars-sur-Formans présente des teneurs en cadmium et cuivre comparables à un sol agricole « ordinaire ». En revanche, les teneurs en cadmium du sol de Bègles et les teneurs en cuivre des sols provenant de Civrieux d'Azergues et Bègles sont élevées.

Tableau 3. Ordres de grandeurs des concentrations mesurées dans les sols en certaines circonstances (Baize, 2009)

	<b>Horizons de surface labourés</b>			
	<b>Sols « naturels » (forêts)</b>	<b>Sols agricoles « ordinaires »</b>	<b>Après épandages massifs de boues chargées en ETM (années 70)</b>	<b>Sous vignes et arboriculture</b>
<b>Cd (ppm)</b>	<0.12	0.20 à 0.45	1.4 à 3.5	
<b>Cu (ppm)</b>	10 à 15	12 à 18	20 à 40	50 à 600

La Figure 9 présente la distribution spatiale des concentrations en plomb à l'échelle du territoire français. Elle montre des tendances régionales marquées, traduisant l'influence de la roche-mère. Les sites d'Ars-sur-Formans et de Civrieux d'Azergues ne sont distants que d'une dizaine de kilomètres mais le premier se trouve dans une zone de dépôt limoneux où les concentrations en plomb sont faibles alors que le second se trouve dans une zone de roches cristallines et migmatites où les concentrations en plomb sont significativement plus élevées.

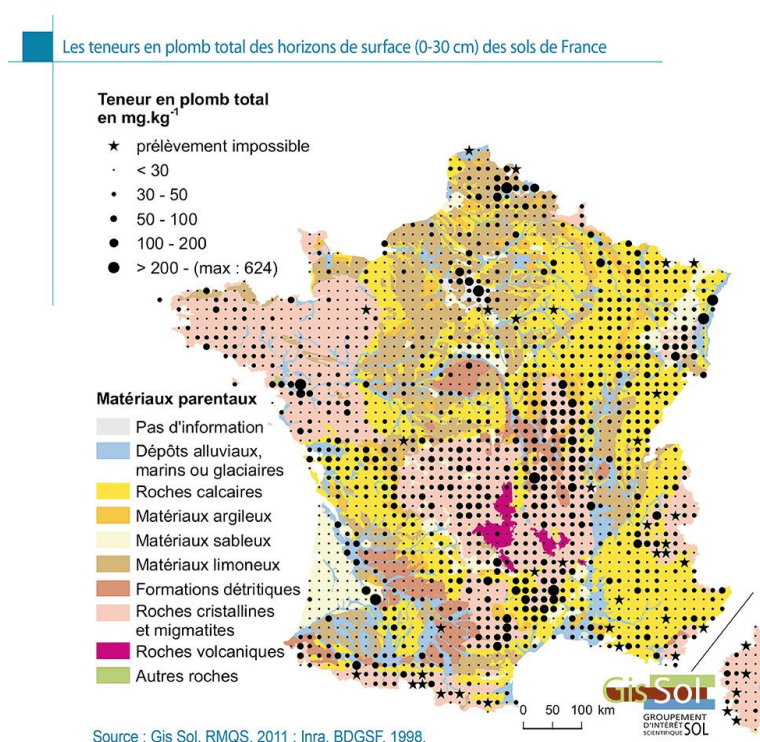


Figure 9. Les teneurs en plomb total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France (Gis Sol, 2011)

À l'exception des profils en carbone organique et en calcium sur le site de Bègles qui présentent des teneurs anormalement élevées dans les horizons les plus profonds, les

analyses du contenu total n'ont pas mis en évidence de pollutions particulières sur ces 3 sols sélectionnés. Ainsi, elles serviront de référence pour les analyses qui seront réalisées lors du démontage des lysimètres.

### 2.3.2. Capacité d'adsorption des phosphates et teneur initiale en phosphore

La rétention des phosphates dans le sol est l'un des mécanismes que nous souhaitons mettre en évidence dans cette étude. Des courbes isothermes de l'adsorption des phosphates ont été réalisées pour les trois sols (Figure 10) afin de connaître la capacité d'adsorption maximale des phosphates pour chacun des 3 sols de l'étude (horizon 10-30 cm). Pour ce faire, des tests batch ont été effectués dans des réacteurs parfaitement mélangés en plaçant 10 g de sol en dans des solutions de 100 mL de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (concentrations variant entre 1 et 1000 mg P/L) tamponnées à pH 7 pendant 24 h (Molle et al., 2005).

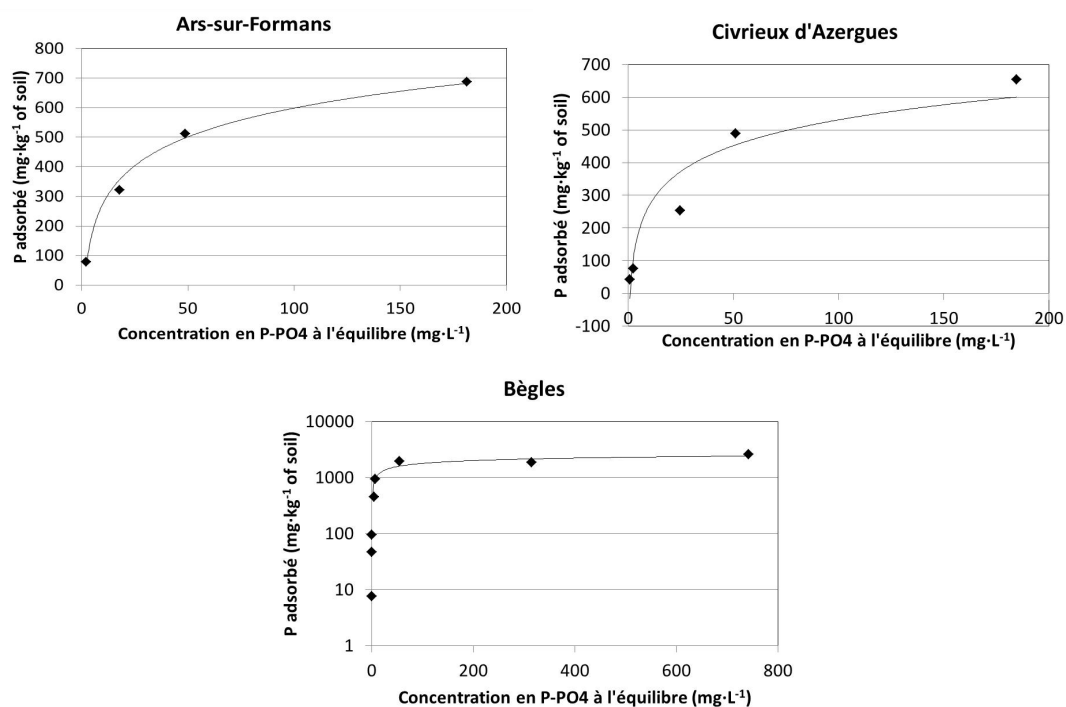


Figure 10. Isothermes d'adsorption des phosphates pour les 3 sols de l'étude

Le coefficient d'adsorption a été déterminé en utilisant le modèle de Langmuir :

$$\frac{C_{eq}}{q} = \frac{1}{q_m K_{ads}} + \frac{C_{eq}}{q_m}$$

Avec  $q$  la concentration de P- $\text{PO}_4$  adsorbée (mg/kg de sol),  $C_{eq}$  la concentration à l'équilibre de la solution de P- $\text{PO}_4$  mise en contact (mg/L),  $q_m$  la concentration à saturation (mg/L) et  $K_{ads}$  le coefficient d'adsorption (L/mg).

Le Tableau 4 présente les valeurs mesurées des coefficients d'adsorption et des concentrations à saturation pour les trois sols (horizon 10-30 cm).

Tableau 4. Coefficients d'adsorption et concentrations à saturation pour les 3 sols de l'étude (horizon 10-30 cm)

	Ars-sur-Formans	Civrieux d'Azergues	Bègles
<b><math>K_{ads}</math> (L/mg)</b>	0.044	0.04	0.065

<b>q<sub>m</sub> (mg/kg)</b>	769	714	2500
------------------------------	-----	-----	------

D'autre part, la quantité de phosphore total initialement présente dans les trois sols de l'étude a également été dosée pour les différents horizons (10-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm, 90-120 cm, Tableau 5). A tel but une minéralisation par eau régale par microonde a été effectuée (NF EN 13346) par le laboratoire LAMA (Irstea, Villeurbanne).

Tableau 5. Teneurs en phosphore total pour chacun des horizons des 3 sols de l'étude

<b>Teneur en phosphore total (mg/g matière sèche)</b>			
<b>Horizon</b>	<b>Ars-sur-Formans</b>	<b>Civrieux d'Azergues</b>	<b>Bègles</b>
<b>10-30 cm</b>	0.62	0.63	0.42
<b>30-60 cm</b>	0.57	0.46	0.27
<b>60-90 cm</b>	0.39	0.39	0.29
<b>90-120 cm</b>	0.30	0.37	0.34

Ces données permettent de connaître l'état initial du sol concernant le phosphore total. On peut noter que pour chacun des trois sols, plus la profondeur augmente plus la teneur en phosphore total initiale diminue. Des analyses identiques des différents horizons des trois sols à la fin de l'étude permettront de déterminer la quantité totale de phosphore retenue durant toute l'étude.

### 2.3.3. Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) donne une information concernant la capacité du sol à échanger des cations (de connaître le pouvoir fixateur du sol en éléments nutritifs). Le pourcentage de sodium échangeable (ESP) renseigne sur le rapport entre les cations Na<sup>+</sup> échangeables et les autres.

La capacité d'échange cationique a été déterminée sur 3 réplicas pour chacun des 3 sols de l'étude avec la méthode Metson, c'est-à-dire par extraction à l'acétate d'ammonium à pH 7, en adaptant le protocole décrit par la norme NF X31-130. Les cations ont été dosés par le laboratoire LAMA (Irstea, Villeurbanne) par ICP-OES et l'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) par spectrophotométrie avec le réactif de Berthelot (NF T 90-015-2 (2000)). Le nombre de site d'échange de la CEC correspond exactement au nombre d'ions ammonium dosés. Grâce au dosage des cations le pourcentage de sodium extractible (ESP) peut être calculé.

Tableau 6. Capacités d'échange cationique et pourcentages relatifs de sodium échangeables des 3 sols de l'étude

	<b>Ars-sur-Formans</b>	<b>Civrieux d'Azergues</b>	<b>Bègles</b>
<b>CEC (meq/100g<sub>sol</sub>)</b>	13	11	18
<b>ESP (%)</b>	0.87±0.01	1.44±0.03	0.94±0.01

Sikora et al. (2014) présentent les classes de valeurs des CEC mises en relation avec les textures des sols. Une CEC comprise entre 8 meq/100g<sub>sol</sub> et 15 meq/100g<sub>sol</sub> correspond à un sol limoneux alors qu'une CEC comprise entre 10 meq/100g<sub>sol</sub> et 20 meq/100g<sub>sol</sub> correspond un sol limono-argileux. D'après les résultats présentés dans le Tableau 6 et ces classes de

valeurs, les CEC des sols provenant d'Ars-sur-Formans (13 meq/100g<sub>sol</sub>) et Bègles (11 meq/100g<sub>sol</sub>) confirment alors les textures de ces sols présentées sur le diagramme textural (voir Figure 1).

La valeur élevée de la CEC du sol provenant de Bègles traduit un contenu important en argile et par conséquent une grande capacité de rétention des éléments nutritifs. Cette valeur de CEC élevée combinée à un très faible ESP (0.94%) suggère une grande capacité de traitement de l' eau sans risque majeur de déstructuration du sol (Richards, 1954 ; Van de Graaff et Patterson, 2001). D' autre part, selon Carroll et al. (2006), conjuguées à une perméabilité moyenne, ces caractéristiques indiquent un sol peu soumis au colmatage et approprié pour le traitement de l' eau. Ces assertions doivent être nuancées selon la nature des argiles composant ce sol (voir 2.3.4), notamment si la proportion d' argiles gonflantes est importante la capacité d' infiltration sera diminuée du fait de la diminution de la porosité. C' est ce qui a été montré lors des essais en colonnes réalisées sur ce sol (Bisone et al., 2016) où la proportion d' argiles gonflantes était importante (50%). Néanmoins, les prélèvements ayant été réalisés à différentes endroits pour ces deux études et compte tenu du fait qu' il existe une très forte hétérogénéité quant à la nature du sol sur le site, le comportement de ce sol vis-à-vis de l' infiltration pourra être différent.

A l' inverse, même si le sol provenant d'Ars-sur-Formans présente une capacité d'échange cationique considérée comme moyenne (<15 meq/100g<sub>sol</sub>) et un très faible ESP (0.87%), sa faible perméabilité peut limiter le drainage des polluants.

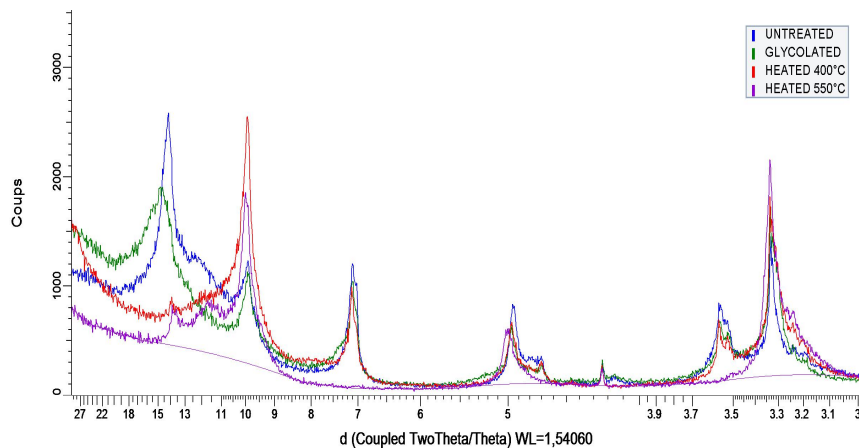
En revanche, la valeur de la CEC du sol de Civrieux d'Azergues est plus importante que celle correspondant à un sol limono-sableux (CEC<sub>Civrieux</sub> = 11 meq/100g<sub>sol</sub> ; CEC < 8 meq/100g<sub>sol</sub> selon Sikora et al., (2014)). La CEC étant fortement influencée par la présence de matière organique, il est envisageable que la présence de matière organique observée par le pédologue sur le profil pédologique de ce sol (Annexe 1) soit à l'origine de cette valeur élevée pour ce type de sol. Comme pour le sol provenant de Bègles, selon Carroll et al. (2006), le fait que ce sol ait une CEC initiale et une perméabilité moyennes le rend approprié pour le traitement de l' eau.

#### 2.3.4. Caractérisation des argiles

Lors des essais préalables en colonne, Bisone et al. (2016) ont mis en évidence l'importance du gonflement des argiles sur l'infiltration d'eau usée traitée. Dans les sols d'Ars-sur-Formans et Bègles ayant une conductivité hydraulique au champ faible (0.52-2.1 mm/h et 1.1-33 mm/h, respectivement) et une teneur en argile significative (15.7% et 20%, respectivement) il est donc apparu nécessaire d'estimer si les argiles présentent dans ces deux sols sont susceptibles de gonfler d'après leur nature. Cette dernière a été déterminée par la préparation d'une série d'échantillon ayant subi des traitement différents : séchage à l'air, glycolé à l'aide de glycol d'éthylène, séchages à 400°C et 550°C (Thiry et al., 2013). Chaque préparation est ensuite étudiée par diffractométrie par rayon X. Les mesures n'ont pas été réalisées sur les échantillons en provenance de Civrieux d'Azergues car la teneur en argile dans l'échantillon de Civrieux d'Azergues était plus faible (9.6%) que pour les deux autres sols et la conductivité au champ relativement élevée (11-45 mm/h).

La Figure 11 présente les spectres obtenus par l'analyse en DRX suivant la préparation des argiles pour les sols d'Ars-sur-Formans et Bègles.

## Ars-sur-Formans



## Bègles

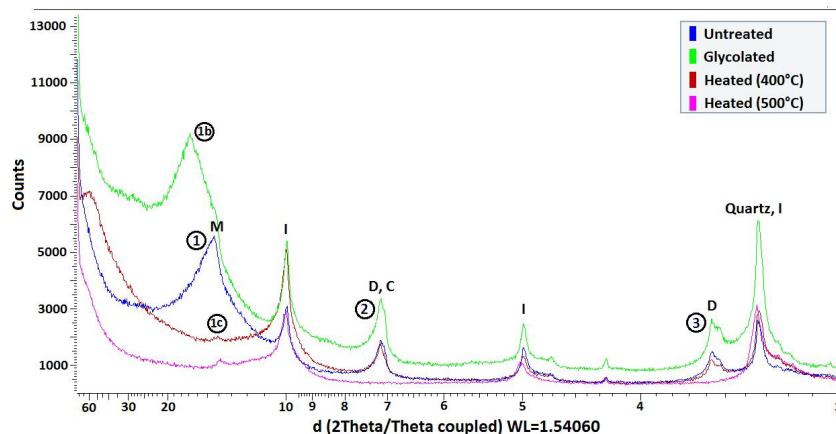


Figure 11. Spectres de diffraction des échantillons ayant subi différents traitements préliminaires afin d'identifier la nature des argiles

Dans l'échantillon en provenance du Technosol de Bègles, la Montmorillonite est l'argile dominante (52%). Les autres argiles présentes sont l'Illite (19%), la Clinochlore (13%) et la Dickite (13%). Dans l'échantillon en provenance d'Ars-sur-Formans, les argiles présentes sont l'Illite (47%), la Chlorite-serpentine (47%) et la Vermiculite (5%). La Montmorillonite est la seule argile gonflante parmi les argiles observées. Dès lors, le risque de gonflement des argiles risque principalement d'affecter les écoulements dans le lysimètre en provenance de Bègles. Ce comportement sera aussi favorisé du fait d'une CEC élevée (18 meq/100g<sub>sol</sub>, Tableau 6) engendrant un échange de cations et par conséquent renforçant le gonflement et la dispersion des argiles. De même, l'ammonium résiduel présent dans les eaux traitées sortant de station d'épuration pourra être retenu par la Montmorillonite (échange d'ions) et entrainera aussi une modification des propriétés hydrauliques. En revanche, même si la forte présence en argiles gonflantes représente un frein à l'infiltration des eaux usées traitées, en diminuant la capacité d'infiltration du sol, la capacité d'adsorption du phosphore dans les argiles (Bergaya et al., 2006; Gérard, 2016) pourrait les rendre intéressantes pour traitement des eaux usées traitées. Une étude sur une période plus longue est nécessaire pour établir la stabilité dans le temps de cette adsorption.

Toutes ces mesures permettent de faire un bilan initial de l'état des 3 sols étudiés, tant au niveau de leur composition texturale qu'hydrodynamique et géochimique. Ainsi, le Tableau 7 récapitule les principales observations réalisées sur les 3 sols de l'étude.

Tableau 7. Récapitulatif des observations réalisées sur les 3 sols de l'étude

Ars-sur-Formans	Civrieux d'Azergues	Bègles
-----------------	---------------------	--------

<b>Capacité de drainage</b>	-	+	+++ (variation spatiale forte)
<b>Contenu total</b>	Pas de pollution particulière	Pas de pollution particulière	Teneurs en carbone organique et en calcium anormalement élevées dans les horizons les plus profonds
<b>Adsorption du phosphore</b>	+	+	++
<b>Capacité d'échange cationique</b>	+	+	++
<b>Argiles</b>	Pas de risque de gonflement des argiles	Faible teneur en argiles	Risque de gonflement des argiles

### 3. Suivi de l'infiltration des eaux usées traitées

#### 3.1. Charges appliquées et consignes

Les lysimètres sont alimentés pendant 3.5 jours et laissés au repos pendant 3.5 jours. L'alimentation se fait par bâchée de 5 litres toutes les 2 heures. La Figure 12 présente le plan d'expérience initialement prévu et le plan d'expérience réalisé.

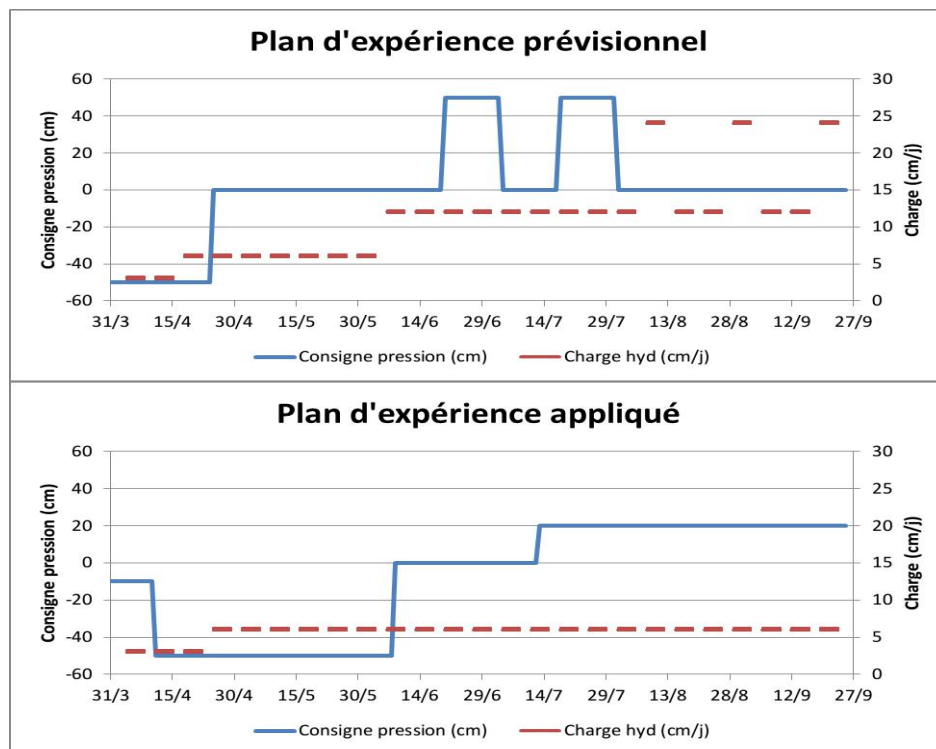


Figure 12. Plans d'expérience prévisionnels et appliqués

Le plan d'expérience initial prévoyait une augmentation progressive de la charge hydraulique de 3 cm/j à 12 cm/j avec des à-coups à 24 cm/j. Cependant, un dysfonctionnement prolongé de la station de traitement des eaux usées de Mionnay nous a



obligés à réduire les charges appliquées et à nous limiter à une charge de 6 cm/j. Ce dysfonctionnement a consisté à 3.5 mois d'arrêt de l'aération sur le bassin de boues activées entraînant des concentrations en matière organique, ammonium et matières en suspension beaucoup plus importantes qu'avant le dysfonctionnement en entrée des lysimètres.

La consigne de pression en bas des lysimètres a dû également être modifiée car la technologie de régulation (pompe péristaltique commandée par un tensiomètre en bas de colonne) ne permettait pas de maintenir une consigne à 0 cme<sup>4</sup> compte-tenu de la quantité d'eau transitant et de la nature des sols (le sol d'Ars-sur-Formans étant le plus limitant).

Le dispositif d'alimentation utilisant une seule pompe pour les trois lysimètres a été remplacé par un dispositif utilisant trois pompes à membrane indépendante après qu'un écart entre les volumes appliqués ait été observé en mai 2016 (Figure 13).

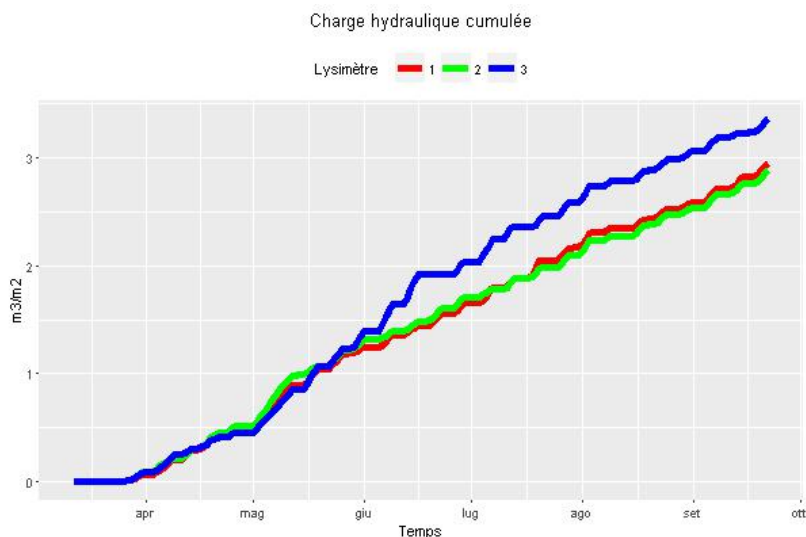


Figure 13. Charge hydraulique cumulée (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) ; lysimètre 1 : Ars-sur-Formans, lysimètre 2 : Civrieux d'Azergues, lysimètre 3 : Bègles

Dans la suite du rapport, nous distinguerons deux périodes : celle précédant le dysfonctionnement de la station de traitement des eaux usées de Mionnay (du 29 mars 2016 au 17 juillet 2016) et celle affectée par le dysfonctionnement de la station (du 17 juillet 2016 au 30 octobre 2016).

### 3.2. Comportement hydrodynamique des 3 sols

Pour comprendre le comportement hydrodynamique des 3 sols, il est intéressant de comparer, les valeurs fournies par les sondes TDR (Time Domain Reflectometry) mesurant les teneurs en eau et les sondes mesurant les teneurs en oxygène à différentes profondeurs. Les Figures 14, 15 et 16 présentent dans leur partie supérieure : l'évolution de la teneur en eau à 3 profondeurs différentes (25 cm, 75 cm, 125 cm) ; et dans leur partie inférieure, la distribution de la teneur en oxygène (exprimée en pourcentage de la saturation) dans le lysimètre en fonction du temps. Les valeurs de teneurs en eau sont déterminées à partir de l'équation de Topp (Topp et al., 1980) permettant de calculer les teneurs en eau volumiques à partir de la permittivité diélectrique mesurée par les sondes TDR. La partie inférieure de chacune des figures a été obtenue en interpolant les valeurs de teneur en oxygène mesurées à trois profondeurs différentes (10 cm, 30 cm, 80 cm) à chaque pas de temps. Les flèches présentes sur la partie supérieure des 3 figures indiquent les deux changements de consigne effectués aux mois de juin 2016 et juillet 2016 afin de passer de -50 cme à 0 cme et de 0 cme à 20 cme à la base du lysimètre, respectivement. Le deuxième changement de consigne correspond aussi au moment du dysfonctionnement.

<sup>4</sup> cme : centimètre de colonne d'eau

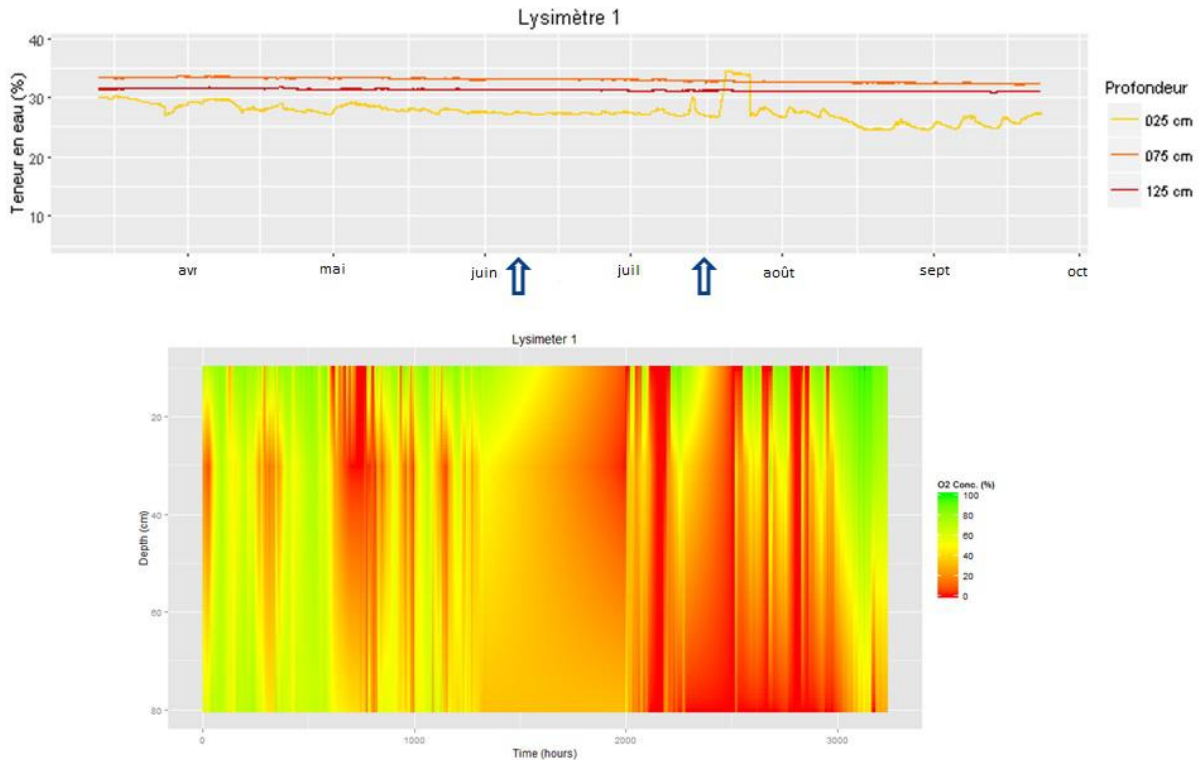


Figure 14. Evolution des teneurs en eau (en haut) et de la concentration en oxygène (en bas) au cours du temps dans le lysimètre 1 (Ars-sur-Formans). Les flèches bleues indiquent les changements de consigne à la base du lysimètre de -50 cm à 0 cm, puis de 0 cm à 20 cm.

Pour le lysimètre 1 (Ars-sur-Formans), les teneurs en eau aux profondeurs 75 et 125 cm ne varient que très peu au cours du temps et sont comprises entre 32 et 35  $m^3/m^3$ . L'absence de variation indique que l'on se trouve en condition saturée alors que les valeurs de teneur en eau volumique sont inférieures à la porosité mesurée (44  $m^3/m^3$ , Tableau 2). Cela indique qu'il serait nécessaire d'ajuster la formule de calage (formule de Topp, Topp et al., 1980) choisie entre la permittivité diélectrique et la teneur en eau volumique pour ce type de sol.

Cet état saturé dès 75 cm explique les faibles teneurs en oxygène mesurées le long de la colonne. Seuls les 20 premiers centimètres du sol bénéficient d'une ré-oxygénation durant les périodes de repos au-dessus de 60 % de teneur en oxygène. Durant les périodes d'alimentation, la teneur en eau augmente en haut du massif et la teneur en oxygène chute à des valeurs proches de 0%. Durant les périodes de repos, les phénomènes capillaires empêchent un drainage efficace de la colonne de sol (le sol d'Ars pouvant maintenir des teneurs en eau proches de la saturation à des pressions capillaires supérieures à 100 hPa, voir Figure 2). Enfin, on voit très bien l'influence des changements successifs de consigne qui a réduit encore la teneur en oxygène à la base du monolithe.



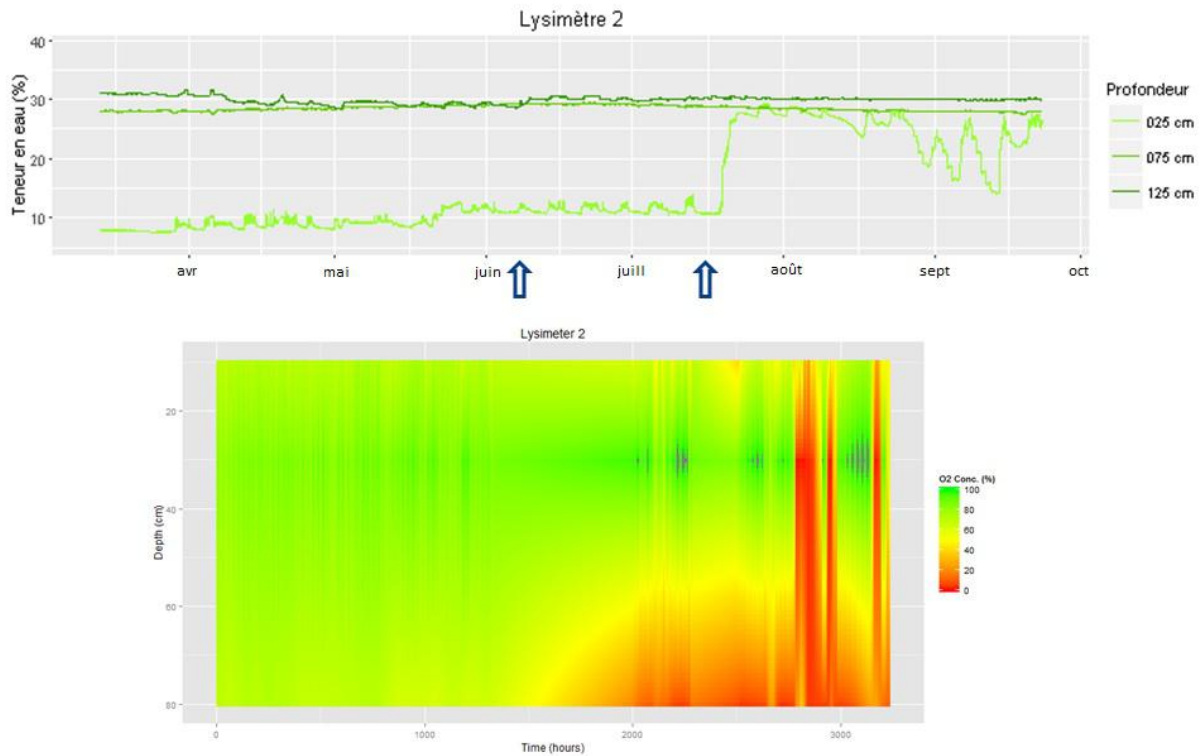


Figure 15. Evolution des teneurs en eau (en haut) et de la concentration en oxygène (en bas) au cours du temps dans le lysimètre 2 (Civrieux d'Azergues). Les flèches bleues indiquent les changements de consigne à la base du lysimètre de -50 cm à 0 cm, puis de 0 cm à 20 cm

Les valeurs des sondes TDR indiquent une teneur en eau élevée à la base du lysimètre avec peu de variation. Cela pourrait laisser penser que la base du lysimètre est également saturée en eau comme pour le lysimètre 1. Mais, cela semble aller en contradiction avec les valeurs de teneur en oxygène élevées mesurées avant le changement de consigne de -50 cm à 0 cm (première flèche Figure 15). Néanmoins, lorsque l'on se réfère à la courbe de rétention présentée par la Figure 2, il apparaît clairement qu'à l'exception de la dernière couche, la rétention capillaire dans ce sol est plus importante que ce à quoi on aurait pu s'attendre compte-tenu de sa texture (peu d'argile et teneur en sable importante, Figure 1). L'augmentation de la consigne à la base (passage de la consigne de 0 cm à 20 cm) modifie les conditions d'oxygénation à l'intérieur du lysimètre avec le développement d'une zone d'anoxie à la base du lysimètre. L'influence des périodes d'alimentation sur la teneur en oxygène tout au long de la colonne est également plus perceptible. Enfin, les variations de teneur en eau proche de la surface sont plus marquées que sur le lysimètre 1 indiquant que le sol de Civrieux d'Azergues a de meilleures capacités de drainage, ce qui confirme les observations faites à partir des courbes de rétention (Figure 2).

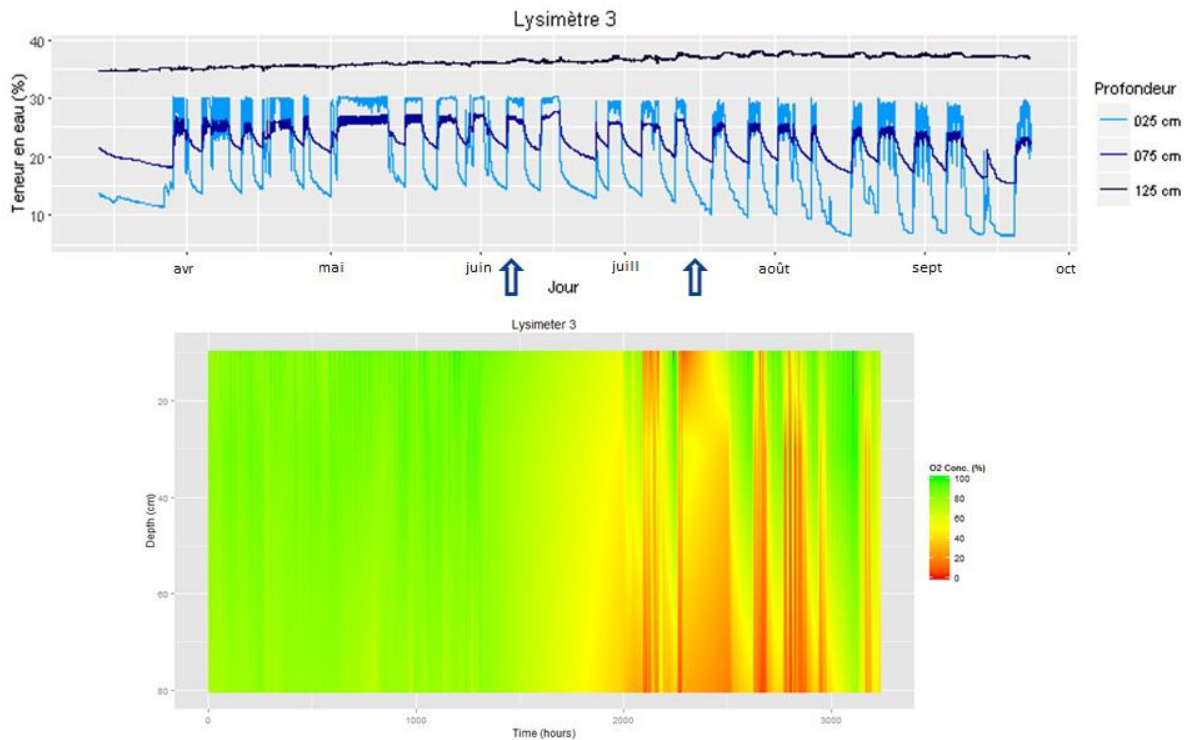


Figure 16. Evolution des teneurs en eau (en haut) et de la concentration en oxygène (en bas) au cours du temps dans le lysimètre 3 (Bègles). Les flèches bleues indiquent les changements de consigne à la base du lysimètre de -50 cm à 0 cm, puis de 0 cm à 20 cm

Les résultats du suivi hydrodynamique du lysimètre 3 sont particulièrement inattendus. Sa teneur importante en argile et les essais préliminaires sur colonne réalisées sur le Technosol de la station de traitement des eaux usées de Bègles nous faisaient redouter des problèmes de drainage (Bisone et al., 2016), or il s'agit du lysimètre évacuant le plus efficacement l'eau. En effet, en nous appuyant sur ces études préliminaires, nous avons choisi d'échantillonner le lysimètre dans une zone où la présence d'argile était moins importante (sachant que sur ce type de Technosol, la variabilité des propriétés est très importante) et surtout où le risque de trouver de large déchets enfouis était le plus faible. Les variations de teneur en eau sont très marquées entre les périodes d'alimentation et les périodes de repos à 25 cm mais également à 75 cm. Ceci pourrait indiquer la présence d'écoulements préférentiels dans ce lysimètre. Cette hypothèse sera investiguée dans la seconde partie de l'étude, notamment en réalisant des traçages conservatifs. Enfin, ce lysimètre est le moins affecté par le développement de conditions anoxiques pendant les périodes d'alimentation.

**Le lysimètre 1 (Ars-sur-Formans) présente les teneurs en eau les plus élevées et se draine peu pendant les périodes de repos. Cela a pour conséquence de limiter le renouvellement en oxygène et donc de conduire au développement de conditions anoxiques dans presque l'ensemble de la hauteur du monolithe. Le lysimètre 2 (Civrieux d'Azergues) se draine plus efficacement pendant les périodes de repos mais l'augmentation de la consigne à la base du lysimètre a conduit au développement d'une zone saturée épaisse qui maintient par capillarité une teneur en eau élevée dans le monolithe et donc le développement de conditions anoxiques à la base ainsi que dans l'ensemble du monolithe durant les périodes d'alimentation. Enfin, les profils de variation de la teneur en eau dans le lysimètre 3 (Bègles) font suspecter la présence d'écoulements préférentiels (susceptibles de court-circuiter une partie importante du massif).**

### 3.3. Paramètres majeurs

L'échantillonnage et les analyses ont été réalisés à raison de 2 échantillons moyens 24 heures par mois durant les 6 premiers mois d'opération des lysimètres, lors des périodes

d'alimentation (cycle d'alimentation/repos des lysimètres : 3.5 jours/3.5 jours). A l'instar des filtres plantés de roseaux, le jour de début du cycle d'alimentation durant lequel l'échantillonnage a été effectué est susceptible d'influencer la mesure même si les écoulements dans le sol sont beaucoup plus lents.

### 3.3.1. *Carbone organique total*

Les comparaisons des concentrations entrée/sortie pour la pollution carbonée ont été conduites en utilisant le carbone organique total (COT) comme analyse, car la limite de quantification de cette méthode est suffisamment basse pour nous permettre de mesurer les concentrations en sortie de lysimètre, ce qui n'aurait pas été possible avec la mesure de la DCO (les valeurs de concentrations en COT étant généralement 3 fois inférieures à celles de la DCO).

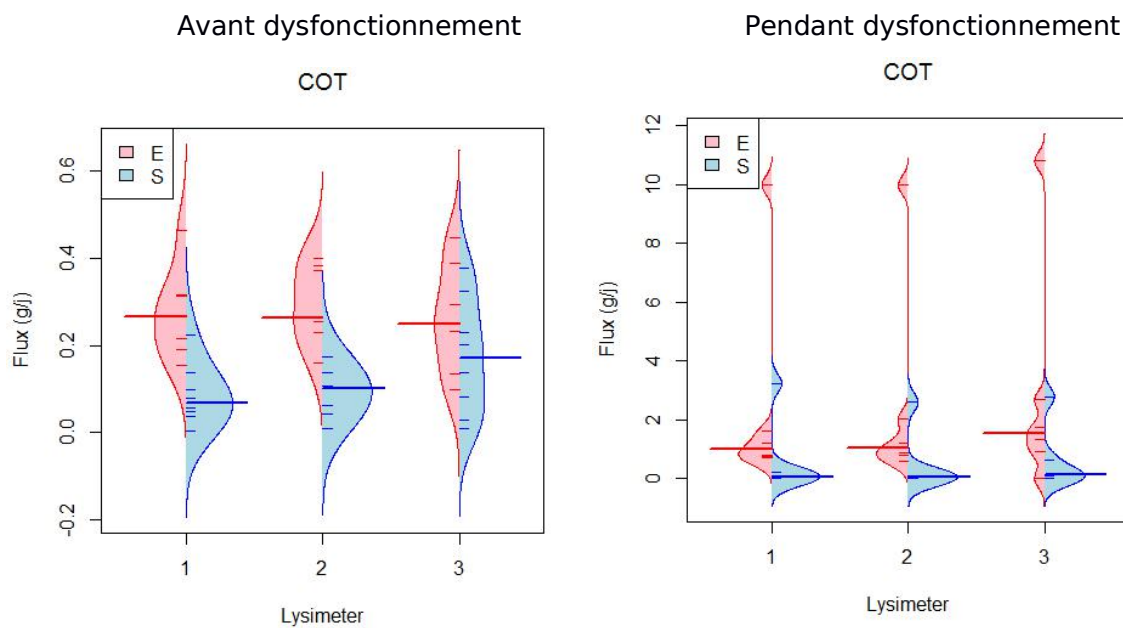


Figure 17. Flux de COT en entrée (en rouge) et en sortie (en bleu) des lysimètres avant et pendant le dysfonctionnement

La Figure 17 représente côte à côte pour chaque lysimètre, la distribution des flux de COT mesurés en entrée et en sortie, avant et pendant le dysfonctionnement de la station d'épuration. Ce type de représentation permet non seulement de comparer les valeurs médianes (représentées par un trait plus large) mais également de rendre compte de l'étalement des mesures dans le temps. Avant dysfonctionnement, les lysimètres 1 et 2 ont un comportement différent du lysimètre 3. En effet, leurs valeurs de COT mesurées en sortie sont moins dispersées et le flux médian plus faible, ce qui corrobore l'hypothèse d'écoulements préférentiels dans le lysimètre 3. Cependant, un autre élément pourrait expliquer les concentrations plus élevées en sortie des lysimètres 3. Nous avons effectué des mesures de SUVA (Specific Ultraviolet Absorbance ;  $SUVA = \text{Absorbance UV à 254 nm} / \text{concentration en carbone organique dissout}$ ) en entrée et en sortie de celui-ci. Cette mesure permet d'estimer le degré d'aromaticité (teneur en cycles aromatiques) de la matière organique de l'effluent. L'évaluation du degré d'aromaticité de la matière organique peut donner des indications sur le pouvoir complexant de celle-ci vis-à-vis de polluants comme les métaux mais peut aussi être utile pour caractériser son degré de maturité dans des processus d'humification. Or, comme l'illustre la Figure 18, ce dernier est bien plus important à la sortie du lysimètre 3 qu'en entrée (et en sortie des deux autres lysimètres), ce qui suggère qu'un phénomène de lixiviation de matière organique se produit au sein de ce dernier.

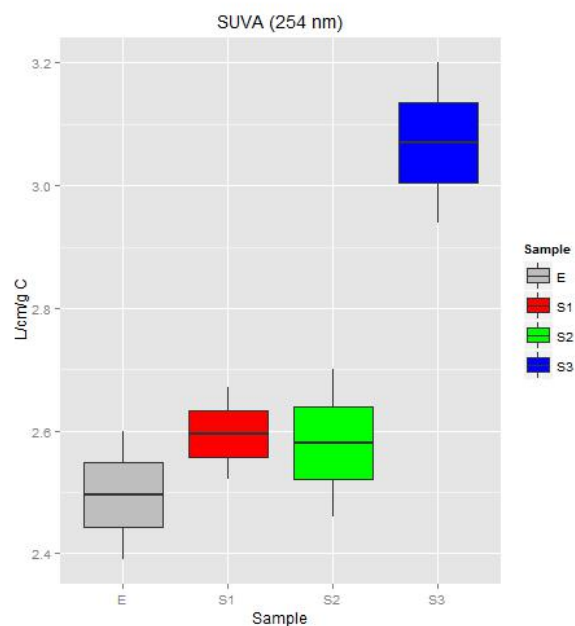


Figure 18. Valeurs du SUVA mesurées en entrée et sortie des lysimètres

Les rendements médians d'élimination du COT sont présentés dans le Tableau 8. L'augmentation de ces derniers pendant le dysfonctionnement s'explique principalement par le fait que la pollution entrante est principalement particulaire et est donc mieux éliminée par filtration.

Tableau 8. Rendements médians d'élimination du COT avant et pendant le dysfonctionnement

<b>Rendement d'élimination du COT (%)</b>			
		Avant dysfonctionnement	Pendant dysfonctionnement
<b>Lysimètre 1</b>	<b>(Ars-sur-Formans)</b>	74.8	93.0
<b>Lysimètre 2</b>	<b>(Civrieux d'Azergues)</b>	62.1	93.9
<b>Lysimètre 3</b>	<b>(Bègles)</b>	31.4	91.3

### 3.3.2. *Azote total*

Comme pour le COT la Figure 19 représente côte à côte pour chaque lysimètre, la distribution des flux d'azote total ( $N_{tot}$ ) mesurés en entrée et en sortie, avant et pendant le dysfonctionnement de la station d'épuration.

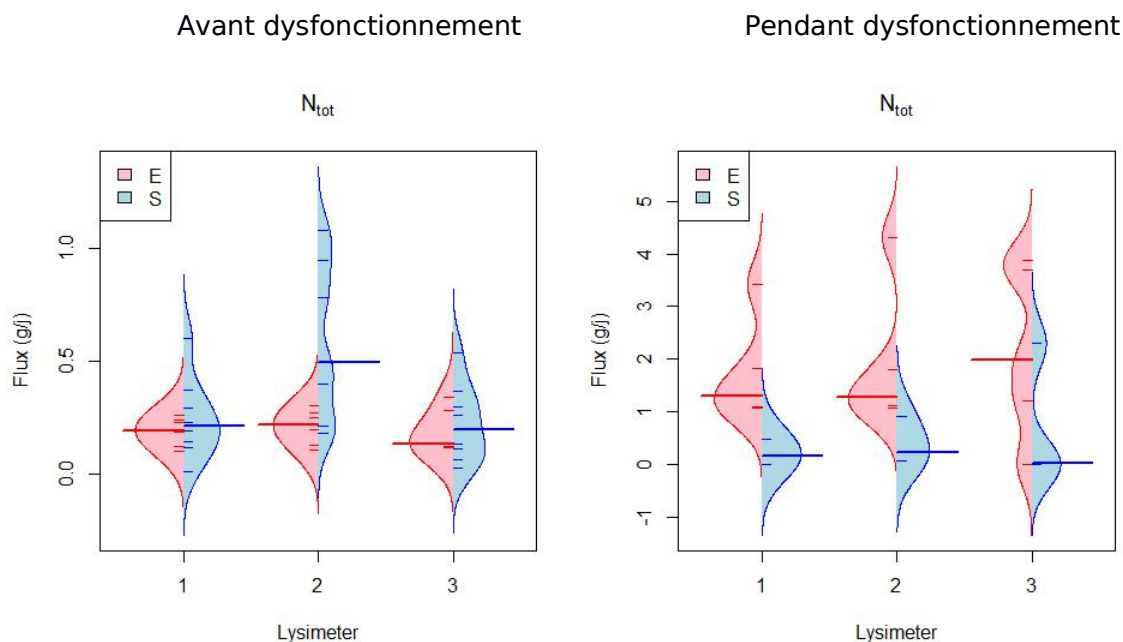


Figure 19. Flux d'azote total ( $N_{tot}$ ) en entrée (en rouge) et en sortie (en bleu) des lysimètres avant et pendant dysfonctionnement

Avant le dysfonctionnement les flux d'azote en entrée des lysimètres étaient très faibles ( $<0.5$  g/j), alors que pendant le dysfonctionnement ceux-ci ont atteint plus de 4 g/j (ce qui reste très faible au regard des charges appliquées en traitement secondaire).

Les rendements médians d'élimination de l'azote total sont présentés dans le Tableau 9. Ces valeurs de rendement sont fournies à titre indicatif car les bilans en formes azotées sont particulièrement sensibles à l'alternance période d'alimentation et période de repos et des bilans sur l'ensemble de ces périodes auraient été nécessaires pour consolider ces valeurs.

Tableau 9. Rendements médians d'élimination de l'azote total ( $N_{tot}$ ) avant et pendant le dysfonctionnement

				<b>Rendement d'élimination de <math>N_{tot}</math> (%)</b>	
		Avant dysfonctionnement		Pendant dysfonctionnement	
<b>Lysimètre</b>	<b>1</b>	-9			
<b>(Ars-sur-Formans)</b>					
<b>Lysimètre</b>	<b>2</b>	-130			
<b>(Civrieux d'Azergues)</b>					
<b>Lysimètre</b>	<b>3</b>	-49			
<b>(Bègles)</b>					

Les rendements négatifs obtenus avant dysfonctionnement traduisent des phénomènes de relargages des nitrates stockés dans les sols, principalement dans le lysimètre 2. Rien dans l'historique de ce site ne permet d'expliquer les fortes concentrations en nitrates mesurées. Le phénomène de nitrification ne peut être rendu responsable de ces fortes concentrations en nitrates mesurées en sortie (concentration médiane : 17 mgN- $NO_3/L$  ; concentration maximale : 55 mgN- $NO_3/L$  ; Figure 20) à la vue des très faibles concentrations en ammonium en entrée (concentration médiane : 0.74 mgN- $NH_4/L$  ; concentration maximale : 1.9 mgN- $NH_4/L$ , Figure 20).

Pendant le dysfonctionnement et pour les trois lysimètres, les fortes concentrations entrantes en ammonium sont efficacement éliminées avec une nitrification importante et une dénitrification partielle (Figure 20). D'autre part, le lysimètre 1 présente des concentrations en sortie significativement plus élevées en ammonium et plus faibles en

nitrites que les deux autres lysimètres. Cela peut être expliqué par les plus faibles teneurs en oxygène mesurées dans le monolithe (Figure 14). La concentration en nitrites en sortie du lysimètre 3 atteint une valeur médiane de 0.8 mg/L. Cette valeur est plus élevée que dans les deux autres lysimètres. La formation de nitrites et leur transfert en profondeur est un paramètre à surveiller car il est susceptible d'affecter la qualité des masses d'eau souterraine.

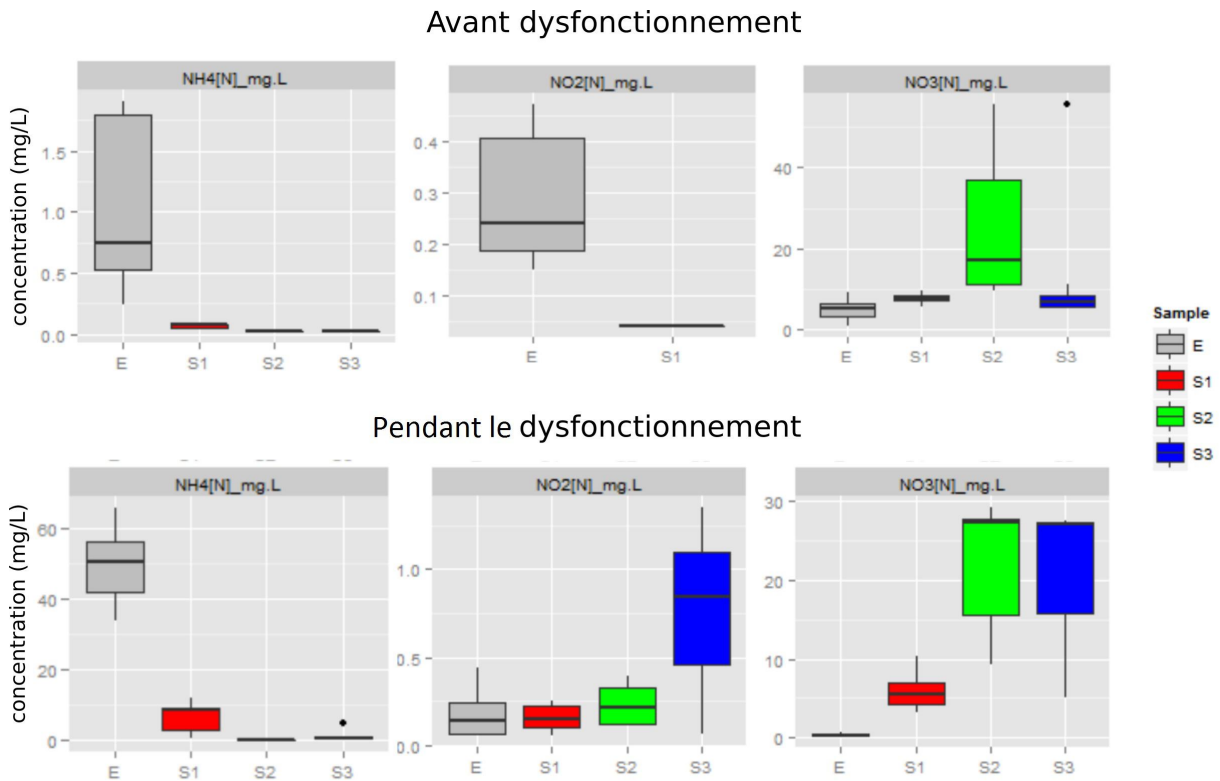


Figure 20. Concentrations en N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>2</sub> et N-NO<sub>3</sub> en entrée et en sortie de lysimètres avant et pendant le dysfonctionnement.

### 3.3.3. Phosphates

Que cela soit avant ou pendant le dysfonctionnement, les phosphates sont efficacement adsorbés dans le système (Figure 21) et, après 6 mois d'opération, nous ne semblons pas avoir atteint la saturation avec une masse apportée cumulée de P-PO<sub>4</sub> d'environ 10 g pour les 3 lysimètres (Figure 22).

Avant dysfonctionnement

Pendant dysfonctionnement

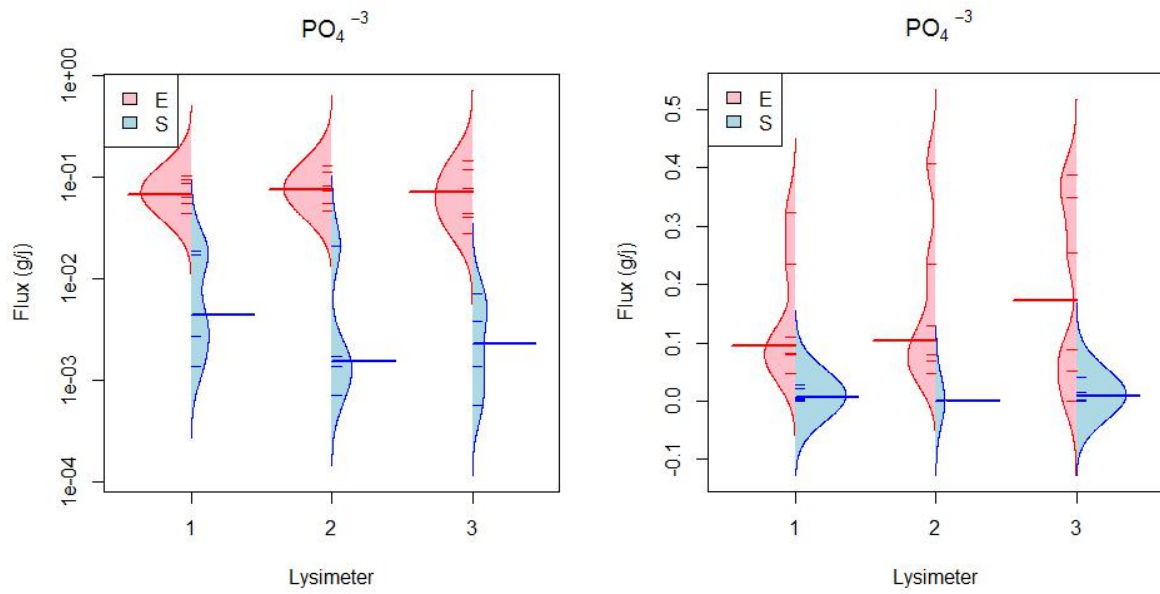


Figure 21. Concentrations en phosphates en entrée (rouge) et en sortie (bleu) des lysimètres avant et pendant le dysfonctionnement.

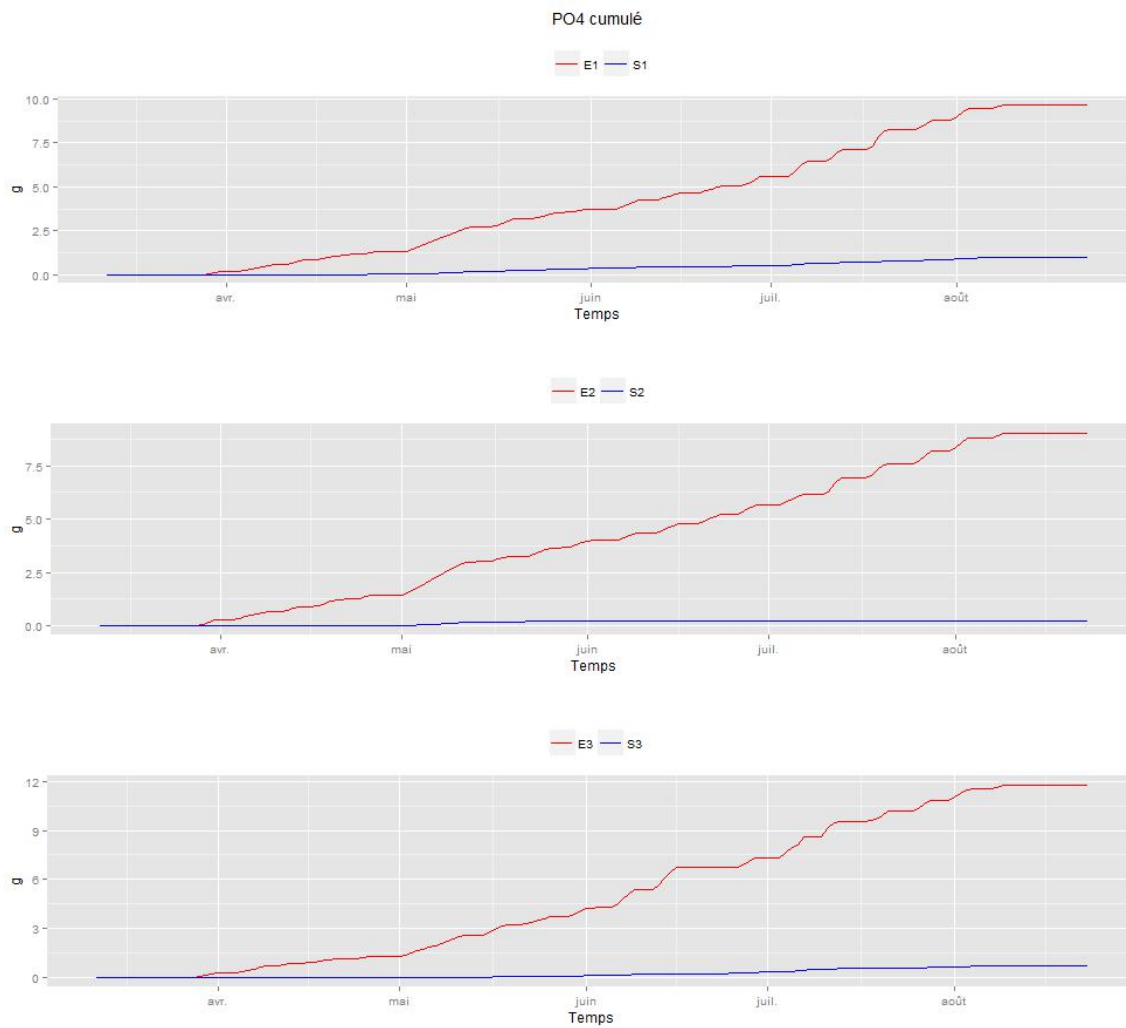


Figure 22. Masses cumulées de phosphates entrant (rouge) et sortant (bleu) des 3 lysimètres

Les rendements médians d'élimination des phosphates sont présentés dans le Tableau 10.



Tableau 10. Rendements d'élimination des phosphates avant et pendant le dysfonctionnement

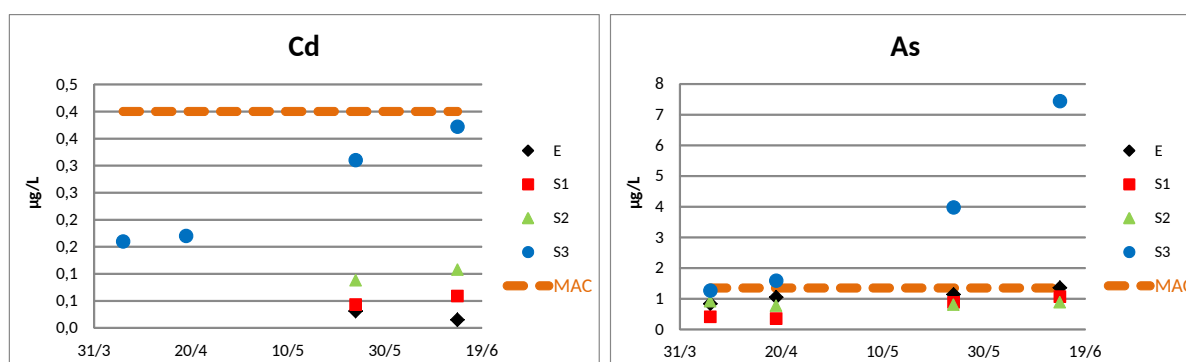
			<b>Rendement d'élimination de P-PO<sub>4</sub> (%)</b>	
			Avant dysfonctionnement	Pendant dysfonctionnement
<b>Lysimètre (Ars-sur-Formans)</b>	<b>1</b>		93	94
<b>Lysimètre d'Azergues)</b>	<b>2</b>	<b>(Civrieux</b>	98	99
<b>Lysimètre 3 (Bègles)</b>			95	95

Une des remarques qui a émergée lors des comités de suivi du projet est qu'il serait nécessaire de travailler en phosphore total (P<sub>tot</sub>) afin de prendre en compte l'abattement sur la fraction particulaire. Le protocole a été modifié en conséquence mais nous ne disposons pas encore de suffisamment de mesures pour les présenter dans ce rapport.

### 3.4. Éléments traces métalliques

Le fait de travailler avec un Technosol (sol provenant de Bègles) potentiellement fortement pollué et le fait que l'infiltration d'eau usée traitée apportée en forte quantité sur les lysimètres modifie les équilibres géochimiques au sein des monolithes, ont rendu pertinent le fait de s'intéresser au devenir des éléments traces métalliques, tant ceux arrivant via l'eau usée traitée que ceux déjà présents dans le sol et susceptibles d'être relargués.

Quatre échantillons moyens 24h ont été prélevés durant les 6 premiers mois d'opération de l'installation suivant le protocole établi par Choubert et al. (2009). Les résultats présentés sur la Figure 23 mettent en évidence une rétention des éléments suivants : Fe, Li, Al, Mn et Rb. Parallèlement, un certain nombre d'éléments ont été relargués aux nombres desquels : Cd, As, Sb et U.





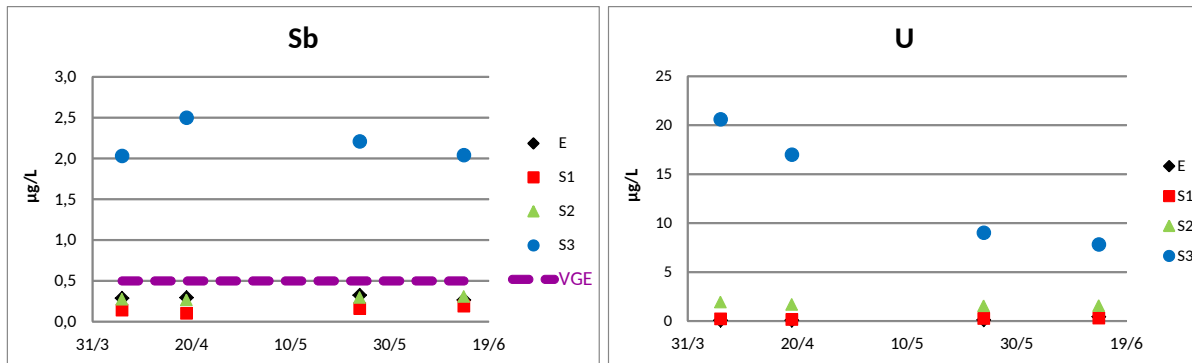


Figure 23. Concentrations en entrée et sortie des lysimètres d'éléments traces métalliques. MAC : Concentration maximale admissible réglementaire ; VGE : Valeur guide environnementale

Le comportement de ces 4 métaux en sortie du lysimètre 3 se distingue nettement par des concentrations beaucoup plus importantes qu'en sortie des deux autres lysimètres. Cependant, ces fortes concentrations ne signifient pas que ces métaux soient présents en plus forte concentration au sein du monolithe (Tableau 11).

Tableau 11. Concentrations en éléments traces métalliques des échantillons de sol prélevés lors de la réalisation des lysimètres (voir 2.3.1, Annexe 2)

Concentrations en éléments traces métalliques (mg/L)					
	Cd	As	Sb	U	Cr
<b>Ars-sur-Formans</b>	0.21±0.01	11±2	1.1±0.1	3.4±0.1	74±4
<b>Civrieux d'Azerges</b>	0.27±0.05	17±1	1.9±0.2	3.1±0.2	40±1
<b>Bègles</b>	0.96±0.5	11±2	1.6±0.4	1.7±0.3	54±9

L'analyse du contenu total ne semble donc pas être un bon indicateur de la susceptibilité d'un sol à relarguer les éléments, y étant présents sous forme précipitée car complexés avec la matière organique ou simplement adsorbés. Des tests de lixiviation seraient donc à même de déterminer le potentiel de relargage de ces éléments traces.

**Les mesures de concentrations élevées en COT en sortie du lysimètre 3 (Bègles) ont permis d'affirmer la présence d'écoulements préférentiels et de suggérer qu'un phénomène de lixiviation se produit au sein de ce lysimètre. La présence de ces écoulements préférentiels sera à prendre en compte lors de l'interprétation future des mesures et bilans 24h. En présence de fortes concentrations en COT et en ammonium, les rendements d'élimination pour les trois lysimètres sont très élevés grâce aux processus de filtration et de nitrification, respectivement. A noter tout de même que du fait de sa plus faible capacité de drainage et par conséquent un renouvellement en oxygène plus difficile dans le sol, la nitrification est plus faible dans le lysimètre 1. Concernant les phosphates, ces derniers sont efficacement adsorbés dans chacun des trois lysimètres. Certains éléments traces métalliques sont retenus dans les sols (Fe, Li, Al, Mn et Rb) alors que d'autres sont relargués (Cd, As, Sb et U), notamment par le lysimètre 3.**

## 4. Conclusion

Ce rapport s'attache à fournir une connaissance plus approfondie des trois sols retenus pour l'étude ainsi que du comportement des polluants entrants et sortants des lysimètres.

Tout d'abord, afin de connaître l'état initial des trois sols étudiés une caractérisation de leurs propriétés texturales, hydrodynamiques et géochimiques a été réalisée. Ainsi, on peut retenir que le sol provenant de Bègles présente une grande capacité de drainage (avec une très forte variation spatiale) alors que la capacité d'infiltration des sols provenant d'Ars-sur-Formans et de Civrieux d'Azergues sont plus faibles. Il en va de même pour l'adsorption du phosphore et de la capacité d'échange cationique. En revanche, alors que les sols d'Ars-sur-Formans et de Civrieux d'Azergues montrent la présence d'argiles sans risques de gonflement et une faible teneur en argile, respectivement, l'analyse du sol provenant de Bègles indique un risque notable de gonflement des argiles à travers la présence de Montmorillonite. L'analyse de la composition du contenu total des échantillons des trois sols signale des teneurs en carbone organique et en calcium anormalement élevées dans les horizons les plus profonds du sol de Bègles tandis que pour les sols d'Ars-sur-Formans et de Civrieux d'Azergues aucune pollution particulière n'a été décelée.

Ces observations ont été confirmées par la suite par les mesures réalisées lors du suivi hydraulique et du suivi des polluants majeurs et des éléments traces métalliques durant les 6 premiers mois d'alimentation. En effet, le lysimètre 1 (Ars-sur-Formans) se draine peu pendant les périodes de repos entraînant une limitation du renouvellement en oxygène et par conséquent une nitrification faible. Le lysimètre 2 (Civrieux d'Azergues) se draine plus efficacement pendant les périodes de repos. En revanche, le fait d'augmenter la valeur de la consigne à la base du lysimètre a conduit au développement d'une zone saturée épaisse qui maintient une teneur en eau élevée dans le monolithe durant les périodes d'alimentation. La présence d'écoulements préférentiels dans le lysimètre 3 (Bègles) est démontrée grâce au suivi hydraulique et aux mesures de concentrations élevées en COT en sortie ; ces dernières mesures apportant aussi des informations quant à un phénomène de lixiviation se produisant au sein de ce lysimètre. A noter tout de même, qu'en présence de fortes concentrations en COT et en ammonium, les rendements d'élimination pour les trois lysimètres sont très élevés grâce aux processus de filtration et de nitrification, respectivement.

Les phosphates et certains éléments traces métalliques (Fe, Li, Al, Mn et Rb) sont retenus dans les trois sols alors que d'autres éléments traces métalliques sont relargués (Cd, As, Sb et U), notamment par le lysimètre 3.

## 5. Bibliographie

Baize, D., 2009. Eléments traces dans les sols - Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles : définitions et utilités. Courrier de l'environnement de l'INRA n°57, 63-72.

Baize, D., Jabiol, B., 2011. Guide pour la description des sols. Edition Quae, Collection Savoir-Faire, 432 p.

Bergaya, F., Lagaly, G., Vayer, M., 2006. Cation and Anion Exchange, in: Handbook of Clay Science. pp. 979-1001.

Bisone, S., Gautier, M., Masson, M., Forquet, N., 2016. Influence of loading rate and modes on infiltration of treated wastewater in soil-based constructed wetland. Environmental Technology.

de Brogniez, D., Ballabio, C., Stevens, A., Jones, R. J. A., Montanarella, L., 2015. A map of the topsoil organic carbon content of Europe generated by a generalized additive model. European Journal of Soil Science 66: 121-134.

Carroll, S., Goonetilleke, A., Khalil, W. A-S, Frost, R., 2006. Assessment via discriminant analysis of soil suitability for effluent renovation using undisturbed soil columns. Geoderma 131(1-2), 201-217.

Chossat, J.C., 2005. La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols. Tec et Doc - Lavoisier, 720 p.

Choubert, J-M., Martin Ruel, S., Coquery, M., 2009. Prélèvement et échantillonnage des substances prioritaires et émergentes dans les eaux usées. Les prescriptions techniques du projet de recherche AMPERES. Techniques Sciences et méthodes 4 :88-101.

Dane J.H. and Topp, G.C., 2002. Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, 1692 p.

Gérard, F., 2016. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils - A myth revisited. Geoderma 262, 213-226.

Gis Sol. 2011. L'état des sols en France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

Gobat, J., Aragno, M., Matthey, W., 2010. Le sol vivant : Bases de pédologie, Biologie des sols. Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 3ème éd., 817 p.

van de Graaff, R., Patterson, R. A., 2001. Explaining the mysteries of salinity, sodicity, SAR and ESP in on-site practice. on-site '01. Advancing on-site wastewater systems. Proceeding; Armidale: Lanfax Laboratories, p. 361-368.

Molle, P., Liénard, A., Grasmick, A., Iwema, A., Kabbabi, A., 2005. Apatite as an interesting seed to remove phosphorous from wastewater in constructed wetlands. Water Science and Technology 9: 193-203.

Musy, A., Soutter, M. 1991. Physique du sol. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 348 p.

Thiry, M., Carrillo, N., Franke, C., Martineau, N., 2013. Technique de préparation des minéraux argileux en vue de l'analyse par diffraction des rayons X et introduction à l'interprétation des diagrammes. Fontainebleau : Centre de Géosciences. Ecole des Mines de Paris.

Richards, L. A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agricultural Handbook n°60. Ed. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C., 160 p.

Sikora, F. J., Crouse, K. K., Heckendorn, S., Huluka, G., Mitchell, C. C., Moore, K. P. Oldham. J. L., 2014. Cation Exchange Capacity. Chapter 6.2 in Soil Test Methods From the Southeastern United States, F. J. Sikora and K. P. Moore (Ed.), Southern Cooperative Series Bulletin No. 419: 170-179.

Topp, G., Davis, J., Annan, A., 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research* 16: 574-582.

## 6. Table des illustrations

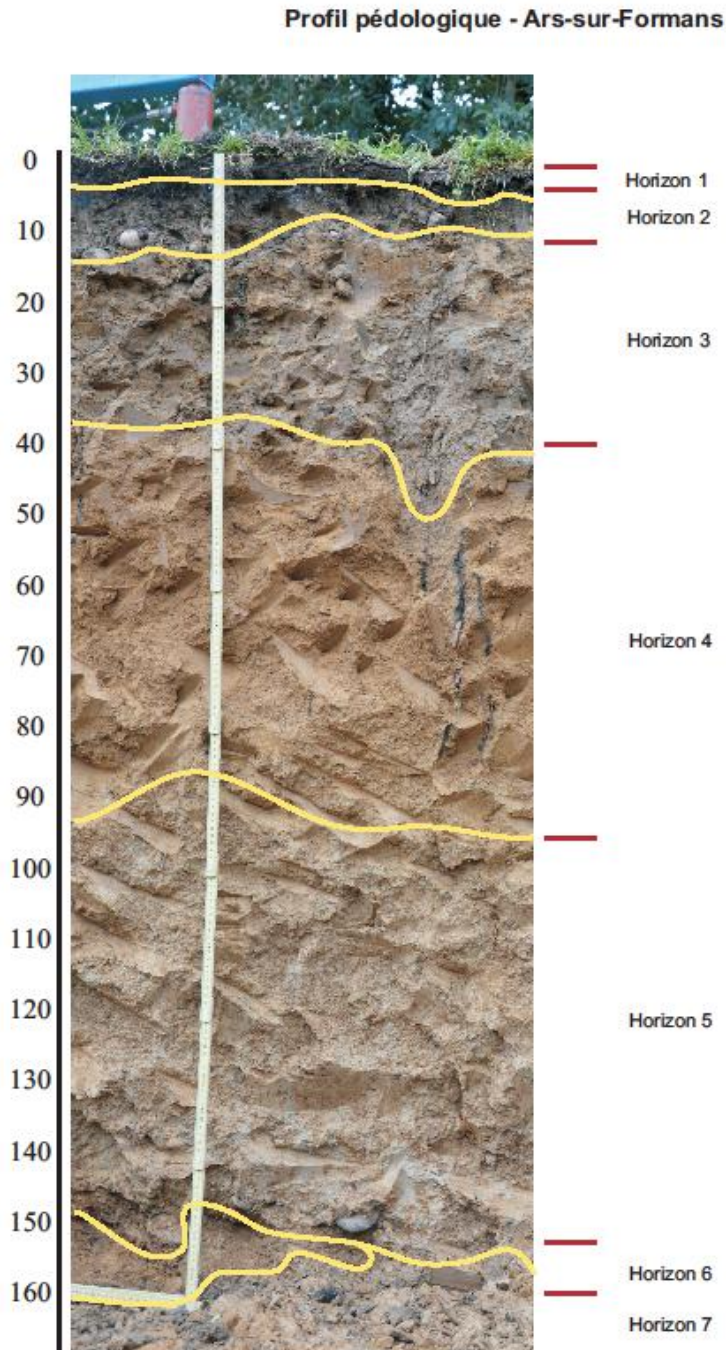
Figure 1. Positionnement sur le diagramme textural des échantillons prélevés dans les fosses pédologiques.....	9
Figure 2. Courbes de rétention d'eau obtenues par bac à sable pour les 3 sols de l'étude.....	10
Figure 3. Coupes de la surface des lysimètres.....	11
Figure 4. Teneurs en carbone organique des 3 sols de l'étude en fonction de la profondeur.....	12
Figure 5. Profil avec dépôt goudronneux observé au fond de la fosse pédologique de Bègles.....	12
Figure 6. Teneurs en calcium des 3 sols de l'étude en fonction de la profondeur.....	13
Figure 7. Concentrations en oxydes d'aluminium et de fer des 3 sols de l'étude en fonction de la profondeur.....	13
Figure 8. Concentrations en ETM des 3 sols de l'étude en fonction de la profondeur.....	14
Figure 9. Les teneurs en plomb total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France (Gis Sol, 2011).....	15
Figure 10. Isothermes d'adsorption des phosphates pour les 3 sols de l'étude.....	16
Figure 11. Spectres de diffraction des échantillons ayant subi différents traitements préliminaires afin d'identifier la nature des argiles.....	18
Figure 12. Plans d'expérience prévisionnels et appliqués.....	19
Figure 13. Charge hydraulique cumulée ( $m^3/m^2$ ) ; lysimètre 1 : Ars-sur-Formans, lysimètre 2 : Civrieux d'Azergues, lysimètre 3 : Bègles.....	20
Figure 14. Evolution des teneurs en eau (en haut) et de la concentration en oxygène (en bas) au cours du temps dans le lysimètre 1 (Ars-sur-Formans). Les flèches bleues indiquent les changements de consigne à la base du lysimètre de -50 cme à 0 cme, puis de 0 cme à 20 cme.....	21
Figure 15. Evolution des teneurs en eau (en haut) et de la concentration en oxygène (en bas) au cours du temps dans le lysimètre 2 (Civrieux d'Azergues). Les flèches bleues indiquent les changements de consigne à la base du lysimètre de -50 cme à 0 cme, puis de 0 cme à 20 cme.....	22
Figure 16. Evolution des teneurs en eau (en haut) et de la concentration en oxygène (en bas) au cours du temps dans le lysimètre 3 (Bègles). Les flèches bleues indiquent les changements de consigne à la base du lysimètre de -50 cme à 0 cme, puis de 0 cme à 20 cme.....	23
Figure 17. Flux de COT en entrée (en rouge) et en sortie (en bleu) des lysimètres avant et pendant le dysfonctionnement.....	24
Figure 18. Valeurs du SUVA mesurées en entrée et sortie des lysimètres.....	25
Figure 19. Flux d'azote total ( $N_{tot}$ ) en entrée (en rouge) et en sortie (en bleu) des lysimètres avant et pendant dysfonctionnement.....	26
Figure 20. Concentrations en $N-NH_4$ , $N-NO_2$ et $N-NO_3$ en entrée et en sortie de lysimètres avant et pendant le dysfonctionnement.....	27
Figure 21. Concentrations en phosphates en entrée (rouge) et en sortie (bleu) des lysimètres avant et pendant le dysfonctionnement.....	27
Figure 22. Masses cumulées de phosphates entrant (rouge) et sortant (bleu) des 3 lysimètres.....	28
Figure 23. Concentrations en entrée et sortie des lysimètres d'éléments traces métalliques. MAC : Concentration maximale admissible réglementaire ; VGE : Valeur guide environnementale.....	29
Tableau 1. Conductivité hydraulique au champ ( $K_{fs}$ ) pour les 3 sols de l'étude.....	9
Tableau 2. Porosité des échantillons non remaniés.....	10
Tableau 3. Ordres de grandeurs des concentrations mesurées dans les sols en certaines circonstances (Baize, 2009).....	14
Tableau 4. Coefficients d'adsorption et concentrations à saturation pour les 3 sols de l'étude (horizon 10-30 cm).....	16
Tableau 5. Teneurs en phosphore total pour chacun des horizons des 3 sols de l'étude..	16
Tableau 6. Capacités d'échange cationique et pourcentages relatifs de sodium échangeables des 3 sols de l'étude.....	17
Tableau 7. Récapitulatif des observations réalisées sur les 3 sols de l'étude.....	19
Tableau 8. Rendements médians d'élimination du COT avant et pendant le dysfonctionnement.....	25

Tableau 9. Rendements médians d'élimination de l'azote total ( $N_{tot}$ ) avant et pendant le dysfonctionnement.....	26
Tableau 10. Rendements d'élimination des phosphates avant et pendant le dysfonctionnement.....	28
Tableau 11. Concentrations en éléments traces métalliques des échantillons de sol prélevés lors de la réalisation des lysimètres (voir 2.3.1, Annexe 2).....	29

## 7. Annexe 1 : Description pédologiques des fosses pédologiques

### 7.1. Profil pédologique d'Ars-sur-Formans

Le profil pédologique d'Ars-sur-Formans a été réalisé par J-M Boissier (Entreprise Ecosylve).



#### Description

De 0 à 5 cm, horizon 1 - Couleur brun sombre - Texture limono-sableuse - Structure grumeleuse - 5 à 10 % d'éléments grossiers, essentiellement sous forme de graviers - Très nombreuses racines fines (graminées) - Horizon peu compact (faible effort nécessaire à la pénétration de la lame de couteau). A 5 cm, Intercalation d'une couche plus ou moins continue de couleur noir (charbon) de moins de 1 cm d'épaisseur.

De 5 à 15 cm, horizon 2 - Matrice de couleur brun beige avec de rares traces rouilles



diffuses - Texture limono-sableuse - Structure polyédrique - Présence d'éléments grossiers, sous forme de graviers (moins de 5%) et de 5 à 10 % de cailloux (galets) formant un "lit" irrégulier à la base de l'horizon - Rares racines fines (graminées) - Horizon compact (pénétration incomplète de la lame de couteau) - Nombreuses galeries de vers de terre (anéciques) avec revêtements bruns sombres.

De 15 à 40 cm, horizon 3 - Matrice de couleur gris beige avec quelques taches rouilles, de rares traces décolorées diffuses, et quelques plages grisâtres de taille décimétrique - Présence de morceaux de charbon - Texture limono-sableuse - Structure polyédrique - Rares éléments grossiers, essentiellement sous formes de graviers - Absence de racines - Horizon compact (pénétration incomplète de la lame de couteau) - Galeries de vers de terre (anéciques) avec revêtements bruns sombres.

De 40 à 90 cm, horizon 4 - Matrice de couleur brun orangé avec de rares traces rouilles diffuses - Texture limono-sableuse, avec une proportion de sables plus marquée que dans les horizons supérieurs - Structure polyédrique - Absence d'éléments grossiers - Absence de racines - Compacité moyenne (pénétration difficile de la lame de couteau) - Galeries de vers de terre (anéciques) avec revêtements bruns sombres.

De 90 à 150 cm, horizon 5 - Transition graduelle - Horizon fortement marmorisé, avec juxtaposition de nombreuses taches blanc-beige (taille augmentant avec la profondeur) et de traces rouilles noyées dans une matrice beige claire peu marquée - Présence ponctuelle de taches noires (absence de concrétions) - Texture sablo-limoneuse, avec forte proportion de sables grossiers - Structure polyédrique à tendance massive, se désagrégant rapidement sous la pression des doigts - Moins de 5 % de petits graviers - Quelques galets (taille centimétrique) à la base de l'horizon - Absence de racine - Compacité moyenne (pénétration difficile de la lame de couteau) - Quelques galeries de vers de terre (anéciques) avec revêtements bruns sombres.

De 150 à 160 cm, horizon 6 - Horizon discontinu de couleur brun rouille - Texture sablo-graveleuse, avec forte proportion de sables grossiers - Rares agrégats à faible cohésion - Présence d'éléments grossiers, sous forme de graviers (environ 30%) et de quelques galets (environ 10 %) - Absence de racines - Compacité impossible à estimer (éléments grossiers).

A 160 cm, horizon 7 - Très forte densité de graviers et galets centimétriques, non carbonatés.

## **Interprétation**

La zone d'étude se situe sur une "terrasse" de pente nulle dominant d'environ 2 mètres le lit actuel du ruisseau du Formans. La carte géologique au 1/50 000 du BRGM (feuille de Villefranche-sur-Saône) indique que les formations géologiques de ce secteur correspondent à des alluvions post-würmiennes de fond de vallée (Fz).

Sur les 40 premiers centimètres (horizons 1, 2 et 3), la présence de charbon, l'hétérogénéité des couleurs, la compacité, la présence localisée d'éléments grossiers, laissent supposer que la surface du sol a été fortement remaniée suite à l'aménagement des abords de la station d'épuration, avec un décapage probable du sol en place, puis l'apport et le nivellement de remblais dont certains éléments (plages grisâtres par exemple) pourraient provenir d'horizons profonds prélevés lors de terrassements.

De 40 à 150 centimètres (horizons 4 et 5), l'augmentation de la profondeur se traduit par :

- une augmentation de la teneur en sables ;
- une relative décoloration du profil ;
- l'apparition de taches rouilles, puis de taches rouilles "auréolées" de blanc, avec une intensité qui augmente en fonction de la profondeur.

Ces caractéristiques peuvent être interprétées comme des signes d'hydromorphie, avec :

- remontées capillaires et précipitation de fer ferrique dans la partie haute de l'horizon 4 (taches rouilles) ;
- redistribution centrifuge du fer (taches rouilles et plages décolorées) et éventuellement exportation de fer ferreux en période de nappe haute (horizon 5 légèrement blanchi).



Les horizons 4 et 5 correspondraient donc à un horizon Go (horizon réductique temporairement réoxydé).

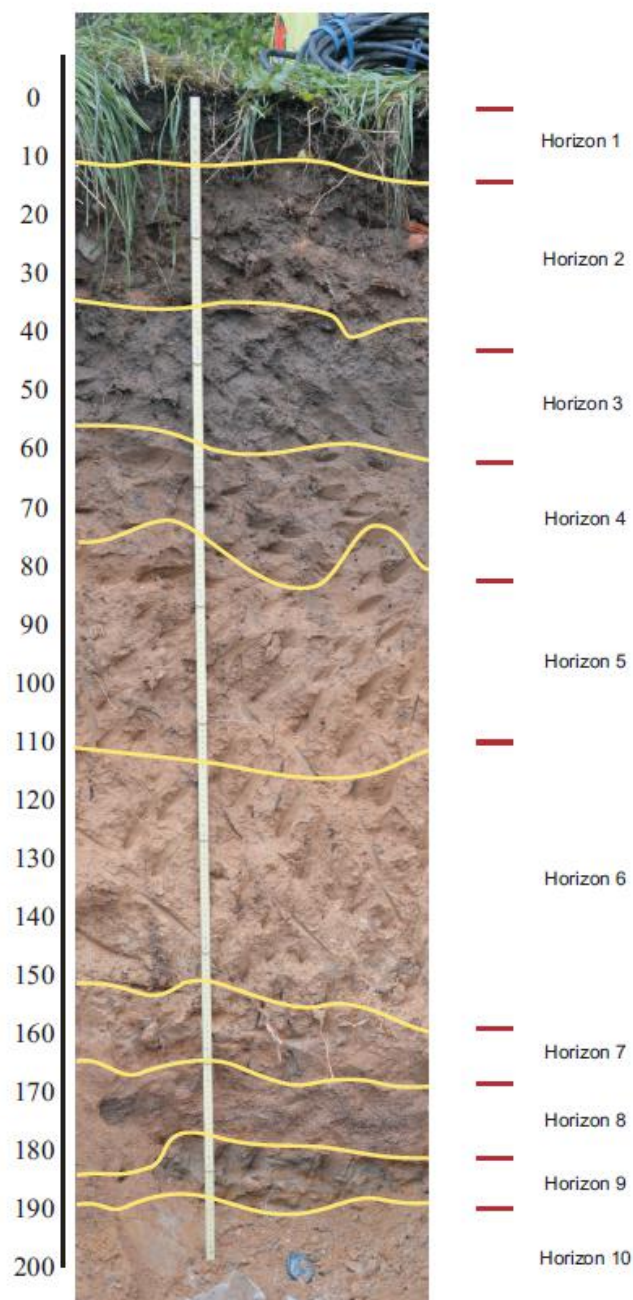
De 150 à 160 centimètres, (horizons 6 et 7), très forte proportion d'éléments grossiers sous forme de sables, de graviers et de petits galets. Cet horizon pourrait correspondre à une intercalation de sables et de graviers, dont la présence est mentionnée dans la notice de la carte géologique de Villefranche-sur-Saône. Sous cette couche d'éléments grossiers, apparition d'une couche plus riche en argiles, très humide et de couleur grise, pouvant correspondre aux "argiles grises" de la notice géologique (cette couche, non visible au niveau du profil décrit, a été observée à un autre endroit de la fosse).

Le sol décrit serait donc formé sur des alluvions riches en limons, avec un fonctionnement lié à une nappe alluviale profonde induisant la présence de signes d'hydromorphie à partir d'environ 40 centimètres de profondeur. A titre indicatif, ce sol pourrait être rattaché aux Fluvisols réductiques du référentiel pédologique (Baize et Girard, 1995), avec un caractère anthropique marqué (décapage des horizons supérieurs et dépôts de remblais).

## **7.2. Profil pédologique de Civrieux d'Azergues**

Le profil pédologique d'Ars-sur-Formans a été réalisé par J-M Boissier (Entreprise Ecosylve).

## Profil pédologique - Civrieux-d'Azergues



### **Description**

De 0 à 10 cm, horizon 1 - Couleur brun sombre - Texture limono-sableuse - Structure grumeleuse fine - 5 à 10 % d'éléments grossiers, sous forme de graviers et de cailloux - Très nombreuses racines fines (graminées) - Horizon peu compact (faible effort nécessaire à la pénétration de la lame de couteau).

De 10 à 35 cm, horizon 2 - Couleur brun gris - Texture sablo-limoneuse - Structure polyédrique à faible cohésion - Présence d'éléments grossiers, sous forme de graviers (moins de 5%) et de 5 à 10 % de cailloux de nature hétérogènes (galets, débris de briques, morceaux de verre) - Racines fines peu nombreuses - Compacité moyenne (pénétration difficile de la lame de couteau).

A 35 cm - Présence, à la base de cet horizon d'un lit discontinue de sables grossiers, sur 1 à 2 cm d'épaisseur.

De 35 à 55 cm, horizon 3 - Couleur gris sombre - Texture limono-sableuse (sables fins) - Structure polyédrique à faible cohésion - Rares éléments grossiers, sous formes de graviers

(moins de 5%) - Quelques racines fines - Horizon compact (pénétration incomplète de la lame de couteau) - Galeries de vers de terre (anéciques).

De 55 à 75-80 cm, horizon 4 - Transition progressive vers une couleur gris beige - Présence diffuse de taches rouilles peu marquées - Texture limono-sableuse (sables fins) - Structure polyédrique à faible cohésion - Rares éléments grossiers, sous formes de graviers (moins de 5%) - Quelques racines fines - Horizon compact (pénétration incomplète de la lame de couteau) - Galeries de vers de terre (anéciques) avec revêtements plus ou moins sombres.

De 75-80 à 110 cm, horizon 5 - Couleur beige, avec présence diffuse de taches rouilles et de taches beige clair peu marquées- Texture sablo-limoneuse, à dominante de sables fins - Présence localisée de lits centimétriques discontinus de sables grossiers et de petits graviers - Structure polyédrique à tendance massive (blocs compacts et anguleux se désagrégant en petits agrégats fragiles sous la pression des doigts) - Rares éléments grossiers, sous formes de quelques graviers et galets (moins de 5%) - Présence de quelques racines fines circulant dans les galeries de vers de terre - Très forte compacité (pénétration de la lame plus incomplète que sur l'horizon précédent) - Galeries de vers de terre (anéciques) avec revêtements plus ou moins sombres.

De 110 à 150 cm, horizon 6 - Passage progressif vers un horizon plus clair, marmorisé, avec juxtaposition de taches blanc-beige et de traces rouilles noyées dans une matrice beige, la densité des taches augmentant avec la profondeur - Présence de taches noires et de rares concrétions (nodules millimétriques noirâtres) - Texture sablo-limoneuse, à dominante de sables fins - Structure polyédrique à tendance massive (blocs compacts et anguleux se désagrégant en petits agrégats fragiles sous la pression des doigts) - Rares éléments grossiers, sous formes de galets (moins de 5%) - Présence de quelques racines fines circulant dans les galeries de vers de terre - Très forte compacité - Galeries de vers de terre (anéciques) avec revêtements bruns sombres

De 150 à 165 cm, horizon 7 - horizon se distinguant du précédent par une marmorisation beaucoup plus marquée, et une compacité moins forte (pénétration incomplète de la lame de couteau).

De 165 à 180 cm, horizon 8 - absence de couleur dominante (juxtaposition de grains de sables de couleurs grises, rouilles, ou brunes plus ou moins sombres) - Présence de taches noires et de rares concrétions (nodules millimétriques noirâtres) - Texture sableuse, avec forte proportion de sables grossiers - Structure particulière (absence totale de cohésion) - Présence de petits graviers (proportion non évaluée) - Compacité moyenne (pénétration difficile de la lame de couteau). Rares galeries de vers de terre (anéciques) avec revêtements bruns sombres.

De 180 à 190 cm, horizon 9 - horizon fortement marmorisé, avec une alternance de plages décimétriques rouilles ou grises - Texture sableuse, à forte dominante de sables fins - Structure massive à faible cohésion (blocs compacts se désagrégant rapidement sous la pression des doigts) - Absence visible d'éléments grossiers dans l'horizon. Transition brusque avec l'horizon inférieur - Absence de racines - Compacité moyenne (pénétration difficile de la lame de couteau) - Rares galeries de vers de terre (anéciques) avec revêtements bruns sombres.

A 190 cm et plus, horizon 10 constitué de sables grossiers, de graviers et de galets siliceux.

### **Interprétation**

La zone d'étude se situe sur une parcelle de pente nulle dominant de 1 à 2 mètres le ruisseau de l'Azergues. La carte géologique au 1/50 000 du BRGM (feuille de Tarare) indique que la zone d'étude se situe sur des alluvions fluviales (la précision de la carte ne permet pas de préciser s'il s'agit d'alluvions récentes (Fyz) ou anciennes (Fx).

Sur les 35 premiers centimètres (horizons 1 et 2), la présence d'éléments d'origine anthropique (brique, débris de verre, ...) laissent supposer que ces 2 horizons correspondent à un apport de remblais, avec incorporation de matière organique (couleur sombre) et structuration d'origine biologique (structure grumeleuse) dans les premiers centimètres.

De 35 à 55 centimètres (horizon 3), la couleur relativement sombre pourrait être induite par la présence de matière organique humifiée. Cet horizon pourrait ainsi correspondre à un horizon organo-minéral (horizon A11) enfoui après l'épandage de remblais cité ci-dessus.

De 55 à 75-80 centimètres (horizon 4), la couleur devient moins sombre, traduisant un

appauvrissement en matière organique humifiée. Cet horizon pourrait donc également correspondre à un horizon organo-minéral (horizon A12).

De 75-80 à 165 centimètres, (horizons 5, 6 et 7), la juxtaposition de taches blanc-beiges et d'auréoles rouilles, dont la densité et l'intensité augmente en profondeur (phénomène très marqué au niveau de l'horizon 7). Ces traits morphologiques peuvent être interprétés comme des signes d'hydromorphie, avec une redistribution centrifuge du fer, et des remontées capillaires et la précipitation de fer ferrique dans la partie haute de l'horizon 5 (voire dans l'horizon 4 où l'on observe quelques taches diffuses de couleur rouille). A noter la présence, surtout dans la partie basse, de taches de taches noires et de rares concrétions (nodules millimétriques noirâtres) pouvant correspondre à des concrétions ferro-manganiques.

Les horizons 5, 6 et 7 correspondraient donc à un horizon Go (horizon réductique temporairement réoxydé).

Remarque : la forte compacité observée ici pourrait être induite par la sécheresse du milieu. En effet, à l'opposé de la face décrite, la fosse montre une paroi relativement humide (l'origine de cette humidité n'a pas été expliquée) avec une compacité moyenne (pénétration assez difficile de la lame du couteau).

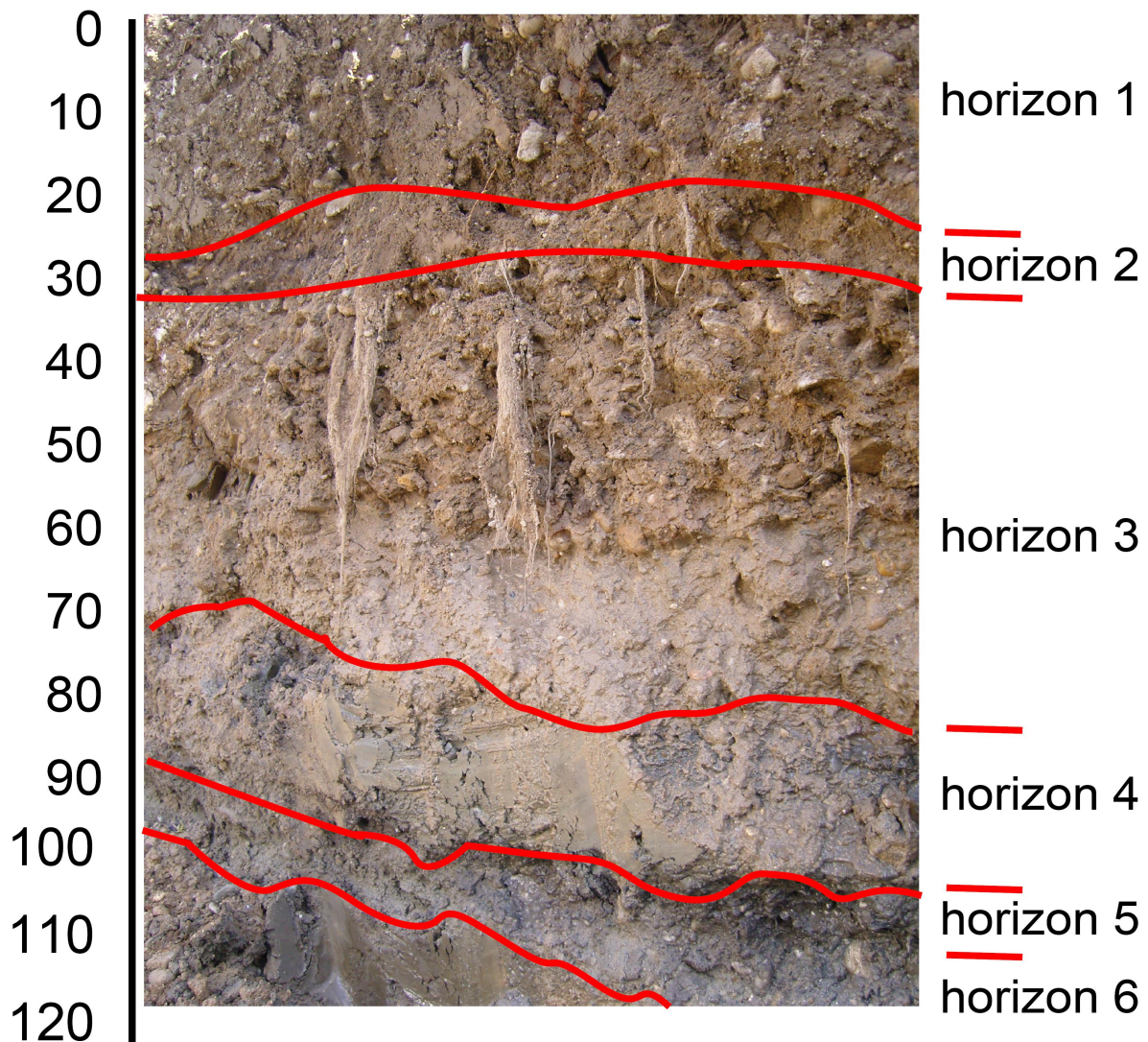
De 165 à 190 centimètres et plus, (horizons 8, 9, et 10), superposition de lits sablo-graveleux de faible épaisseur (décimétrique) reposant sur une couche d'éléments grossiers (graviers et galets) dont l'épaisseur n'a pas pu être évaluée. Ces différentes couches (horizon Dsi) présentent des similitudes avec la description des "alluvions anciennes pliocènes ou pléistocènes, non différenciées" (Fx) faite la notice géologique de la feuille de Tarare, qui correspondent à "des cailloutis arrondis à subanguleux, polygéniques, emballés dans une matrice sableuse grossière avec lentilles de granules ferromanganiques".

Le sol décrit serait donc formé sur des alluvions riches en sables et en limons, avec un fonctionnement lié à une nappe alluviale profonde induisant la présence de signes d'hydromorphie à partir d'environ 70 centimètres de profondeur. A titre indicatif, ce sol pourrait être rattaché aux Fluvisols réductiques du référentiel pédologique (Baize et Girard, 1995), avec un caractère anthropique (dépôts de remblais).



### 7.3. Profil pédologique de Bègles

#### Profil pédologique Bègles



#### **Description**

**Horizon 1** : de 0 à 25 cm - couleur brun foncé essentiellement constitué de remblai avec une présence d'argile

**Horizon 2** : de 25 à 30 cm - couleur brun clair, texture sableuse mélangée avec du remblai

**Horizon 3** : de 30 à 75 cm - couleur brun clair, texture argileux-sableuse avec du remblai et des déchets

**Horizon 4** : de 75 à 95 cm - couleur brun clair et gris, texture argileuse mélangée avec du remblai et du goudron

**Horizon 5** : de 95 à 105 cm - couleur brun clair, texture sableuse mélangée avec du remblai

**Horizon 6** : à partir de 105 cm - couleur gris, couche d'argile épaisse et imperméable

## 8. Annexe 2 : Résultats des analyses de contenu total des 3 sols de l'étude

Echantillon	Profondeur Moyenne cm	Cor g %	S total %	As ppm	Ba ppm	Be ppm	Bi ppm	Cd ppm	Ce ppm	Co ppm	Cr ppm	Cs ppm	Cu ppm	Dy ppm	Er ppm	Eu ppm	Ga ppm	Gd ppm	Ge ppm	Hf ppm	Ho ppm	In ppm	La ppm
<b>ARS-1</b>	20	0,57	0,02	14,7 <sub>3</sub>	319,57	1,57	0,30	0,24	72,6 <sub>9</sub>	7,73	78,0 <sub>2</sub>	4,68	14,82	5,53	3,24	1,23	10,9 <sub>9</sub>	5,43	1,48	11,6 <sub>3</sub>	1,16	0,04	36,2 <sub>8</sub>
<b>ARS-2</b>	45	0,37	0,02	12,9 <sub>0</sub>	300,65	1,63	0,29	0,21	74,9 <sub>4</sub>	7,42	74,7 <sub>0</sub>	4,41	12,71	5,42	3,09	1,21	10,7 <sub>2</sub>	5,44	1,42	11,5 <sub>8</sub>	1,12	< L.D.	37,2 <sub>2</sub>
<b>ARS-3</b>	75	0,21	0,01	10,5 <sub>1</sub>	282,87	1,36	0,54	0,19	76,8 <sub>0</sub>	6,60	78,3 <sub>9</sub>	3,89	< L.D.	5,43	3,20	1,21	9,87	5,61	1,48	12,9 <sub>1</sub>	1,15	< L.D.	37,8 <sub>4</sub>
<b>ARS-4</b>	105	0,11	< L.D.	7,12	252,37	1,13	0,25	0,20	69,5 <sub>6</sub>	5,32	65,5 <sub>6</sub>	2,58	< L.D.	4,78	2,82	1,08	7,77	4,88	1,37	12,6 <sub>4</sub>	1,01	< L.D.	33,8 <sub>8</sub>
<b>CIV-1</b>	20	0,88	0,03	18,1 <sub>9</sub>	559,76	2,60	0,49	0,32	40,7 <sub>2</sub>	6,87	40,4 <sub>9</sub>	8,12	27,84	3,68	2,27	0,78	12,9 <sub>4</sub>	3,25	1,34	5,92	0,79	< L.D.	20,2 <sub>0</sub>
<b>CIV-2</b>	45	0,97	0,03	18,9 <sub>2</sub>	554,96	3,31	0,49	0,34	55,6 <sub>7</sub>	7,07	37,9 <sub>3</sub>	10,1 <sub>6</sub>	24,90	3,93	2,25	0,90	14,9 <sub>6</sub>	3,97	1,34	7,51	0,81	< L.D.	27,0 <sub>0</sub>
<b>CIV-3</b>	75	0,4	0,02	15,7 <sub>1</sub>	472,04	2,84	0,29	0,23	52,2 <sub>1</sub>	5,68	39,2 <sub>0</sub>	8,45	13,30	3,61	2,07	0,81	12,9 <sub>2</sub>	3,66	1,27	7,64	0,74	< L.D.	25,6 <sub>1</sub>
<b>CIV-4</b>	105	0,19	0,01	16,1 <sub>6</sub>	534,10	3,33	0,89	0,22	76,6 <sub>0</sub>	6,39	41,8 <sub>2</sub>	8,53	17,46	4,57	2,55	0,93	14,0 <sub>5</sub>	5,12	1,39	9,52	0,92	< L.D.	36,9 <sub>4</sub>
<b>BEG-1</b>	20	0,37	0,06	14,0 <sub>3</sub>	267,55	2,11	0,89	2,00	45,7 <sub>5</sub>	8,37	56,0 <sub>6</sub>	6,87	28,58	3,09	1,68	0,86	13,2 <sub>2</sub>	3,37	1,43	3,22	0,62	0,04	24,0 <sub>3</sub>
<b>BEG-2</b>	45	0,75	0,06	8,87	217,92	1,52	1,00	0,36	32,3 <sub>8</sub>	5,50	38,9 <sub>4</sub>	4,45	30,79	2,13	1,20	0,60	8,76	2,30	1,21	2,78	0,43	< L.D.	16,6 <sub>3</sub>
<b>BEG-3</b>	75	1	0,07	8,63	198,72	1,34	0,31	0,97	29,8 <sub>6</sub>	7,08	70,5 <sub>5</sub>	3,81	32,44	1,84	1,01	0,52	8,84	1,97	1,09	2,08	0,37	< L.D.	14,4 <sub>1</sub>
<b>BEG-4</b>	105	1,96	0,14	11,2 <sub>6</sub>	257,55	1,81	0,37	0,51	45,6 <sub>9</sub>	7,83	50,3 <sub>3</sub>	5,50	30,07	2,93	1,62	0,77	11,6 <sub>9</sub>	3,23	1,36	2,80	0,60	< L.D.	22,6 <sub>4</sub>

Echantillon	Profondeur moyenne cm	Lu ppm	Mo ppm	Nb ppm	Nd ppm	Ni ppm	Pb ppm	Pr ppm	Rb ppm	Sc ppm	Sb ppm	Sm ppm	Sn ppm	Sr ppm	Ta ppm	Tb ppm	Th ppm	Tm ppm	U ppm	V ppm	W ppm	Y ppm	Yb ppm
<b>ARS-1</b>	20	0,52	< L.D.	12,7 <sub>3</sub>	32,4 <sub>2</sub>	25,1 <sub>6</sub>	22,1 <sub>4</sub>	8,54	72,54	8,78	1,38	6,52	5,65	90,90	1,21	0,87	11,6 <sub>5</sub>	0,48	3,45	58,6 <sub>7</sub>	2,59	33,3 <sub>4</sub>	3,32

<b>ARS-2</b>	45	0,48	< L.D.	12,5 5	32,5 9	23,9 8	19,0 5	8,67	69,36	8,67	1,22	6,52	< L.D.	88,25	1,22	0,86	11,2 2	0,45	3,39	55,3 5	2,32	32,0 2	3,11
<b>ARS-3</b>	75	0,51	< L.D.	12,2 5	33,5 0	20,4 3	15,4 8	8,96	63,84	8,02	1,07	6,70	< L.D.	88,42	1,21	0,87	10,8 8	0,47	3,51	48,8 8	2,28	32,1 0	3,31
<b>ARS-4</b>	105	0,46	< L.D.	12,0 1	29,7 6	15,2 7	12,3 1	8,00	51,40	6,37	0,95	5,99	< L.D.	85,50	1,18	0,76	9,94	0,42	3,31	36,5 8	2,11	28,2 8	3,07
<b>CIV-1</b>	20	0,35	< L.D.	7,39	17,8 0	16,1 9	45,0 2	4,73	132,9 0	6,16	1,73	3,73	8,48	110,2 4	0,83	0,55	7,48	0,34	2,74	37,4 7	2,11	22,4 2	2,34
<b>CIV-2</b>	45	0,34	< L.D.	8,59	23,8 2	15,8 4	50,5 2	6,42	148,8 2	6,59	2,36	4,86	5,03	119,4 0	0,92	0,62	10,6 9	0,33	2,97	38,5 4	2,31	22,9 1	2,26
<b>CIV-3</b>	75	0,32	< L.D.	7,52	22,3 8	11,7 5	39,8 9	6,01	141,7 2	< L.D.	1,49	4,52	< L.D.	106,3 5	0,81	0,58	10,2 5	0,31	3,08	29,8 0	2,17	21,1 1	2,11
<b>CIV-4</b>	105	0,40	< L.D.	7,73	31,9 4	11,8 8	35,3 4	8,73	139,5 9	< L.D.	1,88	6,38	< L.D.	117,7 2	0,88	0,78	15,8 0	0,38	3,59	33,0 9	2,16	25,5 0	2,62
<b>BEG-1</b>	20	0,25	< L.D.	10,1 5	20,6 2	28,0 0	27,2 8	5,56	89,56	9,77	2,41	4,08	4,91	80,19	0,96	0,52	7,94	0,24	2,09	70,6 4	2,27	16,9 6	1,64
<b>BEG-2</b>	45	0,18	< L.D.	7,21	14,1 4	16,2 8	27,1 9	3,79	63,56	6,39	1,16	2,80	< L.D.	74,45	0,67	0,36	5,29	0,18	1,41	46,8 3	2,23	11,7 5	1,14
<b>BEG-3</b>	75	0,15	< L.D.	7,53	11,9 9	25,1 3	30,4 3	3,22	52,86	< L.D.	1,35	2,36	< L.D.	89,37	0,61	0,31	4,53	0,15	1,40	51,7 9	2,26	10,2 8	1,01
<b>BEG-4</b>	105	0,24	< L.D.	8,79	19,5 0	21,7 6	24,4 2	5,28	74,32	8,85	1,61	3,95	< L.D.	77,05	0,80	0,50	9,12	0,23	1,85	65,0 8	3,40	16,0 6	1,59

Echantillon	Profondeur moyenne	Zn	Zr	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF	Total
	cm	ppm	ppm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>ARS-1</b>	20	55,57	452,98	77,6 3	9,03	3,37	0,0 8	0,7 0	0,8 7	1,30	1,6 2	0,7 0	< L.D.	5,1 0	100,4 0
<b>ARS-2</b>	45	50,21	450,57	78,2 7	8,95	3,24	0,0 7	0,6 6	0,7 8	1,31	1,5 3	0,7 1	< L.D.	4,4 9	100,0 2
<b>ARS-3</b>	75	44,86	494,24	79,7 8	8,42	2,91	0,0 6	0,5 9	0,7 3	1,36	1,4 3	0,7 0	< L.D.	3,7 6	99,75
<b>ARS-4</b>	105	31,69	489,71	83,4 4	7,12	2,14	0,0 6	0,4 4	0,6 7	1,48	1,2 9	0,6 8	< L.D.	2,3 6	99,67
<b>CIV-1</b>	20	94,29	224,52	73,4 1	11,03	2,40	0,0 7	0,6 3	1,1 7	1,85	3,5 1	0,4 1	< L.D.	5,5 7	100,0 4
<b>CIV-2</b>	45	87,10	284,92	72,2 1	12,18	2,53	0,0 8	0,5 9	1,4 7	2,07	3,4 9	0,4 3	< L.D.	4,6 9	99,74
<b>CIV-3</b>	75	48,77	292,00	74,4	10,89	2,03	0,0	0,4	1,1	1,86	3,4	0,3	< L.D.	4,3	99,12



				4			6	5	8		5	8		9	
<b>CIV-4</b>	105	49,20	347,84	75,7 2	11,41	2,23	0,0 6	0,5 2	1,3 6	2,04	3,4 3	0,4 2	< L.D.	3,6 1	100,8 0
<b>BEG-1</b>	20	85,43	117,08	70,3 6	10,04	3,87	0,0 6	0,9 9	3,3 5	0,41	1,7 4	0,4 8	< L.D.	7,3 6	98,65
<b>BEG-2</b>	45	65,13	106,38	74,0 6	6,88	2,47	0,0 3	0,6 4	5,3 7	0,39	1,3 3	0,3 4	< L.D.	7,2 5	98,76
<b>BEG-3</b>	75	75,14	77,39	67,2 2	7,28	3,53	0,0 5	1,7 7	8,1 8	0,35	1,1 1	0,3 1	< L.D.	8,8 2	98,63
<b>BEG-4</b>	105	74,88	103,07	74,7 3	9,04	3,33	0,0 5	0,9 1	1,9 9	0,58	1,5 1	0,4 6	< L.D.	7,5 2	100,1 2

## 9. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe du laboratoire LAMA (laboratoire de chimie des milieux aquatiques) pour les analyses chimiques.



**Projet ROSEEV :**  
**ROle du Sol dans les zonEs de**  
**rEjets Végétalisées - Résultats**  
**des six premiers mois de suivi**  
**de la plateforme lysimétrique**  
**de Mionnay (69)**  
**Rapport intermédiaire**  
A. Morvannou, S. Bisone, N. Forquet



**Irstea**

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

**01 40 96 61 21**

[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)

**Onema**

Hall C - Le Nadar  
5, square Félix Nadar  
94300 Vincennes

**01 45 14 36 00**

[www.onema.fr](http://www.onema.fr)

