

VALORISATION DE L'URINE PAR IRRIGATION AU GOUTTE-À-GOUTTE

Impacts sur le milieu et durabilité des équipements

Recherches menées par la coopérative ECOSEC et le centre de recherches IRSTEA de Montpellier.

Vincent LE DAHERON¹, Victoria SAUNAL¹, Clémentine DUPRAZ¹, Marie-Liesse AUBERTIN¹, Bruno MOLLE², Nassim Aït-Mouheb², Benjamin CLOUET¹.

¹_Ecosec, 710 rue Favre de Saint-Castor, 34080 Montpellier

²_IRSTEA, 361 Avenue François Breton BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5

Contact : bruno.molle@irstea.fr - nassim.ait-mouheb@irstea.fr - contact@ecosec.fr
Pour plus d'informations : www.ecosec.fr - www.irstea.fr

Remerciements : ce projet a été mené grâce au soutien de la région Occitanie par son agence Transferts dédiée à l'innovation et BPI France.

RÉSUMÉ

Ces travaux ont pour but l'amélioration des connaissances liées à la valorisation agronomique de l'urine humaine en tant que fertilisant. Les recherches ont été menées par ECOSEC, concepteur de toilettes publiques séparatives, et le centre IRSTEA de Montpellier, dont l'expertise porte sur les systèmes d'irrigation ou encore sur la réutilisation des eaux non-conventionnelles.

L'urine est un déchet du corps humain utilisé comme engrais naturel depuis la nuit des temps et disponible en grande quantité partout dans le monde. Depuis la fin du XXe siècle, de nombreux travaux ont démontré un pouvoir fertilisant semblable aux engrais synthétiques. Sa réutilisation participe à la fermeture des cycles biogéochimiques tout en réduisant la pression sur les stations de traitement des eaux.

Ces recherches ont montré que l'urine pouvait potentiellement se substituer aux engrais synthétiques. Ces travaux sur une saison de culture ont montré que l'apport d'urine permet un gain de 50% de la masse humide de la partie comestible d'épinards en comparaison à un engrais commercial. Ces travaux ont aussi montré une contamination de l'urine récoltée par des microorganismes d'origine fécale. L'analyse de plusieurs micropolluants a démontré des valeurs extrêmement faibles au sein des urines utilisées (< 10 ng/ml). Une sur-fertilisation (jusqu'à 510 kg N/ha) a été réalisée afin d'étudier les transferts et risques de lessivage des éléments azotés. Aussi, un risque de salinisation des premières couches de sol a été mis en évidence par un suivi de conductivité, sans pour autant provoquer un excès préjudiciable pour les cultures. Le test pendant plusieurs mois de différents systèmes d'irrigation goutte-à-goutte a permis de montrer la plus forte sensibilité au colmatage des goutteurs de type auto-régulant (Pressure Compensating) en comparaison avec des goutteurs de type non auto-régulant. Le colmatage au sein des goutteurs étant principalement d'origine physique et chimique. Il faut noter que ces résultats ont été obtenus sur une saison.

De nouvelles recherches réalisées sur le long terme permettront de confirmer ces résultats et de notamment mieux appréhender les transferts au sein des végétaux.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	2
1. INTRODUCTION	5
1.1. DE L'URINE À L'ENGRAIS	6
1.2. UN ENGRAIS PARFAIT ?	6
1.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE	7
2. MATÉRIELS ET MÉTHODES	8
2.1. LOCALISATION	8
2.2. SOURCE D'URINE	8
2.3. EXPERIENCE 1 : CULTURES HORS-SOLS	8
2.3.1. Installation	8
2.3.2. Irrigation et fertilisation	8
2.3.3. Sols	9
2.3.4. Plantes	9
2.4. EXPERIENCE 2 : DURABILITE DES SYSTEMES D'IRRIGATION	10
2.4.1. Dispositif expérimental	10
2.4.2. Goutteurs	10
2.5. PRELEVEMENTS : URINE / SOL	11
2.6. METHODES ANALYTIQUES	11
2.6.1. pH, conductivité et ions de l'urine	11
2.6.2. Salinité	11
2.6.3. Masse des végétaux	11
2.6.4. Mesures des débits	11
2.6.5. Analyses au microscope	12
2.6.6. Laboratoires mandatés	12
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	13
3.1. ANALYSE DE L'URINE	13
3.1.1. Caractéristiques	13
3.1.2. Pathogènes	13
3.2. EXPERIENCE 1 : CULTURES HORS-SOL	13
3.2.1. Plantes	13
3.2.2. Lixiviats	14
3.2.2.1. Reliquats azotés	15
3.2.3. Bilan sur l'azote	16
3.2.3.1. Micropolluants	16
3.2.4. Sol	17
3.2.4.1. Salinité	17
3.3. EXPERIENCE 2 : DURABILITE DES SYSTEMES D'IRRIGATION	19
3.3.1. Evolution des débits	19
3.3.2. Colmatage	23
CONCLUSIONS	28
RÉFÉRENCES	29

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : représentation schématique du système séparatif <i>Ecodoméo</i>	8
Figure 3 : représentation schématique du dispositif expérimental de culture (vue de dessus).....	9
Figure 2 : vue en coupe du système de culture.....	9
Figure 4 : aperçu du dispositif expérimental de test des matériels d'irrigation.....	10
Figure 5 : représentation schématique du dispositif expérimental (test des matériels d'irrigation).....	10
Figure 6 : détail des goutteurs utilisés.....	11
Figure 7 : progression de la croissance des épinards (28 mars, 28 avril et 15 mai).....	15
Figure 8 : masse humide et sèche des épinards (e) en fonction des doses de fertilisation.....	16
Figure 9 : bilan sur l'azote dans les différents compartiments.....	16
Figure 10 : quantités de nitrates et d'azote ammoniacal récoltées au sein des lixiviats.....	18
Figure 11 : quantité de phosphate récoltée au sein des lixiviats.....	19
Figure 12 : reliquats azotés (NO_3^- et NH_4^+) au sein des sols 1 et 2 à deux horizons différents.....	20
Figure 13 : évolution des débits moyens des goutteurs pour chaque type de système avec leurs écart-types (n=20).....	21
Figure 14 : impact de la fertilisation sur la conductivité du sol à 4 horizons (15, 30, 45 et 60cm).....	22
Figure 15 : observation au microscope des goutteurs de type PC2.....	24
Figure 16 : observation au microscope des goutteurs de type NPC2.....	25
Figure 17 : observation au microscope des goutteurs de type NPC4.....	26
Figure 18 : observation au microscope des goutteurs de type Irriwater.....	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : caractéristiques de culture du paturin des prés et des épinards.....	12
Tableau 2 : goutteurs sélectionnés, caractéristiques et temps de gouttage journalier.....	12
Tableau 3 : caractéristiques de culture du paturin des prés et des épinards.....	14
Tableau 4 : abattement des pathogènes au sein de l'urine stockée.....	14
Tableau 5 : résultats des analyses micropolluants. Le seuil de détection des appareils est situé à 10 ng/mL.....	17

1. INTRODUCTION



Dans les zones arides, la rareté des ressources hydriques les rendent particulièrement sensibles au réchauffement climatique. Aussi, avec l'augmentation des besoins alimentaires à l'échelle mondiale, la part des ressources en eau utilisée pour l'agriculture ne cesse de s'accroître pour atteindre aujourd'hui 70% de la consommation totale (UN Water 2017). La pression sur la ressource est elle aussi en perpétuelle augmentation et pour la seule région méditerranéenne, 180 millions de personnes sont en situation de stress hydrique.

Face à cette situation qui, au vu des prévisions actuelles (hausse des températures couplée à une baisse des précipitations) ne vas pas s'améliorer, les modes de gestion ou encore les pratiques culturales tendent à se perfectionner afin d'optimiser son utilisation. Parmi eux, les systèmes d'irrigation plus précis et notamment les systèmes d'irrigation goutte-à-goutte

tendent à se démocratiser dans les régions arides depuis les années 1960. La micro-irrigation contribue à réduire les pertes en eau par rapport aux techniques d'irrigation traditionnelles. Ces systèmes permettent de doser précisément la quantité d'eau nécessaire pour la plante et avec une efficacité qui varie entre 70 et 95%. Néanmoins, la sensibilité des distributeurs de micro-irrigation au colmatage constitue le principal inconvénient lié à l'utilisation de ce type d'irrigation (Gamri 2014).

En étroite lien avec l'augmentation de la population mondiale, la demande en engrais ne cesse d'augmenter depuis plusieurs décennies. Qu'elle soit énergivore (engrais azotés) ou non renouvelable (engrais phosphorés), la production massive d'engrais de synthèse au rythme actuel semble inenvisageable d'ici quelques décennies, avec un pic du phosphore annoncé dès 2035 (Cordell 2010).

Etant directement lié à la disponibilité et au prix des engrais, il se peut que le prix des céréales subissent de nouvelles fortes variations d'ici les prochaines années, entraînant de nouvelles crises comme les « émeutes de la faim » vécues en 2008 (Dufumier and Hugon 2008).

Pour une utilisation optimale des ressources hydriques et des fertilisants en agriculture, la fertirrigation apparaît être une technique prometteuse. L'apport d'engrais couplé à une irrigation au plus près des végétaux, permet aussi une diminution des pollutions tout en

augmentant les rendements de production (Thayyil 2017). Cependant, son utilisation au sein de système d'irrigation de précision pose la question de la durabilité des équipements.

En parallèle, l'urine, concentre une majeure partie des éléments (N, P, K...) excrétés par le corps humain, et son utilisation pour améliorer la productivité agricole n'est plus à prouver. La recherche proposée se focalise sur la valorisation agronomique de l'urine et plus particulièrement sa mise en œuvre grâce à différents systèmes d'irrigation goutte à goutte.

1.1. DE L'URINE À L'ENGRAIS

Les concepts d'assainissement alternatifs impulsé par les pays scandinaves dans le début des années 1990 promeuvent une réduction des consommations en eau et une gestion cyclique des excréta. Des nouvelles approches comme la séparation à la source des matières fécales et de l'urine a ouvert la voie à de nouvelles pratiques. L'accent est notamment mis sur l'urine, représentant moins de 1% du volume des eaux usées mais 80% de l'azote et 50% du phosphore traité par les stations d'épuration (Schönning and Stenström 2004).

Suite à de nombreuses expériences grandeur réelles, l'utilisation de l'urine comme source alternative d'engrais a reçu une attention croissante (Karak and Bhattacharyya 2011, Kirchmann and Pettersson 1995). De nombreuses études ont ainsi prouvé que le rendement

de différents végétaux fertilisés à l'urine est similaire voir supérieur au rendement de végétaux fertilisés avec des engrais synthétiques, et ce dans de multiples conditions et régions (Jonsson et al. 2004, Mneni et al. 2008, Senecal 2010).

L'urine est composée à 95% d'eau, les 5% des constituants restants regroupent l'urée, la créatinine, des ions dissous (chlorure, sodium, potassium, etc.), et des composés inorganiques et organiques ou des sels. Liquide stérile, l'urine contient des quantités importantes des principaux macroéléments requis par les plantes : azote (N), phosphore (P) et potassium (K). L'azote se présente en fortes concentrations, de 3 à 7 grammes d'azote par litre d'urine, principalement sous forme d'urée (K. M. Udert, Larsen, and Gujer 2006). La quantité d'urine produite par jour et sa teneur en éléments nutritifs dépendent à la fois de l'alimentation, du métabolisme ou encore de l'activité physique de chacun. En moyenne le volume d'une miction est compris entre 100 et 300 ml, ce qui équivaut à un volume compris entre 0,6 et 1,5 litres par jour (Richert, Gensch, Jönsson, & Thor-Axel, 2011).

1.2. UN ENGRAIS PARFAIT ?

Malgré ces forts intérêts agronomiques et sa grande disponibilité à la surface du globe, plusieurs questions restent en suspens pour une utilisation en tant que fertilisant. Outre les questions d'ordre socio-culturelle, économique ou politique, la réutilisation de nutriments anthropogéniques sur des terres arables est encore parsemée de nombreuses zones d'ombres sanitaires, agronomiques ou encore

technologiques.

Un point fréquemment soulevé est la présence d'éléments potentiellement préjudiciables (substances médicamenteuses, sels minéraux...) pour les végétaux et le milieu récepteur. En effet, l'urine est un liquide complexe excréant plus de 3000 métabolites (Bouatra et al. 2013) issus de produits inhalés, ingérés ou encore intégrés par passage cutané dans l'organisme. Parmi eux, l'urine excrète près de 70% des substances pharmaceutiques rejetées par notre corps (Lienert, Bürki, and Escher 2007). Plusieurs études ont montré que les teneurs en métaux sont très faibles (OMS, 2006) et que les concentrations en résidus pharmaceutiques restent bien inférieures à celles trouvées dans certains sous-produits animaux comme les fumiers ou lisiers (Richert et al. 2010). Aussi, peu d'études ont été menées jusqu'à présent sur le comportement des micropolluants ainsi que leur devenir dans les différents compartiments (plantes, sol, eau). Leurs potentiels impacts sur les plantes sont peu connus et aucun test de toxicité n'a encore été mis en place. En 2010, une étude a analysé l'absorption de la carbamazépine et de l'ibuprofène par le ray-grass par fertilisation avec de l'urine supplémentée en micropolluants (Winker et al. 2010). Parmi les composés étudiés, seule la carbamazépine a été retrouvée dans les parties aériennes de la plante.

Un problème récurrent en agriculture, notamment dans les zones arides, est la salinisation des sols. En effet, 10 à 15 % des surfaces irriguées en zones arides souffrent, à des degrés divers, de problèmes de salinisation (FAO, 2015). Or l'urine

contient une quantité non négligeable de sels solubles ce qui pose une contrainte supplémentaire en production agricole. Bien que fortement variable d'un sujet à un autre, une étude de 2005 rapporte une concentration moyenne de 8,8 g NaCl / litre d'urine (Ganrot 2005). De plus, ces ions Na⁺ et Cl⁻ sont considérés comme étant les sels les plus nocifs pour la croissance végétale (Hasegawa et al. 2000), pouvant affecter directement la croissance végétale et indirectement par la détérioration des caractéristiques du sol. Des précautions d'applications sont donc à prendre pour ne pas risquer de contribuer à la salinisation du sol.

De nombreuses études ont déjà démontré la sensibilité au colmatage des systèmes d'irrigation goutte à goutte lors de leur utilisation avec des eaux non conventionnelles (Gamri 2014). De plus, lors du stockage de l'urine, différents solides blanchâtres cristallins comme la struvite (MgNH₄PO₄·6H₂O) ou les phosphates de calcium de type hydroxyapatite (Ca₅(PO₄)₃OH) précipitent naturellement (Kai M. Udert et al. 2003). Il a été montré que l'urine apporte des risques supplémentaires de colmatage des équipements d'irrigation (Zandee, Etter, and Udert 2012).

1.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Il s'agit de comprendre plusieurs des verrous évoqués plus haut afin d'envisager le développement de la pratique de valorisation agricole des urines à grande échelle. Les objectifs sont les suivants :

- Tester différents niveaux de fertilisation, jusqu'au dépassement

de la limite de fertilisation en zones sensibles (170 kg N/ha) fixée par la Directives Cadre Européenne pour en analyser l'effet pour l'environnement. Pour cela, on travaillera avec différents niveaux de fertilisation à l'urine, sur différents végétaux, dans différents sols. Les effets analysés comprendront le lessivage des nutriments, la salinisation du sol et la quantification des reliquats azotés.

- Quantifier la présence d'éléments pathogènes au sein de l'urine lorsqu'elle est récupérée par le système séparatif gravitaire et suivre leur dégradation lors du stockage.
- Suivre, en amont et en aval d'une fertilisation, l'évolution d'éléments pathogènes et de micropolluants.
- Etudier la sensibilité au colmatage de plusieurs types de matériel d'irrigation goutte à goutte lors de leur utilisation avec de l'urine sur une saison.



2. MATÉRIELS ET MÉTHODES



2.1. LOCALISATION

L'ensemble des expérimentations a été mené sous serre au sein de la Plateforme de Recherche et d'Expérimentation dédiée à l'Irrigation (PRESTI) de l'IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) à Montpellier entre août 2016 et juillet 2017

2.2. SOURCE D'URINE

L'urine utilisée pour mener à bien ces travaux est de l'urine provenant de sanitaires publics installés par l'entreprise [Ecosec](#). Le système de trône utilisé ayant permis la récupération de l'urine est un système séparatif gravitaire de type [Ecodomeo](#) (Figure 1). Le système fonctionne sans eau et sans sciure. Le tapis roulant actionné par l'utilisateur sépare les urines des matières fécales et permet une récupération sélective. Un inconvénient majeur de ce système est un fort risque de contamination croisée de l'urine

par les matières fécales. Environ 500 litres d'urine ont été collectées par bidons de 20 litres entre le 15 juin et le 17 août 2016 sur plusieurs plages privatives de la Grande-Motte (34).

2.3. EXPERIENCE 1 : CULTURES HORS-SOLS

2.3.1. Installation

Les plantes ont été cultivées au sein de bacs hors-sol (Dolav, 1000 ACE II) de 900 litres. Leur surface est de 1 m². Ce dispositif, semblable à un lysimètre, a permis la récupération des volumes lessivés et l'étude des transferts d'eau, de nutriments et de polluants. Ainsi, les impacts des pratiques d'irrigation étudiées sur le milieu récepteur, le sol et les nappes phréatiques, peuvent être évalués.

2.3.2. Irrigation et fertilisation

A 10 cm au-dessus de chaque bac, deux lignes d'irrigation comprenant chacune 3 goutteurs non autorégulant NPC₂ (débit nominal à 1 bar : 2 L/h) ont été installées.

Un système d'appoint d'irrigation par aspersion a été ajouté afin de permettre une germination homogène et l'apport d'eau claire nécessaire à la croissance végétale. 10 mm journaliers ont été délivrés à chaque bac.

L'urine permettant la fertilisation a préalablement été stockée 6 mois et diluée au 1:6^{ème} dans une cuve de stockage de 120 litres. La fertilisation a démarré juste après la levée des plantes et a été réalisée chaque

semaine pendant 10 semaines. L'eau d'appoint apporté lors de la période de germination a permis de saturer préalablement le sol en eau.

Différentes doses de fertilisation ont été apportées :

- Eau (E) : témoin sans fertilisation
- Ferti (F) : fertilisation à 170 kg N/ha avec un engrais universel biologique commercial (NPK : 3,5 - 3,5 - 3,5)
- Dose 1 (D1) : fertilisation à l'urine à 170 kg N/ha
- Dose 2 (D2) : fertilisation à l'urine à 510 kg N/ha

Une concentration moyenne de 6 grammes d'azote total (formes ammoniacales et nitrates/nitrites) par litre d'urine mesurée au sein des urines a été utilisée pour calculer le volume d'urine à apporter.

2.3.3. Sols

Deux variantes d'un même sol ont été mises en place au sein des bacs afin de mener ces expériences. L'intérêt de mener cette expérience

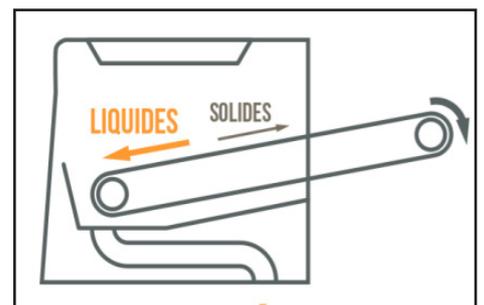


Figure 1 : représentation schématique du système séparatif [Ecodomeo](#).

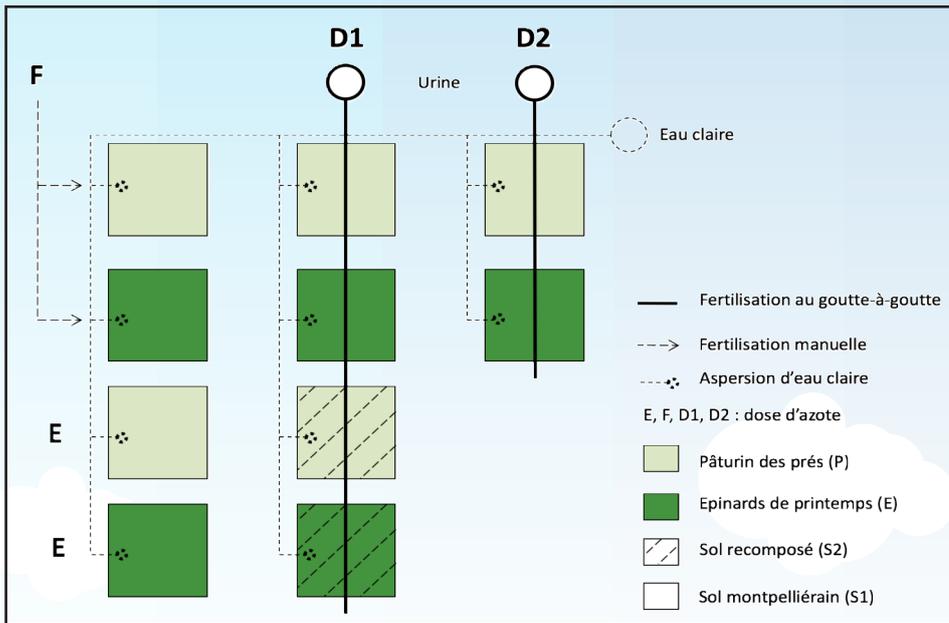


Figure 3 : représentation schématique du dispositif expérimental de culture (vue de dessus).

mentation avec différents sols est de mesurer l'influence de la nature du sol sur les paramètres étudiés.

- Sol 1 (S1) : sol provenant du terrain de l'Irstea (sol argilo limoneux) ;
- Sol 2 (S2) : sol recomposé à partir de sol 1 (80%) auquel a été mélangé du sable de rivière (20%). Ce mélange permet de réduire la teneur en matière organique du sol et d'augmenter sa conductivité hydraulique pour accélérer les transferts d'eau.

2.3.4. Plantes

Deux types de plantes aux usages totalement différents ont été choisis pour mener ces travaux :

- Pâturin des prés (P) : plante fourragère
- Epinard (E) : plante maraîchère

Le pâturin des prés (*Poa pratensis*)

est une graminée fourragère de type gazon fréquemment utilisé sur des terrains de sport en combinaison avec le ray-grass anglais. L'épinard (*Spinacia oleracea*) est une plante potagère annuelle ou bisannuelle.

Le choix des plantes a été influencé par leur consommation en azote, leur résistance à la salinité et leur

court cycle de culture. Les durées de cycle de culture ainsi que leur consommation saisonnière en azote sont données ci-contre en tableau 1.

Les 10 bacs composant le dispositif expérimental ont été répartis comme présenté en figure 3.

2.4. EXPERIENCE 2 : DURABILITE DES SYSTEMES D'IRRIGATION

2.4.1. Dispositif expérimental

Sur une durée de 3 mois, une installation en circuit fermé a permis de tester quatre types de systèmes d'irrigation fréquemment utilisés en irrigation goutte à goutte (figures 4 & 5). Le système a été mis en fonctionnement avec de l'urine préalablement stockée 6 mois au sein d'une cuve de type IBC.

2.4.2. Goutteurs

Quatre types de goutteurs ont été

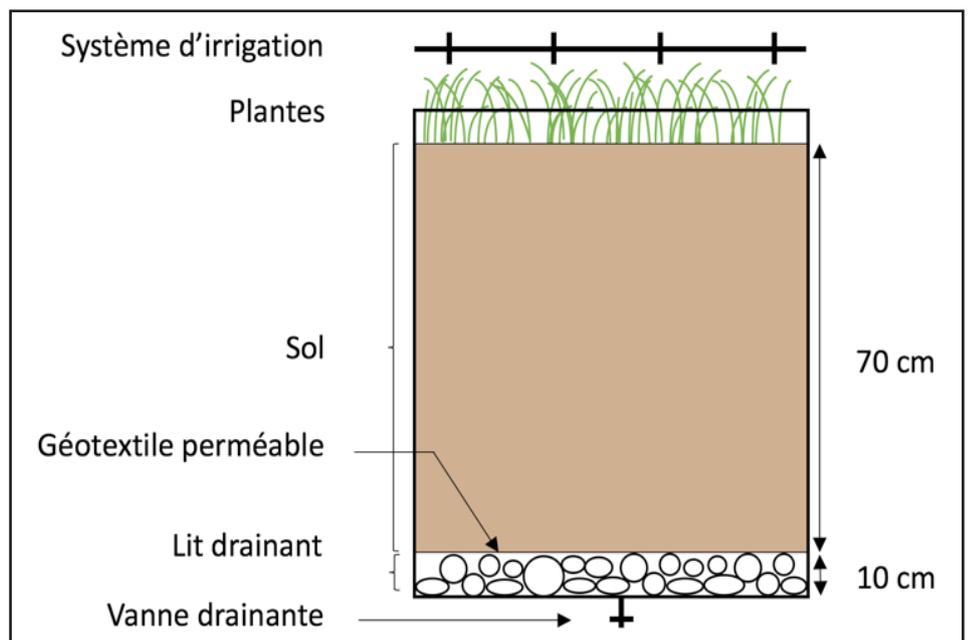


Figure 2 : vue en coupe du système de culture.

testés au cours de l'expérimentation :

- NPC2 (Non-Pressure Compensating) : goutteur non-autorégulant caractérisé par une variation du débit en fonction de la pression du réseau. Débit nominal de 2l/h à 1 bar. Une série de labyrinthes au sein du goutteur amortie la vitesse d'écoulement.
- NPC4 : même fonctionnement que NPC2. Débit nominal de 4l/h à 1 bar.
- PC2 (Pressure-Compensating) : goutteur autorégulant, débit nominal de 2l/h pour une pression variant entre 1 et 3 bar. Une membrane élastomère au sein du goutteur permet de stabiliser le débit.
- Irriwater : Bancelhon, $\varnothing 1,4$ mm. Goutteur en laiton utilisé en irrigation enterré.

Pour les systèmes d'irrigation Pressure Compensating (PC) et Non-Pressure Compensating (NPC), chaque ligne d'une longueur de 4,5m comporte 20 goutteurs. Pour l'équipement d'irrigation enterré de type Irriwater, la ligne comporte 10 distributeurs, voir Figure 5.

Un filtre de 130 μm est installé après la pompe. La pression dans le circuit est fixée à 1 bar et, afin de suivre l'évolution du fonctionnement des équipements, le débit de chaque goutteur est mesuré chaque semaine. En fin d'expérimentation, les éventuels dépôts au sein des goutteurs sont observés au microscope. La durée des chroniques de mise sous pression des lignes d'irrigation est détaillée dans le tableau 2.

2.5. PRELEVEMENTS : URINE / SOL

Chaque semaine, les lixiviats de chaque bac sont récupérés et pe-



Figure 4 : aperçu du dispositif expérimental de test des matériels d'irrigation.

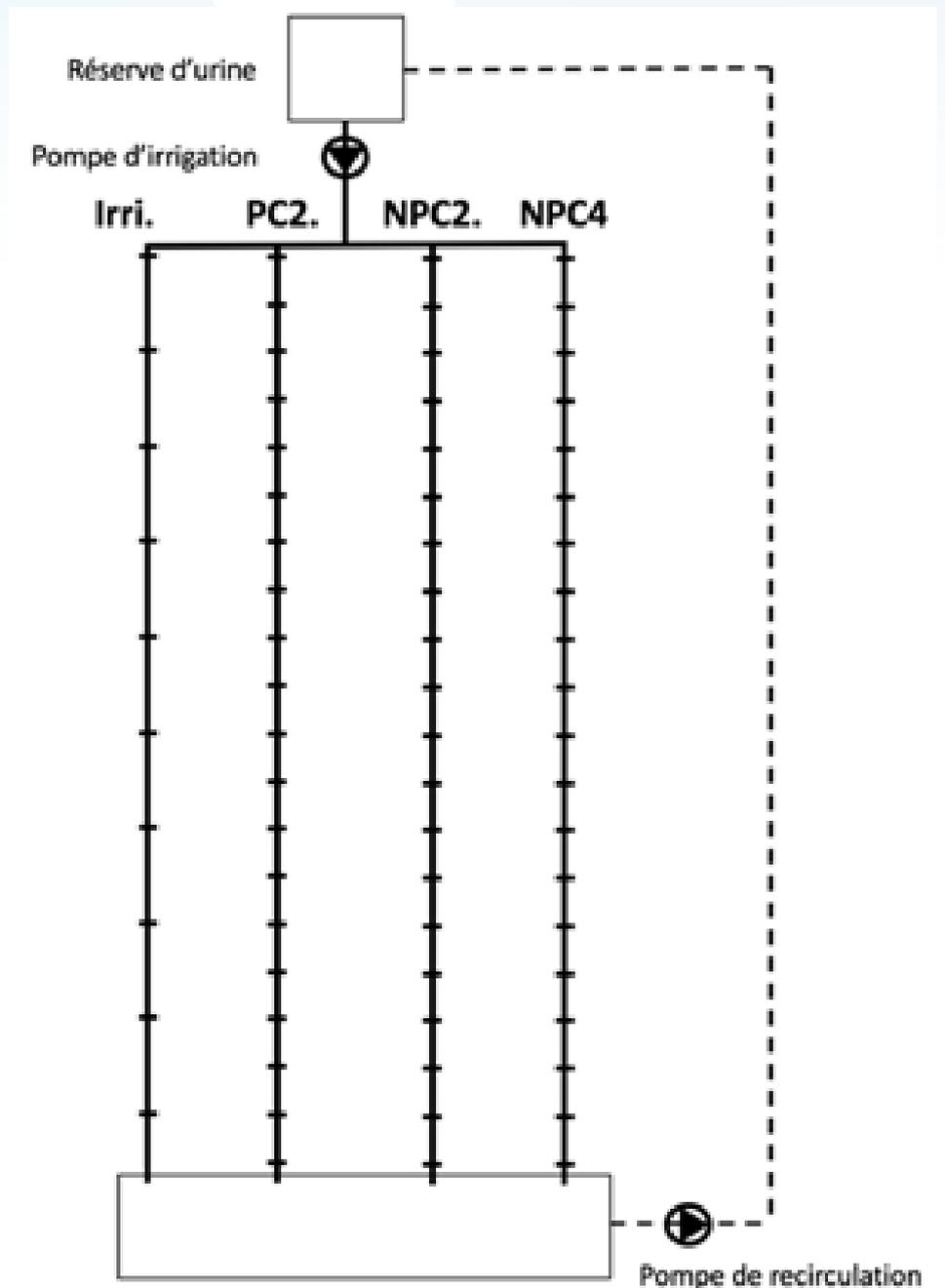
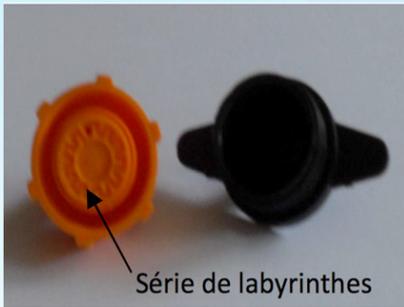
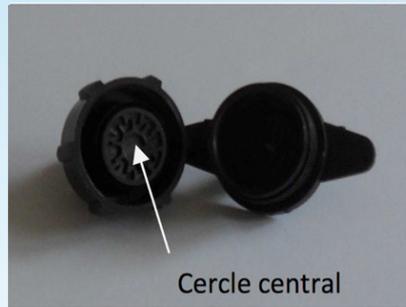


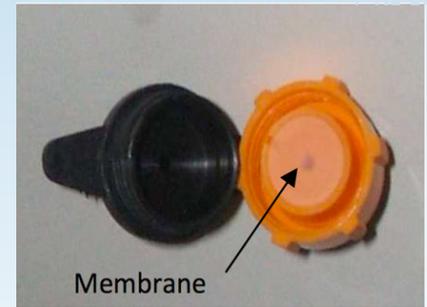
Figure 5 : représentation schématique du dispositif expérimental (test des matériels d'irrigation).



NPC2



NPC4



PC2

Figure 6 : détail des goutteurs utilisés.

sés. Les paramètres suivants sont ensuite mesurés : pH, conductivité et concentrations des éléments suivants : NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} . Le stock d'urine utilisée pour la fertilisation a été analysé de la même manière avant le début des expérimentations.

En début d'expérience, une analyse granulométrique et physico-chimique des sols a été réalisée ; la conductivité des sols a aussi été mesurée. En fin d'expérience, des analyses ont permis de déterminer la variation de la teneur en sels du sol ainsi que les reliquats azotés. Ces analyses ont été menées à quatre horizons différents (0-15cm, 15-30cm, 30-45cm, 45-60cm).

2.6. METHODES ANALYTIQUES

2.6.1. pH, conductivité et ions de l'urine

La conductivité électrique, le pH et la température des échantillons ont été mesurés avec un conductimètre portable.

Avant leur analyse, les échantillons ont été stockés au réfrigérateur (env. 6°). Avant chaque analyse, les échantillons ont été filtrés avec un système de filtration à mem-

brane (taille de pores 0,45 μm). Les concentrations en éléments dans l'urine ont été mesurées avec un spectrophotomètre portable Hach Lange DR1900. Les méthodes suivantes ont été utilisées :

- Phosphates PO_4^{3-} : méthode Molybdovanadate.
- Ammoniac NH_3 et azote ammoniacal NH_4 : méthode Salicylate.

2.6.2. Salinité

La salinité du sol a été directement déterminée à partir de la conductivité électrique des échantillons de sol. Cette dernière a été obtenue à partir d'une méthode électrométrique sur une solution extraite du sol (Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec 2015).

2.6.3. Masse des végétaux

Après avoir été récoltés, les végétaux sont directement pesés avec une balance de précision. Ils sont ensuite séchés à 80°C durant 24 heures dans un four puis repesés afin d'obtenir leur masse sèche.

2.6.4. Mesures des débits

La mesure des débits des goutteurs a été réalisée avec un bécher gradué de 1 litre et un chronomètre. Après un temps fixe écoulé, le bécher est pesé avec une balance (Mettler, PM6000), déduction faite de la tare. L'urine pesée est ensuite reversée dans le circuit. La densité de l'urine variant entre le début et la fin de l'expérience (de 1,02 à 1,09), les débits ont été corrigés selon une évolution de la densité considérée linéaire.

2.6.5. Analyses au microscope

En fin d'expérience, le goutteur est analysé sous microscope optique (Olympia, BX43) avec un grossissement final de x20 et x40. La localisation et la consistance des éventuels dépôts sont ainsi étudiés.

2.6.6. Laboratoires mandatés

Les analyses de pathogènes et de micropolluants ont été externalisées. Les laboratoires suivants ont été mandatés pour effectuer les analyses :

- Pathogènes : Laboratoire d'analyses environnementales et alimentaires ABIOLAB, basé à Montbonnot-Saint-Martin (38)

- Micropolluants : Laboratoire de Toxicologie et de Bioanalyse (LTB), basé à Narbonne (11)
- Sol : laboratoire Aurea – Agrosociences, basé à La Membrolle s/ Choisille (37).

Tableau 1 : caractéristiques de culture du paturin des prés et des épinards.

	Pâturin	epinard
Cycle de culture (mois)	2 à 3	2 à 2,5
Besoins en azote (kg N/ha)	140 à 280	220

Tableau 2 : Goutteurs sélectionnés, caractéristiques et temps de gouttage journalier.

Nom	Régulation	Débit à 1 bar (L/h)	Durée de gouttage journalier (h)	Qté d'urine débitée par jour (L)
PC ₂	Auto-régulant	2	2	4
NPC ₂	Non auto-régulant	2	2	4
NPC ₄	Non auto-régulant	4	1	4

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION



3.1. ANALYSE DE L'URINE

3.1.1. Caractéristiques

Une série d'analyses a été réalisée sur les urines fraîches utilisées pour les travaux. Les caractéristiques moyennes de ces dernières sont données dans le tableau 3. La valeur de pH est similaire à celle trouvée dans la littérature et suppose que l'urée a été hydrolysée. Les concentrations correspondent elles aussi aux valeurs fréquemment trouvées au sein de publication de référence (Maurer, Pronk, and Larsen 2006).

3.1.2. Pathogènes

Dans l'ouvrage de référence publié par l'OMS sur le sujet (Organisation mondiale de la Santé 2012), un stockage de 6 mois à 20°C suffit à l'inactivation de la plupart des organismes d'origine fécale. Des analyses de pathogènes ont été menées afin de quantifier la présence

de microorganismes fécaux et leur abattement au cours du temps.

Le stockage de l'urine a été réalisé en extérieur durant 7,5 mois entre août 2016 et mars 2017. Les résultats sont donnés ci-après (tableau 4).

L'analyse d'urine réalisée avant stockage a mis en avant une contamination d'origine fécale importante. Les analyses après stockage montrent un abattement de plus de 4 log pour les Coliformes totaux et les Spores de bactéries anaérobies sulfitoréductrices ; et de plus de 8 log pour les *Escherichia coli* et les Entérocoques. La survie de ces microorganismes dépend fortement des conditions de stockage. Ce fort abattement peut être dû à la fois aux valeurs élevées de pH, température et concentration ammoniacale (Schönning and Stenström 2004). Le stockage ayant été réalisé dans une cuve translucide, l'impact des radiations U.V. a lui aussi été probablement conséquent.

3.2. EXPERIENCE 1 : CULTURES HORS-SOL

3.2.1. Plantes

Les photos montrant l'évolution de la croissance des plantes, visibles ci-dessous en figure 7, démontrent de nouveau le pouvoir fertilisant de l'urine. Le développement des épinards fertilisés avec la dose 2 (D2) est sensiblement supérieur aux autres bacs. Visuellement, aucune carence ou signe de sur-fertilisation n'a été remarqué sur les végétaux. Les masses humides

et sèches des parties comestibles des épinards (E) sont détaillées en Figure 8. On peut noter un fort gain de croissance pour les épinards fertilisés avec la dose 2 (D2 : 510 kg N/ha) mais qui n'est pas proportionnel à l'apport d'azote. Leur masse sèche est 1,6 fois supérieure à ceux fertilisés avec la dose 1 (D1 : 170 kg N/ha). Aussi, pour une fertilisation similaire de 170 kg N/ha (D1 et F), la matière sèche des végétaux fertilisés à l'urine est 1,5 fois supérieure à celle des végétaux fertilisés avec l'engrais universel commercial.

Ce résultat laisse supposer une meilleure bio-disponibilité de l'azote et du phosphore au sein de l'urine. En effet, les éléments nutritifs au sein de l'engrais commercial sont seulement assimilables suites à des transformations au sein du sol. Des essais sur un temps plus long et sur plusieurs cycles de cultures permettrait de renforcer les conclusions. Les tendances observées lors des pesées des masses humides sont les mêmes avec les masses sèches, le type de fertilisation n'a donc pas d'effet sur le stockage de l'eau au sein des plantes.

3.2.2. Lixiviats

A quatre dates (3 avril, 10 avril, 3 mai et 14 mai) durant la croissance des plantes, la totalité des lixiviats provenant de chaque bac a été quantifiée et analysée (pH, conductivité, concentration en NH_4^+ , NO_3^- et PO_4^{3-}). A partir des volumes récoltés et des concentrations mesurées, la masse lessivée des différents éléments a été calculée (masse (mg)=concentration (mg/l)

Tableau 3 : caractéristiques de culture du paturin des prés et des épinards.

	pH	Conductivité (mS/cm)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NH ₃ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)
Urine de trône	9,16	29,9	32	2300	820	2650

× volume (l)).

Aucun lixiviat n'a pu être récupéré du bac d'épinards fertilisé à 510 kg N/ha (D2-S1E). Cela est dû à leur important besoin hydrique du fait de l'importance du développement végétal et du stockage d'eau que cela induit. La masse totale des éléments au sein des lixiviats des différents bacs est représentée dans les figures ci-après (figure 10 et 11).

On peut noter que la grande majorité de la fraction azotée des lixiviats (85% pour NH₃ et NH₄⁺, 70% pour NO₃⁻) a été récolté durant la dernière prise d'échantillon, alors que la croissance des plantes était terminée. La quantité d'azote ammoniacal au sein des lixiviats est faible comparée à la quantité de nitrates, l'azote apporté a donc été correctement minéralisé.

La dernière prise d'échantillon est intervenue une fois la croissance des épinards terminée et la montaison bien entamée. La grande quantité de nitrates présents dans les lixiviats (Figure 10) en fin de

croissance pour la dose 2 montre que les dernières fertilisations ont été excessives par rapport aux besoins de la plante et aux capacités de rétention du sol.

On remarque aussi que le sol ayant la plus grande conductivité hydraulique (S2) contribue à une plus forte lixiviation des éléments azotés et une plus faible minéralisation de l'azote ammoniacal.

Sur la masse totale de phosphore récoltée dans les lixiviats, 60% ont été récoltés durant le dernier échantillonnage (figure 11). Si les éléments azotés sont clairement en excès en fin de culture avec la dose 2 (D2), les éléments phosphorés apparaissent au sein des lixiviats dès la première prise d'échantillon. Cela peut s'expliquer par la nécessité d'un temps plus long pour permettre une fixation dans le sol qui en règle générale est assez efficace, au-delà du fait que les besoins en phosphate (PO₄³⁻) sont les plus élevés lors des phases de fécondation et fructification, intervenant en fin de culture pour

les épinards.

3.2.2.1 Reliquats azotés

L'analyse des reliquats azotés a été effectuée à deux horizons H1 et H2, respectivement 0 – 30 cm et 30 – 60 cm au sein des différents bacs. L'analyse a été effectuée avant le début et à la fin de l'expérimentation. Ces analyses permettent de déterminer l'azote minéral non consommé par les plantes et donc disponible dans le sol.

Dans toutes les configurations, la majeure partie des reliquats azotés est sous forme nitrique (NO₃⁻). Cela confirme bien les processus de minéralisation décrit lors de l'analyse des lixiviats. La quantité de reliquats est sensiblement plus conséquente au sein des sols fertilisés avec la dose 2 (D2 : 510 kg N/ha), notamment au sein des bacs avec les épinards (E).

A titre d'exemple, en fin de culture, l'azote minéral (NO₃⁻ & NH₄⁺) accessible pour la culture au sein du bac avec le paturin (D2-S1P), cal-

Tableau 4 : abattement des pathogènes au sein de l'urine stockée

	Unité	Avant stockage	Après stockage
Coliformes totaux	UFC/100ml	>15 000	<1
E. Coli (NPP)	NPP dans 100 ml	>83 000 000	23 981
Entérocoques (NPP)	NPP dans 100 ml	>83 000 000	23 981
Spoires de bactéries anaérobies sulfitoréductrices	UFC / 100 ml	>15 000	2

culée par le laboratoire d'analyses en fonction de l'épaisseur des horizons, de la densité apparente et de la pierrosité, est de 439 kg N / ha. Comparées à la dose de fertilisation, et au reliquat de début d'expérimentation, ces réserves d'azote minéral sont conséquentes et sont le signe d'une surdose d'azote due à la forte ferti-lisation.

On remarque dans le sol reconstitué (Sol 2 - S2) une masse de reliquats azotés plus faible que pour le sol 1. Cela confirme, pour une croissance végétale similaire à dose égale et donc une utilisation des éléments fertilisants supposée proche, une lixiviation plus conséquente. Aussi, la quantité de reliquats est plus importante au sein des premières couches de sol.

3.2.3. Bilan sur l'azote

A partir des analyses réalisées, un bilan peut être effectué sur l'azote minéral. Le bilan représenté en figure 9 est celui de bac de pâturin des prés fertilisé à la dose 2 (D2-S1P) :

- Fertilisation : 510 N/ha
- Lixiviats : azote nitrique 550 mg/m², azote ammoniacal total 105 mg/m² soit 6,5 kg N/ha
- Reliquats : azote minéral 439 kg N/ha

Sans compter les infime reliquats azotés initiaux et les pertes par volatilisation difficilement estimables, la part d'azote exportée par les plantes serait donc de : 65 kg N/ha. Cette valeur est plutôt faible en com-parison avec le taux d'exportation moyen d'un gazon



Figure 7 : progression de la croissance des épinards (28 mars, 28 avril et 15 mai de haut en bas respectivement). Pour les deux dernières photos, il s'agit des traitement D2, D1 et F (dose d'azote décroissante) dans les bacs de gauche à droite respectivement.

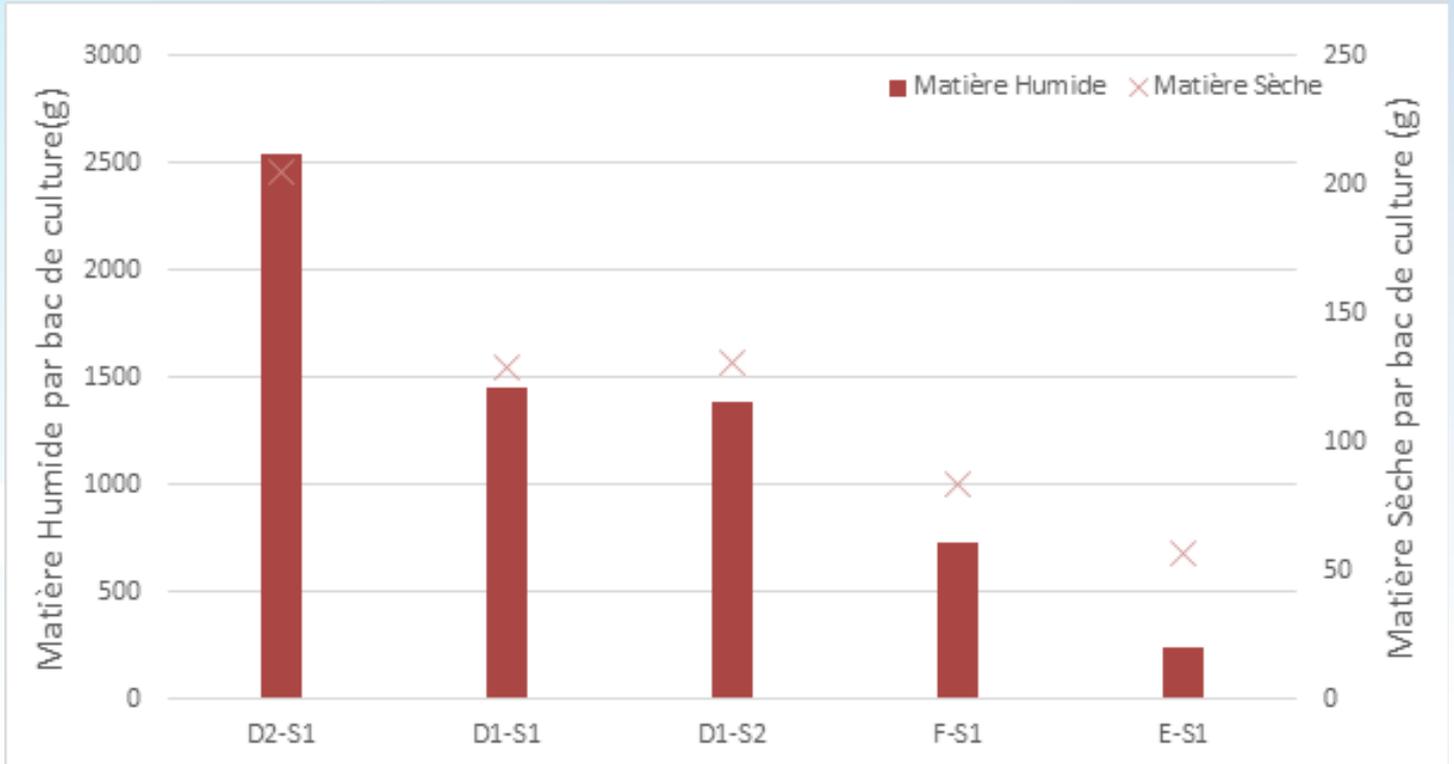


Figure 8 : masse humide et sèche des épinards (e) en fonction des doses de fertilisation. D2-S1 : dose 2 (510 kg N/ha), sol 1 ; D1-S1 : dose 1 (170 kg N/ha), sol 1 ; D1-S2 : dose 1 (170 kg N/ha), sol 2 ; F-S1 : dose 1 (170 kg N/ha) fertilisant commercial, sol 1 ; E-S1 : eau seulement (0 kg N/ha), sol 1.

similaire (ray-grass italien) : 90 kg N/ha, d'après le COMIFER, Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée.

3.2.3.1. Micropolluants

La présence de résidus pharmaceutiques au sein de l'urine stockée ainsi que deux types de lixiviats a été analysée. Ces derniers soulèvent de nombreuses questions quant à leur devenir lors de la réutilisation de l'urine, en particulier pour leurs impacts potentiels sur l'environnement et la santé publique. Ces molécules ont été choisies car couramment étudiées dans les travaux de suivi des micropolluants. Les résultats des analyses sont détaillés dans le tableau 5.

Ces chiffres peuvent être mis en perspective des concentrations

relevées dans d'autres eaux. Par exemple, (Bazard 2011), compilant les résultats de plusieurs études, a estimé une concentration moyenne dans des eaux de surface et l'eau potable de, respectivement, 132 ng/L et 30 ng/L pour la carbamazépine.

En effet, une station d'épuration classique de type biologique n'élimine que 70 à 80% des produits pharmaceutiques présents dans les effluents.

Les risques liés à la présence d'hormones, résidus pharmaceutiques ou encore métaux lourds doivent être aussi mis en perspective par rapport aux quantités trouvées au sein des produits résiduaux organiques couramment utilisés comme les lisiers, fumiers et boues (Richert et al. 2011, Jönsson et al.

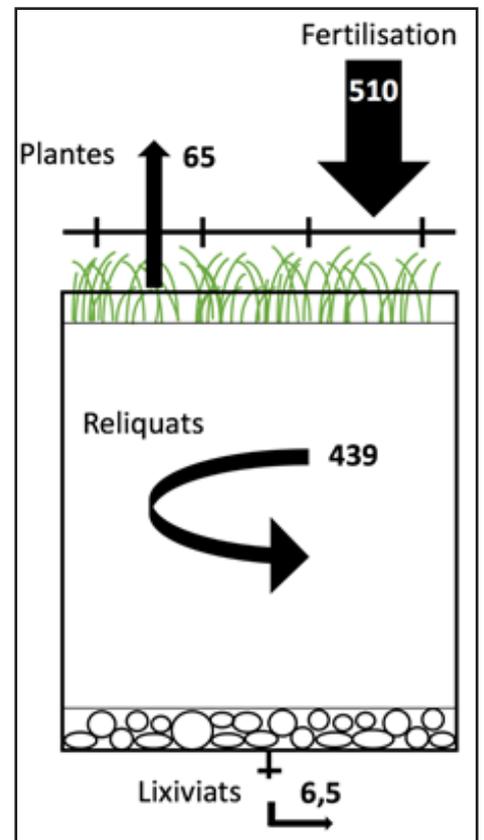


Figure 9 : Bilan sur l'azote dans les différents compartiments.

Tableau 5 : résultats des analyses micropolluants. Le seuil de détection des appareils est situé à 10 ng/mL.

	Carbamazépine	10,11-carbamazépine époxyde	Diclofénac
Urine stockée	3,75 ng/ml	<10 ng/ml	<10 ng/ml
Lixiviat D1-S1P	<10 ng/ml	<10 ng/ml	<10 ng/ml
Lixiviat D2-S1P	<10 ng/ml	<10 ng/ml	<10 ng/ml

1997). Par exemple, des études ont confirmé des risques plus élevés par l'application de fumier que d'urine humaine (Hammer and Clemens 2007).

A ce jour, la présence de résidus médicamenteux n'est pas prise en compte dans la Directive Européenne n°98/83/CE du 03/11/1998 définissant les critères d'eau propre à la consommation humaine. Aussi, aucune substance pharmaceutique n'est présente dans la liste des substances prioritaires et dangereuses de l'article 3 de l'arrêté du 7 septembre 2015 tiré de la réglementation R.212-9 du Code de l'environnement. Il n'y a donc aucune obligation légale quant aux seuils à respecter relatifs à la présence de micropolluants au sein de l'urine. Le comportement des micropolluants dans les sols sont régis par des interactions complexes dépendant fortement des caractéristiques de ces derniers (pH, teneur en matière organique, structure...) (Martins 2008). De plus, les résidus pharmaceutiques ont peu d'effets phytotoxiques pour le moment démontrés sur les plantes.

Aussi, à ce jour, aucune étude n'a été réalisée afin d'analyser les risques d'accumulation des micropolluants. Pour mettre en évidence les effets éventuels du sol (dégradation, fixation), il faudrait tra-

vailer sur des durées plus longues et avec des concentrations plus fortes, ou du moins détectables.

3.2.4 Sol

3.2.4.1. Salinité

Par sa forte concentration en sels, l'application d'urine peut conduire à une salinisation des sols. La conductivité des sols au sein des bacs contenant les épinards (E) a été mesurée pour les différents types de fertilisation. Des prélèvements ont été réalisés à quatre horizons : 0 – 15 cm, 15 – 30 cm, 30 – 45 cm et 45 – 60 cm, dans les zones d'influence des goutteurs (figure 14). L'urine à une conductivité moyenne de 33500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'eau utilisée a une conductivité moyenne de 165 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Avant la fertilisation, les sols S1 et S2 avaient respectivement une conductivité de 161 et 143 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Suite à la fertilisation à la dose 2 (D2-S1 : 510 kg N/ha), la conductivité moyenne sur les différentes profondeurs est de 276 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la conductivité maximale de 343 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est relevée à la surface du sol, signe de forte accumulation des sels. Cependant, cette valeur maximale reste bien inférieure à la limite de classification des sols dits salins (3 dS/m soit 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

L'augmentation de la conducti-

tivité est plus faible avec la dose 1 (D1 : 170 kg N/ha) : 173 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en moyenne pour le sol 1, 163 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le sol 2. Pour les deux sols, la plus forte augmentation de la conductivité est localisée dans le second horizon. Cet horizon correspond à la zone où une grande majorité des prélèvements d'eau ont été effectués du fait de la densité des racines.

A la différence des lixiviats azotés, les sels semblent ici avoir été d'avantage lessivés avec le sol 2. On peut voir que la fertilisation avec le fertilisant commercial augmente de manière faible la conductivité à la surface du sol et n'a plus d'effet pour l'horizon le plus profond. La réponse de la majorité des plantes au stress osmotique est un ralentissement de la croissance, et à partir d'un certain niveau une diminution de productivité (Maas and Grattan 1999). Cependant, les réactions varient grandement d'une espèce à une autre.

3.3. EXPERIENCE 2 : DURABILITE DES SYSTEMES D'IRRIGATION

3.3.1. Evolution des débits

Chaque semaine, les débits de tous les goutteurs ont été mesurés. Du fait de l'évaporation de l'urine, sa densité a augmenté au cours de l'expérience. Les débits mesurés

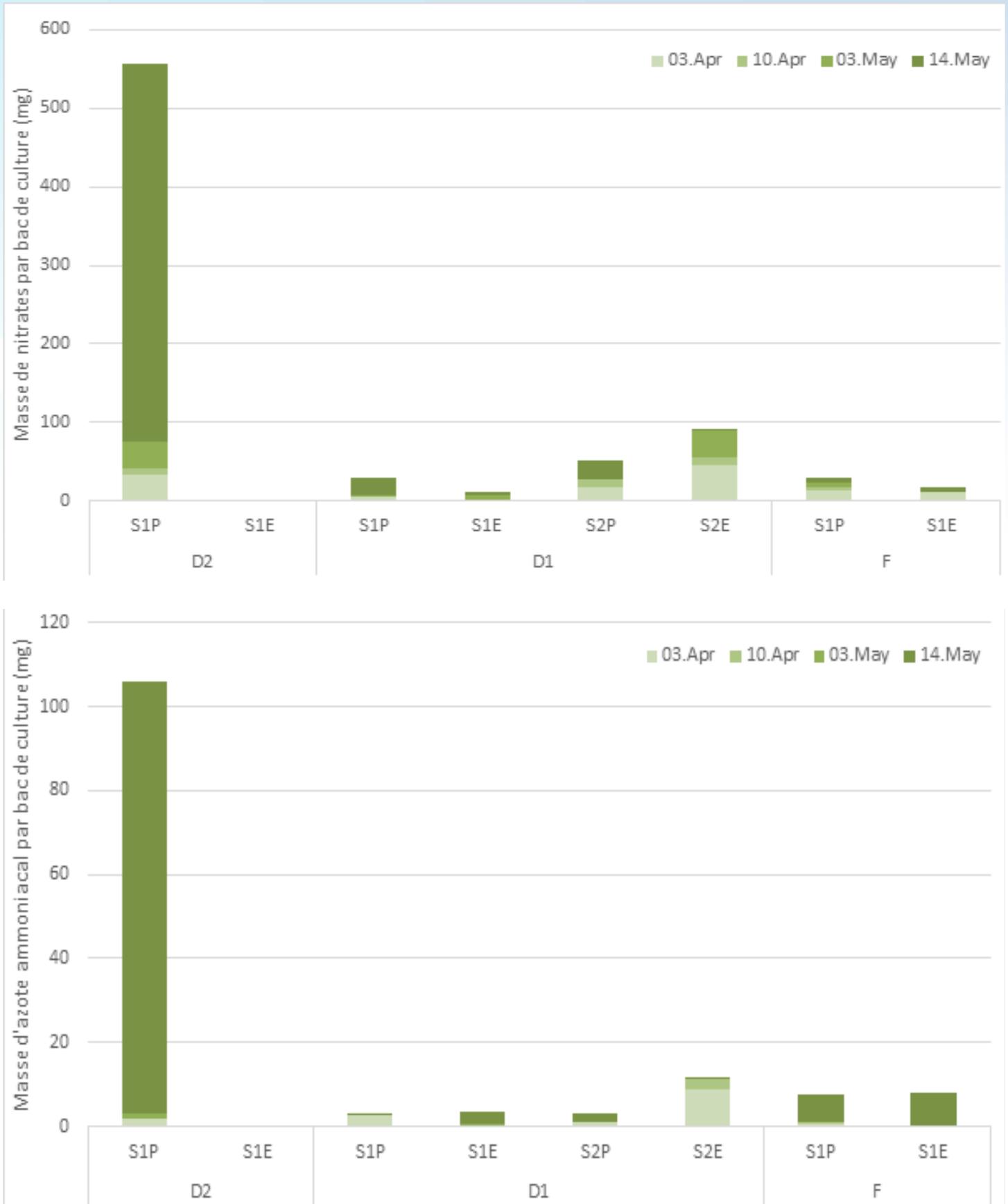


Figure 10 : haut = quantité de nitrates (NO₃⁻) récoltés au sein des lixiviats. Bas = quantité d'azote ammoniacal (NH₄⁺ et NH₃) récoltés au sein des lixiviats. D2 = 510 kg N/ha, D1 = 170 kg N/ha, S1 = sol 1, S2 = sol 2. Les suffixes E et P représentent les épinards et le patûrin respectivement.

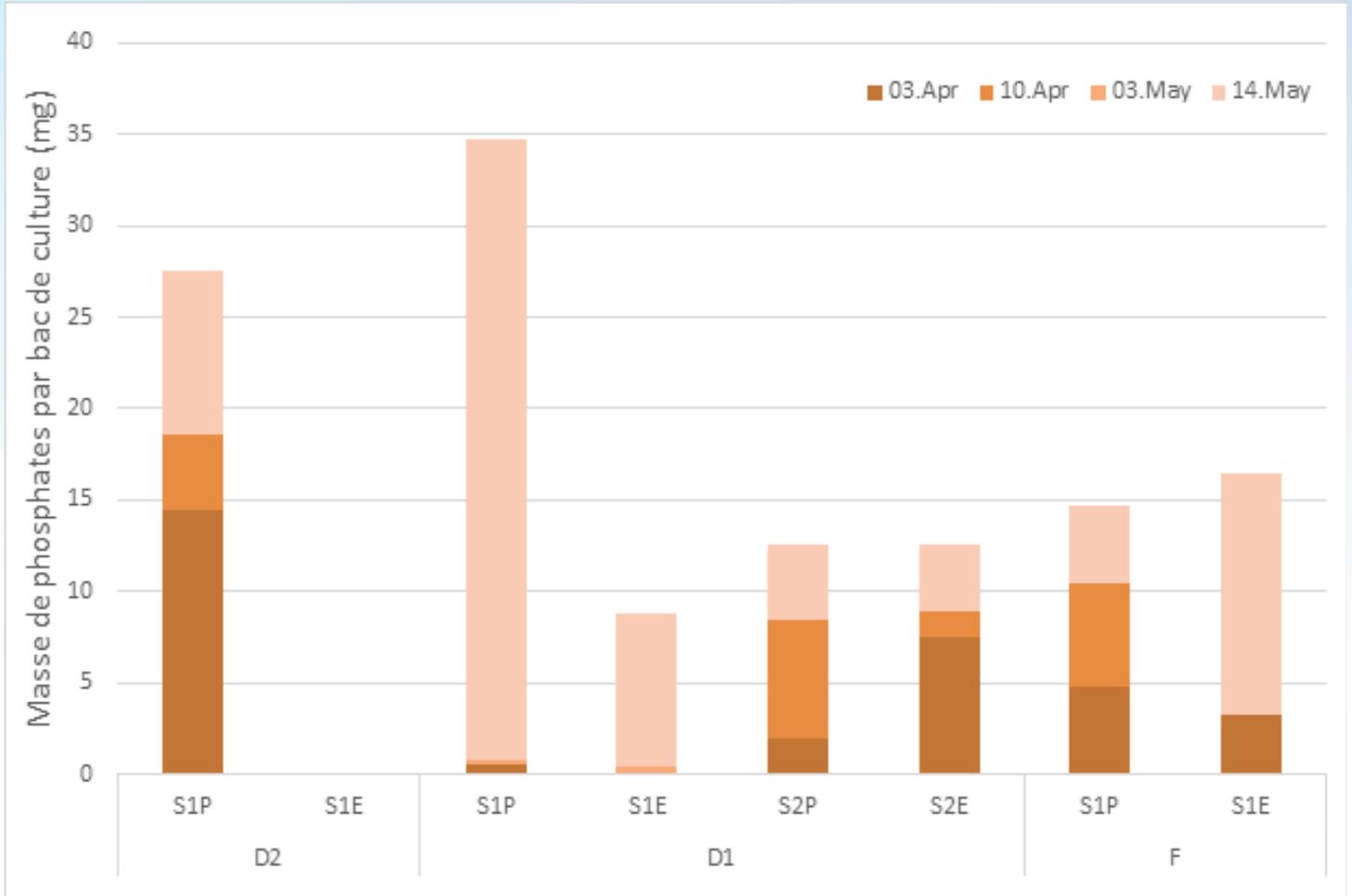


Figure 11 : quantité de phosphate (PO_4^{3-}) récoltée au sein des lixiviats. D2 = 510 kg N/ha, D1 = 170 kg N/ha, S1 = sol 1, S2 = sol 2. Les suffixes E et P représentent les épinards et le patûrin respectivement.

ont alors été corrigés selon une variation supposée linéaire de la densité.

Pour chaque ligne de goutteurs, une moyenne de tous les débits mesurés a été réalisée tous les 10 jours sur toute la durée de l'expérience. Les graphiques ci-après montrent l'évolution de ces débits moyens (figure 13). Lorsqu'un goutteur est totalement obstrué, le débit est compté comme nul pour le calcul de la moyenne. Ces débits nuls n'ont par contre pas été pris en compte dans les calculs d'écart-types. Les chiffres en partie supérieure des graphiques correspondent au nombre de goutteurs colmatés. La ligne horizontale montre le débit nominal à une

pression de 1 bar. Les barres verticales représentent l'écart-type calculé pour les débits mesurés.

Pour deux des quatre goutteurs testés, il a pu être remarqué que les débits stipulés par le constructeur différaient sensiblement des débits mesurés par plusieurs essais.

Durant une première phase, pour tous les goutteurs, le débit a tendance à dépasser le débit initial d'environ 5% en moyenne. Ce phénomène a été précédemment justifié (Gutierrez et al. 2015) par un lissage des aspérités des parois par les particules déposées au sein des goutteurs.

On peut noter que des premiers

goutteurs sont obstrués à partir de la 9ème semaine d'expérimentation. La chute du débit moyen est ensuite continue pour atteindre une baisse de près de 20% en fin d'expérimentation. Ce type de goutteur est donc fortement sensible au colmatage dans les présentes conditions d'utilisation.

Après plusieurs tests on remarque que le débit nominal est sensiblement supérieur aux données constructeur (2,3 l/h au lieu de 2 l/h). Contrairement aux autres goutteurs de même type étudiés (PC2 et NPC4), le débit moyen est stationnaire tout au long de l'étude. Cela s'explique notamment par le fait qu'aucun goutteur n'a été colmaté durant l'expérimentation.

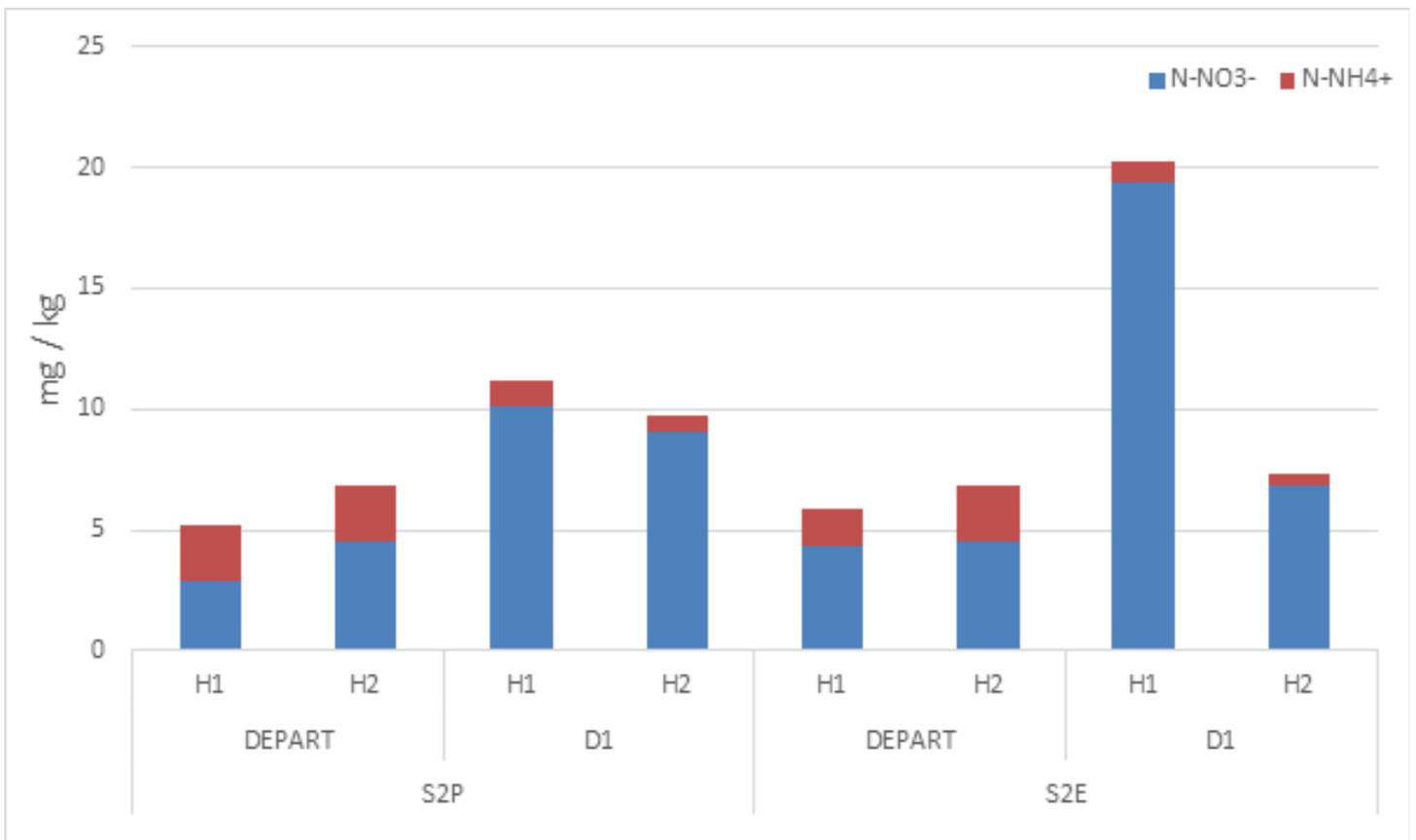
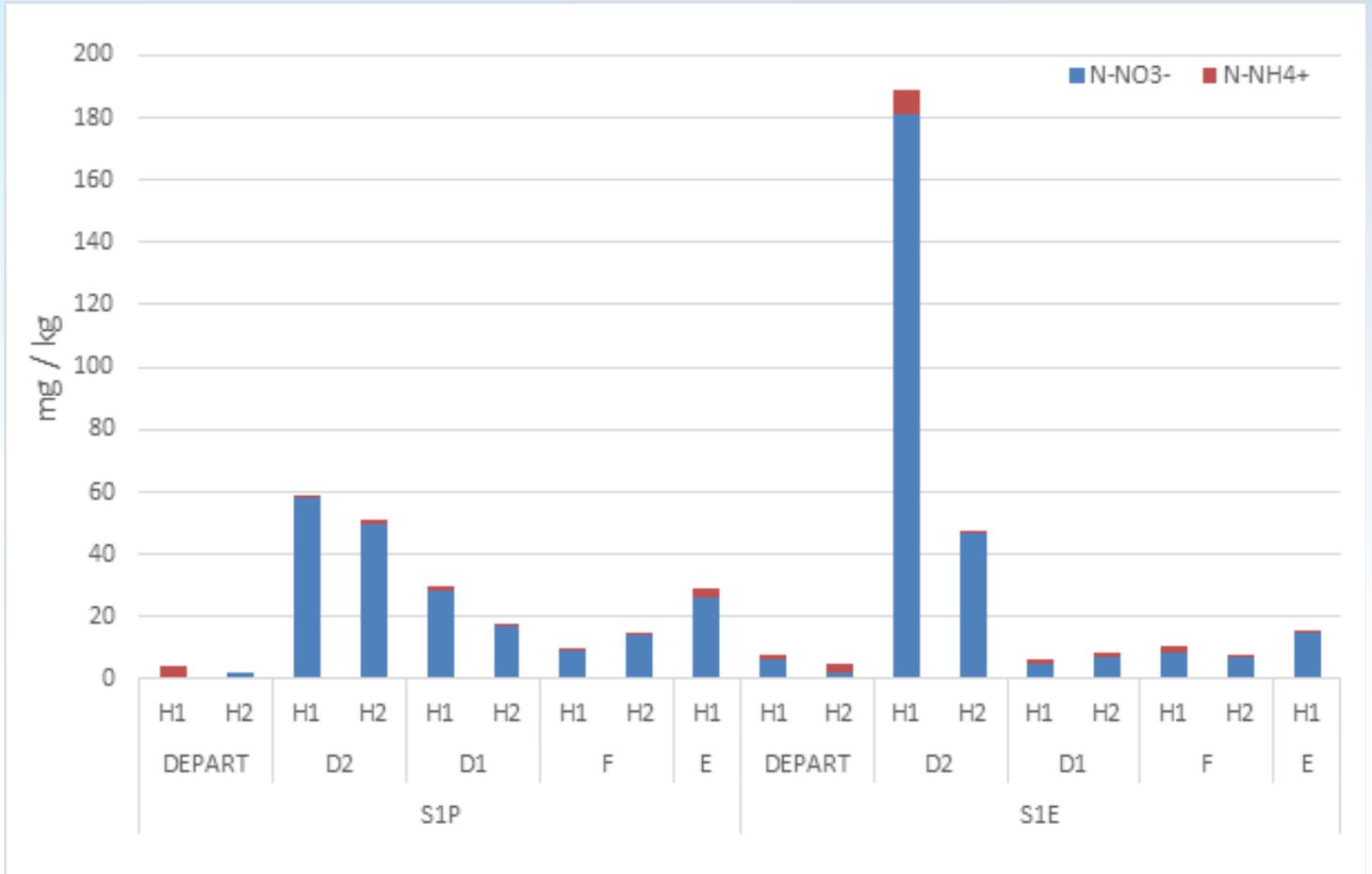


Figure 12 : reliquats azotés (NO₃⁻ et NH₄⁺) au sein du sol 1 (haut) et du sol 2 (bas) à deux horizons différents (H1 et H2). DEPART = quantité d'azote du sol avant le début de l'expérience, D2 = 510 kg N/ha urine, D1 = 170 kg N/ha urine, F = 170 kg N/ha fertilisant, E = 0 kg N/ha (eau).

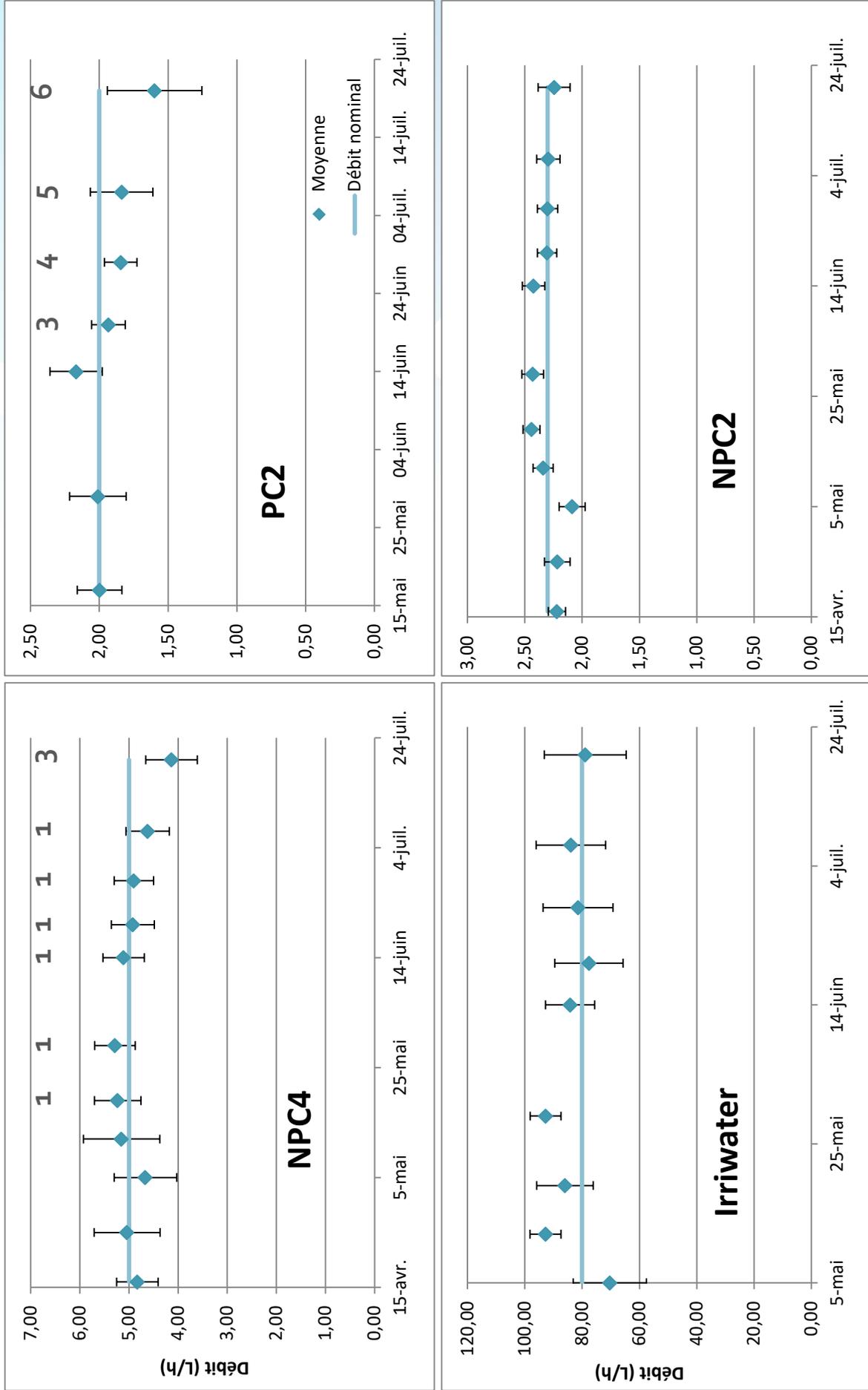


Figure 13 : évolution des débits moyens des goutteurs pour chaque type de système avec leurs écart-types (n=20). Les lignes horizontales représentent les débits nominiaux pour chaque type de goutteur. Les chiffres au-dessus des graphiques représentent le nombre de goutteurs complètement colmatés sur la ligne.

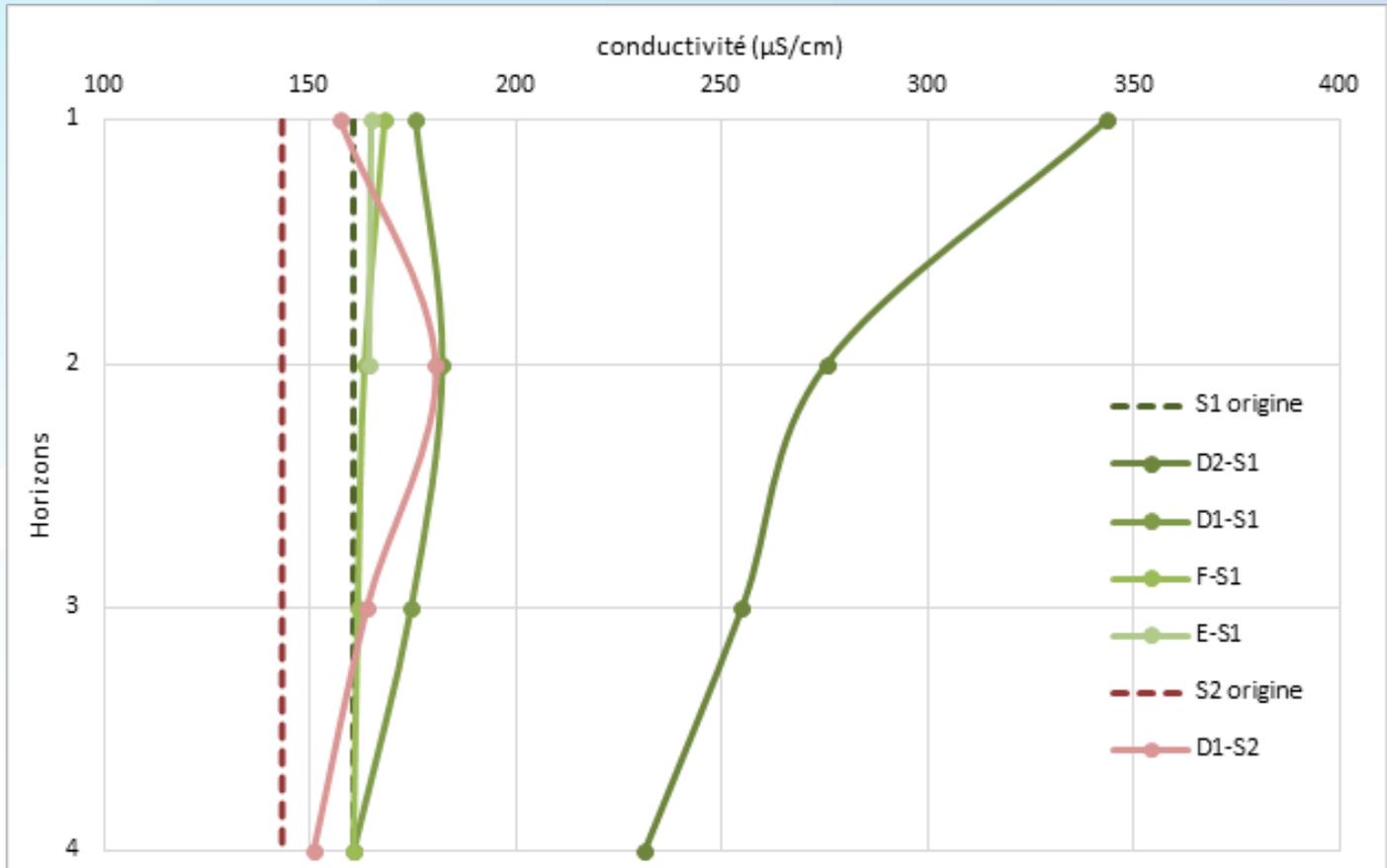


Figure 14 : impact de la fertilisation sur la conductivité du sol à 4 horizons (15, 30, 45 et 60cm pour les horizons de 1 à 4 respectivement). D2 = 510 kg N/ha urine, D1 = 170 kg N/ha urine, F = 170 N/ha fertilisant, E = 0 kg N/ha (eau), S1 = sol 1, S2 = sol 2.

Il peut donc être supposé que ces goutteurs soient peu sensibles au colmatage lors d'utilisation d'urine.

On peut remarquer que la variation des débits moyens présentés figure 13 est très faible durant toute l'expérimentation. Suite aux tests réalisées, il semblerait que les goutteurs de type Irriwat (Bancilhon, diamètre 1,4 mm, voir Figure 13), utilisés en irrigation goutte à goutte enterrée, ne soient pas sensibles au colmatage lors de leur utilisation avec de l'urine. Cela peut s'expliquer par la simplicité de l'équipement ainsi que sa conséquente section de passage du fluide (1,4 mm de diamètre).

Avec un plus grand nombre de goutteurs colmatés, on peut noter

que les goutteurs autorégulant sont les plus sensibles au colmatage, confirmant de précédents travaux menés (Gutierrez et al. 2015).

Par contre, contrairement à des résultats détaillés dans ces mêmes travaux, les goutteurs NPC2 paraissent moins sensibles au colmatage sur que les goutteurs NPC4.

Il apparaît que les goutteurs PC2 colmatés sont ceux en fin de ligne de d'irrigation. Une baisse de pression due aux pertes de charge le long de la ligne peut expliquer la plus forte propension au colmatage. Ces présents résultats restent à nuancer par des écarts-types et donc une hétérogénéité des mesures consécutives sur une

même ligne à une même date .

3.3.2. Colmatage

A la fin de l'expérimentation, tous les goutteurs ont été ouverts puis observés au microscope optique. Les figures ci-après permettent d'appréhender les différents types de colmatages obtenus au sein des goutteurs (figures 15 à 18). Seules les photos des goutteurs ayant un signe significatif de colmatage ont été inclus dans ces figures.

A gauche des figures sont présentes les courbes de débit pour chaque goutteur, en fonction de la durée de l'expérimentation (jours). Pour rappel, les goutteurs PC (Pressure-Compensating) contiennent une membrane afin d'obtenir un

débit indépendant de la pression de fonctionnement. On peut observer que cette membrane est à la fois le siège de développement de biofilm, de dépôt de matière en suspension (MES) et de précipités ayant cristallisés. Sur les goutteurs ayant été totalement colmatés en fin d'expérience, des poils pubiens ainsi que des grains de sable, en cohérence avec la provenance de l'urine (plages privatives),

Une baisse peu significative du débit a été observée sur le suivi des goutteurs NPC2. Néanmoins, on peut remarquer des dépôts conséquents au sein des labyrinthes. Ces dépôts sont principalement des amas de matières en suspensions d'aspect muqueux et de couleur noire. Là aussi, à la fois une cristallisation minérale, un développement de biofilm et de nombreux poils pubiens sont dénombrés.

Une légère baisse de débit a été observée pour les goutteurs NPC4 et seulement 3 d'entre eux s'étaient colmatés. Comme au sein des goutteurs précédents, on remarque en d'importantes agglomérations de grains de sable, des poils pubiens ainsi que des résidus minéraux témoins d'une cristallisation.

La section de passage du fluide étant plus conséquente au sein des goutteurs en laiton de type Irriwater, un colmatage moindre est observé. Des signes de cristallisation sont aperçus majoritairement en entrée du goutteur, les sorties étant quasiment intactes. On peut noter que l'élément constitutif du goutteur (laiton) semble être altéré par l'urine.

L'observation de goutteurs au microscope a permis de mettre

en avant un colmatage principalement dû aux grains de sable, à la cristallisation de minéraux et à la présence de poils pubiens au sein de l'urine. Une filtration plus fine que celle mise en place (130 µm) permettrait de réduire fortement ces risques de colmatage.



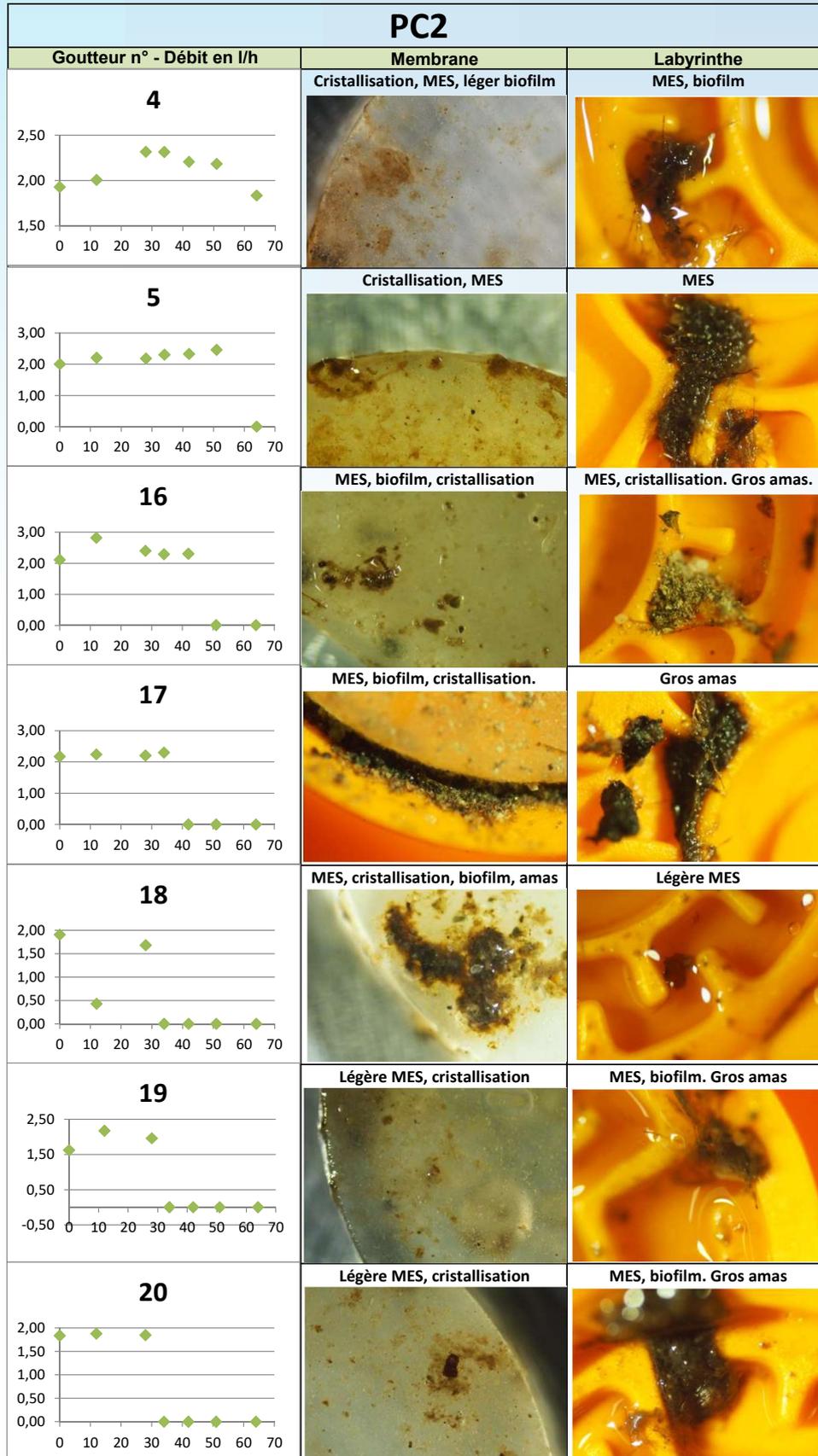


Figure 15 : observation au microscope des goutteurs de type PC2. L'évolution du débit pour chaque position est représentée en graphique à gauche.

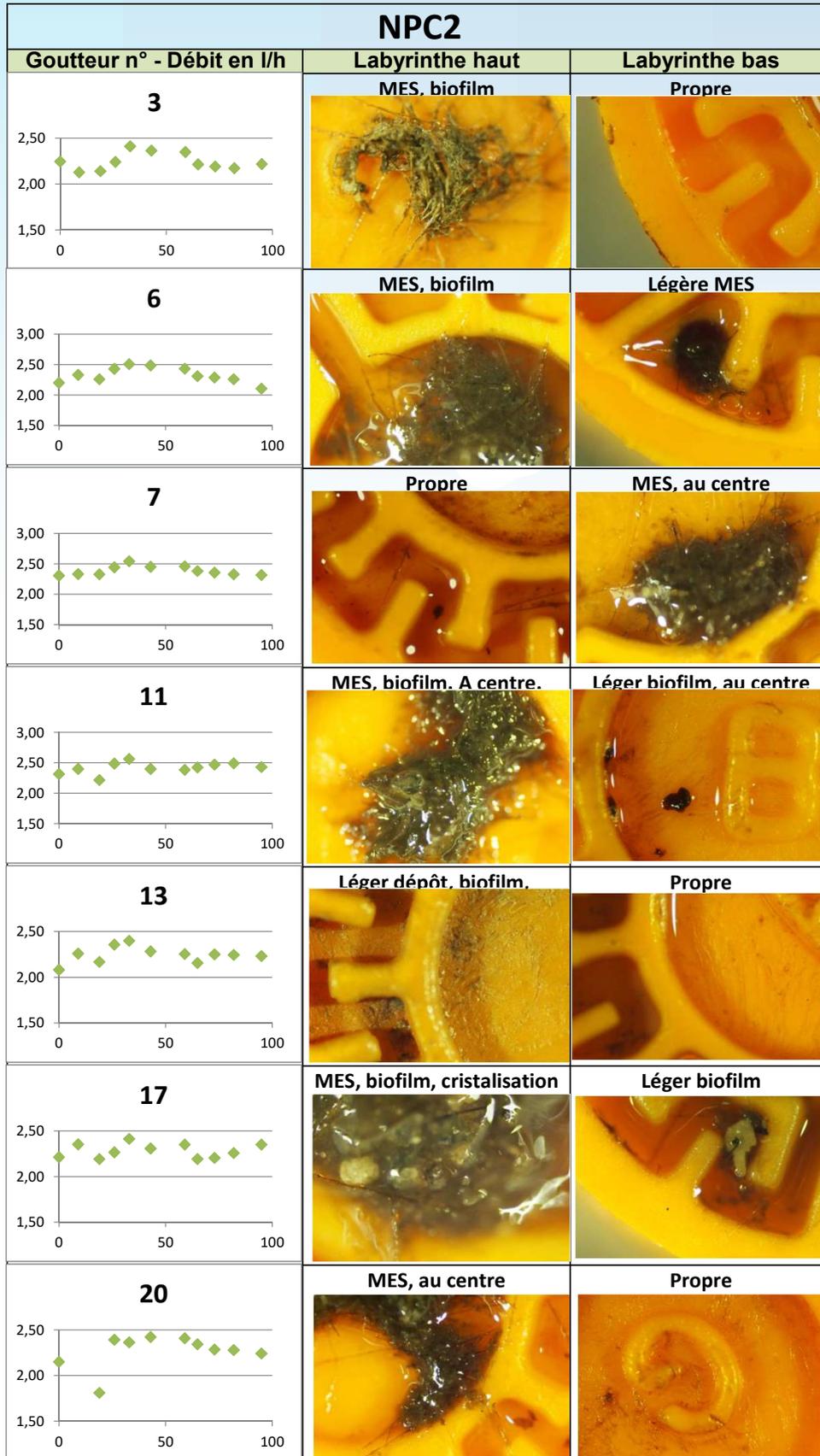


Figure 16 : observation au microscope des goutteurs de type NPC2. L'évolution du débit pour chaque position est représentée en graphique à gauche

NPC4			
Goutteur n° - Débit en l/h	Labyrinthe haut	Labyrinthe bas	Sortie
1 	Légère cristallisation 	Propre 	Propre
3 	Légère MES 	Propre 	Propre
4 	Propre 	Propre 	Cristallisation
6 	Propre 	Propre 	Légère cristallisation
7 	Légère cristallisation 	Propre 	Partiellement obstrué
8 	MES, à l'entrée, biofilm 	Propre 	Propre
10 	Cristallisation, à l'entrée 	Propre 	Cristallisation dans le labyrinthe
20 	Propre 	Propre 	Propre

Figure 17 : observation au microscope des goutteurs de type NPC4. L'évolution du débit pour chaque position est représentée en graphique à gauche

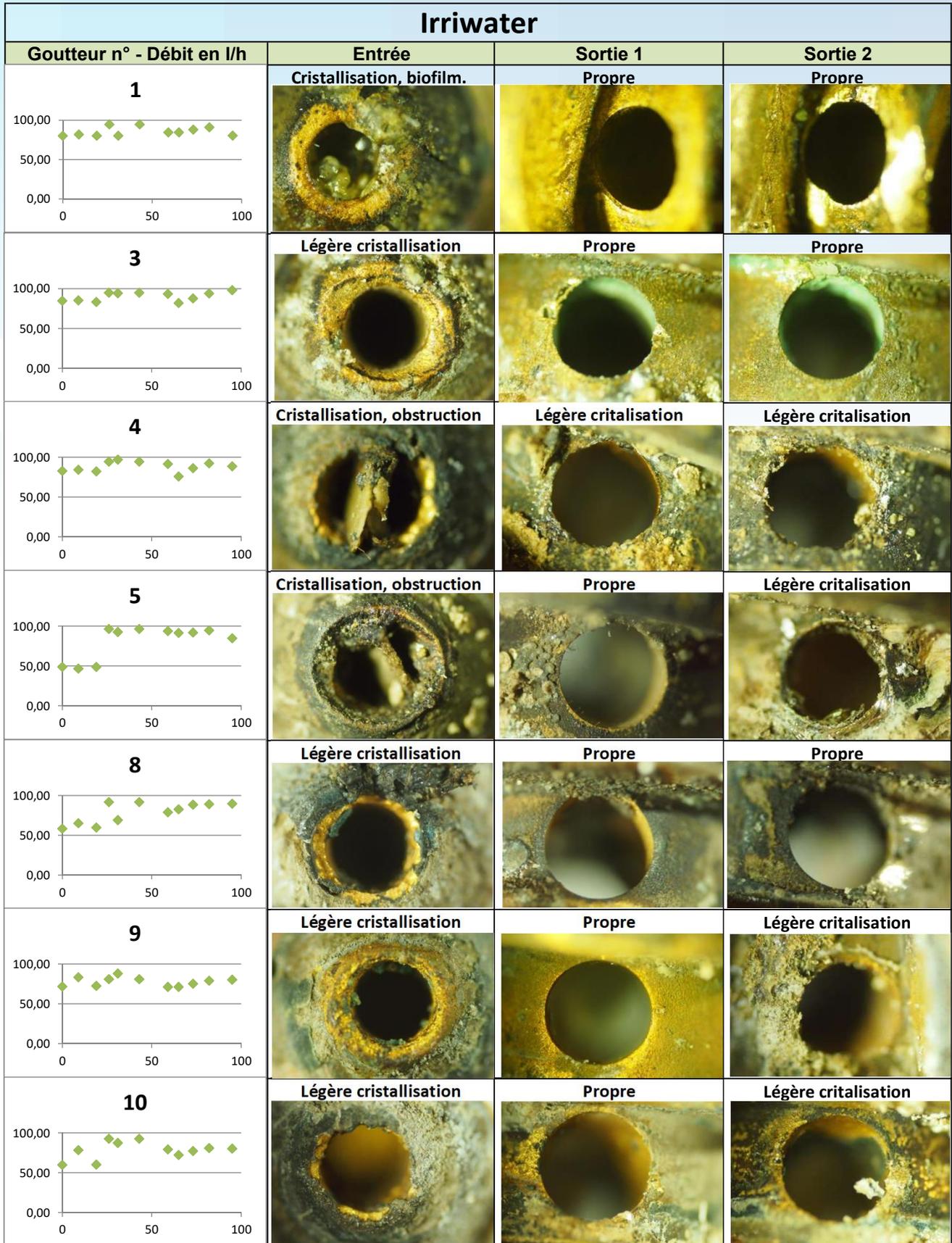


Figure 18 : observation au microscope des goutteurs de type Irriwater. L'évolution du débit pour chaque position est représentée en graphique à gauche

CONCLUSIONS



Par ce projet et ces résultats encourageants, il a été montré que par sa composition, l'urine peut être utilisée efficacement comme une source de fertilisation. Elle semble même être plus facilement assimilée par le sol et les plantes qu'un engrais classique. Le stockage d'une urine mise en contact avec des matières fécales durant 6 mois à température ambiante a montré la suppression définitive de la majeure partie des microorganismes d'origines fécales. Une analyse de plusieurs résidus pharmaceutiques fréquemment recherchés a révélé des valeurs extrêmement faibles au sein des urines utilisées (< 10 ng/ml). Si on ne peut cependant pas présumer d'éventuels effets d'accumulation, les risques de pollution des milieux par les micropolluants ainsi que leur transmission au sein des végétaux peuvent être considérés comme acceptables en comparaison des bénéfices tirés. Par une fertilisation extrême (jusqu'à 510 kg N/ha), l'analyse des lixiviats et

reliquats azotés a démontré une complète minéralisation de l'azote issue des urines et des risques de lessivages semblables à ceux rencontrés lors de l'utilisation d'un engrais synthétique. Un suivi de la conductivité des sols a montré une augmentation de la présence de sels dans les premières couches de sol sans provoquer un excès de sels préjudiciable pour les cultures, du fait notamment de la faible durée de l'essai.

Cependant, du fait du faible nombre de répétitions réalisées pour chacun des tests, ces résultats prometteurs sont à nuancer. Aussi, ces travaux ont été menés sur une seule saison et des recherches similaires réalisées à plus long terme seront nécessaires pour valider ces premiers résultats et permettre le développement de la pratique à grande échelle. En effet, les risques d'accumulation des sels et nutriments, potentiellement préjudiciables pour l'environnement, doivent être précisés. Estimer plus finement la progression de la salinité dans le sol et ce pour différents taux de salinité serait notamment intéressant. L'effet de la pluviométrie sur le lessivage pourrait permettre une réduction des risques lors du développement de la pratique.

La micro-irrigation est une technique idéale pour limiter le contact d'une eau potentiellement contaminée avec les agriculteurs et les cultures. Cependant, il a aussi été montré que dans le cas de leur utilisation avec des eaux non-conventionnelles, le fonctionnement des

systèmes d'irrigation peut être altéré. Ces recherches ont permis de confirmer que les goutteurs auto-régulant, par leur fonctionnement différent (membrane), sont plus sensibles au colmatage. Sur le temps de l'expérimentation, il a aussi été démontré que les dépôts au sein des goutteurs étaient majoritairement d'origine physique et chimique. Des essais pratiques permettant de tester différentes méthodes de décolmatage des systèmes seraient à étudier.

A ce jour, aucune réglementation française ou européenne n'encadre la pratique de valorisation agromonomique de l'urine humaine. Le besoin de travailler sur cette thématique est fort pour permettre d'avancer vers une utilisation optimale de cette source de minéraux renouvelable et à faible impact énergétique.

RÉFÉRENCES

- Bazard, Olivier. 2011. "les médicaments dans les eaux : presence et impact ecotoxicologique. exemple de trois molecules : ibuprofene, carbamazepine et ethinyl-estradiol."
- Bouatra, Souhaila, Farid Aziat, Rupasri Mandal, An Chi Guo, Michael R. Wilson, Craig Knox, Trent C. Bjorndahl, et al. 2013. "The Human Urine Metabolome." PLoS ONE 8 (9). doi:10.1371/journal.pone.0073076.
- Cordell, Dana. 2010. «The Story of Phosphorus Sustainability Implications of Global Phosphorus Scarcity for Food Security».
- Dufumier, Marc, and Philippe Hugon. 2008. "Piques et Polémiques Les 'émeutes de La Faim': Du Sous Investissement Agricole À La Crise Sociopolitique." Revue Tiers Monde 4 (196): 927–34. doi:10.3917/rtm.196.0927.
- Gamri, Souha. 2014. "Réutilisation Des Eaux Usées En Irrigation Localisée : Impacts Des Conditions D'écoulement et Des Matériaux Sur Le Développement de Biofilm."
- Ganrot, Zsófia. 2005. "Urine Processing for Efficient Nutrient Recovery and Reuse in Agriculture."
- Gutierrez, Elodie, Emmanuelle Redon, Mélanie Richard, Souha Gamri, AIT Mouheb Nassim, and Séverine Thomas. 2015. "Analyse de L'interaction Entre Le Colmatage Physique et Biologique Dans Les Goutteurs de Micro-Irrigation," 1–5.
- Hammer, M., and J. Clemens. 2007. "A Tool to Evaluate the Fertiliser Value and the Environmental Impact of Substrates from Wastewater Treatment." Water Science and Technology 56 (5): 201–9. doi:10.2166/wst.2007.573.
- Hasegawa, Paul M, Ray A Bressan, Jian-kang Zhu, and Hans J Bohnert. 2000. "Plant Cellular and Molecular Responces to High Salinity." Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 51: 463–99. doi:10.1146/annurev.arplant.51.1.463.
- Jonsson, H., A.R. Stinzing, B. Vinneras, and E. Salomon. 2004. "Guidelines on the Use of Urine and Faeces in Crop Production." EcoSanRes Publication Series 2: 1–35. http://www.ecosanres.org/pdf_files/ESR_Publications_2004/ESR2web.pdf.
- Jönsson, Håkan, Thor Axel Stenström, Jan Svensson, and Annika Sundin. 1997. "Source Separated Urine-Nutrient and Heavy Metal Content, Water Saving and Faecal Contamination." Water Science and Technology 35 (9): 145–52. doi:10.1016/S0273-1223(97)00192-3.
- Karak, Tanmoy, and Pradip Bhattacharyya. 2011. "Human Urine as a Source of Alternative Natural Fertilizer in Agriculture: A Flight of Fancy or an Achievable Reality." Resources, Conservation and Recycling 55 (4): 400–408. doi:10.1016/j.resconrec.2010.12.008.
- Lienert, Judit, T. Bürki, and B. I. Escher. 2007. "Reducing Micropollutants with Source Control: Substance Flow Analysis of 212 Pharmaceuticals in Faeces and Urine." Water Science and Technology 56 (5): 87–96. doi:10.2166/wst.2007.560.
- Maas, E.V, and S.R Grattan. 1999. "Crop Yield as Affected by Salinity." Agricultural Drainage, no. 38: 55–108. doi:10.2134/agronmonogr38.c3.

Martins. 2008. "*Microbiogéochimie, Transfert Réactif et Impact Des Micropolluants Dans Les Sols. Approche Couplée Multi-Échelles et Modélisation.*"

Maurer, M., W. Pronk, and T. A. Larsen. 2006. "*Treatment Processes for Source-Separated Urine.*" *Water Research* 40 (17): 3151–66. doi:10.1016/j.watres.2006.07.012.

Mnkeni, Pearson N S, Funso R Kutu, Pardon Muchaonyerwa, and Lorimer M Austin. 2008. "*Evaluation of Human Urine as a Source of Nutrients for Selected Vegetables and Maize under Tunnel House Conditions in the Eastern Cape, South Africa.*" *Waste Management & Research : The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 26 (2): 132–39. doi:10.1177/0734242X07079179.

Organisation mondiale de la Santé. 2012. "*Directives OMS Pour L'utilisation sans Risque Des Eaux Usées, Des Excreta et Des Eaux Ménagères*" IV, Utilis.

Richert, Anna, Robert Gensch, Linus Dagerskog, and Håkan Jönsson. 2010. «*Practical Guidance on the Use of Urine in Crop Production.*» http://www.ecosanres.org/pdf_files/ESR_Publications_2004/ESR2web.pdf.

Richert, Anna, Robert Gensch, Håkan Jönsson, Thor-Axel Stenström, and Linus Dagerskog. 2011. «*Conseils Pratiques Pour Une Utilisation de l'Urine En Production Agricole.*»

Schönning, Caroline, and Thor Axel Stenström. 2004. "*Guidelines on the Safe Use of Urine and Faeces in Ecological Sanitation Systems.*"

Senecal, Jenna. 2010. "*Human Urine Enhances Biomass Production in Spinach.*" no. Höglund 2001: 2001.

Thayyil, Pradeepkumar. 2017. "*Fertigation - the Key Component of Precision Farming*" no. March.

Udert, K. M., T. a. Larsen, and W. Gujer. 2006. "*Fate of Major Compounds in Source-Separated Urine.*" *Water Science and Technology* 54 (11–12): 413–20. doi:10.2166/wst.2006.921.

Udert, Kai M., Tove A. Larsen, Martin Biebow, and Willi Gujer. 2003. "*Urea Hydrolysis and Precipitation Dynamics in a Urine-Collecting System.*" *Water Research* 37 (11): 2571–82. doi:10.1016/S0043-1354(03)00065-4.

WHO. 2006. "*WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater: Volume III - Wastewater and Excreta Use in Aquaculture*" 3: 162.

Winker, Martina, Joachim Clemens, Margrit Reich, Holger Gulyas, and Ralf Otterpohl. 2010. "*Ryegrass Uptake of Carbamazepine and Ibuprofen Applied by Urine Fertilization.*" *Science of the Total Environment* 408 (8). Elsevier B.V.: 1902–8. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.01.028.