



La chabasite : traitement et stockage de l'urine

Nassim AIT MOUHEB¹, Bruno MOLLE¹, Vincent LE DAHERON², Victoria SAUNAL², Eric POINCELET³

Avec la participation de Renaud DE LOOZE

1 – UMR Geau, IRSTEA, 361 Avenue François Breton BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5

2 – ECOSEC, 111 Avenue du Faubourg Boutonnet, 34000 Montpellier

3 – PlanetWatch24, 4 rue Galvani - 75838 Paris cedex 17





Sommaire

RÉSUMÉ	4
1. INTRODUCTION.....	6
1.1. Gestion actuelle de l'urine	6
1.2. De l'urine à l'engrais	6
1.3. La chabasite, piège à azote	7
1.4. L'assainissement écologique	8
2. MATÉRIELS ET MÉTHODES	10
2.1. Source d'urine, qualité et quantité	10
2.1.1. Urinoirs secs.....	10
2.1.2. Système séparatif Ecodomeo.....	10
2.2. Méthodes analytiques	11
2.2.1. Analyses laboratoires.....	11
2.3. Objectif des tests et protocoles.....	11
2.3.1. Test 1 : capacité de rétention hydrique	12
2.3.2. Test 2 : capacité de rétention en azote	12
2.3.3. Test 3 : effet de la biomasse.....	13
2.3.4. Test 4 : Processus de nitri-dénitrification	13
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	14
3.1. Test 1 : capacité de rétention hydrique	14
3.2. Test 2 : capacité de rétention en azote	14
3.3. Test 3 : effet de la biomasse	15
3.4. Test 4 : processus de nitri-dénitrification	17
3.4.1. Cycle de l'azote	17
3.4.2. Résultats et discussions.....	17
4. CONCLUSIONS	22
4.1. Exemples d'utilisations - produits Ecosec	22
4.2.1. Vespalth	23
4.2.2. Mada chabasite	24
4.2.3. Mura	24
RÉFÉRENCES	25

Liste des illustrations

Figure 1 : Fraction des nutriments contenus dans l'urine, Eawag	6
Figure 2 : Tas de chabasite	8
Figure 3 : Structure interne et externe de la chabasite	8
Figure 4 : Cabine Mada raccordée à une fosse d'arbre étanche pour la valorisation de l'urine in situ	9
Figure 5 : Système séparatif Ecodoméo	10
Figure 6 : Schéma des dispositifs expérimentaux des tests 1, 2, 3 et 4	11
Figure 7 : Croissance du pâturin des près, planté sur la chabasite et irrigué à l'urine	16
Figure 8 : Concentrations de NH_3 et de NO_3^- à différentes positions	18
Figure 8 : Colonnes utilisées pendant l'expérience	19
Figure 9 : Conductivité et pH à différentes positions	20
Figure 10 : Concentrations en NH_4^+ à différentes positions	21

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des urines d'urinoir et de trône	10
Tableau 2 : Besoins en azote du pâturin des près	13
Tableau 3 : Bilan de masse – Rétention de l'azote	14
Tableau 4 : Bilan de masse – consommation de l'azote	17
Tableau 5 : Abattement de l'azote ammoniacal (concentrations moyennes)	20
Tableau 6 : Produits Ecosec - utilisation de la chabasite	22

RÉSUMÉ

Dans le cadre du développement de ses produits innovants, [l'entreprise Montpellieraine ECOSEC](#) a fait appel au laboratoire de recherche [IRSTEA](#) (Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture). Situé à Montpellier au sein d'un réseau renommé d'instituts agronomes, l'IRSTEA est le spécialiste français de la réutilisation des eaux usées.

Ce document est la synthèse de recherches menées durant 4 mois (début 2017) au sein de la plateforme expérimentale de l'IRSTEA. Les recherches ont porté sur l'utilisation d'une roche volcanique (la Chabasite) en tant que support pour le traitement et la valorisation de l'urine.

Depuis plusieurs années, Ecosec conçoit des produits innovants pour la gestion des matières organiques urbaines. Autonomes, sans raccordement ni produits chimiques, les produits sont développés pour la Ville de demain.

Depuis le développement à l'occasion de la COP21 à Paris par PlanetWatch24 de la [Vespa-lith](#), premier urinoir à faire appel à une roche volcanique aux propriétés uniques, la Chabasite, Ecosec a développé en partenariat avec les concepteurs de ce démonstrateur provisoire deux nouvelles lignes de produits finis faisant appel à cette roche. Les produits finalisés sont plus aboutis, et notamment totalement étanches contrairement au premier démonstrateur installé à Paris dans le cadre de la COP21 :

- [La Mada Chabasite](#), allie la cabine compacte Mada d'Ecosec et la fosse à Chabasite GreenPee;
- [La Mura](#), un urinoir et son mur végétalisé.

Plusieurs travaux scientifiques ont montré la pertinence de l'utilisation de cette roche volcanique pour le traitement des rejets fortement chargés en azote. Néanmoins, ces travaux ont jusqu'ici porté sur le traitement des rejets animaux (élevage porcin, notamment dans la région de Parme, ce qui a permis la disparition des algues vertes en aval de cette région d'élevage intensif) et aucune recherche n'a encore été menée sur le traitement des effluents humains.

Les intérêts de ces recherches sont donc multiples :

- Valider la capacité de rétention hydrique de la Chabasite
- Montrer que la Chabasite est capable de stocker l'azote présent dans l'urine humaine
- Démontrer les propriétés de la Chabasite en tant que média de transformation de l'azote

Les résultats montrent que la Chabasite peut être utilisée pour le traitement de flux fortement azotés comme l'urine humaine. En effet, ses propriétés physiques permettent à la fois un stockage de la majeure partie de l'azote contenu dans l'urine tout en étant le siège de processus biologiques épuratoires.



1. INTRODUCTION

1.1. Gestion actuelle de l'urine

Les mictions sauvages constituent un problème prégnant et récurrent des centres urbains, notamment les grandes agglomérations sujettes à des pics de visiteurs saisonniers. En effet, les évaporations de l'azote ammoniacal sous sa forme gazeuse (ammoniac), constitue le principal vecteur des nuisances olfactives. Ce même gaz peut également former des particules fines et ultrafines particulièrement néfastes pour la santé lorsqu'il entre au contact du NOx produit par les voitures diesel, contribuant ainsi à l'installation d'une pollution urbaine chronique notamment en période estivale.

Il est donc essentiel d'apporter aux collectivités une solution souple et économiquement abordable pour limiter, voir éliminer, ces mictions dites sauvages. La mise en place d'un maillage de toilettes écologiques accessibles à travers les rues d'une agglomération ou dans ses squares, parcs et jardins présente le double avantage de lutter à la fois contre le gaspillage et la pollution de l'eau, les nuisances olfactives en période de forte affluence, mais également contre la pollution atmosphérique par diffusion d'ammoniac dans l'air.

1.2. De l'urine à l'engrais

Dans l'assainissement traditionnel, l'urine représente moins de 1% du volume des eaux usées mais 80% de l'azote et 50% du phosphore traité par les stations d'épuration (Schöning & Stenström, 2004).

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 en fonction de sa concentration, principalement sous forme d'urée.

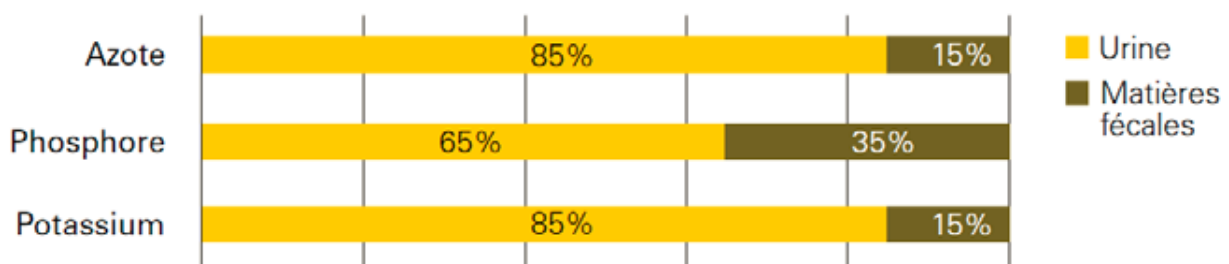


Figure 1 : Fraction des nutriments contenus dans l'urine, Eawag

L'urine est donc un engrais liquide à action rapide bien équilibré, riche en azote (De Looze, 2016). La quantité d'urine produite par jour et sa teneur en éléments nutritifs dépend à la fois de l'alimentation, de la quantité globale de liquides absorbés, 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 journalier compris entre 0,6-1,5 litres par jour (Richert, Gensch, Jönsson, & Thor-Axel, 2011).

Encore considérées comme un déchet polluant et coûteux (traitement de l'azote par les stations d'épuration, eutrophisation des milieux), nos urines sont pourtant une source d'engrais naturel inépuisable. Il convient, en milieu rural comme urbain, de les remettre au coeur des cycles naturels.

Grâce aux propriétés uniques de la Chabasite, une solution de traitement et de valorisation de l'urine robuste, fiable, hygiénique, écologique et compacte va pouvoir être développée.

1.3. La chabasite, piège à azote

La Chabasite est une roche d'origine volcanique de la famille des zéolithes. Son maillage cristallographique particulier et singulièrement fin lui confère une capacité d'échange cationique des plus élevées au monde, ainsi qu'une rapidité de piégeage cationique sans équivalent dans le monde minéral. Les dimensions des cavités intra-cristallines sont à l'origine de son appétence sélective pour les ions potassium (K^+), sodium (Na^+), calcium (Ca^+), et particulièrement pour l'ion ammonium (NH_4^+), dont la taille est particulièrement adaptée à celle des canaux intra-cristallins (Passaglia, 2013).

La Chabasite est ainsi capable de piéger quasi sélectivement l'azote ammoniacal de l'urine.

L'évaporation de l'azote ammoniacal sous sa forme de gaz étant responsable des mauvaises odeurs dues aux mictions sauvages, l'utilisation de la Chabasite pour la gestion in-situ des urines urbaines semble donc être une solution particulièrement prometteuse.

Aussi, après avoir capté l'azote ammoniacal, il a aussi été montré que la Chabasite est capable de le redistribuer et de le rendre directement disponible aux plantes par simple contact avec les racines, en échange cationique avec les acides humiques de la plante (Di Guiseppe, Faccini, & Melchiorre, 2016).

Par ailleurs, l'importance du volume global des cavités intra-cristallines explique la haute capacité de rétention hydrique de la Chabasite. Sur la figure 3 ci-dessous, les points bleus représentent les molécules d'eau, et les points orange, les cations ammoniacaux (NH_4^+). Cette eau résiduelle assure un continuum propice aux échanges cationiques rapides, à la stabilité des équilibres physico-chimiques, et à la réversibilité de ces échanges permettant une régénération ad vitam des capacités de la roche.

En outre, les nombreuses anfractuosités de la roche favorisent la multiplication et le travail



Figure 2 : Tas de chabasite

des microorganismes présents dans le milieu environnant, ce qui explique notamment la fertilité naturelle des terres d'origine volcanique par nitrification accélérée de l'azote sous toutes ses formes, le rendant ainsi directement absorbable par la biomasse. Aussi, l'importance de la surface externe de la Chabasite favorise le développement de microorganismes transformant les matières azotées piégée pour les transformer en nitrates, en gaz carbonique et en eau.

1.4. L'assainissement écologique

Dans le cadre de la COP21 de Paris et afin d'offrir des solutions innovantes de sanitaires hygiéniques, autonomes, faciles et économes d'entretien, PlanetWatch24 a développé un premier démonstrateur, la Vespalith, où la Chabasite est utilisée pour gérer les effluents d'urine. A la suite de ce premier développement et retour d'expérience, la DEVE a demandé à ce que la Chabasite soit totalement isolée du milieu extérieur, pour éviter tout risque de percolation de l'azote dans le sol en cas de pics de fréquentation. Cette demande de modification a dûment été actée par les concepteurs.

Avec cette exigence légitime d'étanchéité totale du bac de Chabasite, Ecosec projette d'incorporer la Chabasite à différents produits, tel que la Mada, sur le modèle de la Vespalith. Une fosse à Chabasite, dénommée Peet, serait alors ajoutée à proximité de la Mada, permettant d'alimenter en eau et de fertiliser l'arbre en charge d'assurer tout ou partie de l'exportation des apports hydriques de l'urine, composante principale des effluents.

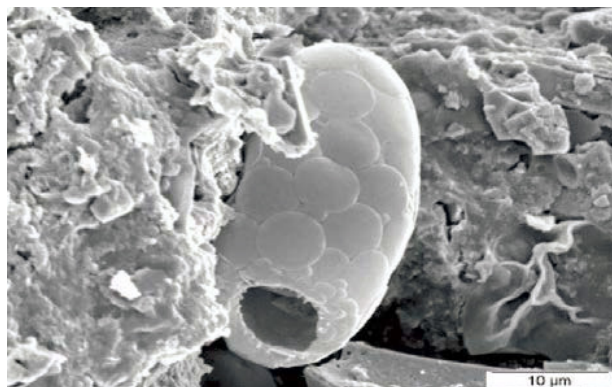
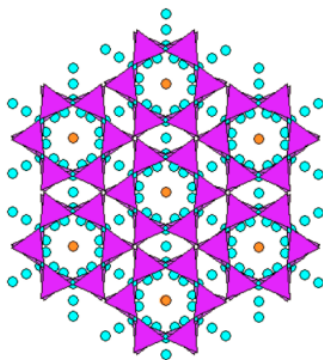
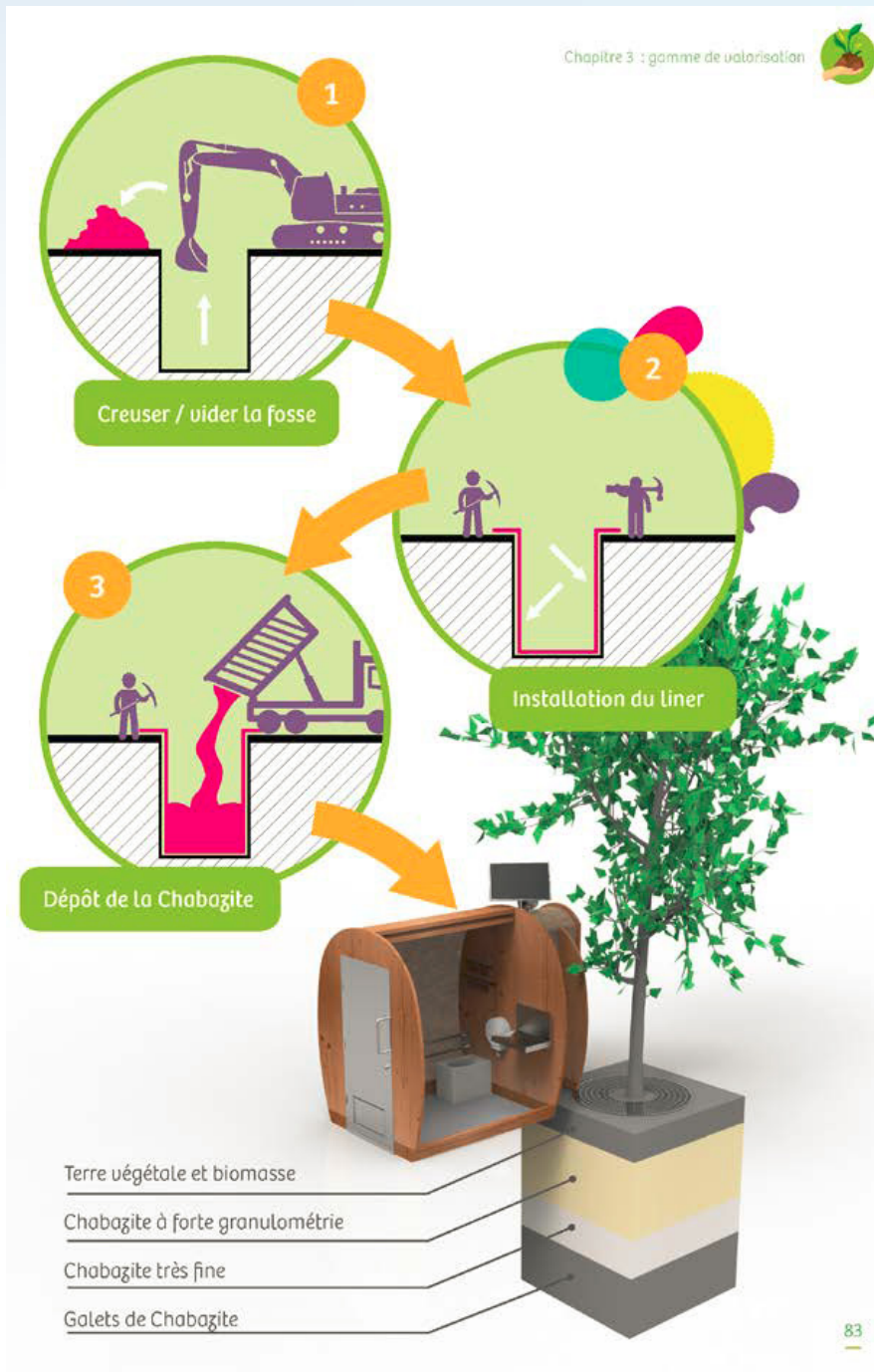


Figure 3 : Structure interne et externe de la chabasite

La Chabasite est également utilisée au sein de la Mura, urinoir directement raccordé à un mur végétalisé, en faisant appel à des plantes rustiques capables de pousser en milieu fortement salin, la salinité globale de l'urine étant proche de celle de l'eau de mer. Un nombre significatif de plantes présentent encore la faculté de s'adapter rapidement en fonction de la prééminence relative des différents cations, avec possibilité notamment de substituer le K^+ par le Na^+ , intrinsèquement très présent dans les urines.



Des recherches menées depuis plus d'une décennie par les Universités de Modène et Ferrara ont montré l'intérêt de la chabasite pour la réduction des nuisances olfactives liées aux élevages porcins. L'Institut du Porc Français (IFIP) a aussi prouvé les capacités de cette roche à traiter les effluents fortement chargés en azote (Guinand, 2014).

Néanmoins, à ce jour, aucune étude officielle n'avait porté sur l'utilisation de la Chabasite pour le traitement de l'urine humaine. Afin de démontrer ses propriétés uniques, les présents tests ont été menés par l'IRSTEA.

Figure 4 : Cabine Mada raccordée à une fosse d'arbre étanche pour la valorisation de l'urine in situ

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Source d'urine, qualité et quantité

Afin de mener les tests dans les conditions les plus réelles, l'ensemble des tests ont été menés avec deux types d'urine :

- De l'urine issue d'un urinoir sec
- De l'urine issue du trône à système séparatif de type **ECODOMEO**

Les analyses du pH, de la conductivité, et des différentes formes azotées et phosphorées (NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- et PO_4^{3-}) ont été effectuées sur dix échantillons. Les caractéristiques moyennes des urines d'urinoir et de trône sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Caractéristiques des urines d'urinoir et de trône

	pH	Conductivité (mS/cm)	NO_3^- (mg/L)	NH_3 (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	Azote total (mg/L)	PO_4 (mg/L)
Urine d'urinoir	9,10	29,7	23	3150	3505	6,68	3000
Urine de trône	9,16	29,9	32	2300	820	3,16	2650

2.1.1. Urinoirs secs

Un urinoir sec fonctionne sans eau, l'urine récupérée est donc pure et non diluée. Pour les tests, cette urine a été récupérée à partir d'un urinoir sec installé dans le bâtiment de l'IRSTE-A. Les volumes d'urine récupérés correspondaient à environ 20L par semaine.

2.1.2. Système séparatif Ecodomeo

Le trône utilisé par l'entreprise Ecossec dans la fabrication de ses produits, et celui permettant la récupération de l'urine pour les expérimentations est un système séparatif gravitaire de type Ecodoméo.

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.

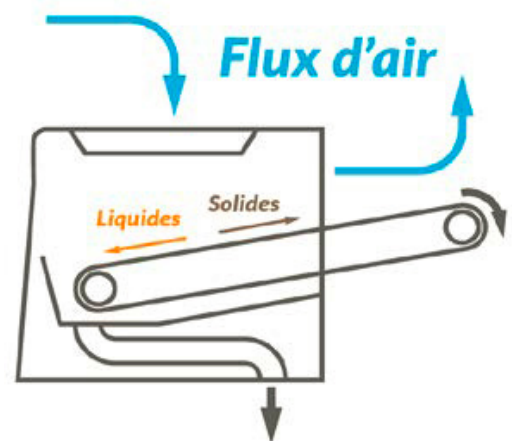


Figure 5 : Système séparatif Ecodoméo

2.2. Méthodes analytiques

2.2.1. Analyses laboratoires

Les analyses des différentes formes d'azote sont réalisées avec un spectrophotomètre portable Hach DR1900.

2.3. Objectif des tests et protocoles

Les différents objectifs de ces tests sont présentés ci-dessous. Ils seront ensuite détaillés dans chaque partie.

- Test 1 : valider la capacité de rétention hydrique de la chabasite
- Test 2 : valider la capacité de rétention en azote de la chabasite
- Test 3 : mesurer l'effet sur la biomasse végétale (croissance/absorption nutriments)
- Test 4 : valider les processus nitrification/dénitrification dans la chabasite

Le dispositif expérimental pour les 3 premiers tests est identique ; les récipients sont des bacs de 65 litres, dont 52,78 litres emplis de chabasite de granulométrie moyenne (de 0,7 à 5 mm) et 5,28 litres d'un lit drainant (galets de chabasite) et d'une vanne permettant de récupérer les lixiviats. Pour le test 3 de la terre végétale a été ajouté au-dessus de la chabasite pour permettre le développement de la biomasse végétale (figure 5).

Le dispositif expérimental du test 4 est composé d'une colonne de 2m de haut remplie de 80 cm de chabasite de granulométrie moyenne (de 0,7 à 5 mm), de 90cm de chabasite de granulométrie fine à très fine (de 0,1 à 0,7 mm), et 23 cm d'un lit drainant (galets de chabasite). 4 vannes permettant de récupérer les lixiviats sont positionnées à différentes hauteurs.

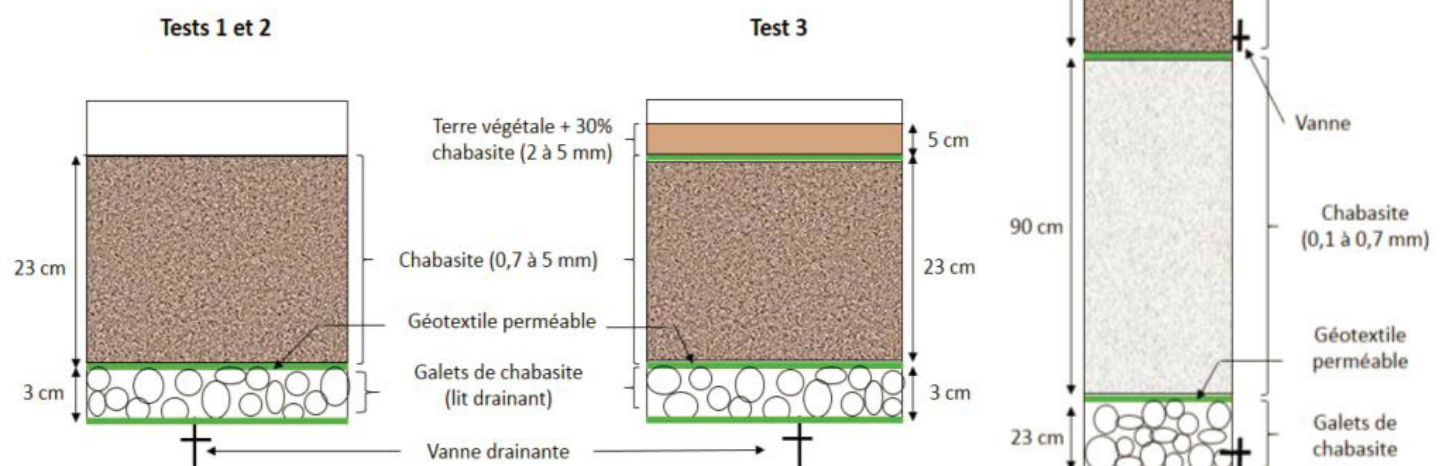


Figure 6 : Schéma des dispositifs expérimentaux des tests 1, 2, 3 et 4

2.3.1. Test 1 : capacité de rétention hydrique

Le premier test vise à définir le volume d'urine qu'est susceptible de retenir la chabasite au sein de sa porosité. En effet la chabasite étant une roche volcanique poreuse présentant d'importantes cavités intra-cristallines, un certain volume de liquide peut être stocké en son sein.

Trois fois par semaine, 2L d'urine (8 mictions) ont été versés sur les bacs de chabasite. Lorsque la saturation hydrique du bac est atteinte, c'est-à-dire que l'urine dépasse le volume de chabasite, les lixiviats sont récupérés et pesés pour en déduire leur volume. Lors de cette expérience, une bâche positionnée sur la partie supérieure des bacs a permis de supprimer l'évaporation potentielle de l'urine.

La capacité de rétention de la chabasite est calculée avec le volume d'urine retenu rapporté au volume de chabasite. La capacité de rétention « C » était estimée dans la bibliographie à environ 50% du volume de la roche (Mumpton, 1999) :

$$C = \frac{(\text{Volume à saturation} - \text{Volume de lixiviat})}{\text{Volume de chabasite}}$$

2.3.2. Test 2 : capacité de rétention en azote

La chabasite serait non seulement capable de stocker en certain volume de liquide au sein de sa porosité, mais la géométrie de sa porosité la rend également capable de stocker la forme ammoniacale de l'azote ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$). Ce test vise à déterminer la quantité d'azote que permet de piéger la chabasite.

On estime que 1 kg de chabasite peut absorber 18g de NH_4^+ , quel que soit sa granulométrie (Passaglia, 2013).

Trois fois par semaine, 5 L d'urine (20 mictions) ont été versés sur les bacs de chabasite. En début d'expérience, l'urine versée a été analysée (différentes formes d'azote, pH, conductivité). Ensuite, lorsque le bac atteint la saturation hydrique, c'est-à-dire que l'urine dépasse le volume de Chabasite, les lixiviats ont été récupérés. Le pH et la conductivité électrique sont mesurés ainsi que les différentes formes d'azote (NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}). La quantité d'azote piégée par la chabasite est ensuite déterminée par la comparaison de la quantité d'azote mesuré en entrée à celle mesurée en sortie.

2.3.3. Test 3 : effet de la biomasse

Ce test a été mis en place afin de valider la capacité des plantes fertilisées à l'urine de pousser sur un substrat de chabasite, et de connaître la quantité d'azote qu'elles consomment lors de leur croissance.

Chaque semaine, 2 L d'urine non diluée sont versés dans des tubes diffusant l'urine sous la biomasse végétale (cf. figure 6). Cet apport est réalisé en trois fois (trois fois 0,67 L d'urine). Régulièrement la biomasse est irriguée en surface à l'eau claire par aspersion, selon leur besoin. Lorsque l'urine dépasse le volume de chabasite, les lixiviats sont récupérés, le pH et la conductivité électrique mesurés, les différentes formes azotées et phosphorées (NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) quantifiées. La quantité d'azote et le volume d'urine exporté par les plantes ont été calculés par comparaison avec les tests 1 et 2.

Les besoins en azote du pâturin des prés sont compris entre 140 kgN/ha et 280 kgN/ha par période de culture. Les besoins en azote rapportés à la surface cultivée dans les bacs sont résumés ci-dessous.

Tableau 2 : Besoins en azote du pâturin des prés

Besoin en azote du pâturin	140 kgN/ha	280 kgN/ha
Surface du bac	0,21 m ³	0,21 m ³
Besoin total en azote pour la surface donnée	2,94 g	5,88 g

2.3.4. Test 4 : Processus de nitrification/dénitrification

Afin de reproduire les processus se déroulant dans la fosse d'arbre accolée à un produit Ecosec de type Mada chabasite, un module (cf. figure 4) de hauteur supérieure aux précédents a été mis en place.

Ce test permet d'appréhender le piégeage et les réactions de changement de forme de l'azote qui auront lieu au sein de fosses de ce type. Notamment, une réduction des teneurs en azote ammoniacal (NH_4^+) et en nitrates (NO_3^-) sont attendus grâce aux processus de nitrification/dénitrification.

Trois fois par semaine, 4 L d'urine (16 mictions) ont été versés sur les colonnes de chabasite. Lorsque l'urine dépasse le volume de chabasite, les lixiviats ont été récupérés aux 4 positions de prélèvements, le pH et la conductivité électrique mesurées et les formes d'azote et de phosphore quantifiées (NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- et PO_4^{3-}).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Test 1 : capacité de rétention hydrique

La capacité de rétention hydrique est estimée dans la bibliographie à 50% du volume de la roche (Mumpton, 1999). Nos tests ont montré que cette capacité de rétention se situe plutôt autour de 40% du volume de la roche. Après la première saturation de la chabasite, un 2ème test identique a été mené. Il a montré que la capacité de rétention diminue ensuite à environ 20%.

3.2. Test 2 : capacité de rétention en azote

La chabasite a été arrosée à l'urine 3 fois par semaine jusqu'à saturation hydrique. Les lixiviats ont ensuite été récupérés et analysés. L'expérience a été répétée à plusieurs reprises. Les résultats des mesures réalisées ainsi qu'un bilan de masse de l'azote total piégé par la Chabasite sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Bilan de masse – Rétention de l'azote

	Azote total entré mesuré (g)	Azote total sortie mesuré (g)	Azote retenu (g)	Pourcentage de rétention
Urine d'urinoir				
07 Mars	200,3	4,9	195,4	98%
13 Mars	66,8	3,5	63,2	95%
19 Mars	100,2	7,9	92,3	92%
05 Avril	100,2	5,2	95,0	95%
17 Mai	126,9	20,9	106,0	84%
Total	594,3	42,4	551,9	
Urine de trône				
05 Avril	94,6	0,3	94,2	100%
19 Avril	53,6	1,2	52,4	98%
17 Mai	63,0	2,3	60,8	96%
Total	211,2	3,7	207,4	

Au total 594,3g d'azote ont été versé sur le bac irrigué avec l'urine d'urinoir et 211,2g d'azote ont été versé sur le bac irrigué avec l'urine de trône. La saturation en azote n'a pas été atteinte.

Considérant une urine à 6 g/l d'azote total, il aurait fallu verser près de 130L d'urine pour saturer complètement la Chabasite en azote. D'après ces tests la chabasite peut traiter plus de 13,5 g d'azote total (environ 2,5L d'urine) par kg de chabasite. Ces résultats sont légèrement inférieurs à ceux trouvés dans la littérature (14 g de N-équivalent ou 18 g de NH_4^+ / kg chabasite) (Passaglia, 2013).

Il a aussi été remarqué l'absence totale d'odeur après application de l'urine dans les bacs contenant la chabasite.

1 kg de chabasite est donc capable de stocker l'azote de plus de 2,5L d'azote sans rejet ni odeur.

On peut observer que le pourcentage de rétention au départ très élevé (supérieur à 95%) diminue légèrement avec les ajouts d'azote. L'hypothèse peut donc être faite que plus la chabasite approche de la saturation, moins l'adsorption sera efficace, et plus le pourcentage de rétention sera faible, tout en restant élevé.

Le système utilisé par la chabasite pour retenir l'azote est un système d'échange d'ions. Afin de renouveler la roche, un simple lavage à l'eau claire permet la libération des ions de NH_4^+ (Passaglia, 2013).

3.3. Test 3 : effet de la biomasse

Tout d'abord, l'observation de la biomasse végétale montre un développement rapide et important, (cf. figure 8). Même soumis à des forts taux d'azote le pâturin des prés se comporte bien. Il arbore une couleur verte foncée.

Ce test confirme que la chabasite semble être un substrat propice à la croissance de plantes (Di Guiseppe, Faccini, & Melchiorre, 2016).

La rétention hydrique de la chabasite est augmentée en présence de plante du fait de la consommation d'eau de celle-ci par évapotranspiration. La capacité de rétention hydrique en présence de biomasse se situe en moyenne autour de 45%.

En termes de rétention de l'azote, le bilan de masse de l'azote total est présenté ci-dessous. L'azote retenu par la chabasite a été calculé à partir du test précédent où la biomasse végétale n'était pas présente.

On remarque qu'au moment de la récupération du lixiviat, le 11 Avril, le pâturin des prés n'avait pas atteint son maximum de croissance et n'avait donc pas consommé la totalité de ses besoins en azote, présentés dans le tableau 3. Après comparaison avec le bilan sur l'azote du test 2, la consommation des plantes représente entre 5 et 10% de l'azote traité. Le reste est piégé par la chabasite.

17 Mars



28 Avril



15 Mai

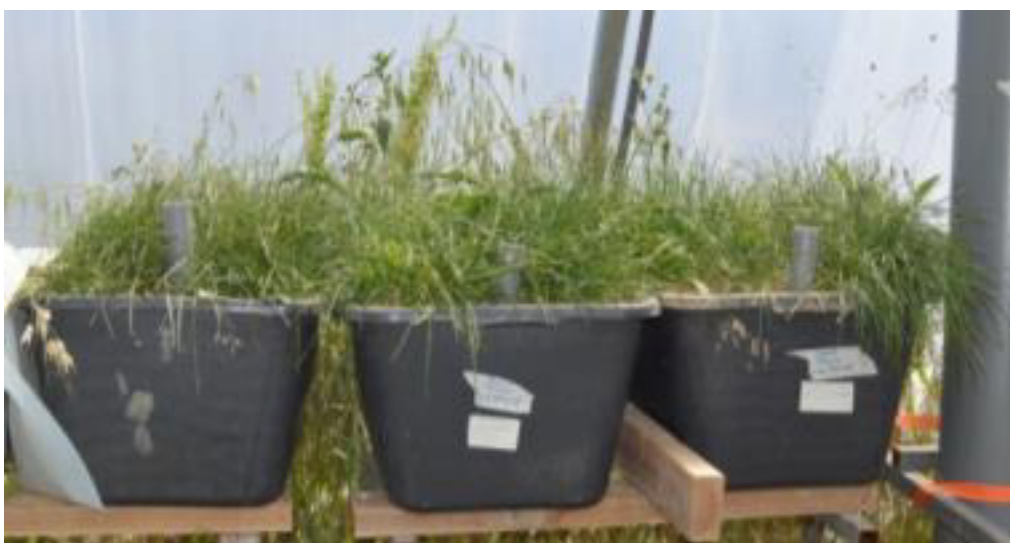


Figure 7 : Croissance du pâturin des près, planté sur la chabasite et irrigué à l'urine

Tableau 4 : Bilan de masse – consommation de l'azote

	Azote total entrée (g)	Azote total sortie (g)	Azote retenu (g)	Azote consommé par les plantes (g)
	Urine d'urinoir			
11 Avril	35,8	0,06	34,03	1,85
	Urine de trône			
11 Avril	22,5	0,07	20,72	1,73

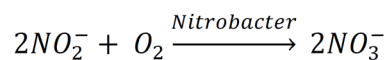
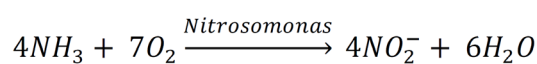
Les plantes ont besoin d'eau et d'engrais pour leur croissance. L'ajout de biomasse végétale permet d'augmenter la capacité de rétention hydrique à 45 % et de valoriser in-situ près de 10% de l'azote.

3.4. Test 4 : processus de nitrification

3.4.1. Cycle de l'azote

La nitrification est un processus microbien opéré par des bactéries spécifiques, entraînant une désoxygénation des ions nitrates. Ce phénomène se produit principalement dans les sols. De façon conceptuelle, la nitrification se déroule en deux étapes : ammoniac -> nitrite puis nitrite -> nitrate.

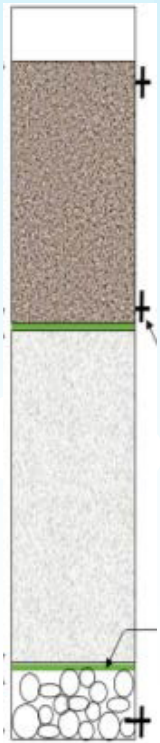
Au niveau chimique, le processus se déroule ainsi :



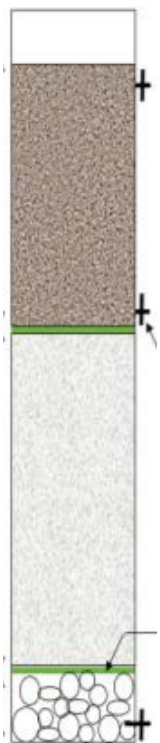
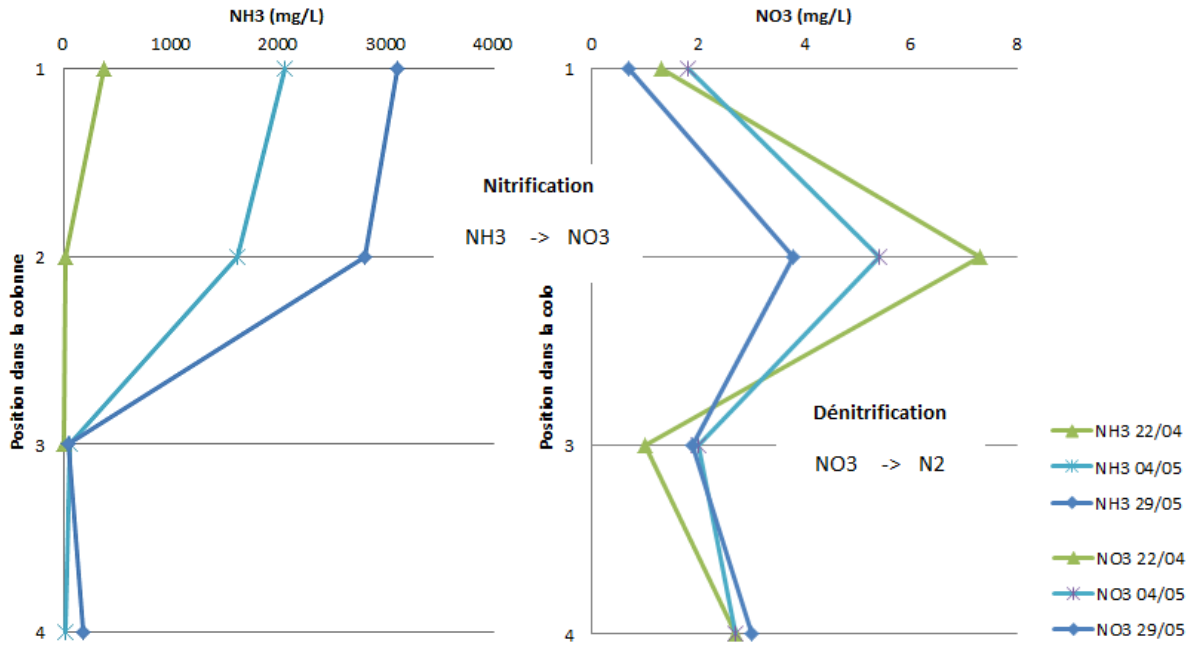
La dénitrification est également un processus microbien opéré par des bactéries spécifiques. Elles réduisent l'ion nitrate NO_3^- , en ion nitrite NO_2^- , puis en diazote N_2 , naturellement présent en grande quantité dans notre atmosphère et qui va s'échapper ensuite du sol par simple volatilisation. La réaction de dénitrification est une réaction anaérobie.

3.4.2. Résultats et discussions

Les colonnes de chabasite ont été saturées hydriquement avec de l'urine d'urinoir et de l'urine de trône. Les lixiviats ont été récupérés à 4 hauteurs différentes. L'opération a été répétée plusieurs fois pour chaque urine. Les analyses des concentrations de NH_3 et de NO_3^- contenues dans les lixiviats, aux différentes positions dans la colonne, pour l'urine d'urinoir et l'urine de trône, sont représentées ci-dessous.



Urine d'urinoir



Urine de trône

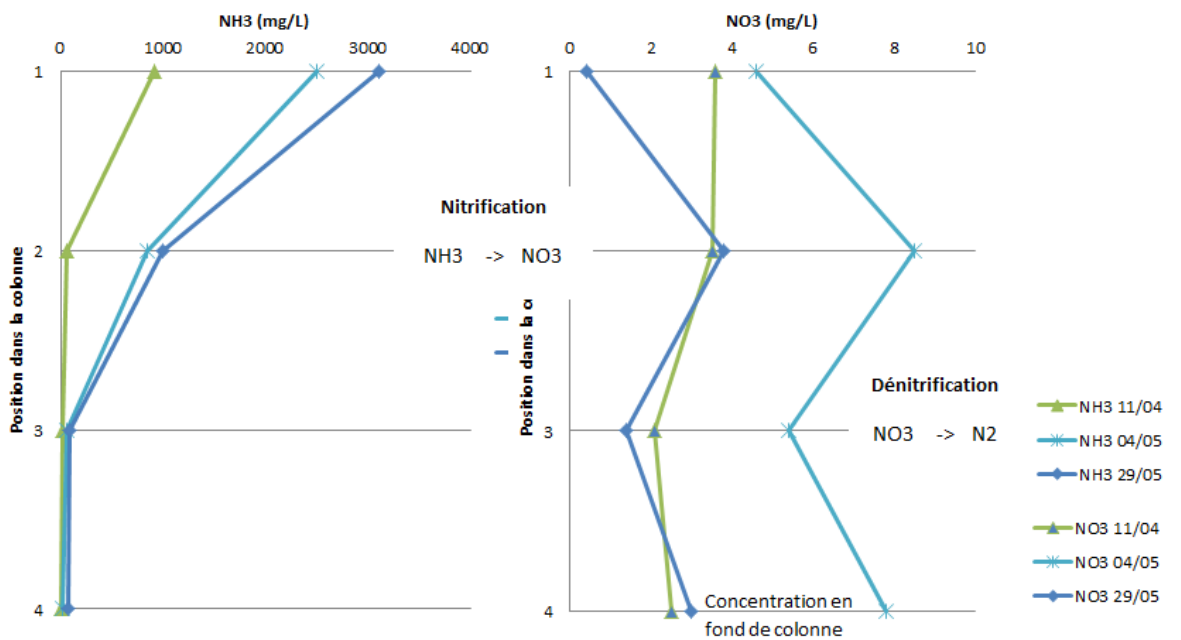


Figure 8 : Concentrations de NH₃ et de NO₃⁻ à différentes positions

La partie haute de la colonne est considérée en condition aérobie. La partie basse, de granulométrie plus fine et rapidement saturée, est considérée en condition anaérobie. La diminution de la concentration de NH_3 accompagnée de l'augmentation de la concentration de NO_3^- laisse penser qu'un début de réaction de nitrification a bien lieu dans le haut de la colonne. Par la suite, la diminution de la concentration de NO_3^- laisse penser que la réaction de dénitrification a bien lieu dans le bas de la colonne.

Cependant, les quantités de nitrate produites, puis transformées en azote atmosphérique, sont très faibles en comparaison à la quantité d'azote ammoniacal (de l'ordre de 6 mg/l). Les réactions de nitrification et dénitrification sont des processus très lent. Même si elles ont bien lieu dans la chabasite, celles-ci nécessitent plus de temps qu' accordé au cours des expériences. Dans un environnement de fosse d'arbre Peet, cette réaction de dénitrification se produira à plus grande échelle, permettant de bien gérer les excédents azotés par exportation de l'azote sous sa forme courante atmosphérique de diazote N_2 .



Ces réactions sont accompagnées d'une diminution de la conductivité, et d'une diminution du pH (cf. figure 9). L'urine passe d'un pH aux alentours de 9, cohérent avec une urine d'ont l'urée a été hydrolysée ; à un pH aux alentours de 6,5. Cette diminution de pH est cohérente avec les hypothèses faites sur les réactions de nitrification et dénitrification.

L'observation de ces deux réactions est accompagnée par une diminution de l'azote ammoniacal (NH_4^+) et des phosphates tout au long de la colonne. En effet la Chabasite agit toujours comme un piège à azote ammoniacal. Elle permet également de piéger d'autres ions, tels que les phosphates. Les tableaux et graphiques représentant ces diminutions sont représentés tableau 6 et figure 10.

Les concentrations moyennes des différentes formes d'azote en entrée et en sortie de la colonne, ainsi que l'abattement de l'azote ammoniacal entre l'urine versée en entrée de la colonne et les lixiviats récupérés en sortie de la colonne, sont représentées dans le tableau ci-dessous.

Figure 8 : Colonnes utilisées pendant l'expérience

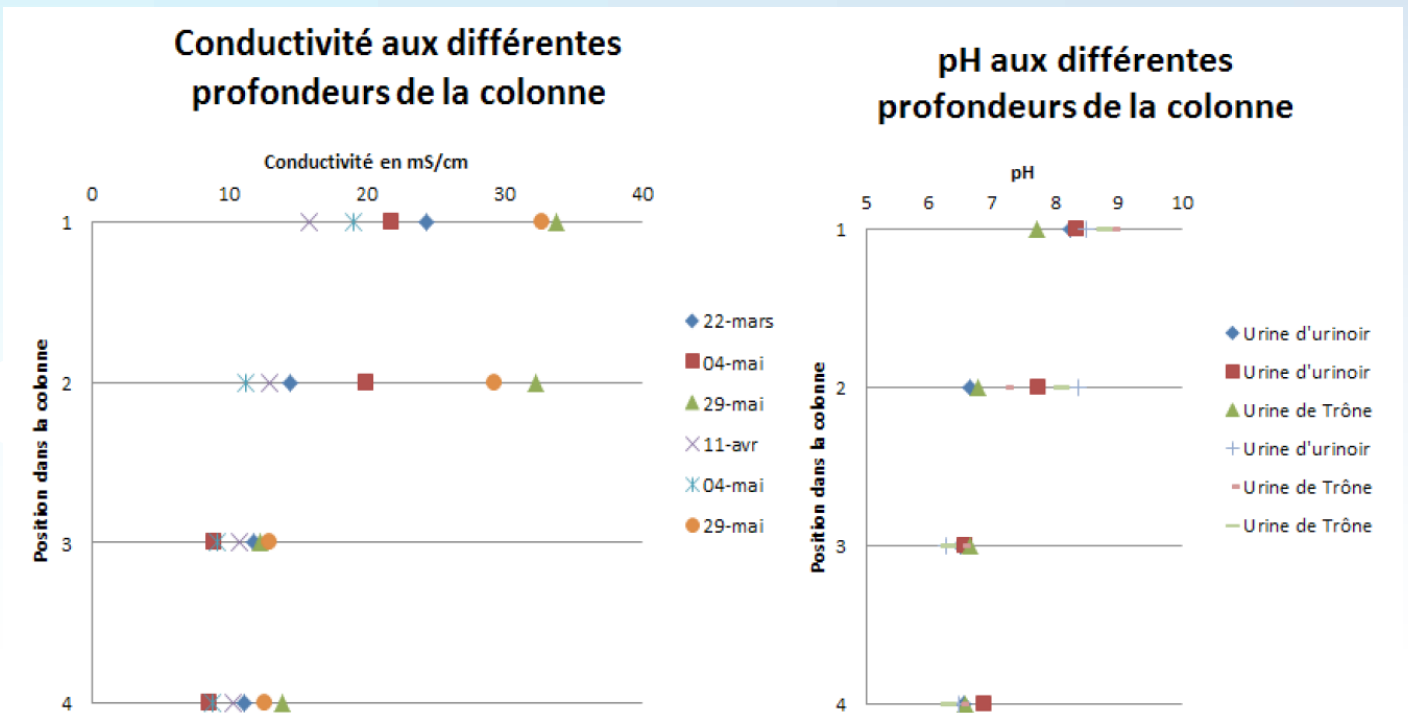


Figure 9 : Conductivité et pH à différentes positions

Tableau 5 : Abattement de l'azote ammoniacal (concentrations moyennes)

	pH	Conductivité (mS/cm)	NH ₃	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻
Urine d'urinoir					
Entrée	9,097	29,7	3150	3505	3000
Sortie	6,6	11,2	102	6,6	11,8
Abattement			97%	100%	100%
Urine de trône					
Entrée	9,159	29,9	2300	820	2650
Sortie	6,5	10,6	31,5	3,2	18,4
Abattement			99%	100%	99%

L'élimination de l'azote ammoniacal se fait donc différemment en fonction de la quantité d'oxygène présent dans le milieu et du contact avec les racines. En effet, la chabasite favorise à travers différentes couches à granulométries et compositions variables les réactions successives de nitrification / dénitrification.

- Dans les couches supérieures de surface, riches en O_2 (aérobie superficielle), le contact du système racinien avec la chabasite saturée en NH_4^+ provoque le remplacement de ce dernier avec le H_3O^+ sécrété par la racine lors de la pousse des plantes (acides humiques). L'azote ammoniacal est aussi en partie transformé en nitrate, plus facilement assimilable par les racines.
- Dans les couches inférieures, pauvres en O_2 (anaérobie profonde), le nitrate provenant des couches supérieures et non directement assimilé par les plantes, est transformé en N_2 (gaz) selon le processus de dénitrification.

Les réactions biologiques permettent d'obtenir en fond de colonne une solution hydrique à très faible taux d'azote. Aussi, tout au long de la colonne, l'azote ammoniacal est piégé par la chabasite, évitant ainsi tout dégagement gazeux, responsable des mauvaises odeurs.

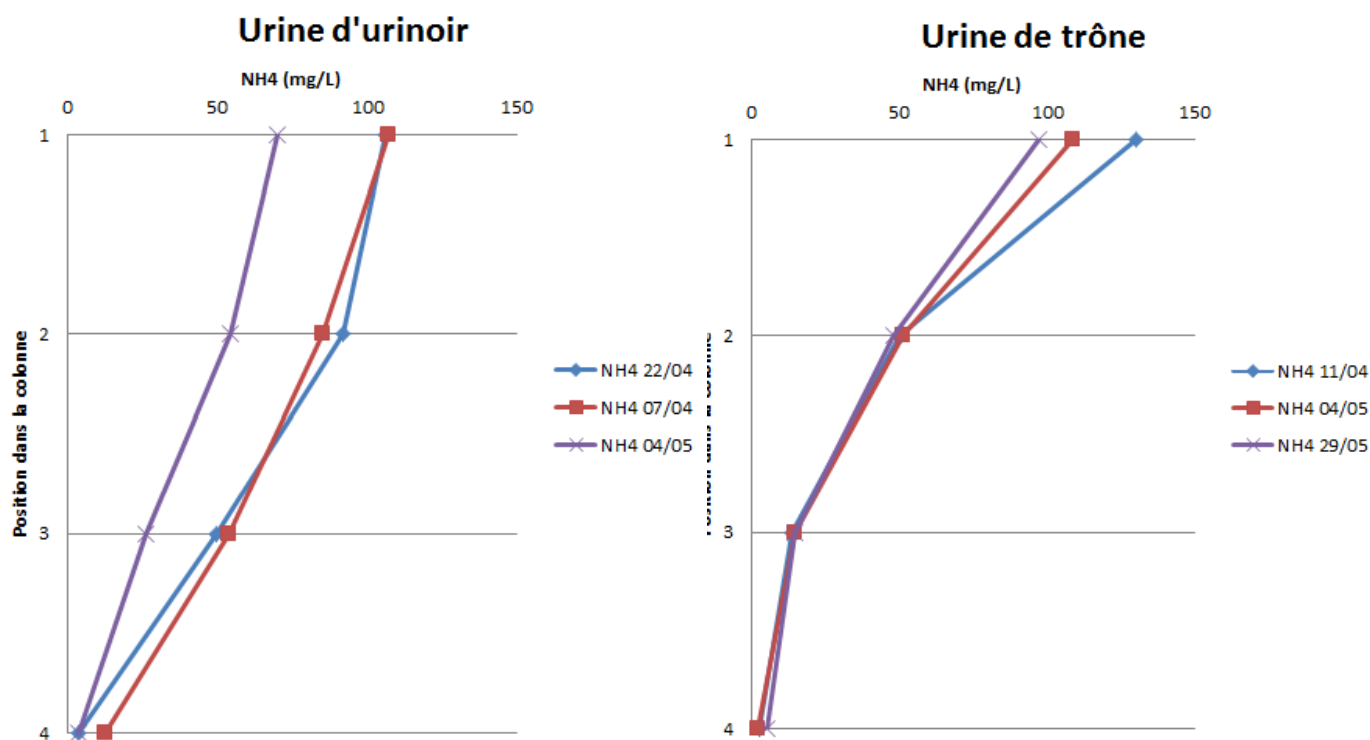


Figure 10 : Concentrations en NH_4^+ à différentes positions

4. CONCLUSIONS

La chabasite est un substrat adapté à la valorisation in-situ des urines. En retenant une grande partie de l'azote ammoniacal, la chabasite réduit notamment significativement les odeurs désagréables. Dans le cadre de son utilisation au sein des produits Ecosec, la chabasite pourrait servir de stockage de l'urine.

De plus, ces expériences ont prouvé qu'elle était un milieu propice, bien que lent, aux processus biologiques tels que la nitrification et la dénitrification, permettant une transformation de l'azote en solution nutritive pour plantes.

Associée à une biomasse végétale, elle est un substrat idéal et favorise une croissance des plantes optimales, tout en permettant une consommation de l'azote par ces dernières et une évaporation de l'eau contenue dans l'urine.

Les valeurs suivantes, calculées à partir des présents résultats et données à titre indicatif, permettent d'estimer le nombre d'utilisation des différents produits Ecosec avant saturation de la chabasite :

Tableau 6 : Produits Ecosec - utilisation de la chabasite

	Volume (m ³)	Rétention hydrique (L)	Rétention d'azote (g)	Nombre d'utilisations
Vespalith	2,77	1247	30 000	5000
Mada Chabasite	11,2	5040	120 000	20 000
Mura	1,2	540	13 000	2000

Ces valeurs ont été calculées à partir des expériences réalisées dans les conditions les plus défavorables pour la roche. Les données suivantes détaillent plus précisément ces valeurs ainsi que les fréquences de vidange des produits lors d'une utilisation moins extrême de la chabasite.

4.1. Exemples d'utilisations - produits Ecosec

Les trois produits développés et proposés par Ecosec et PlanetWatch 24 utilisant la chabasite ont chacun des caractéristiques bien différentes. Néanmoins, les mécanismes régissant le traitement de l'urine restent communs :

- Stockage de l'azote ammoniacal (NH₄⁺)
- Transformation de l'azote ammoniacal en nitrates (NO₃⁻) et diazote (N₂)
- Transformation de l'azote ammoniacal en nitrates puis exportation par la biomasse végétale

A partir des expériences réalisées et du taux de fréquentation des trois produits phares d'Ecosec, leurs fréquences de vidange ont ainsi pu être estimées. Cependant, afin d'estimer plus précisément chacune de ces durées, des expérimentations plus longues (de 6 mois à 1 an minimum) seraient à réaliser.

Aussi, les capacités de traitement des produits et les processus naturels les régissant sont fortement dépendant de contraintes environnementales (température, humidité...), ainsi deux cas de figure peuvent être différenciés :

- Cas défavorable : température élevée (moyenne journalière > 25°), apport hydrique faible (< 2mm/j), croissance végétale faible
- Cas optimal : température moyenne, apport hydrique moyen, croissance végétale importante

La réversibilité de la chabasite est une de ses caractéristiques la plus intéressantes pour la gestion des produits proposés. Elle peut être très simplement rincée de tous les éléments qu'elle a accumulé au fil des mois / années, ce qui simplifie énormément sa gestion particulièrement souple et économique sur le long terme.

4.2.1. Vespalith

- Volume de chabasite : 2,77 m³ (5540kg)
- Types de plantes : pois de senteur, cannes de Provence et bambous
- Surface plantée : 1m²

	Conso. azote	Conso. en eau
Pois de senteur	8 g/an/m ²	5 L/j/m ²
Canne de Provence	100 g/an/m ²	20 L/j/m ²
Bambou	100 g/an/m ²	30 L/j/m ²

Fréquentation (personnes/j)	Volume d'urine (L/j)	Durée avant saturation Cas défavorable (j)	Durée avant saturation Cas optimal (j)
20	4	270	513
50	10	100	190
100	20	35	80
200	40	20	30



4.2.2. Mada chabasite

- Volume de chabasite : 11,2 m³ (22 400kg)
- Types de plantes : peuplier, pouvant consommer jusqu'à 100 litres d'eau par jour et 100g d'azote par an pour un arbre de 30cm de diamètre (Etienne & Luc, 2004)
- Surface plantée : 1m²

Fréquentation (pers/j)	Volume d'urine (L/j)	Durée avant saturation Cas défavorable (j)	Durée avant saturation Cas optimal (j)
20	4	1200	3300
50	10	460	1265
100	20	200	550
200	40	70	230

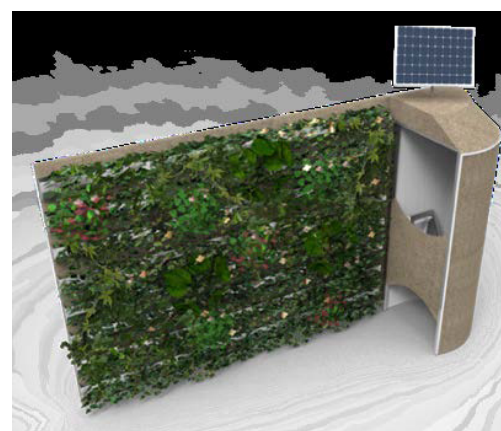


4.2.3. Mura

- Volume de chabasite : 1,2 m³ (2 400kg)
- Types de plantes : pois de senteur, coton et géranium

	Conso. azote	Conso. en eau
Pois de senteur	8 g/an/m ²	5 L/j/m ²
Coton	50 g/an/m ²	15 L/j/m ²
Géranium	10 g/an/m ²	10 L/j/m ²

Fréquentation (pers/j)	Volume d'urine (L/j)	Durée avant saturation Cas défavorable (j)	Durée avant saturation Cas optimal (j)
20	4	100	165
50	10	40	65
100	20	15	25
200	40	5	10



RÉFÉRENCES

De Looze, R. (2016). *L'urine, de l'Or liquide au Jardin*. Editions de Teyran.

Di Guiseppe, D., Faccini, B., & Melchiorre, M. (2016). *Yield and Quality of Maize grown on a loamy soil amended with natural Chabazite Zeolite*. *Environmental Quality* 17 (2015) 35-45.

Etienne, M., & Luc, L. (2004). *Variation journalière de la consommation d'eau de peupliers en vallée de la Garonne* (Vol. 160). Forêt - Entreprise.

Guigand, N. (2014). *Influence de l'incorporation de 3% de Chabasite dans l'alimentation des porcs charcutiers sur l'émission d'ammoniac et d'odeurs*. IFIP - Institut du Porc.

Journal Officiel. (2010). *l'irrigation de cultures ou d'espaces verts*. JORF no201 du 31 août 2010 page 15828.

Mumpton, F. A. (1999). *La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* - Vol. 96, pp. 3463-3470.

Passaglia, E. (2013). *NH₄ exchange in chabazite, heulandite-clinoptilolite, and phillipsite*. *SCIENZE FISICHE E NATURALI*, ISSN 2037-4631.

Richert, A., Gensch, R., Jönsson, H., & Thor-Axel, S. (2011). *Practical Guidance on the Use of Urine in Crop Production*. Stockholm Environment Institute, EcoSanRes Series, 2010-1.

Schönning, C., & Stenström, T. A. (2004). *Guidelines for the Safe Use of Urine and Faeces in Ecological Sanitations Sytems*. Stocklom Environment Institute.