

TOUR DE FRANCE 2017 : PROJETS SCIENTIFIQUES LIES AU TRAITEMENT ET A LA VALORISATION DE L'URINE

Réalisé par : Vincent LE DAHERON, Benjamin CLOUET, Victoria SAUNAL

Juin - Juillet 2017

SOMMAIRE

Contexte	3
1. Institut National des Sciences Appliquées (INSA) - Toulouse	4
2. Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) - Rennes.....	6
3. Université de Montpellier	9
4. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) / AgroPariTech.....	11

CONTEXTE

Initiés par les pays scandinaves dans les années 1990 et poursuivi dans les pays en développement, les recherches scientifiques sur le traitement et la valorisation de « l'or jaune » s'intensifient peu à peu en Europe occidentale et particulièrement en France

En effet, l'assainissement « tout-à-l'égout » est remis en cause à la fois par son empreinte environnementale et l'épuisement de ressources naturelles non renouvelables indispensables à notre agriculture. Les techniques alternatives d'assainissement comme la séparation d'urine à la source gagnent en popularité et permettent de repenser nos systèmes d'assainissement linéaires actuels.

Ces dernières années et dans les prochains mois, des projets scientifiques d'envergure, axés sur le traitement des urines et leur valorisation agronomique ont été lancés en France.

Durant la deuxième semaine de juin 2017, Ecosec est partie à la rencontre des acteurs clés de ces travaux. Quatre instituts de recherches dans quatre villes différentes ont été visités. Ce présent rapport présente ces centres de recherches ainsi que leurs travaux majeurs sur la thématique de traitement et valorisation des urines.

Ce rapport est axé volontairement sur les traitements « technologiques » de l'urine et l'agenda serré de ce Tour de France a obligé l'équipe d'Ecosec à faire l'impasse sur certains acteurs tout aussi intéressants comme :

- **Fabien Esculier**, responsable du programme de recherche OCAPI (Optimisation des Cycles Azote et Phosphore en Ville), mené à l'initiative du SIAAP parisien et en collaboration avec plusieurs laboratoires renommés. Suite à ses travaux, portant sur l'étude du métabolisme urbain et notamment des cycles biogéochimiques, et grâce à son énergie, des bâtiments pilotes permettant la séparation d'urine vont voir le jour dès 2018. (fabien.esculier@ponts.org)
- **Renaud de Looze**, agronome et pépiniériste grenoblois, auteur du [premier ouvrage argumenté](#) consacré entièrement à l'utilisation de l'urine en tant qu'engrais. (delooze@wanadoo.fr)
- **Samuel Lanoë**, auteur de « [L'assainissement Durable](#) » et porteur avec Habitat Dol et Emeraude Habitation du [premier projet d'habitat collectif](#) (et participatif) français incluant de l'assainissement écologique, début des travaux en 2018. (s.lanoe@yahoo.fr)
- Le [Réseau d'Assainissement Ecologique](#) et [Toilettes du Monde](#), institutions françaises historiques de l'assainissement écologique, réalisant fréquemment des pertinents outils et rapports permettant la promotion de pratiques nouvelles.

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES (INSA) - TOULOUSE

Laboratoire : [LISPB](#) (Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et de Procédés)

Personne rencontrée : Projet SMS : Etienne Paul (paul@insa-toulouse.fr), Mathieu Sperandio (sperandi@insa-toulouse.fr), Yolaine BESSIERE (yolaine.bessiere@insa-toulouse.fr)

Projet MUSE : Mathilde BESSON (mbesson@insa-toulouse.fr)

Mots clés : SMS – Micropolluants, Séparation à la Source, Toilettes sous vide

MUSES – Assainissement urbain, Modélisation, Traitements décentralisés

Résumé : L'obtention d'un financement d'une telle ampleur est, pour le laboratoire Toulousain ainsi que les 5 laboratoires et 4 PME partenaires, l'aboutissement de 15 années de recherches sur la valorisation des matières et de l'énergie contenue dans les eaux usées. Cette tournée nationale devait initialement passer par 3 de ces PME¹ dont les activités sont directement en lien avec le traitement et la valorisation de l'urine (installation de sanitaires séparatives, traitement membranaires...). Le calendrier serré de ce voyage nous a malheureusement obligés à renoncer à ces visites. Les principaux projets en cours sur la thématique de l'assainissement innovant sont :

SMS (Séparation à la Source des Micropolluants) :

Le projet SMS vise à mettre en place une plateforme démonstrative pour le développement de filières d'assainissement pour l'élimination des micropolluants d'origine médicamenteuse. L'urine concentrant une grande partie de ces micropolluants, ce projet est fortement axé sur le traitement de cette dernière mais n'explore pas de solution de valorisation agronomique. Il comprend les objectifs principaux suivants :

➤ La construction, le test et la commercialisation de toilettes séparatives sous vide, en partenariat avec JP Coste. Leur fonctionnement sous plusieurs contraintes est comparé avec celui de toilettes séparatives gravitaires. Le but est de limiter la dilution de l'urine par les chasses d'eau tout en augmentant la fiabilité des produits sanitaires et en réduisant notamment considérablement les risques de colmatage par précipitation.



Figure 1 : Banc de tests des toilettes séparatives

¹ [JP Coste](#), [Polymem](#), [Ozoval](#)

- Le développement d'une méthode unique pour la quantification de 9 microcomposés d'intérêt² au sein de diverses matrices complexes (urine, perméat de bioréacteur à membrane, digestat de méthaniseur...).
- En partenariat avec Ozoval, la mise en place d'un traitement d'ozonation hydride (électroozonation et ozonation catalytique), permettant la destruction des micropolluants au sein de flux chargés en matières organiques (urines, perméat de bioréacteur à membrane...), tout en réduisant les coûts d'investissement et de fonctionnement et en limitant la formation de métabolites.

Cette adresse, (<https://roundme.com/tour/122601/view/311006/>), permet une visite virtuelle des pilotes (méthaniseur, bioréacteur à membranes, installations d'écotoxicologie...) en fonctionnement sur le site expérimental de la STEP de Cugnaux.

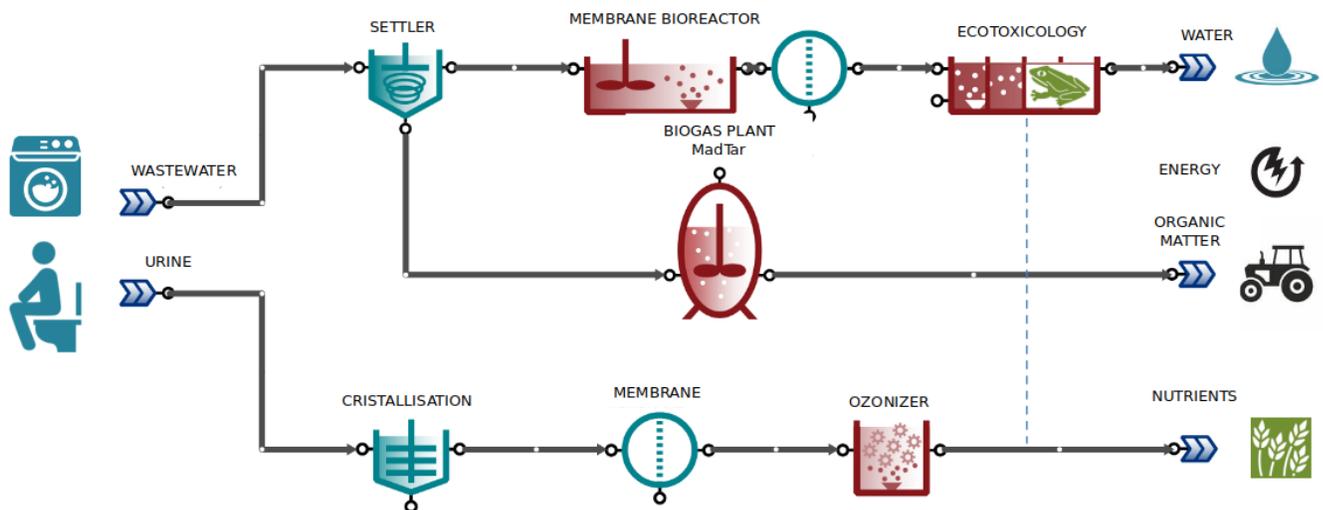


Figure 2 : Schéma représentatif des pilotes du projet SMS

MUSES (Modélisation Urbaine de Scénarios de Séparation des Effluents à la Source) :

Le projet MUSE vise à repenser les flux de matières du métabolisme urbain. Il comprend pour cela la modélisation de nouvelles filières d'assainissement des eaux usées. Aussi, des évaluations environnementales, techniques et économiques de multiples scénarios d'épuration innovants sont menées. Pour cela, différentes pratiques et facteurs sont pris en considération, comme :

- Taux de séparation des effluents (eaux grises, eaux vannes, urine) et taux de collecte
- Modes de collecte, transport et traitement des effluents
- Echelle de la séparation, de la collecte et du traitement
- Typologie d'habitations (résidentiel, tertiaire...)

Ces études, réalisées en concertation avec les acteurs de l'aménagement (aménageurs, urbanistes, architectes, etc.), permettront le développement d'un logiciel d'aide à la décision pour la mise en œuvre de futurs bâtiments.

² Molécules sélectionnées : caféine, carbamazépine, diclofénac, 17- β -estradiol, ibuprofène, 2-hydroxy-ibuprofène, ofloxacine, oxazépam, propranolol, sulfaméthoxasole

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES POUR L'ENVIRONNEMENT ET L'AGRICULTURE (IRSTEA) - RENNES

Laboratoire : OPAALE - *Optimisation des Procédés en Agriculture, agroALimentaire et Environnement.*

Personne rencontrée : Patrick Dabert (patrick.dabert@irstea.fr), Equipe PANDOR.

Mots clés : Recyclage du phosphore, Rejets d'élevage, Méthanisation, Compostage

Résumé : L'IRSTEA de Rennes fait parti d'un réseau des 9 centres de recherches répartis sur toute la France. Fortement ancré dans le territoire breton, les activités de recherches sont en lien avec l'élevage, les déchets ainsi que l'industrie agro-alimentaire.

Deux équipes de recherches forment ce centre :

PANDOR (Procédés de vAlorisation agronomique et éNergétique des Déchets ORganiques),

Spécialisée depuis des années dans le développement de procédés pour la gestion des déchets organiques et leurs filières de valorisation associées. Pour cela, l'équipe s'est doté d'équipements pour la caractérisation de la matière organique et de communautés microbiennes, la conception et modélisation de procédés ou encore la mesure des potentiels méthanogènes.

SAFIR (Stratégie d'Amélioration des Filières et de Réduction des Impacts)

Etudie elle les impacts environnementaux et sanitaires de la gestion des effluents et déchets organiques. Les compétences accumulées permettent la mesure et le contrôle des émissions gazeuses (NH_3 , H_2S , CH_4 , N_2O), le traçage des sources de contamination fécale et la réalisation d'Analyse de Cycle de Vie.

Plusieurs projets de ces équipes ont pour finalité le traitement et la valorisation des urines ... animales. Il nous semble néanmoins pertinent de proposer un résumé non-exhaustif de ces projets :

Phosph'OR :

Ce projet d'envergure, mené entre 2010 et 2014 par l'IRSTEA, vise la récupération du phosphore minéral particulaire des effluents d'élevages porcins par la production d'engrais minéral (struvite et calcium phosphate).

Le procédé comprend une étape de dissolution du phosphore minéral contenu dans le lisier par acidification, puis une séparation des boues organiques par ajout de polymère, la précipitation de la struvite par ajout de magnésie (MgO) et une filtration permettant la récupération de l'engrais.

Un pilote de taille industriel, basé sur ce procédé, a montré la faisabilité économique et les intérêts écologiques d'un tel procédé. Des études agronomiques ont permis de démontrer la valeur fertilisante des produits issus du recyclage. Néanmoins, son développement se retrouve bloqué par une réglementation peu encline à autoriser la mise sur le marché d'un tel produit en dehors d'un cahier des charges rigide.



Figure 3 : Pilote pour la récupération du phosphore des effluents d'élevage

Anammox :

Sur les territoires où les densités d'élevage sont fortes, comme en Bretagne, les rejets d'élevage sont une source majeure de pollutions des sols et milieux aquatiques. Ainsi, la Bretagne enregistre les plus forts excès d'azote et de phosphore dans les sols en France. Les pollutions les plus visibles et problématiques étant l'eutrophisation des milieux récepteurs et la prolifération des algues vertes sur le littoral.

Désignée comme zone vulnérable aux nitrates dans le cadre de la directive européenne nitrates, des moyens considérables sont mis en œuvre pour réduire la perte de nutriments (Plan Algues Vertes). Aussi, de nouvelles pratiques culturales et de nouveaux traitements des effluents sont testés à l'échelle de l'exploitation (méthanisation, traitement biologique de l'azote...).

Comme chez l'Homme, la majeure partie de la fraction azotée des rejets animaux se trouvent dans l'urine. La Cooperl, leader français de la production porcine a récemment développé un procédé (nommé TRAC) permettant la séparation à la source de l'urine. Cette dernière, pauvre en carbone, peut être difficilement traitée en traitement biologique classique (nitrification / dénitrification).

Ne nécessitant ni carbone ni oxygène, la voie métabolique Anammox (ANAerobic AMMonium Oxidation), découverte dans les années 90, suscite de plus en plus d'intérêt pour le traitement des eaux usées. Mise en œuvre par des bactéries autotrophes, elle permet une oxydation de l'ammonium (NH_4^+) en utilisant le nitrite (NO_2^-) comme accepteur final d'électron pour former de l'azote moléculaire (N_2).

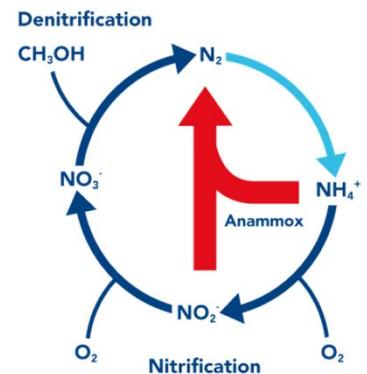


Figure 4 : Traitement biologique Anammox

Procédé innovant sur lequel les recherches sont encore embryonnaires, un des inconvénients majeur de ce traitement est la rareté de la population bactérienne régissant ce procédé. L'équipe de recherche a du

développer leur propre culture de bactéries Anammox et l'enrichissement, réalisé sur plusieurs mois, a montré la sensibilité des bactéries à l'oxygène et la matière organique.

Aussi, dans la thématique de valorisation des déchets organiques urbains, le Projet Européen **DECISIVE** (A DECentralised management Scheme for Innovative Valorisation of urban biowaste) nous a aussi interpellé. L'équipe d'Anne Tremier (anne.tremier@irstea.fr), impliquée dans le développement du compostage domestique depuis des années, est coordinatrice de ce projet qui vise une gestion innovante des flux de biodéchets générés en ville.

Il vise à repenser le métabolisme urbain actuel des matières organiques, de l'énergie et des biodéchets afin de tendre vers une économie plus circulaire.

Pour une valorisation circulaire locale et décentralisée des biodéchets, des études environnementales, économiques, organisationnelles et techniques sont menées. Dans ce cadre, de nouveaux produits pour la gestion décentralisée des biodéchets sont en cours de développement : micro-méthaniseur, composteur rotatif.



Figure 5 : Dégradation de la matière organique : suivi des dégagements gazeux

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Laboratoire : Institut Européen des Membranes (IEM)

Personnes rencontrées : Projet CARBIOSEP (CARtuche de traitement BIOlogique et de SEParation, mobile et régénérable) : Marc Héran (marc.heran@umontpellier.fr), François Zaviska (francois.zaviska@umontpellier.fr), Céline Jacquin (jacquin.ce@gmail.com)

Mots clés : Traitement biologique, Bioréacteur à membrane, Filtration membrane, Re-use

Résumé : L'institut Européen des Membranes (IEM) est une unité mixte de recherche du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier (ENSCM) et de l'Université de Montpellier (UM). Il est l'un des laboratoires les plus reconnus en Europe dans le domaine des procédés membranaires.

CARBIOSEP

Ce projet, financé par le Fond Unique Interministériel (FUI), est mené par l'entreprise Bahreïni BFG International et plus précisément son pôle R&D BFG Environmental Technologies, basé à Strasbourg. Il inclut trois universités dont l'Université de Montpellier et a pour but le développement d'un procédé permettant le traitement et la réutilisation *in-situ* des eaux noires au sein des trains. Le stockage des eaux usées étant le facteur limitant l'autonomie des trains, ce traitement permettrait d'augmenter considérablement leur autonomie (de quelques jours à plusieurs mois).

Une vidéo conceptuelle du produit final et des traitements peut être visionnée [ici](https://vimeo.com/166962526) (<https://vimeo.com/166962526>).

Les volumes d'urines collectées au sein des trains représentant la majeure partie du flux des eaux noires, l'équipe de l'Institut Européen des Membranes de Montpellier a accentué ses recherches sur le traitement de ces dernières. Aussi, afin de pouvoir réutiliser les eaux traitées (chasse d'eau, lavage des mains...), des recherches sont menées pour développement un moyen de production *in-situ* d'oxydant pour la désinfection des eaux.

Plusieurs pilotes sont actuellement exploités :



Figure 6 : Prototype de traitement *in-situ* Carbiosep

Nitrification des urines – BRM



Un pilote permettant la nitrification d'urines est actuellement en test au sein du laboratoire de l'IEM. D'un volume faible, 4 litres, et muni d'un bioréacteur à membranes immergé, il permet la stabilisation d'urines partiellement diluées. Le bioréacteur à membranes est un traitement compact servant de support de biomasse pour les bactéries régissant le processus biologiques et permettant une amélioration de la qualité de l'effluent grâce à la filtration membranaire.

Il aura fallu plusieurs semaines de mise en route pour stabiliser le pilote et permettre un traitement à charge constante. Une base apportée en complément permet d'éviter les fortes fluctuations de pH.

Ces travaux font partis de la thèse de Céline Jacquin, dont la soutenance est prévue en octobre 2017, portant sur la caractérisation de la matière organique afin de mieux appréhender les phénomènes régissant le colmatage des membranes.

Figure 7 : Pilote de nitrification des urines avec bioréacteur à membranes

Traitement des urines par électro-oxydation

Un autre traitement exploré par ce laboratoire est le traitement électrochimique des urines. Ce dernier peut être mené par deux processus distincts :

➤ Electro-oxydation indirecte : le traitement de l'azote ammoniacal se fait grâce à la production d'un oxydant (chlore), obtenu par l'oxydation des ions chlorures contenus dans l'urine. Ce chlore produit pourrait aussi permettre la désinfection de l'effluent avant sa réutilisation.

➤ Electro-oxydation directe : consiste en une électrolyse de l'urée par oxydation directe grâce aux électrodes

Ces procédés paraissent prometteurs pour de tel traitement décentralisé mais les recherches doivent être approfondies pour être complètement efficient. L'influence de certains composés oxygénés et la production de sous-produits chlorés doivent notamment être étudiés.

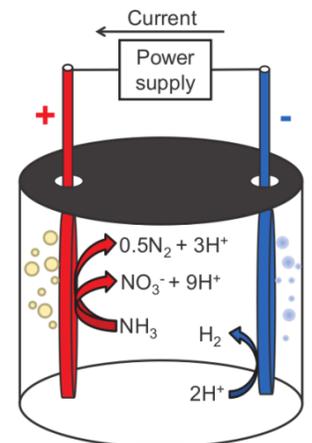


Figure 8 : Traitement basique par électro-oxydation (oxydation de l'azote ammoniacal)
Source : VUNA, EAWAG

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (INRA) / AGROPARITECH

Laboratoire : EcoSys (Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes). Équipe **PRO** : Optimisation de la valorisation des **Produits Résiduaire**s **Organique**s

Personnes rencontrées : Florent Levasseur (florent.levasseur@grignon.inra.fr), Tristan Martin (tristan.martin@grignon.inra.fr)

Mots clés : Déchets organiques urbains, Fertilisation, Agriculture

Résumé : Placée sous les tutelles de l'INRA de d'AgroParistech, l'unité de recherche EcoSys traite d'une manière intégrée le fonctionnement des agroécosystèmes. Les thématiques de recherches visent à l'amélioration des systèmes de production tout en réduisant les impacts de l'agriculture sur l'environnement (écotoxicologie terrestre ; dynamique des pesticides, déchets et émissions de gaz à effet de serre...).

L'équipe PRO du Pôle Science du sol s'attache elle au recyclage agricole des Produits Résiduaire Organique (effluents d'élevage, boues de station d'épuration, compost de boues, compost de déchets, digestat de méthaniseur...). Des essais en plein champ démarrés il y a plus de 20 ans permettent un suivi des effets agronomiques et environnementaux de leur épandage sur le long terme (suivi des macroéléments et éléments traces dans les cultures et les sols, effets sur les rendements...).

Ces travaux, menés en étroite collaboration avec les professionnels du secteur (chambre d'agriculture, agriculteurs...), intègrent aussi les contraintes réglementaires, techniques et économiques propre à chaque filière.

Thèse - Valorisation Agronomique de l'Urine :

Preuve qu'un nombre croissant de chercheur s'intéressent à la séparation et valorisation de l'urine, une thèse sur sa valorisation agronomique va démarrer dès septembre 2017.

Première en France, ces travaux menés par Tristan Martin permettront certainement une prise en considération de cette thématique de recherche au sein de la communauté scientifique et de la société civile. Ils permettront certainement l'émergence d'une filière ainsi que le déverrouillage socio-technique d'une pratique encore mal perçue. Les travaux comprendront notamment :

- Le suivi de micropolluants dans le milieu récepteur (lixiviats, sols)
- Bilan économique de la future filière
- Volet social auprès des agriculteurs
- Bilan carbone complet

Un résumé de la thèse peut-être visionné [ici](#).



Figure 9 :Utilisation de l'urine comme engrais. Sans urine (gauche) et avec urine (droite). Inra, 2017