

PARCOURS PROFESSIONNEL

MEMOIRE DE STAGE DE MASTER

Amel SMAIL

MISE EN PLACE D'UNE CHAÎNE COMPLETE INSTRUMENTEE DE TRAITEMENT ET
VALORISATION DE L'URINE DANS LE BATIMENT CORIOLIS DE L'ECOLE
NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

*Présentation du mémoire le 22 septembre 2016 à 11h dans les locaux de l'Ecole
nationale des ponts et chaussées*

Maître de stage : Fabien ESCULIER
Superviseur de stage : Johnny GASPERI

Confidentialité:

- Oui
 Non

Stage effectué au Laboratoire Eau
Environnement et Systèmes Urbains à
l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

Du 15 mars 2016 au 15 septembre 2016

*« Lors de l'installation de la cuve de récupération d'urine le 22 juin 2016,
nous avons tourné la vanne de la transition socio-écologique »¹*

¹ Proclamation solennelle de Fabien ESCULIER lors des Leesuriales* en juillet 2016, pour marquer un tournant important de l'histoire du projet OCAPI grâce à l'installation de la cuve de récupération d'urine et de la fameuse vanne trois voies à Coriolis.

*Journées dédiées aux présentations de tous les projets de recherches menés par les doctorants et stagiaires au sein du LEESU.



Remerciements

«La reconnaissance est la mémoire du cœur»²

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement Fabien Esculier, mon maître de stage, pour m'avoir intégré à son projet, suivi et tant appris tout au long de mon stage. Son aide, sa disponibilité et ses conseils, m'ont permis de comprendre les concepts fondamentaux liés au stage. Pour sa gentillesse, son humour et sa bonne humeur permanente. J'ai partagé avec plaisir nos divers voyages d'études, grâce auxquels j'ai beaucoup appris et pu rencontrer des personnes très sympathiques. Sans oublier, les moments forts liés à la « transition socio-écologique ». Merci encore.

Je remercie également Bernard De Gouvello, qui a toujours été de très bons conseils, pensant au moindre détail et tombant toujours à pic et avec le sourire.

Je remercie Bruno Tassin, qui a gentiment accepté de m'encadrer momentanément. Pour avoir veillé à ce que le stage se passe dans de bonnes conditions et pour ces précieux conseils ainsi que pour le bon déroulement des cours qu'il a assuré tout au long de mon cursus.

Je remercie également Johnny Gasperi, pour ses conseils de mi-parcours, sa rigueur et son exigence qui m'ont motivée à donner le meilleur de moi-même.

Je tiens particulièrement à remercier Mohamed Saad pour ses nombreux conseils techniques mais également pour son temps et son aide précieuse pour la réalisation des analyses effectuées en laboratoire.

Aussi, je remercie Maxime Dechesne, mon binôme de stage sur le Projet OCAPI, pour le temps qu'on a passé ensemble.

De plus, je tiens également à remercier ceux sans qui ce stage n'aurait pas été aussi plaisant : les membres du LEESU, de la d.school et de l'Ecole des Ponts que j'ai pu croisés et avec qui j'ai eu l'occasion d'échanger avec plaisir ; et tout particulièrement Annick Piazza pour sa jovialité et sa gentillesse, Daniel Thévenot pour sa bonne humeur et son aide logistique, Stéphanie Bonnel pour sa disponibilité, ainsi que tous les stagiaires pour leur aide continue, nos goûters, nos rires et nos débats : Arame, Tianran, Fleur, Yasmin, Céline, Phung, Delphine, Jeroen, Rémi, Tristan, Raphaël, Katell et Arthur.

Et surtout, un grand merci à ma famille pour leur soutien constant et également à mes amis qui m'ont toujours soutenue et encouragée.

² Citation de Hans Christian Andersen



Table des matières

Remerciements	1
Résumé	4
Abstract	4
Listes des sigles et abréviations	6
Liste des figures.....	7
Liste des tableaux.....	9
Liste des annexes.....	10
Introduction.....	11
Le cadre du stage	11
Les objectifs du stage	12
1. La séparation à la source de l'urine : une technique d'assainissement écologique	12
1.1. Composition de l'urine et proportion de l'urine dans les eaux usées	13
1.2. L'azote et le phosphore : consommateurs d'énergie et de ressources	14
1.2.1. Azote	14
1.2.2. Phosphore.....	14
1.3. Les avantages et les inconvénients de la séparation à la source et la collecte sélective des urines	14
1.3.1. Avantages	14
1.3.2. Inconvénients	15
2. Retours d'expériences européennes	16
2.1. Les différents types de séparation à la source distingués en Europe	16
2.1.1. La Suède	16
2.1.2. La Suisse	18
2.1.3. La France.....	18
2.2. Les différentes techniques de traitements de l'urine permettant la récupération des éléments nutritifs pour la valorisation agricole.....	21
2.2.1. L'Hygiénisation par stockage : solution technique la plus simple et la moins coûteuse	22
2.2.2. Récupération phosphore : précipitation sous forme de struvite.....	23
3. Projet pilote AZURIS: mise en place d'une chaîne complète instrumentée de traitement et valorisation de l'urine dans le bâtiment Coriolis de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées	24
3.1. Objectifs du projet AZURIS	24
3.2. Matériels et Méthodes d'analyses.....	26
3.2.1. Paramètres physico-chimiques étudiés pour l'urine fraîche et stockée	26



3.2.2.	Description des protocoles et des matériels analytiques au laboratoire.....	26
3.2.3.	Campagne de collecte AZURIS - Echantillons d'urine	27
3.2.4.	Installation de la cuve de récupération d'urine	31
3.2.5.	Grille de référence- Comparaison de valeurs des paramètres physico-chimiques de l'urine issue de la littérature.....	36
3.3.	Synthèse des résultats	38
3.3.1.	Caractérisation de l'urine fraîche – résultats de la campagne AZURIS	38
3.3.2.	Caractérisation de l'urine stockée – issue de la Campagne de collecte AZURIS	48
3.3.3.	Suivi de la cuve de récupération d'urine	51
3.4.	Conclusion sur l'efficacité du système de collecte sélective d'urine	53
3.5.	Filière de valorisation	53
4.	Etude sur l'appropriation par les usagers de l'utilisation des urinoirs secs à Coriolis et l'acceptabilité de la finalité de l'urine en tant qu'engrais naturel.....	55
4.1.	Objectif de l'enquête	56
4.2.	Méthodologie de l'enquête.....	56
4.3.	Analyse et synthèse des résultats de l'enquête	57
5.	Enseignements et recommandations	59
5.1.	Retours d'expérience du projet AZURIS.....	59
5.2.	Recommandation pour une expansion nationale	59
5.2.1.	Aspect réglementaire de l'urine.....	59
5.2.2.	Aspect environnemental.....	60
5.2.3.	Aspect acceptabilité sociale	60
	Conclusion générale	62
	Bibliographie	63
	Annexes.....	66



Résumé

Du fait de l'augmentation de la population du Grand Paris et de la baisse du débit de la Seine sous l'effet au changement climatique, le Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP) est confronté aux limites de l'assainissement conventionnel des eaux usées. La séparation à la source des urines, qui permettrait d'une part de soulager les stations d'épuration de 80% de l'azote des eaux usées, offrirait d'autre part la possibilité d'améliorer le bilan carbone de l'assainissement et de valoriser l'azote et le phosphore des déjections humaines en agriculture en tant qu'engrais naturel. Avec le soutien du SIAAP et dans le cadre du projet de recherche OCAP, le projet pilote AZURIS a ainsi été développé pour étudier, à l'échelle d'un bâtiment de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, l'efficacité de la mise en place d'une chaîne complète de traitement et valorisation de l'urine.

Dans un premier temps, ce projet a consisté à analyser l'efficacité du traitement de l'urine par stockage, en réalisant une étude de caractérisation de l'urine fraîche et stockée en vue de sa valorisation, puis dans un deuxième temps à installer un réservoir de récupération d'urine issue de l'urinoir sec du rez-de-chaussée du bâtiment Coriolis de l'Ecole des Ponts. La troisième partie du projet a été consacrée à la recherche d'une filière de valorisation de l'urine en tant que ressource. Ce projet a permis de préciser les caractéristiques attendues de l'urine collectée sur un lieu de travail ainsi que les méthodes de collecte optimales. Les résultats sont encourageants et, sous réserve des mesures encore à réaliser, laissent envisager, par simple stockage, une efficacité de récupération de l'ordre de 99% des nutriments de l'urine. Les nombreuses pistes de valorisation étudiées ou mises en œuvre sont également prometteuses et ouvrent la voie à la mise en place d'un assainissement écologique du bâtiment Coriolis et plus largement d'un grand nombre de bâtiments similaires du Grand Paris.

Mots-clés : Assainissement - Séparation à la source – Urine – Azote – Phosphore – Valorisation agricole – Projet pilote

Abstract

With the combined effects of the increasing population of the Greater Paris and the decreasing flow of the river Seine due to climate change, the Wastewater Authority of the Greater Paris (SIAAP) is confronted to the limits of conventional sanitation of waste water. Urine source separation, which would allow on one hand to withdraw 80% of nitrogen in waste water before its treatment, would on the other hand provide a better carbon balance of sanitation and enable the recycling of nitrogen and phosphorus of human excretions in agriculture as a natural fertilizer. Supported by the SIAAP in the context of the OCAP research project, the pilot project AZURIS was thus developed in order to study, at the scale of a building of the Ecole nationale des ponts et chaussées, the efficiency of the implementation of an entire process chain of instrumented treatment and recovery of urine.

Firstly, the project objective is to analyze the efficiency of urine treatment by storage, by performing a characterization study of fresh and stored urine for agricultural use, then in a second stage to set up a urine recovery tank from the dry urinal on the ground floor of the



Coriolis building of Ecole des Ponts. The third part of this project is devoted to finding a recovery option for urine as a resource. This project has made it possible to specify the expected characteristics of collected urine on a working place as well as optimal collection methods. The results are encouraging and further measurements could show that it should be possible, simply by storage, to obtain a efficiency of recovery of about 99% on urine nutrients. The possibilities of agricultural use that were implemented or studied are also promising and pave the way towards implementation of ecological sanitation in Coriolis building and, at a broader scale, on numerous similar buildings of the Greater Paris.

Key words : Sanitation – Source separation – Urine – Nitrogen – Phosphorus – Agricultural reuse – Pilot project



Listes des sigles et abréviations

AZURIS :	AZ ote de l' UR ine à Coriolis
DBO :	Demande Biologique en Oxygène
CI :	Chromatographie Ionique
GES :	Gaz à effet de serre
LEESU :	Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains
MO :	Matière Organique
NT :	Azote total
OCAPI :	O ptimisation des cycles C arbone, A zote et P hosphore en ville
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
RAE :	Réseau d'Assainissement Ecologique
SAIMG :	Service des Affaires Immobilières et des Moyens Généraux (de l'ENPC)
SIAAP :	Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne
STEP :	Station d'Épuration des eaux usées
TDM :	Toilette du monde
TS :	Toilette sèche



Liste des figures

Figure 1: Contribution de l'urine, des fèces et des eaux grises sur l'azote, le phosphore, le potassium, la demande chimique en oxygène et le débit volumique des eaux usées domestiques (BERNE, 2008).....	13
Figure 2 : Toilettes à séparation à la source installées dans les 3 écovillages visités ; (a) Cuvette WostMan, Lotissement réhabilité à Hyldespjaeldet, Albertslund - Danemark (b) Cuvette WostMan, nouveau modèle, Lotissement écologique Munksøgård, Roskilde - Danemark (c) Cuvette Gustavsberg, Ecovillage à Understenshöjden, Stockholm - Suède ...	17
Figure 3 : Parcelles expérimentales de l'Université de Copenhague, visitées au Danemark	17
Figure 4 : Toutes les installations de toilettes sèches publiques mises en place par Sanisphère	19
Figure 5 : (a) Prototype d'un ancien modèle de TS des Gandousiers, pliables pour faciliter le transport. Sur ces TS les fûts sont placés en-dessous de la lunette. Les déjections humaines sont ensuite stockées sur une aire de compostage (b).....	20
Figure 6 : (a) Toilette sèche à séparation marque Separett. (b) Urinoir portable confectionné par Florent Brun	21
Figure 7 : Lieu au cœur du projet AZURIS : le Bâtiment Coriolis de l'ENPC.....	24
Figure 8 : Les toilettes B013, le point de collecte don d'urine de la Campagne AZURIS à Coriolis	28
Figure 9 : Réfrigérateur où sont disposés les flacons vides et les échantillons des participants de la campagne.....	29
Figure 10 : Le protocole expérimental suivi durant la collecte des échantillons de la Campagne AZURIS.....	30
Figure 11 : Vue d'une partie du parking de Coriolis	31
Figure 12 : Plan du parking de Coriolis sur lequel est indiqué la place réservée pour l'installation du dispositif	31
Figure 13 : (a) L'urinoir sec (c'est-à-dire sans chasse d'eau) du projet d'étude AZURIS, (b) Le point de sortie de la canalisation de l'urinoir sec.....	32
Figure 14 : Précipitations découvertes dans les tuyaux correspondants à l'urinoir sec lors des travaux pour l'installation du dispositif	33
Figure 15 : La cuve de récupération d'urine de l'urinoir sec à Coriolis.....	34
Figure 16: Le tarage de la cuve. (a) Ecoulement par volume , (b) Mesure de la hauteur d'eau à l'intérieur de la cuve.....	35
Figure 17: La courbe de tarage de la cuve	35
Figure 18 : Le Boxplot caractérisant le pH d'urine masculine de la Campagne AZURIS.....	41
Figure 19:Le Boxplot caractérisant la concentration d'azote total d'urine masculine de la Campagne AZURIS.....	43



Figure 20: Le Boxplot caractérisant la concentration de phosphates contenue dans l'urine masculine de la Campagne AZURIS	45
Figure 21 : Corrélation entre la quantité d'azote et la quantité de phosphore.....	46
Figure 22: Le Boxplot caractérisant les concentration des sulfates et chlorures contenue dans l'urine masculine de la Campagne AZURIS	47
Figure 23: Courbe a - Corrélation entre la quantité d'azote et la quantité de sulfates ; Courbe b – Corrélation entre la quantité d'azote et la quantité de chlorures.....	47
Figure 24: Evolution des paramètres de l'urine stockée dans les bidons	49
Figure 25: Frise chronologique des événements et de différentes actions réalisées autour de la cuve.....	52
Figure 26: Variation de la conductivité dans la cuve de récupération d'urine	52
Figure 27: Variation du pH de l'urine stockée dans la cuve.....	52
Figure 28: Evolution de l'azote total dans la cuve	53
Figure 29 : Carte répertoriant tous les acteurs contactés lors de la recherche de filière	54
Figure 30: Le réacteur à struvite fabriqué par Ecosec	55
Figure 31: Affiche de la conférence internationale de la D.Event, l'innovation par le design thinking.....	56
Figure 32 : Le stand lors de la campagne de communication, le 23 juin 2016	57
Figure 34: Savez-vous que les boues de station d'épuration sont épandues sur les champs ?	58
Figure 33: Savez ce que devient l'urine d'un urinoir ?.....	58
Figure 35: (a) Pensez-vous que ce soit une bonne idée de recycler l'urine en engrais naturel ? (Réponse Bonne ou mauvaise idée).....	59



Liste des tableaux

Tableau 1 : Performances des procédés de traitement des urines en fonction des objectifs poursuivis	22
Tableau 2 : Caractérisation de la composition de l'urine fraîche et de l'urine stockée provenant de différentes sources bibliographiques.....	37
Tableau 3 : Volume moyen d'une miction d'urine.....	39
Tableau 4 : Caractérisation d'urines masculines fraîchement excrétées.....	40
Tableau 5 : Valeurs du pH de l'urine fraîche obtenues lors de la Campagne AZURIS	41
Tableau 6 : Valeurs de la teneur d'azote total contenue de l'urine fraîche obtenues lors de la Campagne AZURIS.....	42
Tableau 7 : Valeurs de la concentration de phosphates contenue dans l'urine fraîche obtenues lors de la Campagne AZURIS	44



Liste des annexes

Annexe 1 : Le livre « Projet AZURIS-FAQ »	66
Annexe 2 : Affichage de la campagne de collecte d'AZURIS.....	74
Annexe 3 : Consignes de don d'urine	75
Annexe 4: Affiche pour informer de l'installation de la cuve de récupération d'urine	76
Annexe 5 : Questionnaire du sondage effectué le 23 juin 2016 lors de la D.Event	77



Introduction

La concentration géographique des populations dans les villes, par le passé comme par le présent, fait l'objet de nombreuses préoccupations dont la gestion des effluents constitués par les eaux domestiques et les déjections humaines. Autant au 19^{ème} siècle, l'obsession d'hygiène et les exigences de santé publique ont motivé les premiers dispositifs d'évacuation d'eaux usées hors de la ville ; autant aujourd'hui, à l'aube du 21^{ème} siècle, la préservation d'un environnement sain devient une priorité. Cela suscite une vraie prise de conscience concernant la dégradation de certaines ressources qui cause un état de déséquilibre planétaire. En vous promenant à Paris, vous ne manquerez pas de constater que les rues sont propres, mais ne verrez pas que la pollution se retrouve en partie dans les cours d'eau. Avec le principe du tout-à-l'égout, les effluents acheminés à l'extérieur des villes sont déversés en quantité importantes dans le milieu naturel (lacs, fleuves, rivières) et impactent la qualité des milieux aquatiques par des rejets d'azote et de phosphore des eaux usées. Ces derniers participent à l'eutrophisation des milieux aquatiques. Même si la France s'est récemment dotée d'un parc de stations d'épuration lui permettant indubitablement de reconquérir une partie de la qualité de ses milieux aquatiques, le modèle français de l'assainissement par tout-à-l'égout souffre encore au moins de 3 maux :

- Une épuration encore incomplète des eaux usées, en particulier de l'azote, dont le seuil réglementaire de 70% d'élimination en station d'épuration signifie encore le rejet de 30% de l'azote des villes en rivière ;
- Une absence ou un faible recyclage de la majorité des éléments présents dans les eaux usées (carbone, azote, phosphore, etc.) ;
- Des externalités négatives importantes telles que les émissions de gaz à effet de serre (dont le N₂O lors de la nitrification/dénitrification), le coût d'entretien des réseaux d'égout, les rejets de temps de pluie, etc. (F. Esculier, 2015)

Ainsi, une des pistes envisagées pour pérenniser « l'assainissement du futur » pour qu'il soit durable, est d'étudier les différentes voies d'évolutions alternatives à l'assainissement classique actuel dont la séparation de l'urine des eaux usées à la source. Cette étude est le point de départ de plusieurs travaux, dont mon stage.

Le cadre du stage

Ce mémoire est réalisé à partir d'un stage de fin d'étude d'une durée de six mois au Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains (LEESU) de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), effectué dans le cadre du Master II Systèmes Aquatiques et Gestion de l'Eau dont la formation est répartie sur trois établissements : Université Paris Diderot, Université Paris-Est Créteil et l'ENPC. Le LEESU est un laboratoire commun de l'Ecole des Ponts Paris Tech, l'Université Paris-Est Créteil et AgroParis Tech, spécialisé dans la gestion des eaux urbaines et s'intéressant à trois axes de recherche :

- d'une part, la physique et l'hydrologie dont l'étude porte sur le cycle des eaux pluviales ;
- d'autre part, la biogéochimie, qui étudie les sources et les flux des contaminants chimiques et microbiologiques sur les bassins versants urbains et leur impact sur le milieu récepteur ;
- et enfin, la socio-technique avec l'étude des politiques et des usages de l'eau et leurs évolutions en milieux urbains.



Ce stage est intégré au programme transversal de recherche OCAP, Optimisation des cycles Carbone, Azote et Phosphore en ville, qui travaille en partenariat avec le SIAAP, Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne, et l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN). Le projet OCAP remet à l'ordre du jour le débat du tout-à-l'égout et l'un de ses objectifs est d'étudier l'évolution possible des systèmes d'assainissement urbains permettant de maximiser la valorisation des ressources carbonées, azotées et phosphorées tout en limitant l'impact sur l'environnement et les consommations d'énergie. Une des techniques alternatives les plus prometteuses consiste à séparer à la source les divers composants des eaux usées en particulier l'urine et les matières fécales qui représentent l'essentiel des ressources organiques envoyées en égouts. En particulier, l'urine humaine renferme la majorité des nutriments qui sont aujourd'hui éliminés par des procédés intensifs dans les stations d'épuration. La collecte séparée de l'urine pourrait être possible par l'usage de toilettes à séparation ou par des urinoirs. Elle aiderait à boucler le cycle des nutriments en facilitant le recyclage et l'utilisation des excréments dans la production agricole.

Les objectifs du stage

Dans le contexte exposé ci-dessus, le but de mon stage est de mettre en place un projet pilote unique en France avec une visée démonstrative jamais encore réalisé par un laboratoire de recherche français. Afin de permettre l'émergence de cette filière innovante d'assainissement, mon stage consiste plus spécifiquement à réaliser et analyser un scénario de mise en place d'une chaîne complète de collecte et de valorisation d'urine. Ainsi, les missions étaient les suivantes :

- Concevoir, dimensionner puis mettre en place un système de collecte et valorisation d'urine ;
- Instrumenter ce système afin de réaliser un bilan de l'efficacité de la valorisation de l'azote et du phosphore urinaire ;
- Effectuer une revue des techniques de traitement des urines ;
- Tester si possibles des techniques de traitement des urines.

Les résultats du stage serviront en particulier pour une thèse, réalisée actuellement par Fabien Esculier, sur les voies possibles d'évolution des systèmes d'assainissement qui permettraient de faire face aux enjeux du 21^{ème} siècle.

1. La séparation à la source de l'urine : une technique d'assainissement écologique

L'assainissement écologique se définit comme une nouvelle approche qui intègre la gestion des déchets solides et liquides. Elle est fondée sur la réutilisation et la conservation des ressources naturelles. Elle a pour objectif de préserver la santé humaine, d'augmenter la fertilité des sols et de réduire les nuisances causées à l'environnement. (Mustin, 1987).

Avec le développement du projet Grand Paris, initié par le gouvernement en 2007 qui a pour objectif de transformer la capitale en une grande métropole mondiale et européenne, une augmentation de la population d'environ 1 million d'habitants est prévu d'ici 2030. Cet



accroissement de l'urbanisation n'est pas sans conséquences sur l'assainissement et le traitement des eaux usées.

En effet, le SIAAP, la collectivité chargée de collecter en fin de parcours et de traiter les eaux usées de l'agglomération parisienne, s'interroge sur ses capacités épuratoires au vu de cette accélération et densification urbaine, les rendements épuratoires des stations d'épuration atteindront ses limites sans parvenir à un bon état écologiques des cours d'eau. Le SIAAP doit donc trouver une solution alternative rapidement d'où son intérêt d'étudier la collecte sélective des urines.

1.1. Composition de l'urine et proportion de l'urine dans les eaux usées

L'urine permet l'évacuation par le corps humain des déchets du métabolisme cellulaire et des toxiques à élimination rénale présents dans le sang. Intégrant 95% d'eau, elle se compose dans les 5% restants de matière organique dont l'urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ en grande majorité, d'éléments minéraux (chlore, sodium, potassium, phosphate, ammonium, etc.), d'enzymes et d'hormones naturelles. Sa composition varie fortement d'un individu à l'autre et même d'un moment de la journée à un autre, selon l'activité du métabolisme. En Europe, un individu excrète en moyenne 1,5 litres/jour, en médecine la production considérée est de 1,25L/pers/jour (Udert,2003).

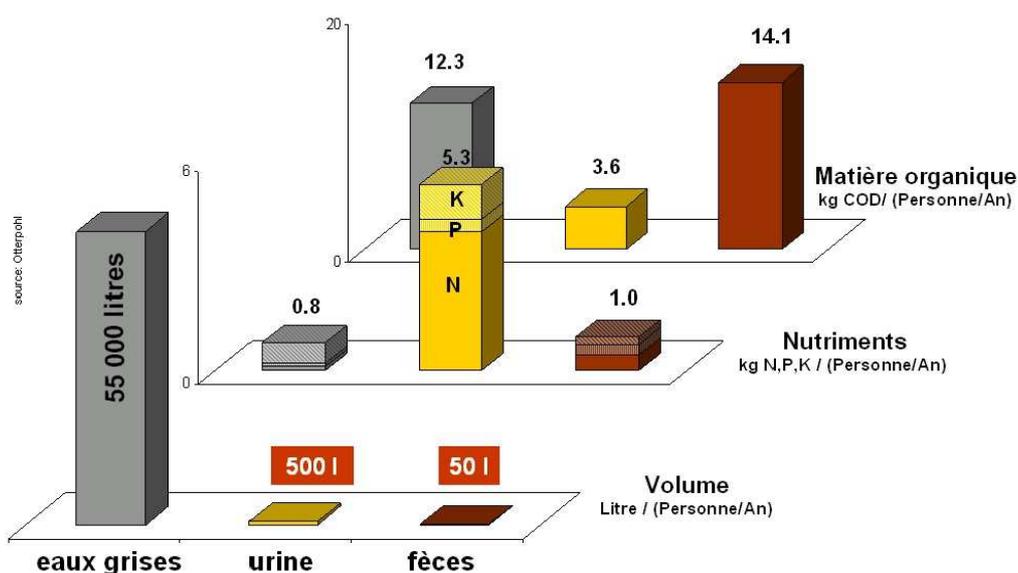


Figure 1: Contribution de l'urine, des fèces et des eaux grises sur l'azote, le phosphore, le potassium, la demande chimique en oxygène et le débit volumique des eaux usées domestiques (BERNE, 2008)

Pourquoi devrait-on collecter l'urine ? Lorsqu'on observe, la composition des rejets humains, on constate que l'urine représente seulement 1% du volume des eaux usées mais elle contient davantage de nutriments que les eaux grises et les matières fécales : la majorité des nutriments s'y retrouvent avec 80% de l'azote et 60% du phosphore (J. Spangberg, 2014). Donc, sortir les urines du réseau d'assainissement actuel permettrait de récupérer les rejets azotés et phosphorés des ménages. Mais quel est l'intérêt de recycler l'azote et le phosphore ?



1.2. L'azote et le phosphore : consommateurs d'énergie et de ressources

L'azote et le phosphore sont des éléments essentiels pour le développement de tout être vivant, y compris les plantes et les animaux. Ces constituants nutritifs sont trouvés dans les sols, captés par les végétaux et sont ensuite assimilables pour les hommes et les animaux. Or, l'activité humaine intensive a bouleversé ces cycles de l'azote et du phosphore en augmentant les besoins en minéraux pour produire des plantes plus vite. Mais d'où proviennent les engrais appliqués aux cultures ?

1.2.1. Azote

L'azote joue un rôle clé dans la croissance de la plante. C'est une ressource considérée comme inépuisable puisqu'elle est naturellement présente dans l'air qui est composé de 80% d'azote sous forme de diazote N_2 . Ce dernier ne peut pas être assimilé par les plantes que sous forme de nitrates NO_3^- . Le passage du premier état au second est possible par le procédé d'Haber-Bosch, mais celui-ci est très énergivore puisqu'il faut fournir 12kWh pour produire 1kg d'azote. (T. Larsen, 2013).

1.2.2. Phosphore

Le phosphore est un élément essentiel, car il permet la croissance des végétaux entre autre en stimulant leur photosynthèse. Le phosphore est indispensable à l'agriculture d'autant plus qu'il n'existe pas de substitut qui pourrait combler les apports nécessaires aux végétaux. En France, la plupart des stocks primaires de phosphore des sols agricoles ont été totalement épuisés et la production agricole française est très fortement dépendante de l'importation d'engrais phosphatés. Ces engrais sont fabriqués à partir de phosphore d'origine minière. Près de 90% des quantités de phosphore extraites dans le monde sont ainsi destinées à la fabrication des matières fertilisantes, le reste étant partagé entre détergents, et quelques applications marginales (Anna Richert, 2010). Au rythme actuel croissant d'extraction et d'utilisation, 167 Mt par an en 2011 (Enk, 2011), les réserves de phosphore devraient s'épuiser d'ici 60 à 130 ans, entraînant bien avant cette échéance une hausse du coût de cet élément indispensable. Les gisements, étant géographiquement concentrés dans quelques régions du monde majoritairement le Maroc, la Chine et l'Afrique du Sud, des crises géopolitiques liées au phosphore sont à attendre.

1.3. Les avantages et les inconvénients de la séparation à la source et la collecte sélective des urines

1.3.1. Avantages

Le premier avantage de la séparation à la source est qu'elle permet de maîtriser l'impact environnemental grâce à la diminution de la pollution à traiter par les STEPs. Depuis la création des STEPs, le traitement de l'azote a toujours été problématique. Dans les eaux résiduaires, l'azote, facteur limitant des Steps, est essentiellement présent sous forme organique et ammoniacal et doit subir quatre grandes opérations : l'ammonification, l'assimilation, la nitrification et la dénitrification. Ce mode d'élimination conventionnel de l'azote est complexe et demande une quantité importante d'énergie et de réactifs. Une étude du SIAAP menée par J.P Tabuchi et A. Caby montre qu'une collecte sélective de l'urine sur 400 000 logements à Paris, éviterait l'installation d'une nouvelle station d'épuration (Caby 2013)



Le deuxième avantage est la diminution de la consommation d'eau potable : les toilettes à chasse d'eau nécessitent beaucoup d'eau (potable) et un système de canalisations pour l'évacuation des eaux usées. Ces effluents sont soit acheminés dans des stations d'épuration où ils sont dépollués à grands renforts de moyens soit déversés dans l'environnement où ils polluent les mers, lacs, rivières et nappes phréatiques. En France, 165 litres d'eau potable sont consommés en moyenne par jour et par habitant (IFEN, Mars 2007) et en moyenne une chasse d'eau classique libère entre 3 à 6 litres d'eau potable. Ainsi, 20 à 30% de la consommation totale d'eau potable est utilisée pour les toilettes. (Cleau, 2016).

La séparation à la source permet également de traiter les micropolluants, l'urine concentre 64% ($\pm 27\%$) des résidus pharmaceutiques excrétés par les humains d'après les recherches effectuées par Lienert, 2007. Dans les systèmes d'assainissement avec égouts ces micropolluants sont rejetés des stations de traitement des eaux usées vers les eaux de surface et peuvent atteindre les eaux souterraines à long terme. Par exemple, les concentrations de résidus pharmaceutiques détectées dans les eaux souterraines se situent dans l'ordre de 50 ng/l en Allemagne (Heberer, 2000). Lorsque l'on compare ces deux approches (le mélange de l'urine avec de l'eau dans la gestion conventionnelle des eaux usées versus application d'urine sur le sol), il s'ensuivra probablement qu'il est plus sûr de rejeter l'urine dans le sol, plutôt que de la faire transiter par le système conventionnel. Les micropolluants peuvent mieux se dégrader dans les couches de sol aérobiques, biologiquement actives (forte concentration de micro-organismes) avec de plus longs temps de séjour que dans les plans d'eau dont l'écosystème est beaucoup plus sensible. Le sol est un milieu plus adapté à la dégradation naturelle des produits pharmaceutiques que l'eau (Anna Richert, 2010)

La récupération des nutriments de l'urine permet la production de fertilisants naturels et le retour au sol des éléments nutritifs d'azote et de phosphore. En France, chaque année un individu produit environ 5kg d'azote et 500g de phosphore, l'épandage de ces urines et fèces dans l'agriculture permet de diminuer jusqu'à 13% l'utilisation d'engrais synthétiques et faciliterait le recyclage par le sol de l'azote et du phosphore (augmentation jusqu'à 35% pour l'azote et 7% pour le phosphore). (Besson 2015).

1.3.2. Inconvénients

Les attributs à la séparation à la source sont nombreux mais ils sont freinés par plusieurs barrières.

La première difficulté est dans la mise en pratique ; installer des toilettes à séparation d'urine à la source en ville se révèle très complexe. En France, le réseau d'assainissement traditionnel est déjà en place donc réinstaurer un réseau d'acheminement pour l'urine nécessite des grands moyens, qu'ils soient techniques ou financiers.

D'autre part, des études ont montré que l'implication et la motivation des utilisateurs sont des facteurs importantes car cela impacte la quantité et la qualité de l'urine collectée (Crolais 2015) ; il faut donc informer et éduquer la population française à cette thématique pas assez répandue et connue. Aussi, il y a tout un travail sur l'appropriation du sujet important à faire en amont pour permettre qu'un tel système fonctionne, à l'image du tri sélectif des déchets solides. D'autant plus que ces toilettes à séparation d'urine bousculent les habitudes d'usage.



Au vu de tous ces points évoqués, nous pouvons conclure que les enjeux liés à la collecte sélective de l'urine sont nombreux, surtout du point de vue écologique. Nous allons voir dans cette deuxième partie qu'il y a différentes possibilités de traiter et de transformer l'urine et nous verrons les retours d'expérience des projets en Europe.

2. Retours d'expériences européennes

Face à l'impasse de l'assainissement conventionnel, plusieurs acteurs mondiaux ont expérimenté d'innovants équipements et techniques, bouleversant les méthodes de conception de filières et de gestion de territoires. A l'horizon, se dessine une réelle alternative avec l'assainissement écologique.

2.1. Les différents types de séparation à la source distingués en Europe

La littérature déjà existante présente plusieurs retours d'usagers dans les pays où des toilettes à séparation ont été installées. Nous allons exposer certains de ces résultats.

2.1.1. La Suède

Les actions de collecte sélective des urines ont réellement démarré à la fin des années 80 et début des années 90. Les premiers modèles de toilettes à séparation ont été introduits en 1993 et les premières applications ont eu lieu dans des écovillages par conviction militante. Le véritable essor date de la fin des années 1990 sur la base de travaux de recherche conduit notamment par l'université d'Uppsala. Ces expériences ont alors été soutenues par les pouvoirs publics et le pic d'installation des cuvettes a été en 2006 – 2007. Le changement politique intervenu en Suède a donné un coup de frein à ces développements mais nous assistons aujourd'hui à un regain d'intérêt pour ces techniques dans le cadre de la valorisation énergétique et des économies circulaires. Aujourd'hui en Suède nous comptons environ 120 000 toilettes avec une collecte séparée des eaux noires et environ 15 000 toilettes à séparation d'urine, d'autre part, les principales applications de cette technique sont en milieu rural ou dans des habitations individuelles. Au cours de ce stage, j'ai eu la chance de participer à un voyage d'étude en Danemark et en Suède, durant lequel, nous avons visité :



(a)



(b)



(c)

Crédit : J-P.T



Figure 2 : Toilettes à séparation à la source installées dans les 3 écovillages visités ; (a) Cuvette WostMan, Lotissement réhabilité à Hyldebjerg, Albertslund - Danemark (b) Cuvette WostMan, nouveau modèle, Lotissement écologique Munksøgård, Roskilde - Danemark (c) Cuvette Gustavsberg, Ecovillage à Understenshöjden, Stockholm - Suède

- trois écovillages, où des logements sont équipés parfois jusqu'à 2 toilettes sélectives « Urine Sorting toilets », à partir duquel l'urine est dirigée vers un lieu de stockage, un réservoir; selon le nombre d'habitant équipé, environ 12 m³ à 150 m³ d'urines sont vidangés à hauteur de 2 fois par an. L'entretien de ces toilettes est un point clé ; entretien mécanique au moins une fois par an (furet), et certains utilisent aussi du vinaigre. Le but de ces installations est d'être indépendant et d'avoir un système d'assainissement décentralisé.



Crédit : J-P. T

Figure 3 : Parcelles expérimentales de l'Université de Copenhague, visitées au Danemark

- des champs expérimentaux de l'Université de Copenhague pour y conduire des essais comparatifs depuis 2003 : il y a des parcelles témoins avec soit aucun apport, soit une fertilisation classique, ou fumiers, lisiers, urine humaine, compost. L'urine s'avère être un excellent fertilisant, équivalent aux engrais traditionnels.
- une société publique VASYD qui gère l'eau potable, l'assainissement et la collecte des ordures ménagères à Malmö, dont l'objectif est d'améliorer les performances épuratoires en bouclant le cycle de l'azote et phosphore. Ils tiennent à respecter les engagements du ministère de l'environnement de recycler 10% d'azote et de 40% de phosphore. Pour cela, VASYD compte mettre en place une opération pilote SuNha or later (Sustainable Urban Nitrogen Handling or later) dans le cadre du réaménagement d'un quartier de Malmö.
- The Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) à Uppsala, nous avons eu l'occasion de rencontrer le professeur Hakan Jönsson et son équipe, spécialiste du recyclage des nutriments et compte parmi les initiateurs de la collecte séparée de l'urine. Cette équipe travaille sur la stabilisation de l'azote et sur la réduction de volume par des voies plus rustique que l'EAWAG.

Pour conclure, la Suède compte parmi les pays le plus avancé dans le recyclage des nutriments, il faut d'ailleurs noter que le gouvernement suédois favorise et propulse ces projets par une législation en vigueur.



2.1.2. La Suisse

A partir de l'an 2000, la Suisse, a monté un groupe de recherche sur l'assainissement : Eawag, aquatic research qui fait partie de l'institut de recherche dans le domaine de l'eau des EPF (Ecole Polytechniques Fédérales de Suisse) à Zurich. L'eawag a mis en place un projet multidisciplinaire Novaquatis comprenant neuf modules organisé autour de la collecte sélective des urines : l'acceptabilité sociale, les technologies pour le stockage et le transport de l'urine, les traitements de l'urine pour la production de fertilisants agricoles, les traitements pour éliminer les micropolluants, les impacts liés à l'utilisation de l'urine comme fertilisants et des projets pilotes...

Novaquatis a travaillé notamment sur 4 projets pilotes où l'équipe de recherche a étudié les comportements, les problèmes et les impacts de la mise en place de la collecte sélective des urines :

- Des appartements privés : quatre appartements ont été équipés des No-Mixtoilet et d'un réservoir. L'ensemble des toilettes a été remplacé à cause de problèmes de sortie d'urine.
- Les bureaux de l'eawag : des toilettes à séparation et 3 urinoirs sans chasse d'eau ont été installés. La première toilette a été remplacée pour cause de colmatage.
- L'université des sciences appliquées du Nord de la Suisse a été équipée de 3 toilettes à séparation et 6 urinoirs sans chasse
- La bibliothèque de Liestal inauguré en 2005 est équipée des No-mix-Toilet, l'urine est stockée dans des réservoirs puis acheminée par camion vers une usine de traitement.

Les différentes installations placées par Novaquatis ont permis aux chercheurs de conclure sur une bonne acceptabilité de ces toilettes par la population. Mais l'installation à grande échelle, quant à elle, est plus compliquée car cette technologie nécessite une maintenance régulière sauf si c'est mis en place dans les lieux publics où l'accès est plus simple. Cette étude a mis en évidence un autre problème important de la séparation à la source : la précipitation des sels.

L'eawag a aussi participé avec des partenaires sub-africains au projet VUNA « Valorisation des nutriments de l'urine en Afrique ». VUNA a examiné toutes les étapes du système de recyclage des nutriments, de la collecte de l'urine jusqu'à la fabrication de l'engrais. Le fertilisant est fabriqué en deux étapes : la nitrification (transformation de l'ammonium de l'urine en nitrate par les bactéries) et l'évaporation pour obtenir une solution concentrée.

2.1.3. La France

La France s'est récemment penchée sur la question de séparation à la source en ville contrairement à nos voisins européens qui comptent plusieurs années d'étude et de recherche. Ceci dit, ce retard est légèrement en train d'être rattrapé grâce notamment à des acteurs comme le Réseau d'Assainissement Ecologique (RAE). Cette association, créée en 2006, rassemble des bureaux d'études, des artisans, des entreprises et des particuliers, dont l'intérêt général est d'œuvrer pour un système d'assainissement écologique qui s'inscrit dans une logique de recyclage de la biomasse et des éléments nutritifs. Lors de mon stage, j'ai eu l'occasion de participer à une « Intestinale du RAE », rencontre annuelle, et j'ai pu découvrir que leur champs d'action est large allant du juridique au développement de nouvelles techniques d'éco-assainissement de toilette sèche, pour une meilleure protection de la nature et de ses ressources. Les toilettes sèches (TS), aussi connues sous le nom de



toilettes à compost, sont des services très sollicités lors de rassemblement (festivals, concerts,..) mais aussi de plus en plus répandues auprès de particuliers. Les matières fécales accumulées dans ces toilettes dites sèches peuvent être directement compostées ou séchées.

Par ailleurs, j'ai eu la chance de visiter deux pionniers de services des TS situés dans la Drôme :

- Sanisphère, spécialisé dans la distribution des TS dans les lieux publics comme les aires de repos autoroutiers qui compte d'ailleurs presque 100 installations dont certaines sont



situées en Espagne, en Italie et en Suisse

Figure 4 : Toutes les installations de toilettes sèches publiques mises en place par Sanisphère

Crédit : AS

- Les Gandousiers, pionniers des TS pour l'évènementiel. J'ai pu remarquer que chacun de ses acteurs n'a cessé d'améliorer ces conceptions et de fabriquer des systèmes plus sophistiqués. Sanisphère a même développé des toilettes à séparation à la source selon un système gravitaire.





(a)



(b)

Crédit: FE

Figure 5 : (a) Prototype d'un ancien modèle de TS des Gandousiers, pliable pour faciliter le transport. Sur ces TS les fûts sont placés en-dessous de la lunette. Les déjections humaines sont ensuite stockées sur une aire de compostage (b).

Durant les intestinales du RAE, nous avons également rencontré Florent Brun, ingénieur d'étude et Qiong HE, stagiaire, à Toilette du monde (TDM)³, bureau d'étude associatif créé en 2001 par l'actuel gérant de Sanisphère, M. Colombo. Florent Brun travaille pour le développement et l'accompagnement des filières d'éco-assainissement en France et à l'international. Dont l'objectif est entre autre d'aider les populations les plus défavorisées à avoir accès à des services d'assainissement durable et plus spécifiquement sur l'assainissement non collectif. Lors d'une visite à TDM, nous avons remarqué la présence de WC sèches sans eau dans leur local, l'association composte ces déchets.

³ Par ailleurs, Fabien Esculier co-encadre Qiong HE une stagiaire de TDM dont les travaux portent sur « Les caractérisations de filières d'assainissement des matières de toilettes sèches mobiles et urbaines ».





(a)



(b)

Crédit : FE

Figure 6 : (a) Toilette sèche à séparation marque Separett. (b) Urinoir portable confectionné par Florent Brun

Pour finir, nous avons pu constater grâce aux rencontres avec les acteurs du RAE, les prestataires de TS, certaines limites dans la gestion des effluents récupérés. En effet, bon nombre de ceux qui proposent des services de toilettes sèches se retrouvent à gérer des litres d'urine issus des urinoirs lors des festivals et ne savent pas trop quoi en faire. Les Gandousiers ont deux cuves IBC contenant 2 m³ d'urine en attente de valorisation depuis plus d'un an.

2.2. Les différentes techniques de traitements de l'urine permettant la récupération des éléments nutritifs pour la valorisation agricole

La séparation à la source et la manipulation sûre des éléments nutritifs à partir des systèmes d'assainissement sont des moyen de faciliter le recyclage et l'utilisation des excréta dans la production agricole. Mais les urines brutes ne sont pas valorisables immédiatement après la production car elles sont instables et peuvent contenir des agents pathogènes. Grâce au projet Novaquatis, de nombreux chercheurs de l'Eawag ont développé et testé diverses technologies, du simple stockage à des procédés les plus sophistiqués. Ainsi, nous allons lister quelques techniques de traitement qui existent puis nous vous présenterons ceux qui ont été retenus dans le cadre de notre projet.



Tableau 1 : Performances des procédés de traitement des urines en fonction des objectifs poursuivis

Procédé	Élimination de l'azote	Élimination micropolluants	Récupération azote	Récupération phosphore	Réduction volume	Consommation énergétique	Forme du produit
Stockage simple	Non	Non	Oui, risque d'ammoniac volatil	Oui	Non	Faible	Liquide
Stockage avec acidification	Non	Moyenne (50-95%)	Oui	Oui	Non	Faible	Liquide
Précipitation struvite	Non	Bonne (98%)	Faible	Oui	Oui	Faible	Solide
Nitrification-distillation	Non	Moyenne	Oui	Oui	Oui	Forte	Liquide
Anammox	Oui	Ne sait pas	Non	Non	Non	Moyenne	-
Électrodialyse	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Forte	Liquide
Nanofiltration	Non	Oui	Oui	Oui	Légère	Forte	Liquide
Ozonation	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Forte	Liquide

Source : (Crolais 2015)

Selon les analyses effectuées par A. Crolais (L'or liquide, 2015), les technologies présentées dans le tableau ci-dessus sont conçues pour des objectifs précis et des attentes particulières. Nous ne pouvons pas nous prononcer sur le meilleur de ces traitements, car ces techniques ne sont pas adaptées à toutes les situations. Cependant deux stratégies de traitements des urines se distinguent :

- le **traitement uniquement** dont le but est de rejeter les urines après un traitement, dans les milieux pour soulager les STEPs (des traitements azotés). Pour cela, nous privilégierons les technologies pour éliminer les nutriments comme Anammox ;
- la **valorisation des urines** pour obtenir un produit sûr de point de vue sanitaire pour l'épandage avec une préférence pour un produit concentré. Dans ce cas, la précipitation sous forme de struvite et le procédé de nitrification/distillation sont de bons moyens pour avoir de l'engrais concentré.

2.2.1. L'Hygiénisation par stockage : solution technique la plus simple et la moins coûteuse

A la sortie du corps humain, l'urine est une solution instable qui ne peut pas être immédiatement valorisée car elle peut contenir des agents pathogènes. Dans les expériences internationales, la majorité des risques sanitaires provient de la contamination croisée des urines par les fèces. Il est donc recommandé de traiter l'urine ; le premier traitement que subit l'urine c'est l'hygiénisation par le stockage. L'hygiénisation de l'urine est possible grâce aux propriétés de l'urine : l'urine est un fluide très riche en sels minéraux avec un pH élevé de 9 environ (valeur de l'urine stockée). La croissance des microorganismes est nulle et d'après l'étude bibliographique menée par Besson, 2015 ; E.Coli diminue de plus de 6 log₁₀ en une semaine.



Le stockage est la solution technique la plus simple, la plus efficace et la moins coûteuse pour revaloriser l'urine en engrais naturel. De plus, elle permet l'épandage direct de l'urine dans les champs ou compostage ou mélange à du fumier. D'ailleurs, l'OMS recommande d'utiliser une urine stockée pendant un mois à 4°C uniquement pour les cultures devant être transformées. Tandis qu'un stockage à 20°C, pendant 6 mois, l'urine peut être utilisée pour tout type de culture (Richert A. 2011).

2.2.2. Récupération phosphore : précipitation sous forme de struvite

En vue de la pénurie à venir du phosphore pour les besoins agricoles, améliorer la récupération du phosphore est une nécessité au sein des stations d'épurations. La précipitation de la struvite est la méthode la plus efficace pour concentrer le phosphore présent dans l'urine (Maurer, 2006). La struvite est couramment utilisée comme un engrais à libération lente et peut être améliorée pour la commercialisation potentielle. La précipitation est déclenchée par l'ajout de magnésium (sous différentes formes de magnésium disponibles). Le processus se déroule suivant trois étapes :

- L'addition de magnésium ;
- L'équilibre du pH à 9 ;
- Le phosphore précipite alors avec le magnésium en struvite.

La précipitation de la struvite permet de récupérer 95-98% de phosphore (Kimberly LeMonde Fewless 2011) et des études ont montré que les produits pharmaceutiques et les hormones restent en solution, ce qui en fait un engrais déchargé de micropolluants.

Pour conclure, après l'étude rapide sur les techniques alternatives existantes, en terme d'intérêt environnemental et pour les nombreux avantages qu'ils présentent ; nous privilégierons deux méthodes de traitement de l'urine dans le cadre du projet : le stockage prolongé et la production de struvite.



3. Projet pilote AZURIS: mise en place d'une chaîne complète instrumentée de traitement et valorisation de l'urine dans le bâtiment Coriolis de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

3.1. Objectifs du projet AZURIS

Ce projet pilote AZURIS, pour l'Azote de l'Urine à Coriolis, est un projet spécifique monté en partenariat entre le LEESU et la d.school et il se déroule dans le bâtiment à énergie positive Coriolis situé au sein de l'établissement ENPC. Ce bâtiment héberge des laboratoires de recherche à vocation internationale (CEREA, LIGM, CERMICS), la d.school ainsi que des bureaux, des salles de cours et un grand amphithéâtre modulable. La particularité de Coriolis, en plus d'être un bâtiment à énergie positive est la présence, dans tous les étages (5 étages dans l'aile gauche et 3 dans l'aile droite) d'urinoirs secs dans les toilettes masculines.



Crédit : ENPC

Figure 7 : Lieu au cœur du projet AZURIS : le Bâtiment Coriolis de l'ENPC.

La base du projet repose sur une idée simple : réaliser la collecte et le traitement de l'urine à Coriolis. En effet, les urinoirs masculins du bâtiment sont sans eau, nous pouvons donc récupérer facilement cette urine non diluée par le biais de l'urinoir sec, afin de la transformer grâce à un traitement au préalable pour obtenir un produit réutilisable. Donc au lieu d'évacuer les urines avec une grande quantité d'eau dans les égouts comme cela se fait actuellement, le projet AZURIS a pour vocation de valoriser l'urine de tous les urinoirs secs du bâtiment Coriolis. La première étape est de détourner les urines de l'urinoir sec des toilettes masculines, qui se trouvent au rez-de-chaussée du bâtiment, à l'aile gauche, juste à côté de la loge du gardien. De ce fait, nous avons choisi d'étudier spécifiquement cet urinoir car il est adapté au projet et facile à équiper ; la canalisation par laquelle coule l'urine est accessible depuis le sous-sol et nécessite une simple intervention pour détourner et récupérer les urines du réseau d'assainissement actuel. L'installation de la cuve est traitée plus en détail dans la partie 3.2.4.

Grâce à ce projet pilote, nous pourrons avoir un retour en situation réelle pour valider les intérêts de la séparation à la source.



En effet, le principal but du projet est de développer des connaissances scientifiques sur une chaîne complète de récupération, traitement et valorisation d'urine. Le procédé devra avoir un coût de mise en œuvre et d'exploitation faible.

Dans un premier temps, notre approche a été de chercher un procédé qui permettrait de récupérer l'ensemble des nutriments déjà présents dans l'urine et sans pour autant mettre en place un procédé trop complexe et intensif. Pour cela, nous avons opté pour le choix de deux traitements simples à réaliser :

- l'hygiénisation par stockage qui est une des techniques les plus simples et les moins coûteuses. Ce procédé permet de récupérer l'azote, le phosphore et des sels minéraux : sulfates, calcium, magnésium. Mais ce stockage est aussi susceptible d'entraîner des pertes de matière dues à la volatilisation d'ammoniaque pendant l'hydrolyse de l'urée (K.M. Udert, 2006). Ce que nous tenterons d'étudier dans ce rapport.
- la précipitation de struvite⁴ permet de valoriser une partie des nutriments présents dans l'urine. Ainsi, le recyclage d'une partie de l'azote et du phosphore sous une forme solide pourrait être utilisé directement comme engrais.

L'urine étant une solution instable, dont les teneurs de certains composants évoluent, nous avons donc privilégié une méthodologie en 3 étapes, pour effectuer un bilan azoté et phosphoré du système :

- Caractérisation de l'urine fraîche grâce à une campagne de collecte d'urine ;
- Caractérisation de l'urine stockée en réalisant le suivi des éléments nutritifs d'urine stockée issue de la campagne de collecte ;
- Caractérisation de l'urine stockée en réalisant le suivi de l'azote et phosphore dans la cuve de récupération d'urine de l'urinoir sec masculin

Nous décrivons dans un premier temps les matériels et les méthodes d'analyses employées, puis nous verrons dans un deuxième temps les caractéristiques de l'urine à l'excrétion, et dans un troisième temps les caractéristiques de l'urine stockées et pour finir nous ferons une synthèse des résultats.

⁴ Cette thématique a fait l'objet du stage de Maxime Dechesne « Mise en place d'un réacteur de précipitation de struvite à partir d'urine humaine » dans le cadre du Projet OCAP, réalisé en mai-juillet 2016 au LEESU.



3.2. Matériels et Méthodes d'analyses

3.2.1. Paramètres physico-chimiques étudiés pour l'urine fraîche et stockée

Afin d'étudier les différents échantillons d'urine des mesures sont effectuées. Nous avons voulu déterminer plusieurs paramètres pour étudier l'ensemble des caractéristiques de l'urine.

Parmi ceux-ci, les paramètres suivis sont :

- les teneurs en azote total ;
- les concentrations de phosphates, sulfates et chlorures ;
- le pH ;
- la conductivité ;
- la masse.

Pour des raisons pratiques, nous déterminons le volume de chaque miction par calcul et non à l'éprouvette graduée ; en testant cette manipulation en laboratoire nous constatons que l'incertitude liée à la mesure et à la lecture est élevée à cause de la formation de mousse causée par l'urine. D'autre part, cette manipulation est assez longue notamment quand elle doit être réalisée sur plusieurs échantillons. Donc, nous déterminerons le volume par calcul.

3.2.2. Description des protocoles et des matériels analytiques au laboratoire

Pour les analyses chimiques, nous avons utilisé des méthodes classiques en vigueur dans le laboratoire.

3.2.2.1. *Mesure du pH et de la conductivité*

Le suivi du pH et la conductimétrie des échantillons d'urine sont déterminés par la méthode électrométrique au pH-mètre de marque WTW Multi 340i/SET. Il permet de vérifier l'évolution de la solution, s'il y a eu acidification au cours du temps.

3.2.2.2. *Mesure de l'azote total*

Les analyses en Azote total sont effectuées avec un analyseur de carbone COT-mètre de marque SHIMADZU disposant d'un module TNM-1 et d'un passeur automatique 64 voies ASI-V. L'azote total est mesuré suite à une oxydation thermique avec une détection par chimiluminescence. Les NO formés réagissent avec l'ozone pour donner des NO₂ excités, le retour à l'état fondamental permet la détection. Les échantillons sont introduits par le passeur automatique. Une gamme d'étalonnage réalisée entre 0 et 100 mgN.L⁻¹ permet de calculer la concentration en Azote total correspondant à la solution analysée. Comme l'urine a une très forte concentration minérale, les échantillons doivent être dilués 200 fois avant l'analyse pour détecter les phosphates, sulfates et chlorure.

Le protocole d'analyse est le suivant :

- Prélèvement de 200 µL de l'échantillon ;
- Ajout de 40 mL d'eau-ultra.

3.2.2.3. *Analyse anionique*

La détermination des concentrations solutions anioniques : les phosphates, sulfates et chlorure ont été réalisées par analyses en chromatographie ionique de marque Metrohm 761



Compact IC. L'appareil est composé d'une colonne anionique Metrosep C4 150/4.0 (de longueur : 150 mm x 4 mm). Les différents ions sont plus ou moins retenus par les colonnes en fonction de leur affinité et sont détectés en sortie grâce à une cellule de conductivité. Un étalonnage de l'appareil permet de distinguer les ions en fonction de leur volume d'élution et de corréliser l'aire du pic obtenu à leur concentration. La limite inférieure de détection de l'appareil est de 0,5 mg/L pour chaque espèce ionique et la limite supérieure est de 100 mg/L. L'erreur relative est quant à elle de 10 %. En raison de la très forte concentration minérale de l'urine, les échantillons doivent être dilués 50 fois avant analyse. Le protocole analytique est le suivant :

- Prélèvement de 1 mL d'échantillon
- Complément à 50 mL d'eau ultra-pure

Il aurait été également intéressant de mesurer les cations présents dans l'urine par chromatographie ionique principalement :

- l'ammonium, le potassium, le calcium, le sodium et le magnésium. Toutefois, cette analyse n'était pas aisée : en particulier, les très fortes concentrations en ammonium de l'urine stockée pouvait rendre difficile la mesure simultanée des concentrations en ammonium et des autres cations par chromatographie ionique. Il a donc été décidé de restreindre les mesures aux anions et à l'azote total ce qui permet d'analyser les paramètres les plus importants pour notre étude, à savoir l'azote et le phosphore.

3.2.3. Campagne de collecte AZURIS - Echantillons d'urine

Dans le cadre de notre étude, comme nous installons un système de récupération d'urine à Coriolis à partir d'un urinoir masculin, il nous faut connaître les caractéristiques de l'urine à l'excrétion des usagers de sexe masculin, afin d'étudier la teneur et l'évolution des éléments valorisables de l'urine, soit principalement l'azote et le phosphore.

Pour avoir une estimation satisfaisante des caractéristiques de l'urine de la population étudiée, soit de l'ensemble des usagers de l'urinoir à Coriolis, nous avons déterminé le nombre d'échantillons à recueillir en prenant l'hypothèse d'une distribution des valeurs de concentration en azote et en phosphore dans l'urine suivant une loi normale. Nous avons estimé les valeurs de la moyenne m et de l'écart-type s de cette distribution à partir de la population étudiée par Kuntke, 2013 .

Formule du calcul de la taille de l'échantillon basée sur la concentration d'azote total :

$$n = \left(\frac{ts}{em} \right)^2$$

Avec :

n : nombre des échantillons

t : facteur de Student pour un niveau de confiance de 95% soit 1,96

e : marge d'erreur relative choisie à 10%

m : moyenne de la population étudiée par Kuntke 2013 (soit la moyenne de concentration d'azote total, $m = 8,6 \text{ g.L}^{-1}$)

s : écart-type de la population étudiée par Kuntke 2013 (soit $s = 3,7 \text{ g.L}^{-1}$)



La taille d'échantillonnage nécessaire pour un niveau de confiance à 95% et une marge d'erreur à 10% est ainsi estimée à 71 échantillons masculins minimum.

Pour la prise des échantillons d'urine fraîche dès l'excrétion, la Campagne AZURIS de Don d'urine a été lancée à partir du 22 avril jusqu'au 27 mai 2016. La campagne a été basée sur le principe du volontariat et de l'anonymat cependant, ceux qui le souhaitaient, avaient la possibilité de nous communiquer leur identité et de recevoir leur résultat. Pour atteindre ce nombre de « dons d'urine », nous avons réalisé une affiche de campagne, publié un article en ligne avec une rubrique foire aux questions, sollicité nos collègues du laboratoire et notre campagne est également passée sur le panneau d'affichage de l'ENPC.

Le point de collecte principal des échantillons était situé dans les toilettes masculines à Coriolis où se trouve l'urinoir sec sur lequel porte notre étude. Pour recueillir les échantillons d'urine à l'excrétion, un réfrigérateur a été installé dans ces toilettes durant toute la campagne.



Crédit : AS

Figure 8 : Les toilettes B013, le point de collecte don d'urine de la Campagne AZURIS à Coriolis



A l'intérieur du réfrigérateur a été disposé en libre-service, des flacons d'environ 580mL avec des consignes d'utilisation, à disposition des usagers.



Crédit : AS

Figure 9 : Réfrigérateur où sont disposés les flacons vides et les échantillons des participants de la campagne

Nous avons principalement ciblé les usagers masculins étant donné que le système de récupération d'urine sera connecté uniquement à l'urinoir masculin. Cependant, pour faire connaître notre projet à un maximum de personnes et ne pas freiner l'intérêt de la gent féminine à l'égard du projet, leur participation a été permise à condition que cela soit précisé et spécifié sur l'étiquette du flacon que l'échantillon provient d'une personne de sexe féminin. De façon plus générale, il est intéressant d'analyser les échantillons d'urine féminine. Ceci sort du cadre strict du projet AZURIS mais les données recueillies sur les analyses d'urine féminine pourront servir dans l'éventualité du recueil d'urine féminine sur des toilettes à séparation à la source ou sur des urinoirs féminins. L'urinoir féminin pourrait en effet être une piste intéressante de développement pour mettre en place la collecte sélective des urines.

Les échantillons sont conservés à 5°C et ils sont recueillis quotidiennement en fin ou en début de journée et se composent d'échantillons d'une miction d'urine complète.

Les échantillons sont directement analysés pour la masse, le pH et la conductivité et des petits flacons sont préparés et réservés à basse température (4°C) jusqu'à l'analyse pour la concentration des anions et la concentration de l'azote total. Ces échantillons recueillis permettront d'analyser la composition d'une miction d'urine de la population au cours d'une journée de travail.

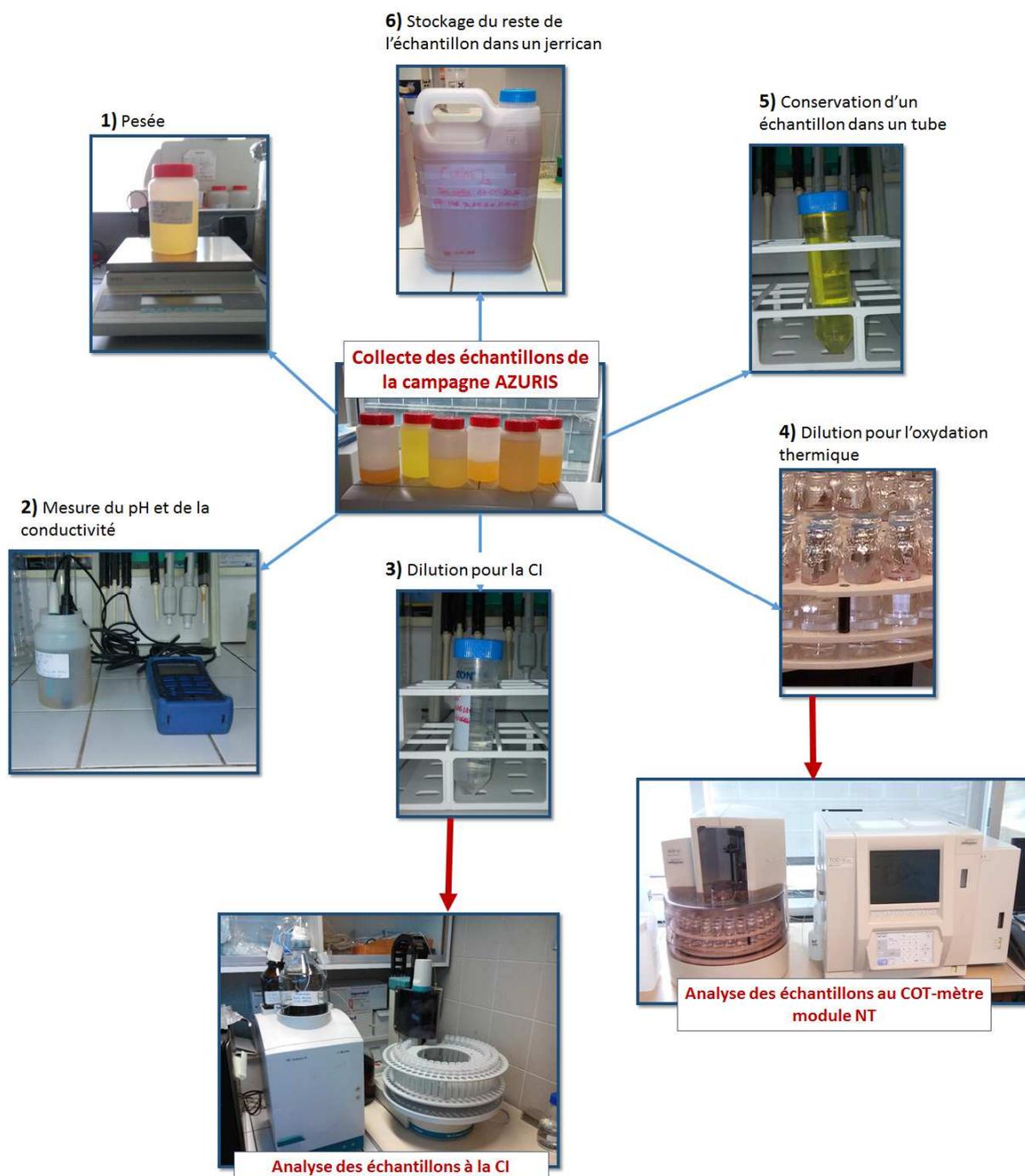
Vous trouverez en annexe 1, le détail du déroulement de la campagne AZURIS.⁵

A l'issue de la campagne, 133 échantillons d'urine au total ont été collectés dont 87 provenant de donneurs mâles, 39 de donneurs femelles et 7 provenant de donneurs de sexe inconnu. Ces échantillons sont nommés E1 à E133.

⁵ La campagne AZURIS est également consultable en ligne voir : <https://leesu.univ-paris-est.fr/AZURIS-presentation.html>



Le résumé du protocole suivi lors de la collecte pendant la campagne AZURIS :



Crédit : AS

Figure 10 : Le protocole expérimental suivi durant la collecte des échantillons de la Campagne AZURIS



3.2.4. Installation de la cuve de récupération d'urine

Un des objectifs du projet AZURIS est l'installation d'un système de collecte sélective d'urine connectée à l'urinoir sec du rez-de-chaussée dans le bâtiment Coriolis.

L'inconvénient de cet urinoir est qu'il ne peut être utilisé que par les hommes. Cependant, le plus grand avantage de cet urinoir sans eau est la potentialité d'extraire seulement de l'urine pure non diluée, et de surcroît l'urine collectée est dissociée des matières fécales réduisant nettement les risques de contamination avec les fèces. D'autre part, l'urine non diluée nécessite un volume moins grand de stockage, permet un meilleur traitement de l'urine et notamment plus efficace pour diminuer l'impact du transport de l'urine.

Le montage de la cuve a lieu au sous-sol du parking Coriolis, où la canalisation par laquelle l'urine circule est aisément accessible et nécessite une simple intervention de plomberie. Il a fallu obtenir dans un premier temps, l'autorisation auprès des Service des Affaires Immobilières et des Moyens Généraux (SAIMG) de l'ENPC, qui nous a donné son premier aval sous réserve de leur donner un protocole détaillé de la mise en place de notre projet, et dans un deuxième temps réserver une place entière de parking dédiée à notre projet.

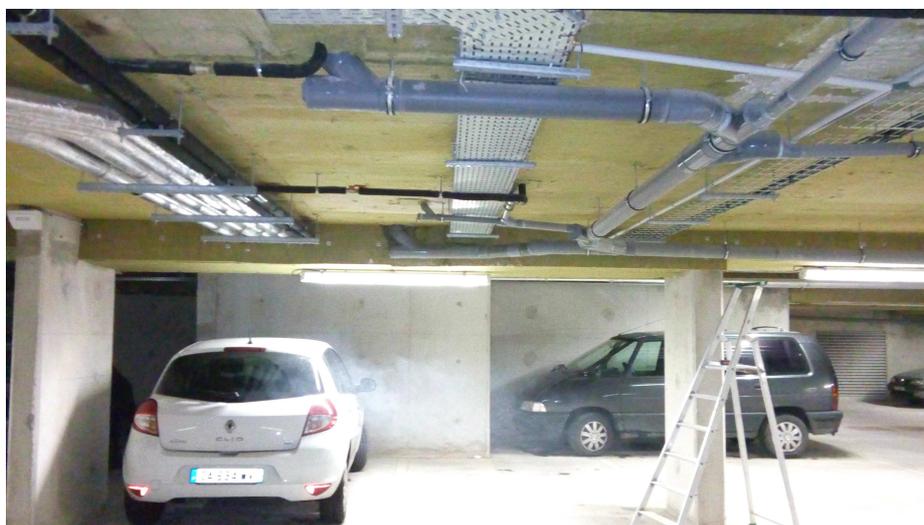
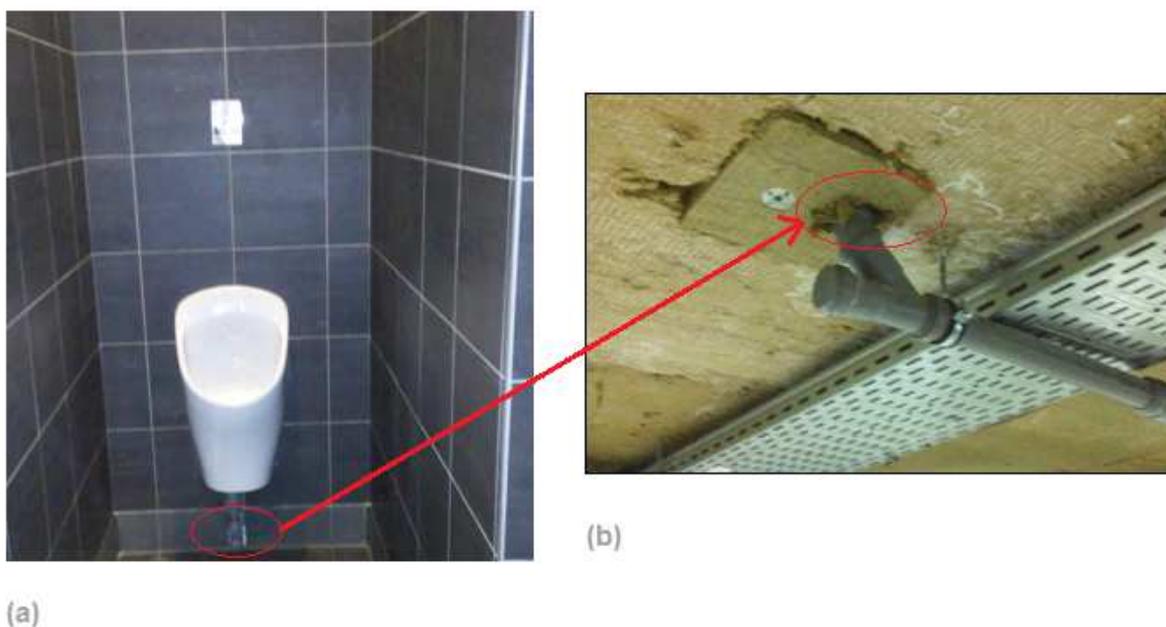


Figure 11 : Vue d'une partie du parking de Coriolis



Figure 12 : Plan du parking de Coriolis sur lequel est indiquée la place réservée pour l'installation du dispositif





Crédit : AS

Figure 13 : (a) L'urinoir sec (c'est-à-dire sans chasse d'eau) du projet d'étude AZURIS, (b) Le point de sortie de la canalisation de l'urinoir sec.

3.2.4.1. *Choix des matériaux*

Les matériaux nécessaires au montage de l'installation ont été minutieusement choisis et selon plusieurs critères techniques et pratiques. Les critères les plus importants, pris en compte et qui ont dicté notre ligne directrice durant toute la phase de montage du dispositif, sont la minimisation des pertes azotées et de formation des précipités des sels minéraux d'urine susceptibles d'entraîner des dépôts dans les tuyaux. L'accumulation de ces précipités qui sont, les cristaux de struvite et l'hydroxyapatite, peuvent provoquer des blocages après seulement quelques milliers d'utilisateurs (Lienert, 2007). Ainsi, pour la conception du système, nous nous sommes reposés dans un premier temps, sur des recommandations suédoises. Les solutions préconisées notamment par Jönsson, 2001, par Mats Johansson et David Gustavsson ⁶ plus celles recommandées par Samuel Lanoë (Lanoë, 2009) sont les suivantes :

- les tuyaux horizontaux doivent avoir une pente d'au moins 1%
- le système ne doit pas être ventilé. Si le dispositif est correctement façonné et étanche, les pertes d'ammoniac gazeux pendant la collecte et le stockage sont estimées à moins de 1% (Jönsson, 2001) voire 0,1% (J. Spangberg, 2014).
- le réservoir doit être rempli par le bas pour limiter la surface d'échange entre l'air et l'urine
- et pour finir, il faut faire des trous sur le tuyau au niveau de l'arrivée des urines en haut pour éviter les surpressions.

⁶ Mats Johansson, consultant suédois et David Gustavsson, chercheur suédois et danois rencontrés lors du voyage d'étude effectué en mai 2016.



Puis dans un deuxième temps, pour élaborer ce dispositif, nous avons pris en compte l'environnement du parking, son aménagement et les normes incendies instaurées dans le parking, qui nous a d'ailleurs contraint dans le choix des matériaux (le bois est interdit, nous avons dû exclure l'utilisation des palettes).

Comme, vous pouvez le constater sur la figure 15, le point de sortie de la canalisation de l'urinoir sec de notre étude se situe à un endroit stratégique, qui nous permet de placer notre réservoir sur une place du parking idéale car nous pouvons maintenir la cuve sur un des deux piliers par le biais de sangles de maintien. D'autre part, la hauteur du plafond est basse c'est un critère physique à considérer pour le choix de la cuve.

Pour finir, le choix du réservoir a été déterminant ; car elle devait correspondre à un volume optimal de récupération et de stockage. Son dimensionnement a été calculé selon une estimation de fréquence des usagers obtenu par la d.school qui a comptabilisé près de 450 personnes utilisant ces toilettes en 3 semaines du mois d'octobre 2015.

Sachant que le volume moyen d'urine produit par jour est de 1,25 L (K.M. Udert, 2006) et qu'un individu urinerait au minimum une fois sur son lieu de travail (même si statiquement il est prouvé que l'ensemble de la population urine plus sur son lieu de travail qu'à son domicile) s'il effectue une journée typique de 9h à 17h, on obtient :

Volume d'urine collecté dans la cuve par jour = nombre d'usagers * volume moyen d'urine masculine d'après la campagne AZURIS = $(450/15) * (0,310) = 9,3$ L/jour.

Ainsi, en un mois, près de 186 litre d'urine seront stockés dans la cuve, sachant que des vidanges seront effectuées régulièrement pour ne pas atteindre la capacité maximale de la cuve.

A partir de ces caractéristiques, nous avons opté pour l'achat d'une cuve destinée à la récupération d'eau pluviale, d'une capacité volumique de 340 litres, 141 cm de hauteur, 64,5 cm de largeur. Celle-ci a été rehaussée par des parpaings pour permettre la vidange dans des bidons de 20 Litres.

Dès lors que nous avons eu l'accord de la SAIMG, nous avons procédé aux travaux de plomberie à l'aide d'un agent plombier. Nous avons découvert en retirant les tuyaux existants pour dévier l'urine vers notre collecteur que la précipitation a eu lieu sur certaines parties du tuyau.



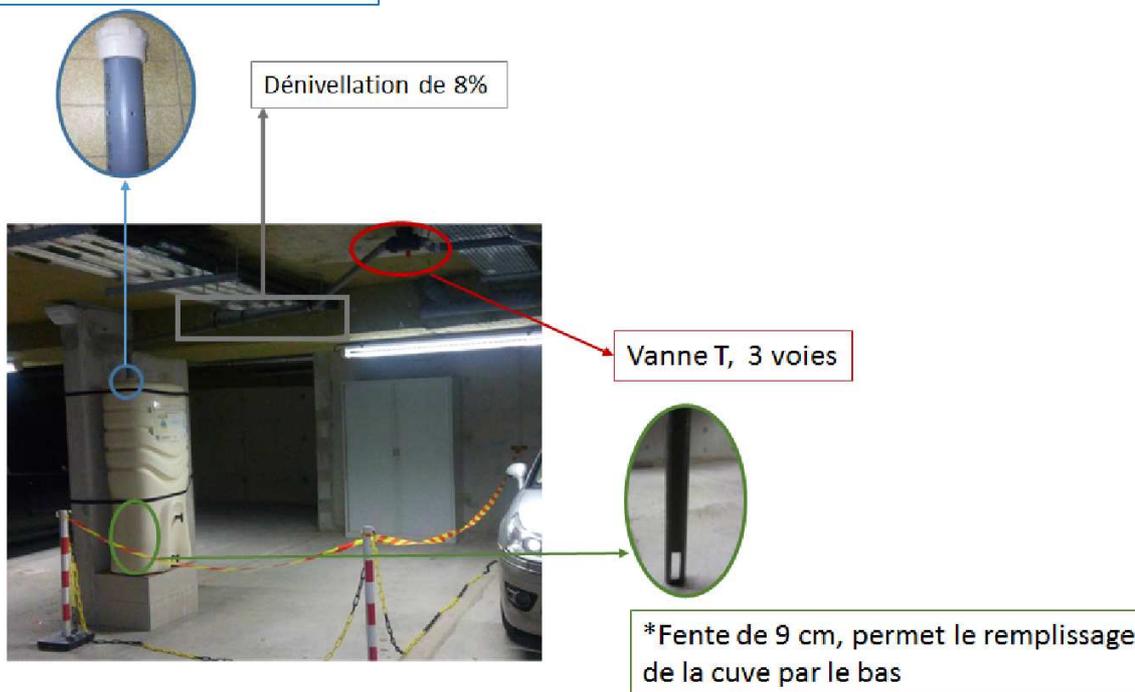
Crédit : AS & Ivanist

Figure 14 : Précipitations découvertes dans les tuyaux correspondants à l'urinoir sec lors des travaux pour l'installation du dispositif



Nous avons respecté les consignes promulguées par les suédois :

* Quatre trous au niveau de l'arrivée des urines dans la cuve



Crédit : AS

Figure 15 : La cuve de récupération d'urine de l'urinoir sec à Coriolis.

Pour faire le suivi des bilans des matières dans la cuve, il était initialement convenu:

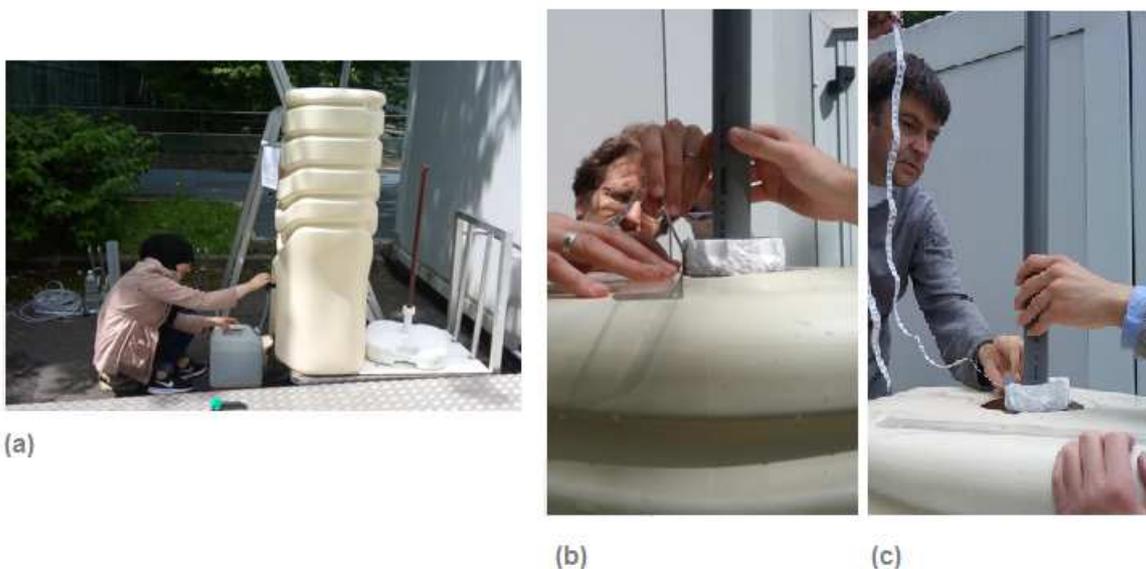
- de dévier la tuyauterie présente au sous-sol du parking de Coriolis et d'orienter les urines de cet urinoir vers une cuve de stockage ;
- d'installer un capteur de gaz ammoniacal pour mesurer les teneurs d'azote à l'intérieur de la cuve et à l'extérieur au niveau du parking pour quantifier les pertes d'azotes par volatilisation ;
- d'équiper l'urinoir sec et la cuve d'une interface numérique prise en charge par la d.school pour avoir un suivi en temps des flux entrants dans la cuve. A cet effet, la d.school devait munir le local des toilettes d'un capteur de présence et d'un capteur de niveau à l'intérieur de la cuve. Ces dispositifs avaient pour but de nous renseigner sur la fréquence d'utilisation et le volume de miction de chaque usager.

3.2.4.2. Tarage de la cuve

Pour diverses raisons de procédures et de temps, les installations numériques et le suivi par un capteur d'ammoniac n'ont pu être réalisés mais ils se feront en dehors du cadre de mon stage. Nous avons réalisé le tarage de la cuve pour connaître quelques paramètres et s'assurer de sa linéarité et qu'il n'y ait pas de rupture dans la cuve de pas sa forme non conventionnelle et régulière.



Pour réaliser ce tarage, nous avons rempli la cuve d'eau au maximum de sa capacité et nous l'avons équipée d'un flotteur relié à un mètre. Au fur et à mesure qu'on vide la cuve, on note le volume et la hauteur d'eau à l'intérieur de la cuve. Nous notons la hauteur d'eau à chaque volume d'un litre écoulé pour les cinquante premiers litres, puis de 50 à 300 litres, nous notons la hauteur tous les 10 litres et pour avoir plus de finesse à la fin, nous relevons la hauteur à chaque litre. Nous avons pu ainsi déterminer le volume mort de la cuve, évalué à 18,5 litres. Ce volume mort est situé entre le fond de la cuve jusqu'au premier niveau du robinet.



Crédit : MD

Figure 16: Le tarage de la cuve. (a) Ecoulement par volume, (b) Mesure de la hauteur d'eau à l'intérieur de la cuve

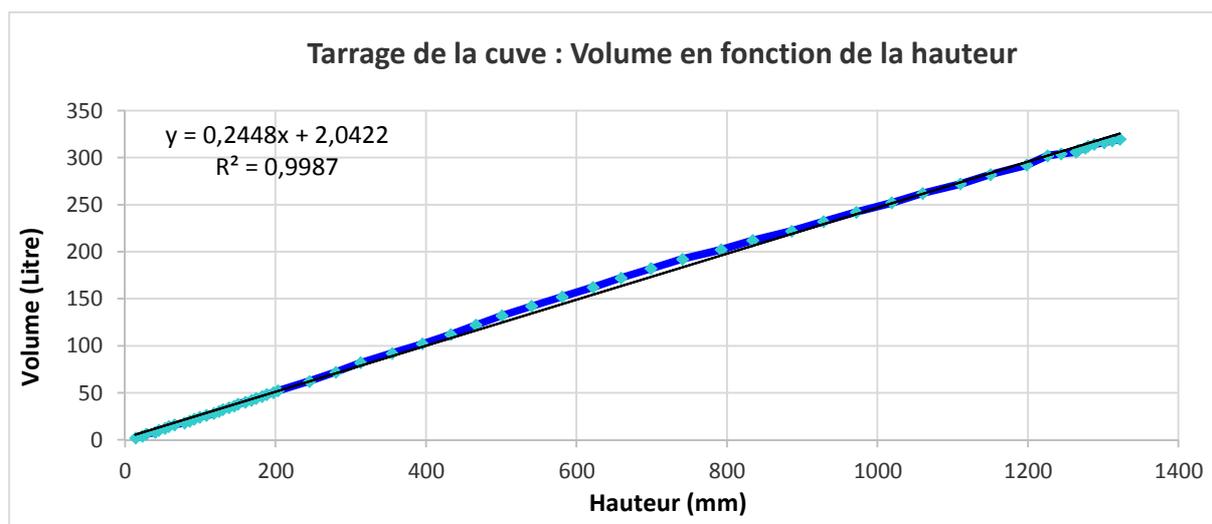


Figure 17: La courbe de tarage de la cuve



Par l'observation de la courbe, nous validons la formule $V = f(h)$, qui suit une linéarité. Nous réalisons qu'il n'était pas nécessaire de réaliser un tarage aussi fin au début. La vidange de la cuve nous révèle que sa capacité volumique est environ 340 litres.

3.2.5. Grille de référence- Comparaison de valeurs des paramètres physico-chimiques de l'urine issue de la littérature

Dans la littérature compilée par Fabien Esculier, plusieurs études ont été réalisées sur la collecte et les traitements spécifiques de l'urine. Ces travaux mettent en évidence les valeurs qui caractérisent l'urine fraîche et l'urine stockée, nous résumerons donc dans le tableau ci-dessous les données tirées de la littérature et des expériences menées par les chercheurs. Par la suite, je compte comparer mes résultats à cette grille de valeurs qui sera prise comme référence dans mes analyses. Le tableau résumé ci-après :



Tableau 2 : Caractérisation de la composition de l'urine fraîche et de l'urine stockée provenant de différentes sources bibliographiques

Paramètres non suivis	Urine fraîche						Urine stockée		
	Unité	Ciba-Geigy, 1977 ¹	Kuntke, 2013	K.M. Udert, 2006 (Moyenne et CV%)	Triger, 2012 (Lieu de travail)	K.M. Udert, 2006 ²	Triger, 2012 (Lieu de travail)	M. Maurer, 2006 (Lieu de travail)	
Volume urine	[L/pers/j]	1,25	-	1,25	0,6	1,25	-	-	
pH	-	6,2	-	6,2	8	9,1	9	9,1	
Conductivité	[mS.cm ⁻¹]	-	-	16,7	32	32	-	-	
COD	[mg.L ⁻¹]	-	9000±4100	10000	4000	10000	-	10000	
Nickel	[mg.L ⁻¹]	8830	8600±3700	9200	20	9200	-	9200	
NH ₄ ⁺ /NH ₃	[mgN.L ⁻¹]	463	431±192	480	29	8100	4357	-	
Urée	[mgN.L ⁻¹]	7700	-	7700	20	0	-	-	
Phosphore	[mgP.L ⁻¹]	800-2000	700±500	740	14	540	447	540	
Phosphate	[mgP.L ⁻¹]	-	653±529	-	-	-	-	-	
Soufre	[mg.L ⁻¹]	1315	600±300	-	-	-	-	-	
Sulfate	[mgS.L ⁻¹]	-	197±115	250	4,8	250	232	-	
Chloreure	[mg.L ⁻¹]	4970	3800±2100	3800	-	3800	4572	3800	
Sodium	[mg.L ⁻¹]	3450	2410±1430	2600	-	2600	2581	2600	
Potassium	[mg.L ⁻¹]	2737	1890±1160	2200	-	2200	2515	2200	
Magnésium	[mg.L ⁻¹]	119	78±51	100	21	0	4	0	
Calcium	[mg.L ⁻¹]	233	106±73	190	22	0	40	0	

**

Valeurs calculées

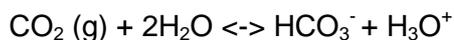
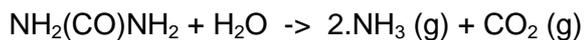


3.3. Synthèse des résultats

3.3.1. Caractérisation de l'urine fraîche – résultats de la campagne AZURIS

L'urine fraîchement excrétée (urine fraîche) est distinguée de l'urine ayant été stockée suffisamment longtemps à partir de l'instant où une partie de l'urée présent dans l'urine est hydrolysée (urine hydrolysée). C'est la réaction de l'hydrolyse de l'urée qui modifie les propriétés physico-chimiques de l'urine (K.M. Udert, 2006).

En effet, les caractéristiques de l'urine excrétée vont fortement évoluer en raison de l'hydrolyse de l'urée, cette réaction a lieu en présence d'uréase, qui est synthétisée par les bactéries. L'hydrolyse de l'urée est réalisée suivant les relations suivantes :



L'hydrolyse conduit donc à une transformation de l'urée en ammoniacque NH_3 puis en ion ammonium NH_4^+ . C'est lors de cette transformation, que le pH de l'urine passe de 6 environ à 9, avec un fort pouvoir tampon dû aux ions carbonates et ammonium ainsi formés. Cette hydrolyse est catalysée par l'uréase, un enzyme sécrétée par de nombreux eucaryotes et procaryotes. Les bactéries représentent la majorité des microorganismes produisant cet enzyme et sont largement présentes, dans les sols, les milieux aquatiques, les intestins humains. Elles peuvent donc également se retrouver dans les ouvrages de collecte des urines et ainsi provoquer l'hydrolyse de l'urée pendant son stockage. (TRIGER, 2012)

Pour cette partie, nous analyserons les résultats de 122 échantillons parmi les 133 ; 11 échantillons ont été écartés :

- E26 car l'individu a changé ses habitudes, il a bu plus d'eau
- E27, E33, E35, E62, E119, E130 et E131 sont des échantillons de sexe inconnus
- E45, E55 sont des échantillons de la 1^{ère} miction de la journée, effectuées à la maison
- E56 est un échantillon qu'on a éliminé dans le doute car il était très trouble.

Parmi, les 122 échantillons ; 83 sont de sexe masculin et 39 de sexe féminin.



- Le volume de miction

L'urine est collectée dans un flacon de 580 mL dont la masse est connue (46,5g), nous en déduisons donc la masse de l'urine pour calculer le volume de miction de chaque individu. Sachant, que la densité de l'urine d'un individu sain est estimée à 1,02⁷, nous en déduisons le volume par calcul.

$$\text{Volume} = \text{Masse de l'urine} / \text{Densité de l'urine}$$

La quantité d'urine produite par jour par un adulte, dépend de la quantité de liquide que la personne boit et de la quantité d'eau transpirée, selon une fourchette un individu excrète entre 0,8-1,5 litre par adulte et par jour (Anna Richert, 2010). Selon K.M. Udert, 2006⁸, la production d'urine considérée par la médecine est de 1,25 L/pers/jour. Ce volume est excrété tout au long de la journée, d'ailleurs le nombre de mictions dépend de la quantité d'urine à émettre et de la capacité physiologique de la vessie d'un individu ; le nombre de miction varie de 0 à 1 pendant la nuit, de 4 à 5 dans la journée. (Larousse médical)⁹.

Dans le cadre de la collecte, nous récupérons une seule miction de la journée, et au vu des résultats le volume de celle-ci diffère d'un individu à l'autre. Les hommes produisent en moyenne 310 mL d'urine par miction tandis que les femmes produisent 240 mL.

Tableau 3 : Volume moyen d'une miction d'urine

Volume moyen d'une miction d'urine (ml)				
	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Plage de données
Population échantillonnée	288	264	125	43-569
Homme	312	289	125	79-569
FEMME	237	223	109	43-558

Le volume total d'urine collecté est d'environ 38 litres. Pour chaque échantillon, nous conservons 58 ml dans un flacon et le reste des échantillons est stocké dans des jerricans alimentaires à 25°C, pour l'étude des caractéristiques de l'urine stockée (partie 3.3.2.).

Le tableau ci-dessous, résume les caractéristiques de l'urine fraîchement excrétée de l'ensemble des donneurs masculins, lors de la collecte AZURIS.

⁷Référence à partir de la thèse d'A. Triger « Procédé hybride cristallisation/séparation membranaire pour le traitement d'un fluide complexe (urine) », 2012

⁸ Référence obtenue à partir de la littérature médicale : CIBA, Geigny. (1977). *Wissenschaftliche TabellenEinheiten im MeBwesen, Körperflüssigkeiten, Organe, Energiehaushalt, Ernährung.*

⁹ <http://www.larousse.fr/archives/medical/page/639#t14561> consulté le 12/06/2016 à 10h30



Les compositions moyennes de la collecte d'urine masculine sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Caractérisation d'urines masculines fraîchement excrétées

Paramètres	Unité	Moyenne	Ecart-type	Plage de donnée
pH		6,64	0,60	5,25-7,63
Conductivité	mS.cm⁻¹	17,28	7,80	5,7-33,8
N_{total}	mg.L⁻¹	5709	3078	1032-15556
NH₄⁺ /NH₃	mgN.L⁻¹	-	-	-
Quantité de N_{TOTAL} par miction *	mg	1611	807	270-4254
Phosphate	mg P.L⁻¹	305,2	72	4,13-1163,6
Phosphore **	mg.L⁻¹	305	220	4,1-1164
Quantité de P par miction *	mg	85	52	1,05-278
Sulfates	mg S.L⁻¹	141,6	81,6	10,3-379
Chlorures	mg.L⁻¹	4362	2447	911-10861
Volume urine^v	mL	312	125	79-569

* Valeur déduite par calcul

** Selon Udert 2004, 95-100% de phosphore est sous forme de phosphates. Ainsi, pour le calcul de la concentration de phosphore, nous supposons que 100% de P est sous forme de PO₄³⁻

La collecte d'urine nous permet de collecter seulement les urines de la journée qui sont moins concentrées que les urines du matin, ainsi nos valeurs en azotes, phosphates et sulfates sont plus faibles que la littérature. Cependant, nos valeurs de pH, de conductivité et chlorures se rapprochent de Triger, 2012, qui a également réalisé une collecte au sein du laboratoire.



- Le pH

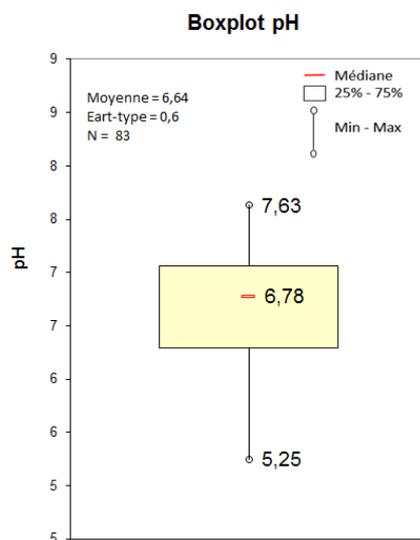


Figure 18 : Le Boxplot caractérisant le pH d'urine masculine de la Campagne AZURIS

Le pH mesuré dans les échantillons est similaire à ce qui est rapporté dans la littérature, que ce soit des échantillons d'homme ou de femme. Par ailleurs, le pH est un paramètre suivi par les médecins, il permet de mesurer les ions H^+ dans l'urine. Le pH est influencé par le régime alimentaire ou les médicaments. En médecine, l'intervalle de référence se situe entre 4,8-7,4. Des données de la littérature montrent que le pH de l'urine fraîche est d'environ 6,2 pour Udert 2003, ou bien 6,47 selon Triger 2012 et que le pH augmente à mesure que l'urée s'hydrolyse en ammonium.

Valeur du pH de l'urine fraîche collectée durant la Campagne AZURIS		
	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>
Population échantillonnée	6,61	0,6
Homme	6,64	0,6
Femme	6,55	0,6

Tableau 5 : Valeurs du pH de l'urine fraîche obtenues lors de la Campagne AZURIS



- L'azote total

Concentration d'azote total de l'urine fraîche (mg.L ⁻¹) collectée durant la Campagne AZURIS			
	Moyenne	Ecart-type	Plage de donnée
Population échantillonnée	5481	3346	921-16097
Homme	5709	3079	1032-15555
Femme	4985	3864	922-16097

Tableau 6 : Valeurs de la teneur d'azote total contenue de l'urine fraîche obtenues lors de la Campagne AZURIS

Dans la littérature, nous retrouvons une teneur en azote : de 8,6 g.L⁻¹ (± 3.7) selon Kuntke 2013 à 9,2 g.L⁻¹ mesuré par Udert, 2004. Ces valeurs sont deux fois plus élevées que celles mesurées lors de la campagne AZURIS, où nous trouvons une moyenne de 5,7 g.L⁻¹ ($\pm 3,1$) chez les hommes.

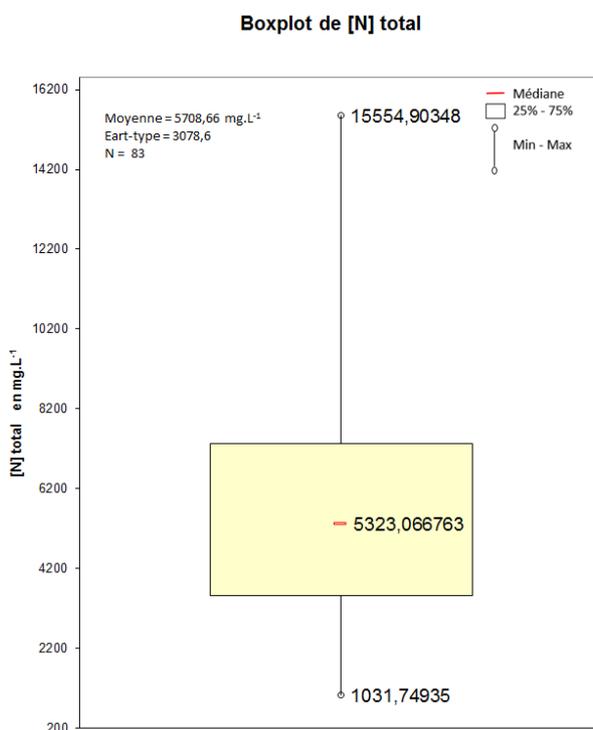


Figure 19: Le Boxplot caractérisant la concentration d'azote total d'urine masculine de la Campagne AZURIS

En observant, nos résultats, nous notons qu'il y a une variation de concentration parmi les échantillons ; la concentration la plus petite est mesurée à 1 gN.L^{-1} (E54) et la concentration d'azote la plus élevée est mesurée à $15,5 \text{ gN.L}^{-1}$ (E79). Ces concentrations ne sont pas toujours représentatives de la quantité d'azote contenue par échantillon car ces valeurs ne prennent pas en compte le volume d'une miction de l'individu. Or, un volume de miction excrété dépend du bilan hydrique de l'individu qui dépend de trois facteurs ;

$$\text{Bilan hydrique} = \text{Volume d'eau ingéré} - \text{volume transpiré} - \text{volume expiré}$$

Aussi, il faut savoir que nous récupérons qu'une seule miction et cela ne permet pas d'avoir la totalité de la quantité d'azote excrétée par un individu tout au long d'une journée.

Nous supposons que ces grandes différences de valeur entre la littérature et nos mesures peut s'expliquer par le fait que nous récupérons seulement une seule miction dans la journée, or la quantité d'azote excrété est en fonction de l'heure, tout en sachant que l'urine du matin est le plus concentrée, c'est une miction qui n'est pas intégrée dans la collecte. Par ailleurs, la quantité d'azote excrété par personne et par jour est propre à chaque métabolisme.

Il est important de souligner, que la quantité d'azote dégradée par l'organisme (par les reins) et retrouvée dans l'urine ; d'une personne varie selon plusieurs paramètres. En effet, le métabolisme d'un individu dépend du :

- Sexe : nous remarquons d'ailleurs que les échantillons masculins sont plus concentrés en azote que celles des femmes;
- Poids, voire de l'âge : ces deux paramètres conditionnent par ailleurs l'alimentation d'une personne
- Régime alimentaire de l'individu : la quantité de protéines ingérées est corrélée à la quantité d'azote excrétée ($N = 0,13 * \text{Total de protéines alimentaires}$, d'après Jönsson).

Donc, pour confirmer, cette hypothèse que le métabolisme d'un individu dégrade une certaine quantité d'azote en fonction de l'heure et entre chaque miction, nous avons réalisé deux tests de 24h. Ces tests consistent à analyser toutes les urines excrétés en une journée pour savoir la quantité d'azote excrétée par jour. Pour cela, nous avons sollicité un volontaire qui a accepté de nous fournir toutes ses mictions de la journée. Ainsi, nous avons pu calculer la quantité d'azote excrétée et dégradée par jour. Nous n'avons pas fait beaucoup de test mais ces deux analyses que nous avons fait, semblent montrer que le métabolisme est constant. Le métabolisme dégrade l'azote en petite quantité tout au cours de la journée et l'azote est éliminé entre chaque miction. Et ce métabolisme est propre à chaque personne.

Nous arrivons à la conclusion que les résultats des échantillons obtenus par la Campagne AZURIS contiennent des teneurs d'azote normaux, tant bien même que ces concentrations d'azote sont faibles comparées à celles de la littérature. En effet, les échantillons recueillis permettent de récupérer qu'une seule fraction de la quantité d'azote émise au cours d'une journée et nous avons pu grâce aux tests de 24h mettre en évidence que le métabolisme est constant. Cela explique la faible quantité d'azote excrétée par le temps qui s'écoule entre deux mictions.



- Le phosphore

Concentration de phosphates de l'urine fraîche (mgP.L⁻¹) collectée durant la Campagne AZURIS			
	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>	Plage de donnée
Population échantillonnée	299	225	4,2- 1164
Homme	305	220	4,2- 1164
Femme	287	238	17,6- 931

Tableau 7 : Valeurs de la concentration de phosphates contenues dans l'urine fraîche obtenus lors de la Campagne AZURIS



Boxplot Phosphates

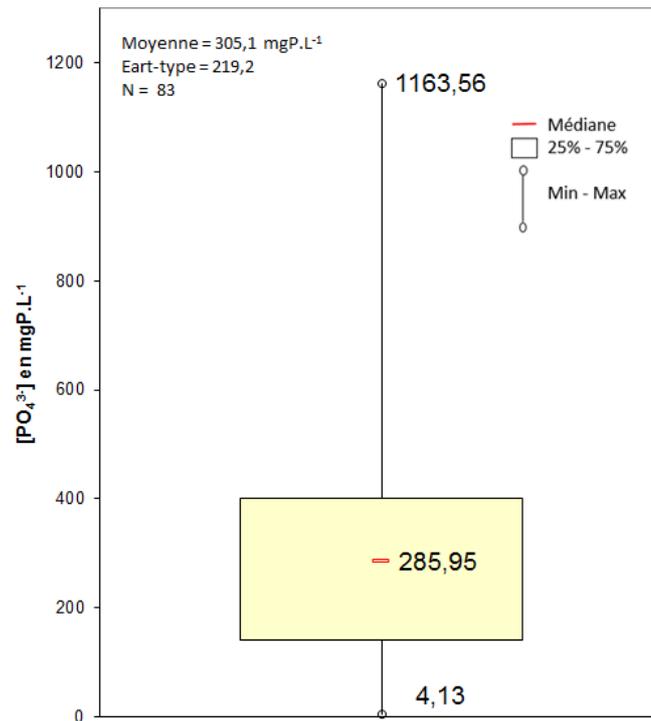


Figure 20: Le Boxplot caractérisant la concentration de phosphates contenus dans l'urine masculine de la Campagne AZURIS

Les résultats dans le tableau 7 montrent que la concentration moyenne de phosphates mesurée dans l'urine fraîche masculine, lors de la campagne, est environ de 0,305 mgP.L⁻¹ avec une variation de 0,004 gP.L⁻¹ à 1,16 gP.L⁻¹. Cette concentration mesurée n'est pas significative de la teneur réelle des phosphores contenue dans les échantillons étant donné qu'elle ne prend pas en compte le volume de miction émis. En effet, plus le volume de miction est grand plus le phosphore est dilué. La quantité moyenne de phosphore contenue par échantillon est environ 1 gP.L⁻¹ ($\pm 0,05$).

Lorsque nous comparons nos valeurs à celles de la littérature dans le tableau 2, nous remarquons que les concentrations de phosphates obtenues par la collecte d'urine sont très faibles, comme pour les teneurs en azote total. Nous émettons la même hypothèse que pour l'azote ; les phosphates sont dégradés par le métabolisme tout au long de la journée, cette dégradation est en fonction du sexe, de la quantité de protéines ingérées par l'individu, de son poids. La quantité de phosphore suit cette relation : $P = 0,011 * (\text{Total protéine alimentaire} + \text{protéines alimentaires végétales})$ donc elle dépend également de l'alimentation. Nous avons également fait les tests de 24h pour les concentrations en phosphates et les résultats montrent que le métabolisme est constant ; près de 1 gP/jour est dégradé.



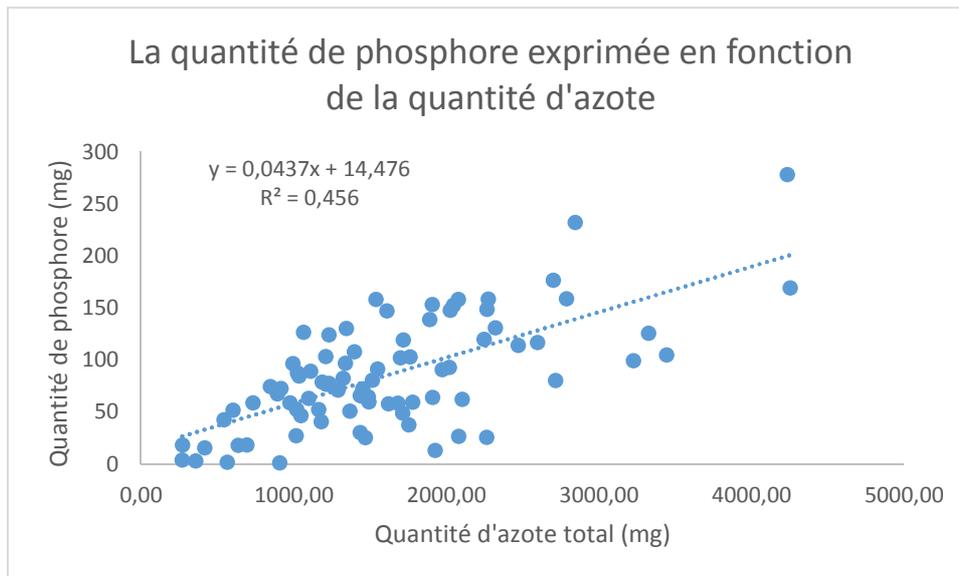


Figure 21 : Corrélation entre la quantité d'azote et la quantité de phosphore

Nous pouvons également constater une légère corrélation entre la quantité de phosphore et la quantité d'azote à 45% de variabilité. Ces résultats laissent supposer que plus la quantité d'azote est grande plus on retrouve du phosphore dans les échantillons.

- *Les sulfates et les chlorures*

La concentration moyenne de chlorures issue de notre campagne est environ égale à $4,4 \text{ g.L}^{-1}$ ($\pm 2,5$) et la concentration moyenne de sulfates mesurée dans nos échantillons est environ de $0,1424 \text{ g.L}^{-1}$ ($\pm 0,082$). En comparant nos valeurs au tableau 2, nous remarquons que les concentrations de chlorures et de sulfates retrouvés dans nos échantillons sont de même ordre de grandeur que celle de la littérature. Pour la concentration de chlorure, nos valeurs se rapprochent de CIBA, 1977 qui mesurent environ $4,74 \text{ g.L}^{-1}$ et pour la concentration de sulfates nos valeurs sont proches de Kuntke, 2013 qui mesure une moyenne de $0,197 \text{ g.L}^{-1}$ ($\pm 0,115$).



En conclusion, les ions sulfates et chlorures sont constants et stables dans l'urine, ce sont des indicateurs témoins dans l'urine.

D'ailleurs grâce aux traceurs chlorures et sulfates dont leur concentration se trouve dans la fourchette des moyennes de la littérature, cela permet de conforter l'hypothèse émise sur le mécanisme de dégradation de l'azote et du phosphore par le métabolisme.

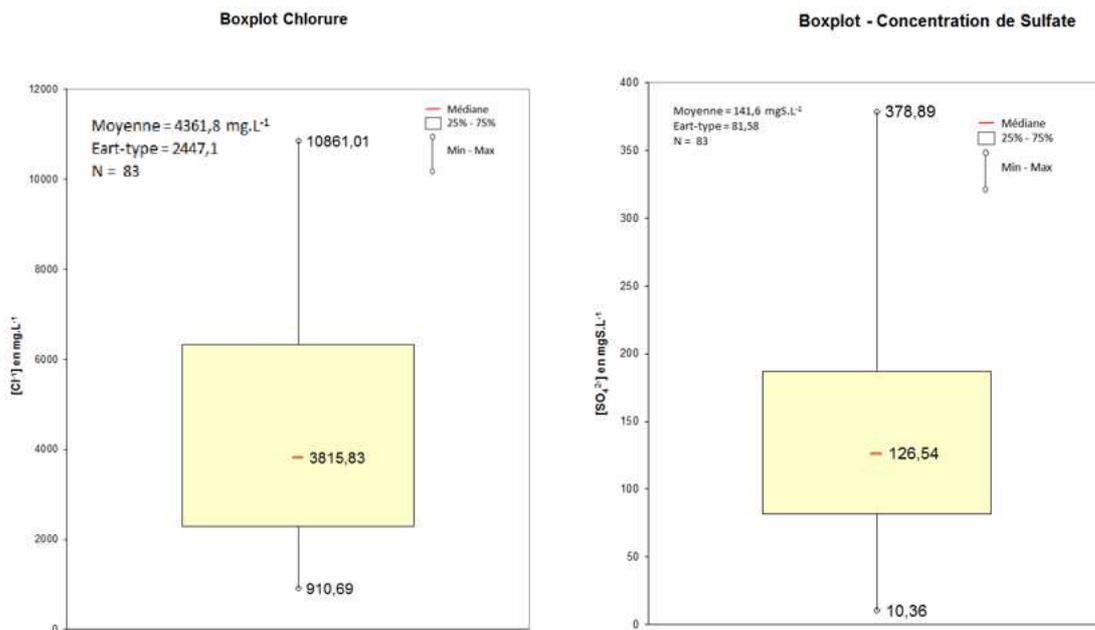


Figure 22: Le Boxplot caractérisant les concentration des sulfates et chlorures contenue dans l'urine masculine de la Campagne AZURIS

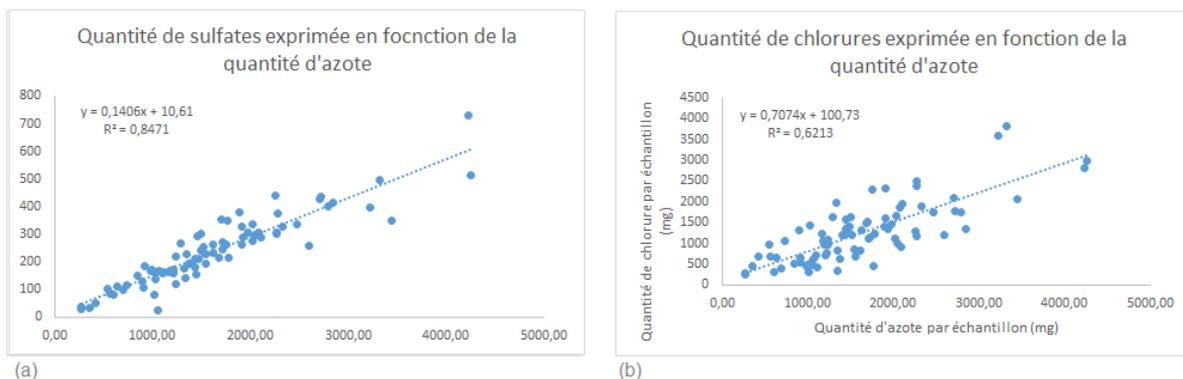


Figure 23: Courbe a - Corrélation entre la quantité d'azote et la quantité de sulfates ; Courbe b – Corrélation entre la quantité d'azote et la quantité de chlorures



D'après la figure 23, nous constatons que, pour une variabilité à 62% pour les chlorures et à 85% pour les sulfates, les quantités de sulfates et de chlorures sont fortement liées à la quantité d'azote contenue dans les échantillons. Les chlorures et les sulfates sont dégradés par le métabolisme en fonction de la teneur d'azote de l'individu.

En conclusion, les caractérisations des échantillons issues de la campagne, montrent que les valeurs obtenues pour le pH, les concentrations des chlorures et sulfates sont similaires aux données de la bibliographie. Tandis que les teneurs en azotes et en phosphores de nos échantillons sont plus faibles que celles retrouvées en littérature. Cela peut s'expliquer par plusieurs raisons ; d'un côté par l'intensité du métabolisme qui est différente selon les individus mais d'un autre côté, rappelons que la taille des échantillons a été déterminée selon la distribution de loi normale de moyenne m et d'écart-type s d'après les valeurs de Kuntke (2013). Or, nos valeurs de moyenne et d'écart-type ne correspondent pas du tout à celles de Kuntke. Aussi, lorsque nous recalculons le nombre d'échantillons à prélever avec les valeurs que nous avons obtenus pour m et s , nous trouvons $n = 114$ individus masculins. Donc les 83 échantillons ne sont pas suffisants ; la distribution de la loi n'est pas tout à fait normale, sans omettre la marge d'erreur relative estimée à 10% qui est peut-être trop grande.

D'autre part, tous les échantillons analysés ne sont pas tous de donneurs distincts, parmi 83 échantillons, 41 échantillons proviennent essentiellement de 3 participants très volontaires. Donc il y a une différence entre cet échantillonnage de la campagne AZURIS et la population utilisant réellement l'urinoir, d'autant plus nous avons réalisé la campagne de collecte fin avril, c'était une période creuse, il y avait beaucoup moins d'étudiants, qui représentent une partie importante des usagers de l'urinoir.

3.3.2. Caractérisation de l'urine stockée – issue de la Campagne de collecte AZURIS

Les échantillons issus de la campagne AURIS ont été stockés dans des jerricans ; les bidons 1 à 3 sont stockés à 25°C et le bidon 4 est stocké à 5°C. Le dernier bidon ne sera pas analysé.

	Volume (Litre)	Echantillons contenus	Date de début remplissage	Date scellé (Date début stockage)
Bidon 1	5	E1 - E25	22/04/2016	11/05/2016
Bidon 2	5	E25 - E46	11/05/2016	17/05/2016
Bidon 3	10	E47 - E92	17/05/2016	24/05/2016
Bidon 4	10	E93- E133	24/05/2016	06/06/2016

Nous avons suivi l'évolution des trois premiers bidons pour caractériser l'urine stockée en suivant les mêmes paramètres que ceux de l'urine fraîche ; pH, conductivité, concentration d'azote total, et les concentrations en phosphates, chlorures, et sulfates.

Les résultats sont représentés ci-après :



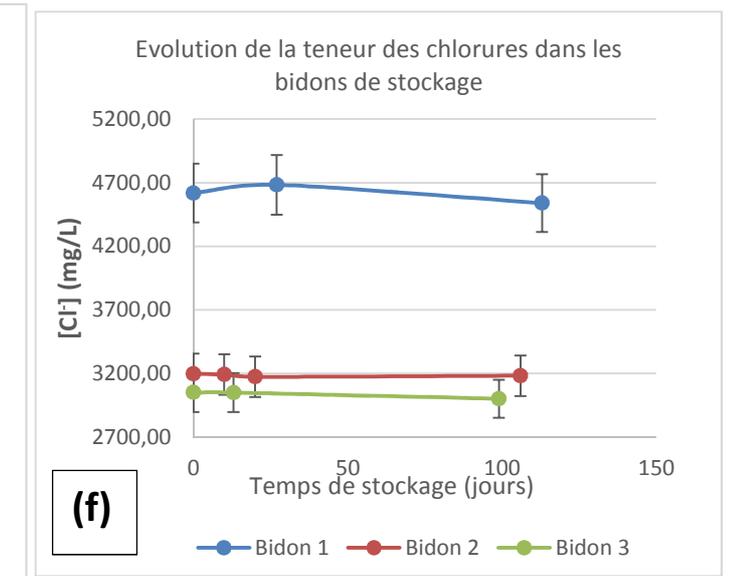
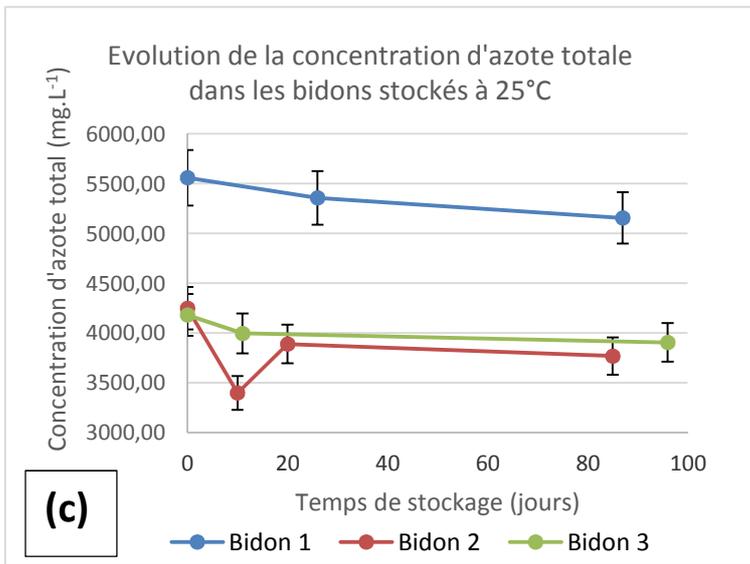
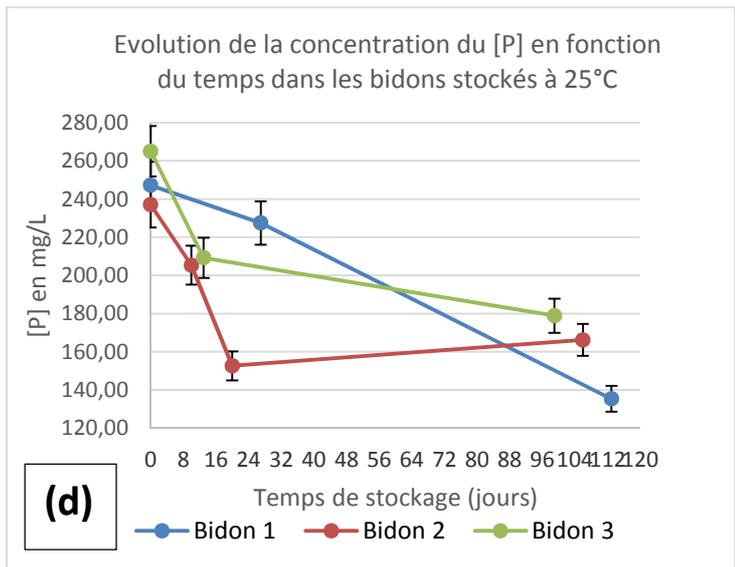
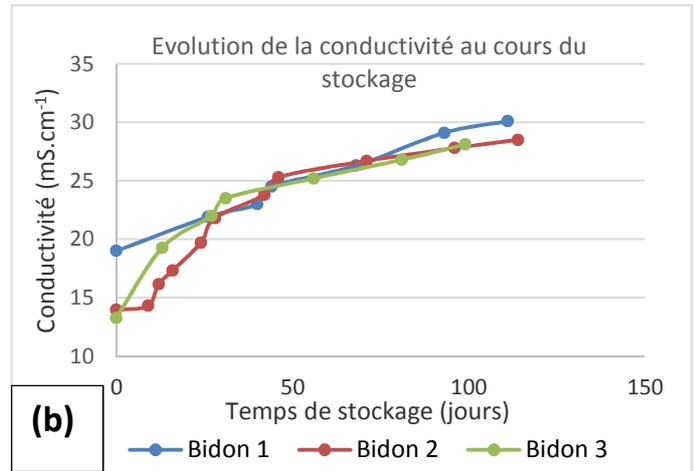
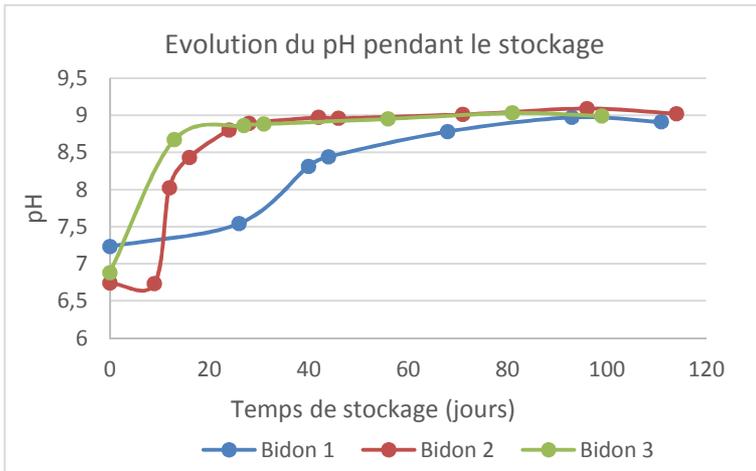


Figure 24: Evolution des paramètres de l'urine stockée dans les bidons



Dans l'expérience menée à l'ENPC dans le cadre du projet OCAPI, l'urine humaine a été recueillie et stockée dans trois jerricans. Suite à la collecte de l'urine fraîche, nous avons montré que la valeur du pH est de 6.61 pour l'ensemble des échantillons homme et femme, la conductivité est de 17 mS.cm^{-1} (± 7), la concentration en azote total est de 5481 mg.L^{-1} (± 3346) et celle du phosphate est de 299 mgP.L^{-1} (± 50). Pendant, le stockage ces quatre paramètres ont évolué et se sont modifiés en raison des processus de décomposition et de dégradation. Nous observons globalement dans les trois jerricans stockés, que la valeur du pH et de la conductivité augmentent et que les concentrations d'azote et de phosphore diminuent.

Sur la figure 24-a, nous observons que dans le bidon de stockage 2 et 3, le pH augmente très rapidement et devient basique en quelques jours : le pH passe de 6,8 à 9 environ, avec un pic au bout d'une dizaine de jours avant de devenir stable. Tandis que dans le bidon 1, cette augmentation de pH se produit lentement, et atteint une valeur proche de 9 en 40 jours. Le pH est un indicateur d'hygiénisation en effet son augmentation est due à la réaction de l'hydrolyse de l'urée dans l'urine, or cette réaction est déclenchée par la présence de l'enzyme uréase. Ainsi, nous supposons que dans les bidons 2 et 3, il y a eu une contamination par des bactéries présentes dans un des échantillons, donc l'uréase déjà présente a déclenché l'hydrolyse de l'urée spontanément. Nous supposons donc que le bidon 1 était plus stérile, il n'y a pas eu de contamination c'est pour cela que la réaction d'hydrolyse a été ralentie, notons d'autre part que ce bidon est resté presque 20 jours conservés au réfrigérateur pendant la collecte avant le stockage une fois le bidon rempli d'urine. Cela a dû permettre le ralentissement de la réaction d'hydrolyse.

Au cours de ces trois mois de stockage, la concentration d'azote total a diminué dans les trois bidons ; nous constatons une diminution de 7% pour le bidon 1 et 6,6% pour le bidon 3 et plus de 11% dans le bidon 2 (figure 24-c). La littérature décrit lors du stockage, que l'hydrolyse de l'urée, permet de transformer 90% de l'azote total en ammoniac et elle peut donc entraîner une perte d'azote par la volatilisation de l'ammoniac. Par ailleurs, nous avons constaté durant cette période de stockage, une odeur émanant de la pièce où étaient stockés les bidons. Il faut souligner que le système de fermeture/ d'ouverture de ces jerricans n'étaient pas fiables, car en le rendant étanche par le biais d'une bande adhésive, au bout d'une semaine l'odeur a été dissipée de la pièce. Cette constatation nous a confortés pour l'achat de jerricans plus sûrs avec un bon système de fermeture, pour le stockage des urines de la cuve de récupération d'urine. Nous n'avons pas pu quantifier ces pertes durant mon stage car le capteur d'ammoniac que nous avons commandé n'est pas arrivé à temps, mais cela sera une prochaine étape du projet AZURIS. Toutefois, l'ammoniac étant plus de mille fois plus soluble dans l'eau que dans l'air (coefficient de Henry de $7.10^{-4} \text{ M(g)/M(aq)}$), il paraît difficilement envisageable que les diminutions de concentration d'azote soient liées à des pertes gazeuses d'ammoniac supérieures à 1%.

La figure 24-d, nous permet de conclure sur une tendance à la baisse de la teneur en phosphate tout au long du processus de stockage de l'urine. En effet, dans le bidon 1 nous comptons près de 45% de baisse pour une diminution un peu moins élevée dans les bidons 2 estimée à 30% et 32% pour le bidon 3. Théoriquement, la tendance à la baisse du phosphore provient de la précipitation de celui-ci en struvite, hydroxyapatite calcite ou autre. D'autre, part la cristallisation de struvite dans l'urine nécessite du magnésium (Mg^{2+}), d'ammonium (NH_4^+) et de phosphate (PO_4^{3-}) en concentration équimolaire. Ainsi, nous pouvons également expliquer la diminution d'azote observée dans ces bidons, par la précipitation d'une partie de l'azote. D'ailleurs dans le bidon, nous avons remarqué à vue d'œil la présence de précipité au fond du bidon.



Cette hypothèse peut être vérifiée en analysant les boues de précipitation qui se trouvent au fond des jerricans stockés.

D'autre part, nous remarquons que les teneurs en chlorures sont plutôt stables dans les trois bidons (figure 24-f), cependant nous percevons une légère augmentation des sulfates de 1,5 à 5 % pour le bidon 2, il y a peut-être une dégradation de soufre dans l'urine propice à la formation des ions. Cette hypothèse irait de pair avec l'augmentation observée de la conductivité, en effet contrairement à d'autres paramètres qui se stabilisent (comme le pH), la concentration des ions dans l'urine est en constante augmentation.

Pour conclure sur le stockage de l'urine fraîche provenant de la campagne de collecte, il y a une diminution de la concentration en azote total en solution et il serait nécessaire de déterminer si c'est une perte de matière gazeuse ou une perte d'azote qui se précipite en struvite ou sous une autre forme. Néanmoins, il semble plausible que le traitement par stockage permette de récupérer 99% de l'azote total.

3.3.3. Suivi de la cuve de récupération d'urine

La cuve a été installée le 20 juin 2016 et la vanne de « transition socio-écologique » de l'ENPC mise en marche le 23/06/2016. L'urinoir étant sec, sans eau, l'urine qu'on collectera dans la cuve ne sera pas dilué.

Il faut savoir avant tout que le volume mort de la cuve correspond à 18,5 litres environ et par conséquent une vidange complète correspond à l'urine récupérée jusqu'au niveau du premier robinet car nous ne pouvons pas récupérer l'urine qui est en dessous du robinet ; ce volume est donc désigné comme le volume mort.

Pour suivre l'évolution des bilans de matières dans la cuve, on a effectué des prélèvements pour analyser le pH, la conductivité et les teneurs d'azote total et des anions. Au premier abord, il était nécessaire d'évaluer le flux journalier d'urine, à cet effet, une interface numérique devait être installée cela n'a pas pu se réaliser car la d.school en charge de cette partie, n'a pas trouvé de moyen pour rapatrier les données numériques. Mais elle sera très prochainement installée. Donc nous n'avons pas de suivi concernant le volume dans la cuve mais nous pouvons la déduire grâce à la vidange qui ont été faite régulièrement et dont on connaît approximativement le volume des jerricans.

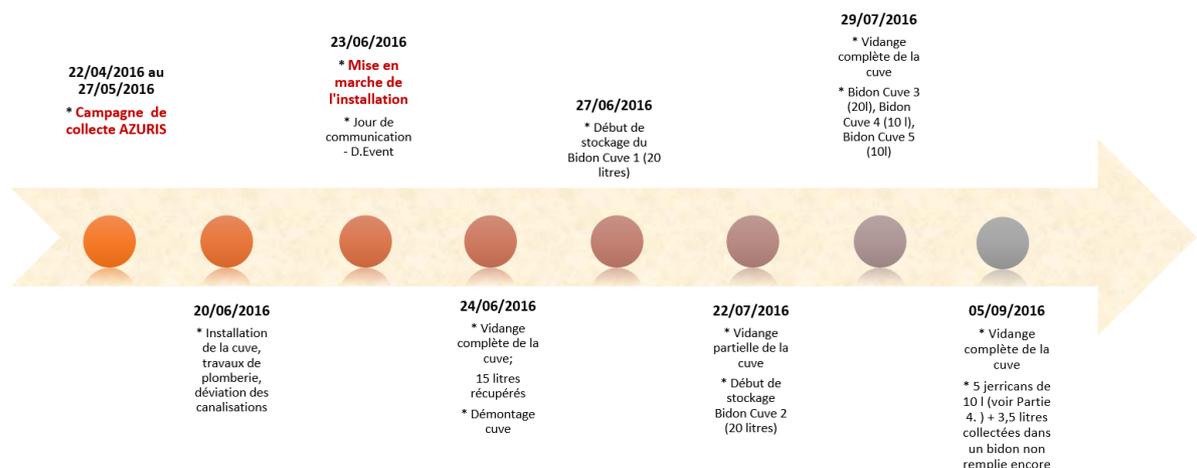


Figure 25: Frise chronologique des événements et de différentes actions réalisées autour de la cuve

Pour connaître, plus ou moins le volume d'urine contenue dans la cuve, les événements retracés sur la frise permettent de le déduire, en effet entre le 23/06 et le 05/09, nous avons effectué trois vidanges complètes et deux vidanges partielles, correspondant à un volume total de 133,5 litres environ. Ces urines ont été collectées dans des bidons « plus étanches » que celles de la campagne de collecte.

Notons, que nous étions pendant une période estivale, l'ENPC notamment le bâtiment Coriolis était peu fréquenté : les étudiants et certains membres du personnels étaient en congés. Ainsi, selon notre estimation grâce à la Campagne AZURIS, le volume moyen d'une miction est mesuré à 310 ml, donc en 3 mois et demi, il y a eu environ 445 usagers de cet urinoir.

Cette urine masculine est recueillie et stockée dans un réservoir de 340 litres, dont nous allons en étudier sa dynamique dans la cuve.

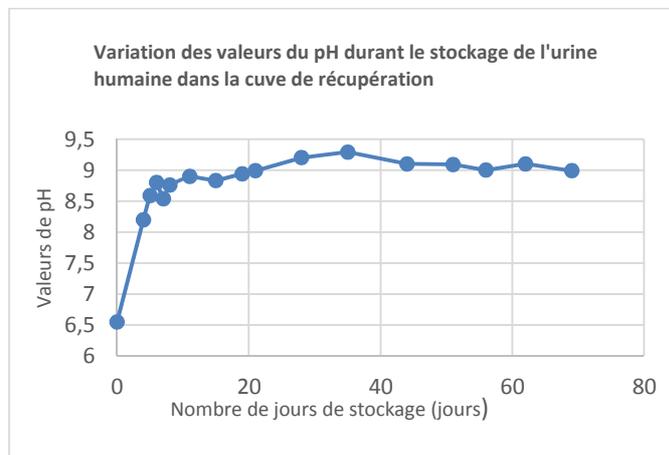


Figure 26: Variation de la conductivité dans la cuve de récupération d'urine

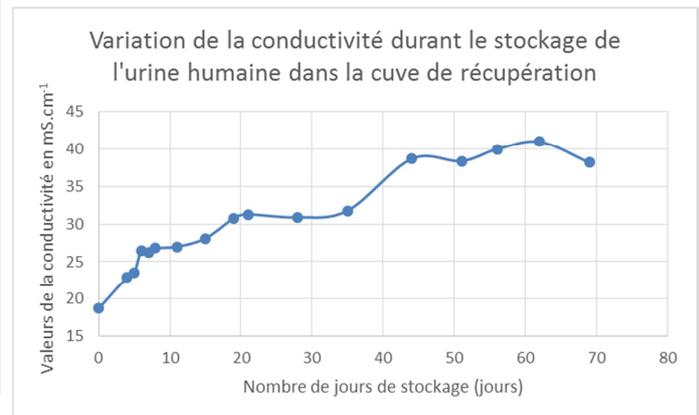
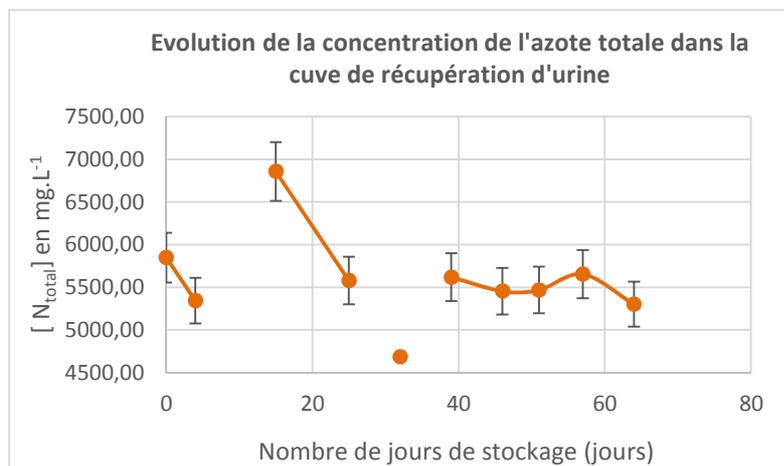


Figure 27 : Variation du pH de l'urine stockée dans la cuve

Suite à la collecte de l'urine fraîche, nous avons montré que la valeur du pH est de 6.64, la concentration en azote total est de 5709 mg.L^{-1} (± 3078) et celle du phosphore par le phosphate est de 305 mgP.L^{-1} . Pendant, le stockage d'urine, ces trois paramètres se sont modifiés en raison des processus de décomposition. Nous pouvons voir, ici sur la figure 27, le pH devient très rapidement basique, dans la cuve, créant ainsi rapidement un milieu défavorable au développement des pathogènes.



Sur le graphique des figures 28 à 31, il y a une discontinuité des courbes ; cela correspond au moment où nous vidons la cuve. Lorsque la cuve est vidée, il y a un changement d'état, le système n'est plus à l'équilibre.



3.4. Conclusion sur l'efficacité du système de collecte sélective d'urine

En conclusion de cette partie, la littérature informe que si on met en place une installation très étanche et correcte on doit voir une perte d'azote entre 0,1 à 1%. Notre étude confirme que, sans ventilation forcée, les pertes gazeuses devraient être de cet ordre de grandeur. Nous trouvons des diminutions de concentration en azote total en solution allant de 6,5% à 11% qui seraient donc plutôt expliquées par des transferts vers les phases solides précipitées et qui restent à confirmer.

3.5. Filière de valorisation

Une fois les urines collectées dans la cuve puis traitées par stockage dans des bidons, il faut leur trouver un débouché. Et comme nous avons pu le voir, lors de la description de la composition de l'urine, celle-ci est très riche en azote et phosphore et est proche de la composition des engrais utilisés en milieu agricole. Le projet OCAPI a, pour le moment, testé deux méthodes de traitements de l'urine pour la valorisation : le stockage pour récupérer l'azote, le phosphore et les minéraux et la précipitation de struvite permettant de récupérer tout le phosphore. Afin de maximiser le recyclage des nutriments, la recherche d'une filière de valorisation s'est concentrée sur la valorisation des urines stockées. Ainsi, cette dernière partie de mon stage a été consacrée à la recherche d'une filière de valorisation de l'urine collectée à Coriolis, et s'est déroulée au courant des mois de juin- août 2016.

- Stratégies adoptées

Dans le but, de maximiser la valorisation des nutriments/ressources présents dans l'urine, nous avons exploré plusieurs pistes avec toujours comme objectif principal ; préserver un bilan environnemental positif. En effet, la collecte, le transport et le traitement/valorisation des urines a été initié pour minimiser les impacts environnementaux. Donc notre stratégie est d'organiser la valorisation en regroupant plusieurs acteurs, proches géographiquement de l'ENPC de façon à organiser la collecte dès que la cuve est pleine tout en réduisant les émissions de GES liées au moyen d'acheminement et notamment au transport.

- Les pistes envisagées :

Nous avons d'abord identifié, les catégories susceptibles d'intégrer l'urine à leur pratique, par épandage direct, comme :

- Les haras et les élevages dans l'idée qu'ils intègrent l'urine aux flux déjà existants d'urines animaliers (fumiers)
- Les agriculteurs, le maraîchage, les vergers, la céréaliculture
- L'horticulture, la commune de Champs



- Le jardin « pontanique » de l'ENPC, qui cultive depuis 4 ans, toutes sortes de cultures ; des fraisiers, framboisiers, tomates, pomme de terre, oignons, pêcher, pommier et récemment des noisetiers ont été plantés.

Pour commencer, nous avons fait des déplacements à proximité de Champs-sur-Marne, dans l'optique de comprendre dans un premier temps les flux de matières organiques et d'engrais adoptés par les acteurs approchés. Lors de notre démarche nous avons rencontré :

- un haras à Lognes, où nous avons appris que « Europaille » fournissait la paille et récupérait par la suite le fumier, la directrice n'étant pas là, nous n'avons pas eu plus d'information sur le devenir du fumier.
- une ferme par coïncidence, à proximité de ce haras, et à 10km seulement de l'ENPC. La Ferme Saint-Thibault est une exploitation agricole et d'élevage de bovins. Le responsable de la ferme semblait plutôt sceptique à la pratique d'épandage d'urine dans ses champs mais il serait partant pour une utilisation via la struvite. Cet agriculteur vend également des produits d'autres agriculteurs locaux dont leurs adresses a été relevées pour les contacter.

Ainsi par le biais de cet agriculteur, nous avons pu rencontrer les responsables de la ferme Grand'Maison, propriétaires d'une grande exploitation de 87 hectares et la ferme de Huyghe également grâce à un autre contact. Ces deux fermes ont accepté de participer au Projet AZURIS et d'expérimenter l'application d'urine dans leurs champs. Ces agriculteurs travaillent en collaboration avec la Chambre d'agriculture pour établir un plan de fertilisation et d'épandage des engrais. Donc, il faudra contacter la Chambre d'agriculture pour mettre en place une collaboration avec ces deux agriculteurs. C'est la prochaine étape de cette partie.



Figure 29 : Carte répertoriant tous les acteurs contactés lors de la recherche de filière

- Les débouchés trouvés :

- Quelques litres d'urines sont déjà réservés pour l'INRA, Institut Nationale de Recherche en Agriculture, qui doit expérimenter l'urine sur des parcelles expérimentales ;



- La responsable du jardin « pontanique » de l'ENPC, Stacey Benoît a accepté d'expérimenter l'épandage d'urine ou alors de mélanger l'urine à son compostage. Cette étude se portera sur des pommiers, radis, pêchers et d'autres cultures. Il faudra donc établir un protocole d'utilisation.
- Ecosec, est une start-up axée sur les toilettes sèches à séparation d'urine et fèces sur le compostage. Elle s'est lancée dans la construction d'un réacteur à struvite pour les festivals. Pour son inauguration et sa première mise en marche sur le marché à l'occasion de la fête de la musique qui a eu lieu du 09 au 11 juillet 2016, elle a utilisée toute l'urine collectée par la cuve installée lors du projet AZURIS. Nous leur avons donnée environ 133 litres d'urines stockées.



Crédit : F.E

Figure 30: Le réacteur à struvite fabriqué par Ecosec

La filière de valorisation est concluante et très encourageante : toute l'urine collectée de la cuve a été valorisée. Nous sommes arrivés à l'un de nos objectifs, nous avons pu :

- valoriser l'ensemble des nutriments de l'urine
- boucler le cycle du phosphore et de l'azote des urines de Coriolis, tout en minimisant notre bilan carbone du au transport, car nous nous sommes principalement concentré sur un rayon de 30 km autour de l'ENPC. Ce début est prometteur sachant que des futures collaborations sont envisagées avec des agriculteurs pour assurer cette filière et assurer le futur devenir des urines.

4. Etude sur l'appropriation par les usagers de l'utilisation des urinoirs secs à Coriolis et l'acceptabilité de la finalité de l'urine en tant qu'engrais naturel

Dans cette partie, nous allons analyser les résultats obtenus par une enquête sur la perception des usagers de toilettes sèches, en l'occurrence ici l'urinoir sec.



4.1. Objectif de l'enquête

L'objectif de cette enquête est de mieux connaître la perception des individus tant à l'usage des urinoirs secs qu'à la consommation de produits fertilisés par de l'urine.

Les questionnaires préparés sont basés sur les thèmes suivants :

- La satisfaction des utilisateurs de l'usage d'un urinoir sec et leur habitudes/comportements adoptés
- Le niveau de connaissance sur l'assainissement
- Les utilisateurs sont-ils prêts à consommer des produits issus de l'agriculture fertilisés par de l'urine humaine ?

4.2. Méthodologie de l'enquête

Le 23 juin 2016, jour officiel de la mise en marche de la collecte sélective des urines à Coriolis, a coïncidé avec la D.Event Conférence Internationale dont le thème est « Innover avec empathie : comment diffuser le design thinking dans une organisation ? ».



Figure 31: Affiche de la conférence internationale de la D.Event, l'innovation par le design thinking

Durant toute une journée, sur le thème de l'empathie, se sont réunis plus de trois cents personnes, des acteurs internationaux accompagnant les entreprises sur les enjeux de l'innovation par le design thinking.

Cette conférence s'est déroulée à l'amphithéâtre Carnot dans le bâtiment Coriolis, place stratégique, car l'amphithéâtre se trouve juste en face des toilettes où est disposé l'urinoir sec sur lequel se porte notre étude. Profitant alors, de cette conférence qui a réuni pas moins 300 personnes, Fabien¹⁰, Maxime¹¹ et moi-même avons entrepris une campagne de communication, pour faire connaître le principe de collecte sélective des urines et présenter le projet OCAPI et le sous-projet pilote AZURIS lancé très récemment à l'Ecole des Ponts.

Ainsi, pendant cette mission de communication, un sondage via un questionnaire a donc été réalisé pour recueillir les impressions et connaître l'acceptabilité sociale de la collecte

¹⁰ Fabien ESCULIER est le chef du projet OCAPI

¹¹ Maxime DECHESNE est un stagiaire du projet OCAPI



sélective des urines auprès de personnes, n'utilisant pas voire ne connaissant pas ce principe.



Figure 32 : Le stand lors de la campagne de communication, le 23 juin 2016

Lors de la distribution des questionnaires, nous nous sommes plutôt concentrés et dirigés vers les hommes sortant des toilettes pour avoir leur jugement sur les toilettes secs mais sans oublier les autres participants et participantes du séminaire. Nous avons donc distribués une centaine de questionnaires qui nous ont été remis en main propre.

Le nombre total de questionnaires renseignés est de 87 dont 70% des sondés sont des hommes (soit 61 individus) et 30% sont des femmes (soit 26).

4.3. Analyse et synthèse des résultats de l'enquête

Les résultats principaux du sondage sont présentés ci-dessous. Il faut noter que les réponses recueillies sont à traiter avec du recul étant donné qu'elles ne sont pas vraiment représentatives de l'ensemble de la population de Coriolis :

- De par la population sondée, en effet ce sont, pour la majorité, des personnes qui ont fait le déplacement jusqu'à l'ENPC pour assister à un séminaire sur l'innovation donc a priori très ouverts au sujet d'innovation comme AZURIS. La plupart des sondés sont dans le domaine du design, marketing, architecture, éducation, et la recherche : domaine où la nouveauté et le développement de nouveau concept sont un moteur dans leur métier.
- De par leur niveau d'étude, plus de 80% des sondés ont fait des études supérieurs à bac +5 (41%) ou long (44%), on pourrait supposer qu'ils ont été sensibilisé à la protection de l'environnement durant leur étude, car c'est sujet qui touche toutes les disciplines et secteur d'activité.
- En raison de leur sexe, il y a une participation inégalitaire entre les hommes (70%) et les femmes (30%). Cette répartition a été influencée du fait qu'on recherchait à connaître le niveau de satisfaction des usagers utilisant l'urinoir sec masculin.



Cela dit, toutes les classes d'âge sont représentées avec une homogénéité dans l'ensemble, il y a environ 19% des personnes questionnées qui ont 25 ans ou moins, 20% ont entre 26 et 35 ans, 24% ont entre 36 et 45 ans, 22% ont entre 45 et 55 ans et le reste près de 14% des sondés ont plus de 55 ans.

Au sujet de la satisfaction des usagers concernant l'urinoir sec :

On distingue parmi les 61 individus masculins questionnés, 80% des hommes ont déjà utilisé les toilettes du bâtiment (soit 49 individus), rappelons tout de même que la particularité des toilettes masculines de ce bâtiment se distingue par la présence des urinoirs secs.

Parmi eux, 77% ont affirmé avoir utilisé l'urinoir sec (soit 38 hommes), or seulement 20 personnes avaient conscience d'utiliser un urinoir sec. Donc 37% d'entre eux n'ont pas aperçu de différence entre un urinoir traditionnel et un urinoir sec. Quand on questionne les individus qui ont utilisé l'urinoir sec sur leur satisfaction de cet usage, 84% soit 32 individus déclarent qu'ils sont satisfaits de l'utilisation d'un urinoir sec et ils considèrent que l'usage est habituel. Tandis que 8% ne sont pas satisfaits pour diverses raisons: « odeur résiduelle », « un peu sale », ou encore car « les gens font pipi par terre » et les 8% restant n'émettent aucun avis quant à leur usage.

Concernant, les personnes interrogées sur leur comportement et habitudes aux toilettes 50% choisissent systématiquement un urinoir pour sa praticité (20%), sa rapidité (11%), et seulement 8% (soit 3 personnes) l'utilise pour économiser l'eau.

Environ 73% des personnes ne savent pas ce que devient l'urine, ils n'ont pas de connaissance sur la filière de gestion de leurs excréments. Ce chiffre nous paraît considérablement important, c'est un indicateur de la méconnaissance du public concernant l'impact lié aux traitements des eaux usées. Et cette ignorance peut compromettre l'attitude et le comportement des usagers dans l'utilisation des urinoirs secs.

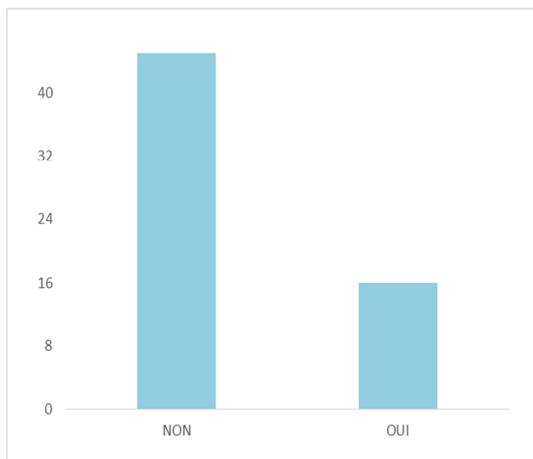


Figure 33: Savez ce que devient l'urine d'un urinoir ?

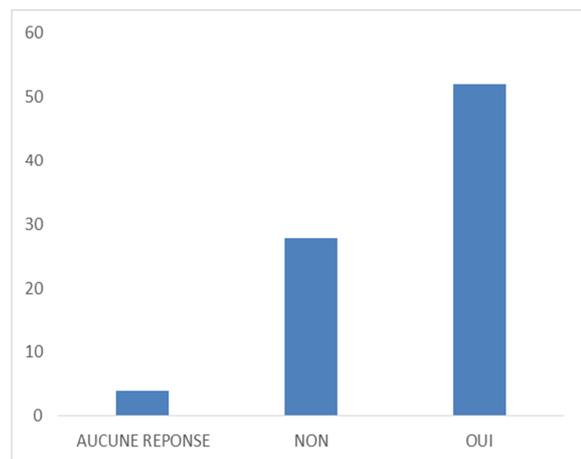


Figure 34: Savez-vous que les boues de station d'épuration sont épandues sur les champs ?

Les résultats compilés par ce « public » sont très encourageants. Parmi les 87 questionnés, 90%, soit 76 individus au total, n'ont émis aucune objection à manger de la nourriture fertilisée avec de l'urine humaine. Généralement, 91% des 87 répondants trouvent que



réutiliser de l'urine dans l'agriculture est une bonne idée. Il y a toutefois, des préoccupations quant à la qualité des engrais, exprimée et mentionnée en commentaire par les participants mais cela dit, ils sont prêts à manger ces produits alimentaires si un traitement au préalable est envisagé et que cet engrais soit sans danger pour la santé humaine.

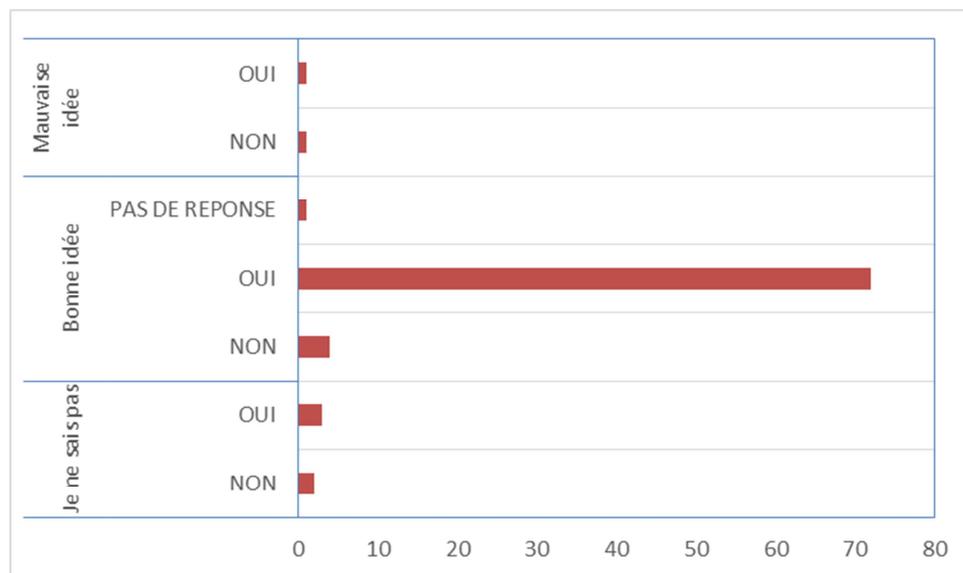


Figure 35: (a) Pensez-vous que ce soit une bonne idée de recycler l'urine en engrais naturel ? (Réponse Bonne ou mauvaise idée)
 (b) Seriez-vous prêts à manger des aliments qui ont poussé après épandage d'urine humaine ? (Réponse oui ou non)

5. Enseignements et recommandations

5.1. Retours d'expérience du projet AZURIS

Nous retenons que pour la collecte sélective des urines, le traitement des urines à privilégier est dans un premier le stockage de l'urine et ensuite la précipitation de la struvite pour récupérer le phosphore et une partie de l'azote.

5.2. Recommandation pour une expansion nationale

5.2.1. Aspect réglementaire de l'urine

- Il y a un vide législatif concernant cette méthode d'assainissement

L'utilisation des excréments humains sort souvent des cadres réglementaires existants. Ceci est de plus en plus évident pour une application agricole, où les nouveaux engrais ne sont pas définis dans les textes législatifs ou consultatifs de nombreux pays. La faiblesse du cadre juridique et institutionnel dans de nombreux pays, dont en France rend difficile la mise en œuvre et le déploiement des solutions novatrices d'assainissement. (EcoSanRes)

- En AB, l'urine ne peut pas être épandue dans les champs



L'urine est un engrais idéal pour la production biologique, où les engrais synthétiques minéraux ne sont pas autorisés. Cependant, il existe des barrières à l'utilisation de l'urine dans les systèmes de production lorsqu'on utilise le label de production biologique. Ces barrières se présentent par exemple dans les règlements de l'Union européenne. L'agriculture biologique est régie par le règlement européen (EEG) 2092/91 qui s'applique à toute agriculture biologique européenne certifiée. Ce règlement régit entre autres choses les apports autorisés en agriculture biologique. L'urine humaine n'est à l'heure actuelle pas incluse comme engrais dans le règlement de l'UE ce qui rend la chose difficile pour les producteurs biologiques en Europe ou concernant l'utilisation de l'urine humaine pour des exports vers un marché européen. (EcoSanRes)

5.2.2. Aspect environnemental

- comment évacuer l'urine des villes, bilan global de gaz à émission de serre (bilan carbone)

5.2.3. Aspect acceptabilité sociale

- Pour la dimension utilisation par les usagers des toilettes à séparation à la source
- Pour la dimension utilisation de l'urine en tant que fertilisant, d'un point de vue culturel et aussi par rapport aux questions des micropolluants ...

L'urine contient des micropolluants tels que des hormones, des résidus de produits pharmaceutiques et également des métaux lourds. En moyenne, 2/3 des résidus pharmaceutiques sont excrétés dans les urines et 1/3 restant se trouve dans les fèces. (Richert et al. (2011))

- Risques sanitaires

Les risques sanitaires liés à l'utilisation de l'urine humaine dans la production agricole sont généralement faibles. En effet, la séparation de l'urine à la source constitue une importante barrière contre la transmission des agents pathogènes puisque la plupart des agents pathogènes sont excrétés avec les matières fécales. Les systèmes de collecte de l'urine devront être conçus de sorte à minimiser le risque de contamination fécale croisée. (EcoSanRes).





Conclusion générale

Durant ce stage de fin d'études, j'ai eu l'occasion de travailler dans le domaine des traitements des eaux usées sur un sujet émergent en France et sur lequel je n'avais aucune notion : la séparation à la source. Ce thème combinant à la fois la recherche et l'innovation, m'a permis d'acquérir de nouveaux savoirs et de développer mes compétences en laboratoire, en analyses et traitements de données et également en communication, et en gestion de projet. En effet, c'était une première pour moi de conduire un projet depuis sa conception jusqu'à sa mise en œuvre, et d'ailleurs cela n'aurait pas pu se réaliser sans l'aide et les conseils précieux de toute l'équipe du projet OCAPI.

Le projet pilote AZURIS initié dans le cadre du programme de recherche OCAPI, n'est encore qu'à ses débuts, mais il permet à la France de se réapproprier le sujet et de s'investir davantage vers cette voie d'assainissement plus écologique et plus respectueuse de l'environnement. Même s'il reste du chemin à parcourir, les premiers résultats obtenus avec le projet AZURIS sont, dans tous les cas, probants et encourageants, car il permet d'appréhender, en situation réelle, les problématiques liées à la séparation à la source de l'urine. Le dispositif mis en place actuellement à Coriolis devrait permettre un très bon rendement de récupération des nutriments. Je suis d'ailleurs très heureuse d'avoir pu accomplir toutes les missions durant ce stage, et notamment la dernière partie de la filière de valorisation, car nous avons réussi à valoriser des déchets, dont leur destination était la station d'épuration de Saint-Thibault-des-Vignes, et nous avons pu « boucler » le cycle de phosphore et de l'azote des premiers litres de la collecte sélective d'urine.



Bibliographie

- Beate I. Escher, Wouter Pronk, Marc J.-F. Suter, and Max Maurer. *Monitoring the removal efficiency of pharmaceuticals and hormones in different treatment processes of source-separated urine with bioassays*. Dübendorf, Switzerland: Environmental science & technology Vol. 40, NO. 16, 2006.
- Berne, B. *Compte-rendu du voyage d'études en Allemagne, les nouvelles technologies de l'éco-assainissement*. 2008. <http://www.toilettesdumonde.org>.
- Besson, M. *Etude des réalisations internationales et simulation d'un scénario de séparation à la source*. Rapport de stage de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme Ingénieur Génie des Procédés, Toulouse: INSA, 2015.
- Bonvin, C., Udert, K-M. «total nutrient recovery from urine – operation of a pilot-scale nitrification reactor. WEF/IWA International Conference on Nutrient Removal and Recovery.» Vancouver, 2013.
- Caby, A. *Quel intérêt et quelle opportunité de mettre en place une collecte sélective des urines en milieu urbain dense ? Etude sur le territoire du SIAAP*. Thèse professionnelle du Mastère Spécialisé Politiques et actions publiques pour le développement durable, Ecole nationale des ponts et chaussées, 2013.
- CIBA, Geigy. «Wissenschaftliche Tabellen Einheiten im Meßwesen, Körperflüssigkeiten, Organe, Energiehaushalt, Ernährung.» 1977.
- Cleau. *Les consommations à la maison*. 22 07 2016. <http://www.cieau.com/les-ressources-en-eau/en-france/les-usages-domestiques>.
- Cordell, D. *Peak phosphorus and the role of P recovery in achieving food security*. Édité par Kai M. Udert and Judit Lienert Tove A. Larsen. 2013.
- Crolais, A., Lebihain, M., Le Gal, A., Maysonnave, E. *L'or liquide, l'innovation sociotechnique en assainissement par la mise en synergie d'acteurs locaux: le cas de la collecte sélective des urines sur le plateau de Saclay*. Rapport de Groupe d'Analyse de l'Action Publique, Ecole nationale des ponts et chaussées, 2015.
- Enk, R. Van. *The phosphate balance : current developments and future outlook*. Technical report, InnovationNetwork and Courage and Kiemkracht, 2011.
- F. Esculier, J. Tabuchi and B. Créno. *Nutrient and energy flows related to wastewater management in the Greater Paris: the potential of urine source separation under global change constraints*. International conference on Water, Megacities and global change, 2015.
- G.Miquel. «Rapport sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France.» s.d.
- Heberer, Th., Fuhrmann, B., Schmidt-Bäumler, K., Tsipi, D., Koutsuba, V., Hiskia, A. «Occurrence of Pharmaceutical Residues in Sewage, River, Ground and Drinking Water in Greece and Germany.» *In Symposia Papers: Issues in the Analysis of Environmental Endocrine Disruptors* (American Chemical Society), Mars 2000.



- Helvi Heinonen-Tanski, Annalena Sjöblom, Helena Fabritius, Päivi Karinen. *Pure human urine is a good fertiliser for cucumbers*. Bioresource technology, 2005.
- IFEN. «La facture d'eau domestique en 2004.» Mars 2007.
- J. Spangberg, P. Tidaker, H.Jönsson. *Environmental impact of recycling nutrients in human excreta to agriculture compared with enhanced wastewater treatment*. Science of the Total Environment, 2014.
- Jönsson, Hakan. *Urine separation -Swedish experiences*. EcoEng Newsletter, October 2001.
- K.M. Udert, T.A. Larsen and W. Gujer. *Fate of compounds in source-separated urine*. Vol. 54. 11-12 vols. Water Science & Technology, 2006.
- Kai M. Udert, Tove A. Larsen, Martin Biebow, Wili Gujer. *Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system*. 37. Dübendorf, Switzerland: Water Research, 2003.
- Kai M. Udert, Tove A. Larsen, Wili Gujer. *Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems*. Dübendorf, Switzerland: Water Research, 2003.
- Kimberly LeMonde Fewless, Sybil Sharvelle, Larry A.Roesner. *Source Separation and Treatment of Anthropogenic Urine*. Colorado State University: The Water Environment Research Foundation, 2011.
- Kuntke, Philipp. *Nutrient and energy recovery from urine*. Wageningen: Wageningen University, 2013.
- Lanoë, Samuel. *Assainissement Durable*. 2009.
- Lienert, J. and Larsen, T.A. *Pilot projects in bathrooms: a new challenge for wastewater professionals*. Water Practice and Technology, 2007.
- M. Maurer, W. Pronk, T.A. Larsen. *Treatment process for source-separated urine*. 8600 Dübendorf, Switzerland: Water Research 40, 2006.
- Maurer, M., Pronk, W., and Larsen, T.A. *Treatment processes for source separated urine*. Water Research, 40 (17), 3151-3166. , 2006.
- Mustin, M. *Le compost : gestion de la matière organique*. . Ed francois Dubusc. 954p., 1987.
- Richert A., Gensh R, Jönsson, H. Streenström T et Dagerskog L. 2011. *Conseil pratique pour une utilisation en production agricole* . SEI EcoSanRes, 2011.
- Richert, A. , Gensch, R., Jönsson,H., Stenström, T-A., Dagerskog,L. «Practical Guidance on the Use of Urine in Crop Production.» *EcoSanRes*, 2010.
- T. Larsen, K. Udert and P. Lienert. *Source separation and decentralization for wastewater management*. Technical report, IWA, 2013.
- Triger, Aurélien. «Thèse : Procédé hybride cristallisation/séparation membranaire pour le traitement d'un fluide complexe (urine).» Toulouse, 2012.
- Udert, Kai Markus. «The fate of nitrogen and phosphorus in source-separated urine.» Thèse, 2002.



University of Bern. *UroSurf*. 2008. http://e-learning.studmed.unibe.ch/UroSurf_FR/ (accès le
Septembre 2016).



Annexes

Annexe 1 : Le livre « Projet AZURIS-FAQ »



Projet AZURIS



PLAN

I-	La campagne de collecte d'urine du printemps 2016	2
II-	Contexte	2
III-	Le projet Azuris	2
IV-	Foire aux questions	3
V-	Liens	6



I- La campagne de collecte d'urine du printemps 2016

Le Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU) réalise une campagne de collecte d'urine afin de connaître plus précisément les caractéristiques de l'urine des usagers de cet urinoir sec. Cette campagne est ouverte à tout usager de cet urinoir (à gauche dans le hall d'entrée du bâtiment). Pour y participer, il vous suffit de vider votre vessie dans les flacons mis à disposition au lieu d'utiliser l'urinoir. Les instructions détaillées sont précisées dans ce local toilettes.

Nous vous remercions par avance de votre collaboration et nous tenons à votre disposition pour toute information complémentaire.

Supervision du projet : Fabien ESCULIER

Chargée de projet : Amel SMAIL

Contact : azuris@enpc.fr

II- Contexte

Face aux enjeux environnementaux actuels, le programme de recherche OCAPI étudie les voies possibles d'évolution des systèmes d'assainissement qui permettraient de valoriser les ressources carbonées, azotées et phosphorées présentes dans les eaux usées tout en limitant l'impact sur l'environnement et les consommations d'énergie. Une de ces voies d'évolution consiste à séparer à la source les divers composants des eaux usées, et en particulier l'urine et les matières fécales qui représentent l'essentiel des ressources organiques aujourd'hui envoyées en égout. La séparation à la source peut permettre de contribuer à boucler le cycle des nutriments par le recyclage des excréments dans la production agricole.

Pour plus d'informations, voir par exemple le documentaire de 7 minutes de la Cité des Sciences et de l'Industrie, « Urine, le nouvel or vert » disponible sur ce lien <http://leesu.univ-paris-est.fr/L-urine-humaine-le-prochain-or-vert.html>.

III- Le projet AZURIS

Dans ce cadre, un projet spécifique a été monté en partenariat entre le LEESU et la d.school : le projet AZURIS, pour valorisation de l'**AZ**ote de l'**UR**ine de Coriolis. L'objectif de ce projet est de réaliser la collecte et la valorisation de l'urine d'un urinoir sec masculin du rez-de-chaussée du bâtiment Coriolis.



Le projet consiste à dévier le tuyau d'évacuation d'urine vers une cuve de stockage puis de mettre en place un système de collecte et une filière de valorisation. Tout ce système sera instrumenté afin de réaliser un bilan de l'efficacité de la valorisation des composants de l'urine.

Par ailleurs, il est prévu de travailler plus largement sur le design des toilettes afin d'améliorer à la fois le bilan environnemental des toilettes et le confort pour l'utilisateur.

IV- Foire aux questions

- 1) Je suis une femme, puis-je également y participer ?
- 2) Quelle est la composition de l'urine ?
- 3) Cette campagne est-elle anonyme ?
- 4) Allez-vous analyser des stupéfiants ou d'autres molécules liées à mon mode de vie ?
- 5) La collecte sélective et l'utilisation de l'urine en agriculture est-elle autorisée ?
- 6) Puis-je utiliser mon urine chez moi pour mes plantes ?
- 7) Que deviendra mon urine ?
- 8) En quoi le recyclage de mon urine dans le projet AZURIS sera-t-il plus écologique que si mes urines étaient envoyées en égout ?
- 9) Autre question ?

1) Je suis une femme, puis-je également y participer ?

Nous regrettons que cette campagne soit principalement tournée vers les hommes. L'installation d'urinoirs secs féminins n'a pas été prévue à la construction du bâtiment Coriolis. Nous comptons aussi travailler sur des méthodes permettant de valoriser l'urine féminine et nous espérons bien, avec votre soutien, développer également de telles campagnes à l'avenir.

Si toutefois vous rêvez de participer dès maintenant à notre projet, vous pouvez également nous confier un flacon de votre urine mais il conviendra impérativement que vous nous précisiez qu'il s'agit d'un flacon d'urine féminine.



2) Quelle est la composition de l'urine ?

L'urine contient plus de 3 000 composants chimiques. La composition de l'urine change au cours du stockage, voici les concentrations des principaux éléments que l'on retrouve dans l'urine fraîche et dans l'urine stockée :

Tableau 1 : Concentrations des principaux éléments dans l'urine fraîche et l'urine stockée

	Unité	Urine fraîche	Urine Stockée
Azote total	gN/m ³	9 200	9 200
Azote ammoniacal	gN/m ³	480	8 100
Urée	gN/m ³	7 700	0
Phosphate	gP/m ³	740	540
Calcium	g/m ³	190	0
Magnésium	g/m ³	100	0
Potassium	g/m ³	2 200	2 200
Carbonate	gC/m ³	0	3 200
Sulfate	gSO ₄ /m ³	1 500	1 500
Chlorure	g/m ³	3 800	3 800
Sodium	g/m ³	2 600	2 600

Source: Udert, K.M., T.A. Larsen, et W. Gujer. « Fate of Major Compounds in Source-Separated Urine ». *Water Science and Technology* 54, n° 11-12 (décembre 2006): 413-20. doi:10.2166/wst.2006.921.

Une analyse détaillée de tous les composés trouvés dans l'urine est disponible ici :

<http://www.urinemetabolome.ca>.

3) Allez-vous analyser des stupéfiants ou d'autres molécules liées à mon mode de vie ?

Nous ne ferons aucune analyse de stupéfiants, médicaments, hormones, etc.

Les seuls paramètres qui seront mesurés sont indiqués dans le tableau ci-dessus. Les informations qu'ils nous permettront d'avoir par rapport au mode de vie des participants à cette expérience sont liées à leur régime alimentaire. L'azote permet de connaître la quantité de protéines ingérées. Le chlorure et le sodium la quantité de sel. Les autres nutriments ou



oligo-éléments (phosphate, sulfate, etc.) permettent uniquement de connaître les quantités de nutriments et d'oligo-éléments du régime alimentaire.

4) Cette campagne est-elle anonyme ?

La participation à cette campagne est strictement anonyme. En revanche, si vous souhaitez avoir le résultat spécifique de l'analyse de votre urine, il vous suffit de nous laisser vos coordonnées sur votre flacon et nous vous communiquerons, dans le strict respect de la confidentialité de ces données, les résultats de l'analyse de votre urine, comparée aux valeurs moyennes et aux recommandations des autorités de santé en termes d'alimentation.

5) La collecte sélective et l'utilisation de l'urine en agriculture est-elle autorisée ?

Aucun texte réglementaire français n'encadre la collecte sélective et la valorisation agricole des urines. Le seul encadrement de cette pratique est donné par l'OMS dans son guide ad hoc : « Utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Volume 4: Utilisation des excréta et des eaux ménagères en agriculture ». Organisation Mondiale de la Santé. 2012. ISBN: 978 92 4 254685 9.

Téléchargeable sur :

http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gsuweg4/fr/

6) Puis-je utiliser mon urine chez moi pour mes plantes ?

Tout à fait. A notre connaissance, le guide le plus complet relatif aux précautions d'usage de l'urine à l'échelle individuelle ou collective est celui-ci :

Richert, Anna, Robert Gensch, Håkan Jönsson, Thor-Axel Stenström, et Linus Dagerskog. « Conseils Pratiques pour une Utilisation de l'Urine en Production Agricole ». EcoSanRes Programme. Stockholm Environment Institute, 2011.

Téléchargeable sur :

http://www.ecosanres.org/pdf_files/EcoRanRes_Urine_Guide_FRENCH_111026.pdf.

7) Que deviendra mon urine ?

Dans le cadre du projet AZURIS, il est prévu que toutes les urines collectées soient valorisées en agriculture. Plusieurs options de valorisation sont actuellement étudiées et



nous ne pouvons pour l'instant vous préciser leur destination. N'hésitez pas à nous recontacter ultérieurement ou à consulter de nouveau cette page pour plus d'informations à ce sujet.

8) En quoi le recyclage de mon urine dans le projet AZURIS sera-t-il plus écologique que si mes urines étaient envoyées en égout ?

Si mes urines sont envoyées en égout, elles iront normalement à la station d'épuration de Saint-Thibault-des-Vignes qui traite les eaux usées de la Cité Descartes (dont les urines) avant rejet en Marne. En analysant le devenir de l'azote, qui est le principal composant des urines, on constate qu'environ 70% est converti en diazote gazeux : il va alors dans l'atmosphère, sans causer de dommage environnemental direct, mais il n'est pas recyclé en tant que nutriment agricole. Seulement 15% de l'azote environ se retrouve dans les boues. Cet azote est alors recyclé en agriculture par épandage des boues ou converti en diazote gazeux par incinération des boues (les deux options sont mises en œuvre à Saint-Thibault-des-Vignes). Enfin environ 15% de l'azote est rejeté en Marne. En outre, lors du traitement, environ 1% de l'azote part dans l'atmosphère sous forme d'oxyde nitreux qui est un puissant gaz à effet de serre.

Avec la collecte sélective de l'urine, on peut envisager recycler plus de 99% de l'azote en agriculture. On supprime alors les 15% de rejet d'azote en Marne, on supprime les émissions d'oxyde nitreux et, sur les champs, on remplace par de l'azote urinaire les engrais chimiques azotés dont la synthèse est responsable d'environ 4% des émissions de gaz à effet de serre français. Même en transportant les urines en véhicule essence à 50km de l'Ecole, les émissions de gaz à effet de serre de ce transport seraient encore inférieures à celles du système actuel.

L'objectif du projet AZURIS est de valider par la pratique le bénéfice écologique attendu de cette valorisation agricole de l'urine.

Pour plus de détails, cf. par exemple :

ESCULIER, Fabien, Jean-Pierre TABUCHI, et Benjamin CRENO. « Nutrient and energy flows related to wastewater management in the Greater Paris: the potential of urine source separation under global change constraints ». International conference on Water, Megacities and global change. Paris, Décembre 2015.

9) Autre question ?

N'hésitez pas à nous poser toute autre question en écrivant à azuris@enpc.fr et nous tâcherons de vous répondre du mieux que nous pourrons.



V- Liens

Pour les plus curieux, vous trouverez ici des liens vers plus de renseignements :

<http://leesu.univ-paris-est.fr/-OCAPI-.html>

<http://leesu.univ-paris-est.fr/L-urine-humaine-le-prochain-or-vert.html>

<http://www.urinemetabolome.ca>

http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gsuweg4/fr/

http://www.ecosanres.org/pdf_files/EcoRanRes_Urine_Guide_FRENCH_111026.pdf.



Annexe 2 : Affichage de la campagne de collecte d'AZURIS

DON D'URINE POUR LE PROJET AZURIS

Le laboratoire LEESU réalise une collecte d'urine. Si vous souhaitez participer à cette expérience, merci d'utiliser les flacons situés dans les toilettes B013.

Nous valoriserons votre urine en engrais naturel !



LeesU
Laboratoire aux échantillons systèmes urbains

dSchool
des Ponts
ParisTech

École des Ponts
ParisTech

ENPC

Plus d'informations sur : <http://leesu.univ-paris-est.fr/AZURIS-presentation.html>

Contact : azuris@enpc.fr



DON D'URINE POUR LE PROJET AZURIS

CONSIGNES

- 1) Se laver les mains
- 2) Prendre un flacon vide dans le réfrigérateur
- 3) Ouvrir le flacon et retirer le capuchon
- 4) Remplir le flacon de votre urine (une miction complète)*
- 5) Remettre le capuchon et fermer le flacon
- 6) Incrire la date et l'heure sur l'étiquette, qui se trouve à l'intérieur du porte-document accroché sur le réfrigérateur
- 7) Votre échantillon peut-être anonyme ou personnalisé. Dans ce cas, si vous souhaitez recevoir les résultats de votre analyse, ajoutez votre nom et vos coordonnées sur l'étiquette.
- 8) Coller l'étiquette sur le flacon
- 9) Déposer le flacon dans le réfrigérateur, sur le bac prévu à cet effet
- 10) Se relaver les mains

-> Nous vous informons que votre échantillon a pour objectif de servir à la recherche, ainsi nous vous garantissons que nous n'analyserons pas la présence de stupéfiants ou hormones.

-> Une fois, les analyses effectuées, nous stockerons ce qui restent des urines dans le but de les revaloriser en les utilisant comme engrais naturel.

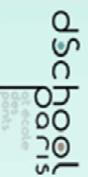
* Promis, ça ne débordera pas! En moyenne, le volume d'une miction est 225 mL et les flacons font 500 mL



4x10



laboratoire eau environnement systèmes urbains



École des Ponts
ParisTech



École des Ponts
ParisTech



Plus d'informations sur : <http://leesu.univ-paris-est.fr/OCAPI-presentation.htm>

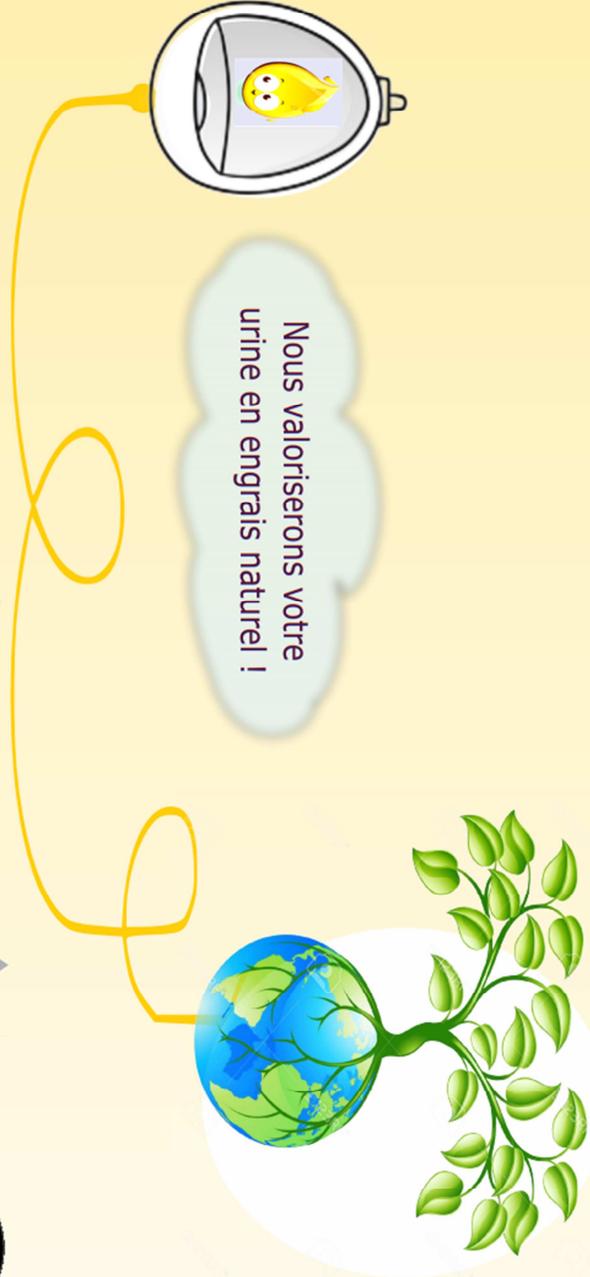
Contact: azuris@enpc.fr



COLLECTE D'URINE POUR LE PROJET AZURIS

Le laboratoire LEESU a installé une cuve de récupération d'urine de cet urinoir sec.
Nous vous remercions de contribuer à ce système d'assainissement écologique.

Nous valoriserons votre urine en engrais naturel !



Plus d'informations sur: <http://leesu.univ-paris-est.fr/AZURIS-presentation.html>

LEESU laboratoire des environnements systèmes urbains

dschool paris école des ponts

École des Ponts ParisTech

GAPI

Contact: azuris@enpc.fr





QUESTIONNAIRE DU PROJET OCAPI SUR L'URINE

- 1- **Savez-vous qu'il existe des urinoirs secs ?**
 - Oui
 - Non
- 2- **Avez-vous utilisé des toilettes dans ce bâtiment ?**
 - Oui
 - Non
- 3- **Si oui, avez-vous remarqué que l'urinoir était sec ?**
 - Oui
 - Non
- 4- **L'avez-vous utilisé ?**
 - Oui
 - Non
- 5- **Si oui, êtes-vous satisfait de l'utilisation de l'urinoir sec ?**
- 6- **Quand vous voulez juste uriner, quelle toilette utilisez-vous ?**
 - Systématiquement un urinoir
 - Systématiquement une toilette
 - L'un ou l'autre
- 7- **Pourquoi ? (facultatif)**
- 8- **Vous arrive-t-il de faire tomber de l'urine à côté d'un urinoir ?**
 - Jamais
 - Rarement
 - Parfois
 - Systématiquement
- 9- **Savez-vous ce que devient l'urine d'un urinoir ?**
 - Oui
 - Non

Commentaires (facultatif) :

Nous menons un programme de recherche nommé OCAPI et porté par le Laboratoire LEESU de l'Ecole des Ponts. Dans ce cadre, nous avons équipé l'urinoir du rez-de-chaussée d'une cuve de récupération pour permettre la valorisation des nutriments de l'urine en engrais naturel.

- 10- **Pensez-vous que ce soit une bonne idée de recycler l'urine en engrais agricole ?**
 - Oui
 - Non

**Tournez la page
SVP**



11- Pourquoi ?

12- Seriez-vous prêts à manger des aliments qui ont poussé après épandage d'urine humaine ?

1/2

- Oui
- Non

13- Si non, à quelle(s) condition(s) ?

14- Savez-vous que les boues de station d'épuration sont épandues sur les champs ?

- Oui
- Non

15- Etes-vous pour ou contre cette pratique ? Pourquoi ?

- Pour :
- Contre :

Quelques informations sur vous :

16- A quelle tranche d'âge appartenez-vous ?

- 25 ans ou moins
- Entre 26 et 35 ans
- Entre 36 et 45 ans
- Entre 45 et 55 ans
- Plus de 55 ans

17- Quel est votre niveau d'étude ?

- Aucun diplôme
- Brevet des collèges
- CAP, BEP
- Baccalauréat
- Supérieur court (Bac+2/ Bac+ 3)
- Supérieur long (Bac+5)
- Supérieur à Bac+5

18- Dans quelle situation socio-professionnelle êtes-vous ?

- En activité
- Parent au foyer
- Etudiant
- En recherche d'emploi
- Retraité
- Autre

19- Dans quel secteur d'activité travaillez-vous ?

Facultatif :

Nom :

Prénom :

E-mail :

Organisation :

Poste occupé :

A remettre au stand OCAPAPI à côté des toilettes SVP.

MERCI !!

