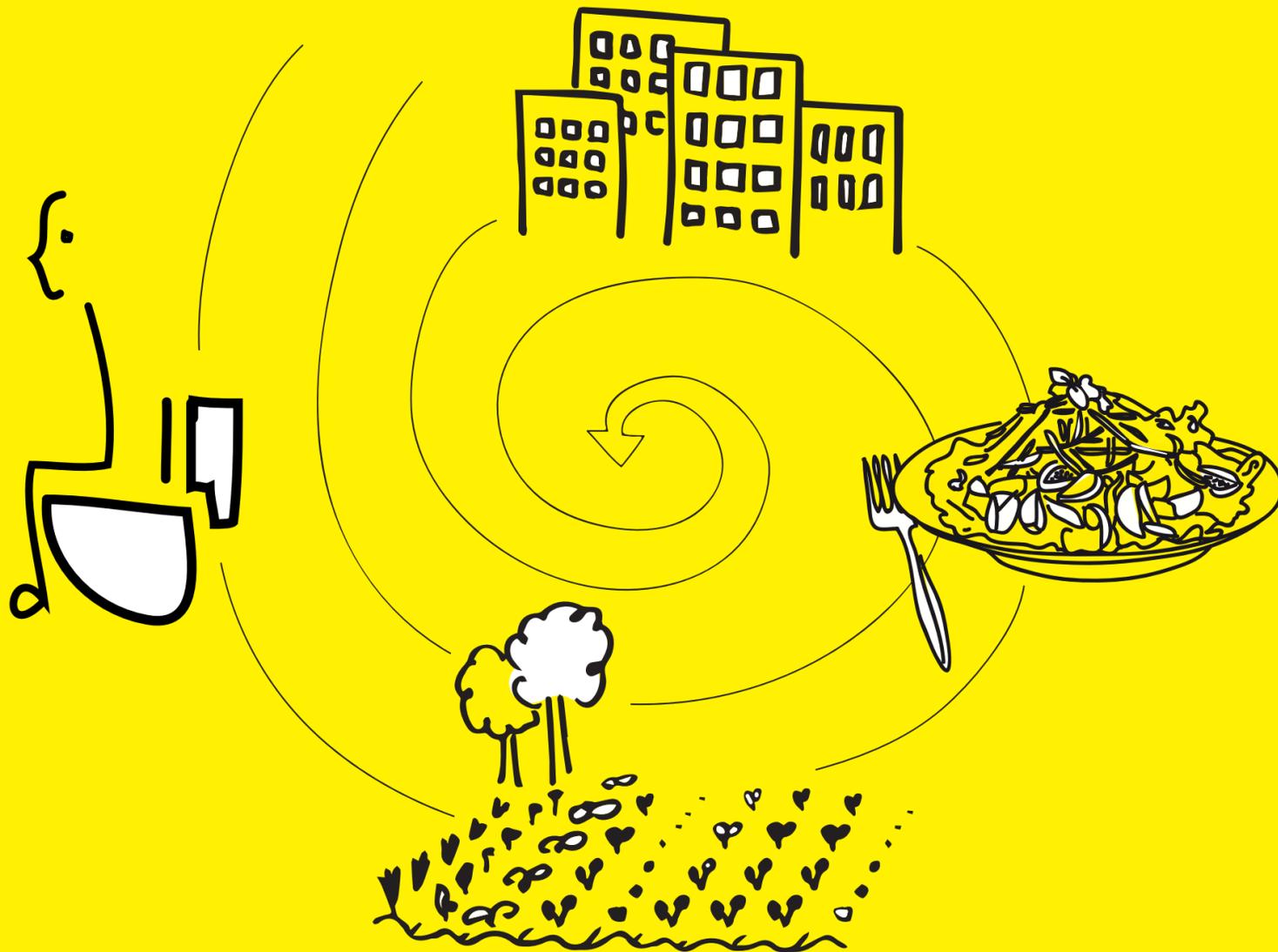


OCAPI

OPTIMISATION DES CYCLES CARBONE, AZOTE, PHOSPHORE EN VILLE



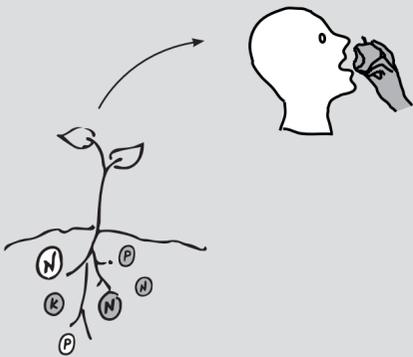
Étudier et accompagner la transition socio-écologique
des systèmes alimentation/excrétion urbains

ALIMENTATION / EXCRÉTION

LES ENJEUX DU RECYCLAGE DES NUTRIMENTS

ALIMENTATION

Les aliments que nous mangeons contiennent des éléments essentiels à la vie tels que le carbone, l'azote, le phosphore, etc.



PRODUCTION ALIMENTAIRE

Pour se développer, les plantes prélèvent dans le sol des nutriments : azote, phosphore et potassium notamment. Chaque récolte exporte ces nutriments du champ : les matières fertilisantes permettent d'en rapporter pour la culture suivante.

UN SYSTÈME MALGRÉ TOUT POLLUANT

L'azote et le phosphore réactifs provenant de nos excréments et relâchés dans l'environnement, qui s'ajoutent aux effluents d'origine agricole, deviennent des polluants.

Ils provoquent l'asphyxie des cours d'eau, des marées vertes sur le littoral (proliférations d'algues), la fermeture de captages d'eau potable (les nitrates sont responsables en France d'une fermeture de puits par semaine !)

A l'échelle du Grand Paris, la baisse attendue du débit de la Seine, jusqu'à 30 % d'ici à 2050, combinée à l'augmentation de la population, va provoquer un effet ciseau : plus d'effluents à traiter et moins d'eau pour les diluer : l'état écologique de la Seine risque de se dégrader.



MÉTABOLISME HUMAIN

Tout ce qui entre dans le corps, un jour, ressort. L'alimentation et l'excrétion fonctionnent donc de pair.

SUR LE TERRITOIRE

Le système alimentation/excrétion d'un territoire regroupe tous les flux de matière qui circulent depuis les champs cultivés jusqu'aux assiettes, transitent par le corps humain puis repartent à l'autre bout, vers l'environnement.

ÉPURATION DES EAUX AUJOURD'HUI

L'ensemble de l'azote présent dans la nourriture ingérée par les Franciliens se retrouve dans les eaux usées (à 90 % via les urines). Cet azote est toxique pour les rivières. Les stations d'épurations enlèvent une partie de l'azote des eaux usées avant rejet mais elles ne permettent pas de recycler l'azote.

UNE LOGIQUE DE DILUTION QUI ATTEINT SES LIMITES

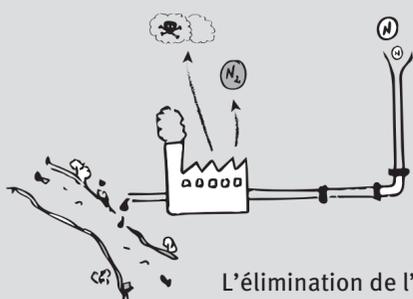
La logique des stations d'épuration est de limiter l'impact environnemental du rejet des eaux usées dans la rivière. Après traitement de 60 à 70% de l'azote des eaux usées, l'agglomération parisienne rejette encore dans la Seine l'équivalent des excréments azotés de 4 millions de personnes. Or la Seine a un petit débit au regard de la taille de l'agglomération parisienne. Les normes de qualité de l'eau dans le secteur aval de Paris sont dépassées.

UN SYSTÈME LINÉAIRE

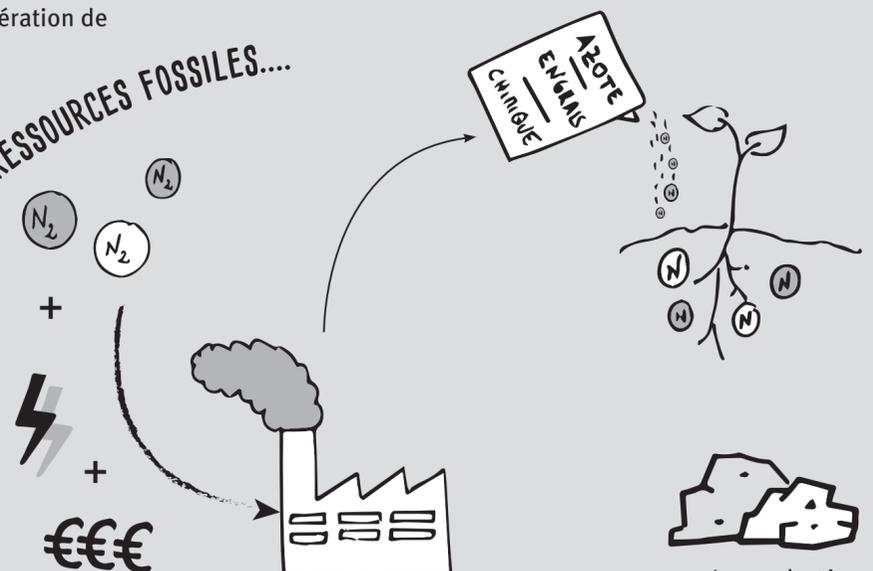
3 % seulement de l'azote et 23 % du phosphore qui entrent en Île-de-France pour nourrir la population urbaine sont retournés aux champs (boues d'épuration épandues ou compostées).

Ce taux est à 0% pour de nombreuses villes qui pratiquent l'incinération de toutes les boues.

ON DÉPENSE DONC BEAUCOUP D'ÉNERGIE ET DE RESSOURCES FOSSILES...
...POUR L'ÉPURATION DE L'EAU...



L'élimination de l'azote des eaux usées est coûteuse en énergie : il faut environ 10 MWh (mégaWatt.heure) pour dénitrifier une tonne d'azote réactif contenue dans les eaux usées.



Dans le même temps, les usines de production d'engrais azoté consomment environ 10 MWh pour synthétiser une tonne d'engrais azotés, c'est-à-dire la même quantité d'énergie !

La production d'engrais phosphoré s'appuie elle sur des ressources minières en voie d'épuisement.

...ET LA PRODUCTION D'ENGRAIS CHIMIQUES !

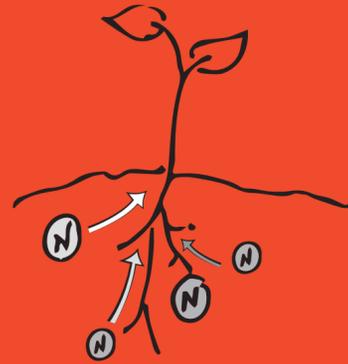
La consommation d'engrais azotés et la quasi-totalité de la consommation de phosphore en Île-de-France pourraient être couvertes par les excréments des habitants de l'agglomération parisienne.

L'URINE HUMAINE, UN ENGRAIS

POURQUOI SE FOCALISER SUR L'URINE ?



Le corps humain excrète deux fois plus de substances par les urines que par les matières fécales. 90% de l'azote excrété se retrouve dans les urines.



L'azote contenu dans l'urine est sous une forme directement assimilable par les plantes.



Contrairement aux matières fécales, l'urine n'est pas considérée comme un vecteur d'agents pathogènes.

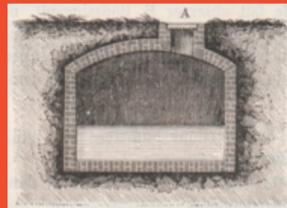
AU COURS DE L'HISTOIRE

L'utilisation des excréments humains comme fertilisant est une pratique très ancienne. Sa mise en oeuvre varie fortement selon les époques et les lieux.

Pratiquée dans l'antiquité romaine comme en Chine ancienne, on la retrouve aussi en France au XIX^{ème} siècle sous différentes formes. La méthode flamande est alors la plus efficace en termes de recyclage.

La « méthode flamande » était notamment répandue autour de Lille et Grenoble. Les fosses d'aisance d'un immeuble sont vidangées dans un tonneau puis transférées dans une citerne sur l'exploitation agricole. Reste à épandre les matières sur les champs au moment opportun. Les agriculteurs rémunèrent les propriétaires pour ces engrais. On prend donc soin de ne pas rejeter ses excréments dans l'environnement.

UN RETOUR DE LA COMPLÉMENTARITÉ VILLE / CAMPAGNE ?



Citerne de stockage à engrais flamand en bout de champ



Épandage de l'engrais flamand par arrosoir portatif



Épandage de l'engrais flamand par tonneau tracté par un cheval

Moyens techniques dédiés à la méthode flamande

ILS LE FONT DÉJÀ

Des projets de séparation à la source des urines et matières fécales existent déjà dans de nombreux pays.



En Suède, pays pionnier, les premières expériences datent des années 90. Elles concernent majoritairement des éco-villages et des lieux de vacances. A Tanum, commune littorale bâtie sur terrain rocheux, ce sont 500 maisons privées, un musée et trois campings qui sont équipés de toilettes à séparation.

En Chine, la séparation à la source a été investie massivement : plus de 2 millions de toilettes sèches à séparation d'urine ont été installées entre 2000 et 2010.

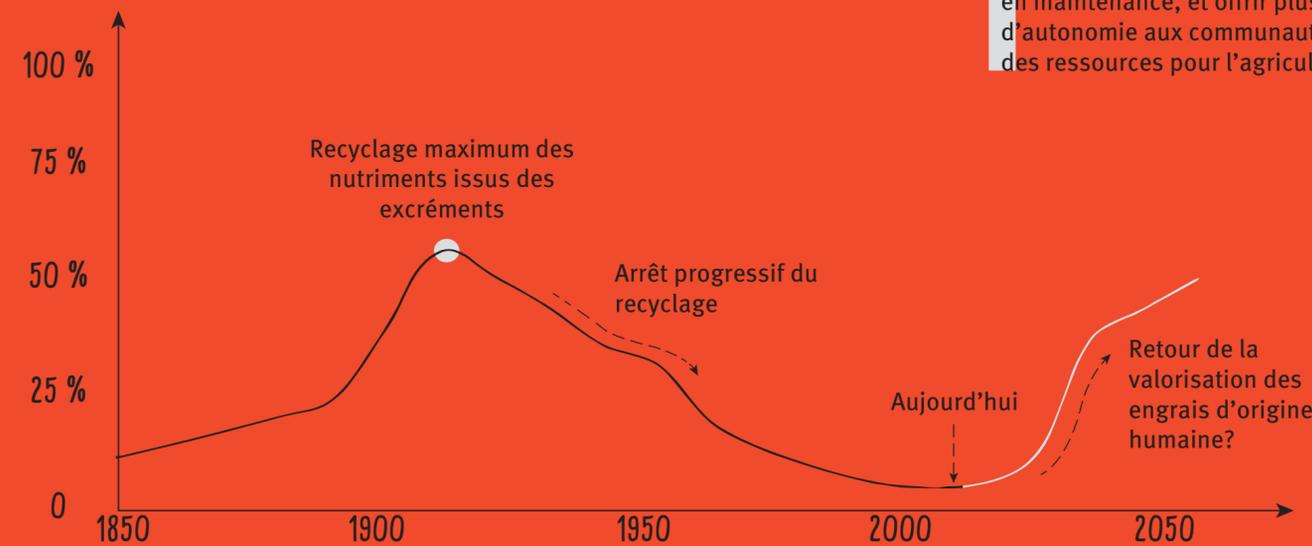


Au Burkina Faso et dans d'autres pays d'Afrique de l'Ouest, de multiples initiatives existent depuis les années 2000, en milieu rural & urbain, mais aussi dans des écoles.

DES ENJEUX SANITAIRES ENCORE BIEN PRÉSENTS

4 milliards de personnes n'ont pas accès à un assainissement de base. Les maladies transmises par l'eau contaminée par les excréments tuent 3,4 millions de personnes chaque année. Les systèmes permettant à la fois d'assainir et recycler présentent ici plusieurs avantages : ils peuvent être moins chers que l'assainissement centralisé, en construction comme en maintenance, et offrir plus d'autonomie aux communautés et des ressources pour l'agriculture.

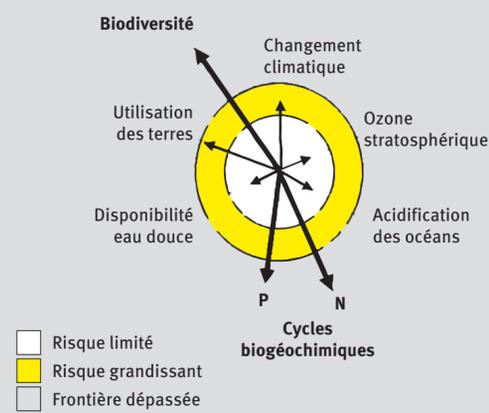
Taux de recyclage agricole de l'azote des urines et matières fécales de l'agglomération parisienne



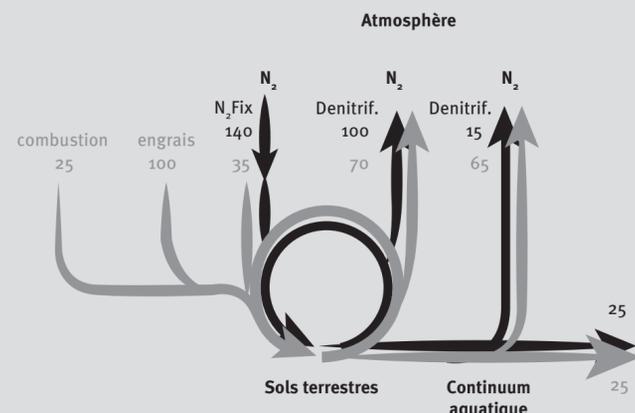
CYCLES ET SYSTÈMES

L'AZOTE, UN ÉLÉMENT MAJEUR DES ÉQUILIBRES PLANÉTAIRES

LES ACTIVITÉS HUMAINES NE PERTURBENT PAS QUE LE CLIMAT



Le dérèglement des flux biogéochimiques (azote, phosphore...) fait partie des grandes frontières du système terre, comme le réchauffement climatique et la destruction de la biodiversité.



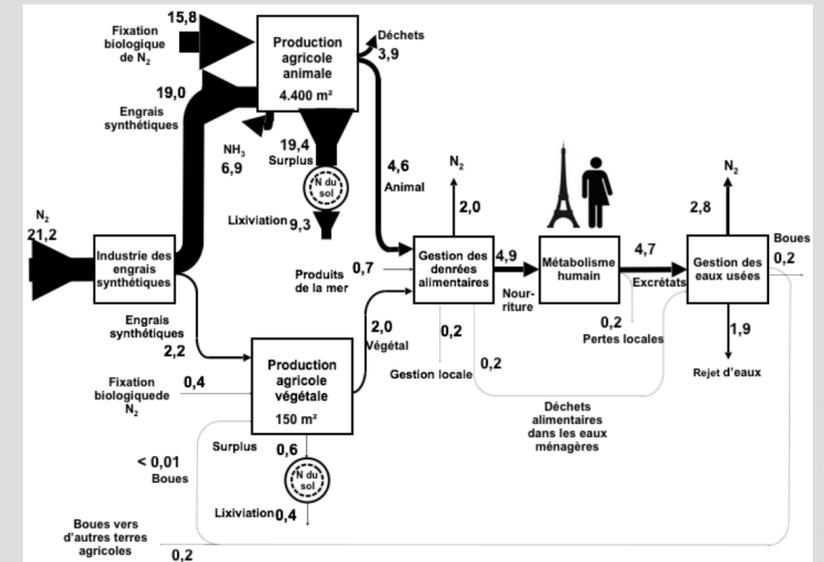
Le cycle de l'azote est le plus perturbé des cycles naturels, dix fois plus que le cycle du carbone.

Il y a aujourd'hui deux fois plus d'azote réactif en circulation dans l'environnement qu'avant le début du développement de l'agriculture industrielle.

L'EMPREINTE AZOTE DES FRANCILIENS, AUJOURD'HUI... ET DEMAIN ?

Aujourd'hui, du point de vue de « l'empreinte azote », le métabolisme urbain de la région parisienne pose trois problèmes. Il est :

- LINÉAIRE** : une très faible proportion de l'azote est recyclée
- NON SOBRE** : fortement consommateur de ressources et d'énergie
- POLLUANT** : il rejette de grandes quantités d'azote réactif dans l'environnement



Empreinte azote d'un habitant de l'agglomération parisienne aujourd'hui (kgN/pers/an)

LES SYSTÈMES ALIMENTATION/EXCRÉTION URBAINS : VERS LA SOUTENABILITÉ ?

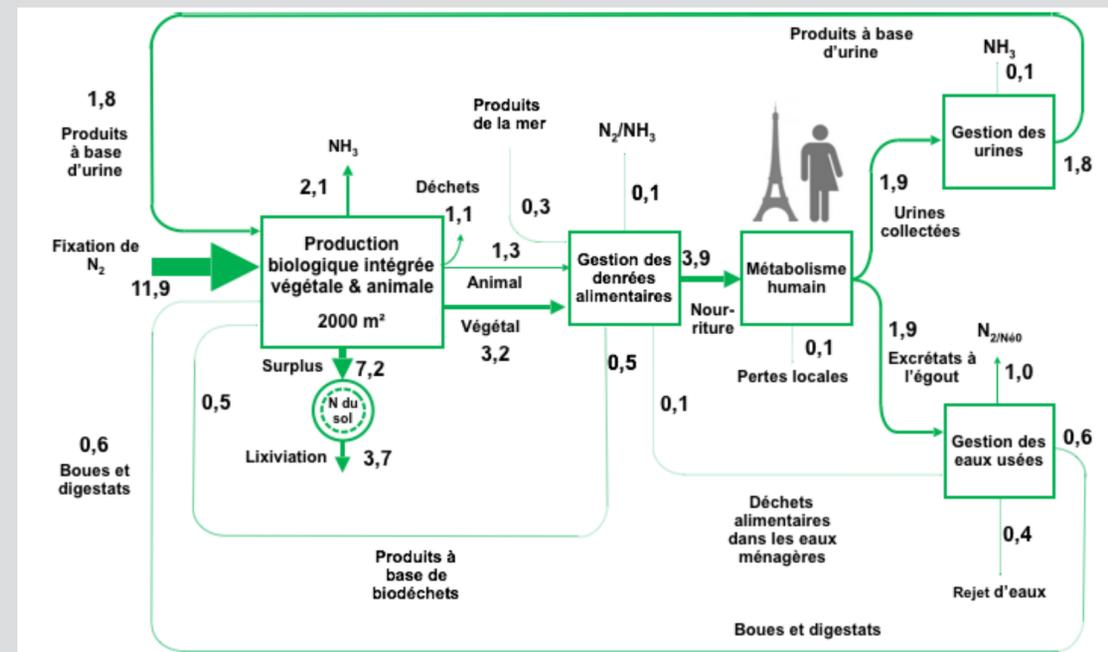
Une étude approfondie des « systèmes alimentation/excrétion » des villes occidentales a été menée dans le cadre de la thèse de Fabien Esculier, fondateur du programme OCAPI (Esculier, 2018).

LA MÉTHODE

Cette étude s'appuie sur une analyse des régimes socio-techniques associés au métabolisme urbain, et s'intéresse spécifiquement aux flux d'azote pour évaluer les limites de leur soutenabilité.

LES RÉSULTATS

Avec comme cas d'étude principal l'agglomération parisienne, ce travail retrace les trajectoires socio-écologiques des villes françaises depuis la révolution industrielle jusqu'au monopole quasi total du triptyque « toilette à chasse d'eau – égout d'eaux résiduelles urbaines – station d'épuration ». Après un inventaire des dispositifs de gestion des urines et matières fécales, théoriques, en développement ou déjà mis en œuvre, la thèse analyse enfin les verrous et leviers de transition vers des régimes circulaires.



Empreinte azote d'un habitant de l'agglomération parisienne envisageable à l'horizon 2050 (kgN/pers/an)

Quatre leviers principaux pour aller vers un système alimentation/excrétion soutenable :

- CHANGEMENT DES PRATIQUES AGRICOLES** : retour de la polyculture élevage, fin des engrais synthétiques
- SOBRIÉTÉ DU RÉGIME ALIMENTAIRE** : moins de protéines animales
- RECYCLAGE DES RESSOURCES** : notamment l'urine humaine
- LIMITATION DU GASPILLAGE ALIMENTAIRE**

RÉINVENTER LES TOILETTES

COLLECTER L'URINE POUR LE RECYCLAGE DES NUTRIMENTS

LA SÉPARATION À LA SOURCE

Pour valoriser l'urine, l'idéal est de la collecter dès sa production, le moins possible diluée dans l'eau et séparée des matières fécales. On appelle cela la séparation à la source.

Les toilettes séparatives fonctionnent sur le même principe que de la collecte des ordures ménagères. On peut les voir comme des lieux de recyclage d'un nouveau genre.

À chaque situation, une solution adaptée doit être développée. Il n'y a pas de réponse universelle.



ON NE FAIT PAS PIFI DE LA MÊME MANIÈRE, QU'ON SOIT CHEZ SOI, AU TRAVAIL OU DANS UN LIEU PUBLIC, ET SELON QU'ON SOIT UN HOMME, OU UNE FEMME...

DES SOLUTIONS EXISTENT DÉJÀ

Avec les urinoirs, la population masculine française pratique déjà largement la séparation à la source de l'urine ! À quand les femmes ?

INTERFACES SÉPARÉES

Les urinoirs secs comme leur nom l'indique ne collectent que l'urine, sans chasse d'eau. Un « siphon sec » bloque les odeurs. Si la plupart des urinoirs sont dédiés aux hommes, il existe aussi des urinoirs mixtes, et... des urinoirs féminins.



TOILETTES À SÉPARATION, AVEC EAU

Des toilettes à séparation avec eau : l'urine part à l'avant et est collectée séparément. Les matières fécales partent à l'arrière et sont traitées séparément.



TOILETTES À SÉPARATION, SANS EAU

Toilettes à séparation sans eau (ou toilettes sèches) : l'urine part à l'avant et est collectée séparément. Les matières fécales partent à l'arrière, en général elles sont compostées mais peuvent aussi être déshydratées, lombricompostées, méthanisées, etc.



LES URINOFERTILISANTS

UNE DIVERSITÉ D'ENGRAIS ISSUS DE L'URINE

Il est possible de produire de multiples formes d'engrais à partir de l'urine. Les traitements mis en place ont plusieurs objectifs : concentrer les nutriments pour diminuer le volume, limiter les odeurs, hygiéniser l'urine collectée, etc. Leur pertinence dépend de contextes de collecte et de valorisation. Par exemple, certains agriculteurs préféreront utiliser un liquide tandis que d'autres se tourneront plutôt vers des formes solides.

On peut distinguer quatre types de processus :

- simple stockage : l'urine stockée se stérilise elle-même, par augmentation spontanée du pH.
- procédés de stabilisation (acidification, alcalinisation, nitrification, etc.) : ils permettent de conserver les nutriments (azote et phosphore), en particulier en cas de concentration.
- procédés de concentration (distillation, évaporation après imprégnation, etc.) : pour réduire le volume à gérer
- procédés extractifs (précipitation de struvite, traitement membranaire, etc.)

SIMPLE STOCKAGE

Le stockage est un procédé de traitement à part entière car il permet de faire baisser le taux d'organismes pathogènes et de micropolluants de l'urine (résidus de médicament, etc).



Urinoir sec dans le bâtiment Coriolis à l'École Nationale des Ponts et Chaussées



Cuve de Stockage de l'urine au sous-sol du bâtiment Coriolis

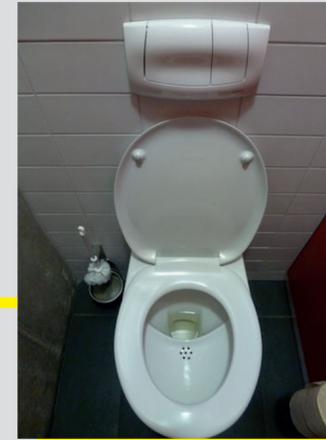
Les excréments des animaux mélangés à de la matière sèche (paille) produisent du fumier. Quand ils sont stockés seuls, sous forme liquide, on parle de lisier. De la même manière Les excréments humains produisent donc du fumain (fumier humain) et du lisain (lisier humain).

STABILISATION

À la sortie du corps humain, l'azote est excrété dans l'urine sous forme d'urée. Cette molécule organique se dégrade tout de suite en ammonium, qui est plus ou moins volatil en fonction du pH. Différents moyens existent pour éviter de perdre l'azote dans l'air. La nitrification stabilise par exemple l'azote en phase liquide sous forme de nitrate.

CONCENTRATION

La concentration de l'urine permet de diminuer les coûts de transport et l'espace nécessaire au stockage. Elle facilite la mise en place de filières de distributions.



Toilettes à séparation dans le bâtiment de l'EAWAG, important centre de recherche sur l'eau situé à Zürich, Suisse.



Procédé VUNA : nitrification + charbon actif + distillation. Installé en sous-sol du bâtiment de l'EAWAG.

EXTRACTION

Les procédés d'extraction visent à extraire de l'urine certains minéraux ciblés, les plus abondants, tels que l'azote et le phosphore. La production de struvite

est aussi utilisée comme traitement des eaux usées en station d'épuration. Elle nécessite l'ajout de magnésium.



Épandage de l'urine collectée, dans des champs expérimentaux



La fertilisation à l'urine peut être pratiquée par tous et simplement, dans son potager. Ce livre fait référence en la matière et explique les bonnes pratiques.



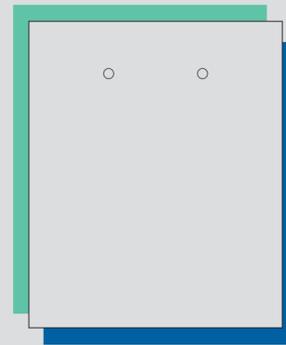
Fertilisation du jardin partagé de l'École Nationale des Ponts et Chaussées



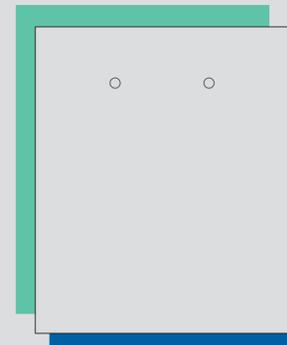
Lisain : Urine stockée depuis le 12/01/2016



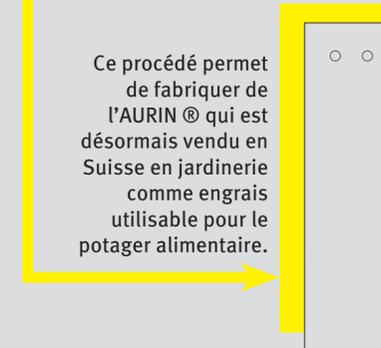
Urine nitrifiée



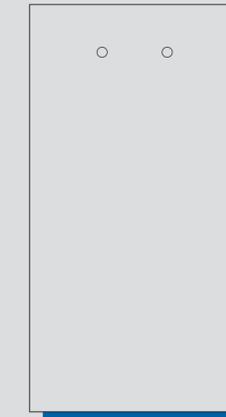
Urine déposée sur des cendres



Urine déposée sur un mélange son de blé + cendres



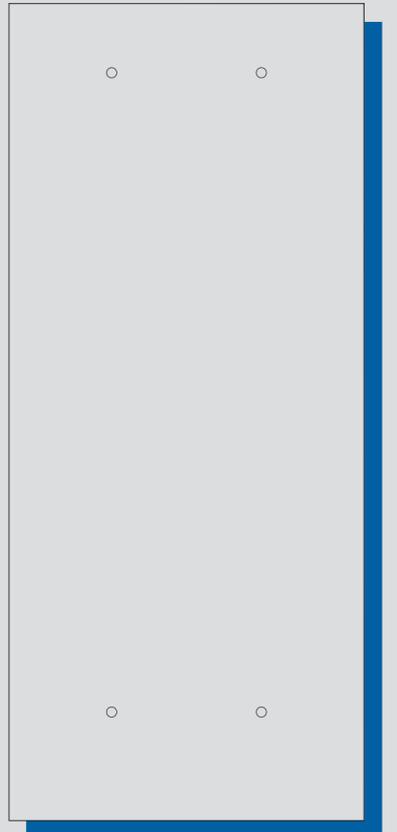
Ce procédé permet de fabriquer de l'AURIN® qui est désormais vendu en Suisse en jardinerie comme engrais utilisable pour le potager alimentaire.



Produit issu de l'urine de la gare de Hambourg. Le procédé utilisé combine oxydation et filtration à une échelle très fine. Ce traitement permet une grande concentration des nutriments mais il n'est pas disponible à la vente.



Struvite produite en station d'épuration par l'entreprise CNP en Allemagne. Le procédé utilisé permet d'obtenir des cristaux de grande taille, qui sont plus simple à filtrer et se dispersent moins dans l'atmosphère avec le vent au moment de l'épandage.



FOS : struvite produite en station d'épuration en Hollande.

CONSTRUIRE DES FILIÈRES

DE NOMBREUX SECTEURS CONCERNÉS

De multiples enjeux à prendre en compte aux différents maillons de la chaîne et des réponses qui diffèrent en fonction des contextes.

RECHERCHE PUBLIQUE

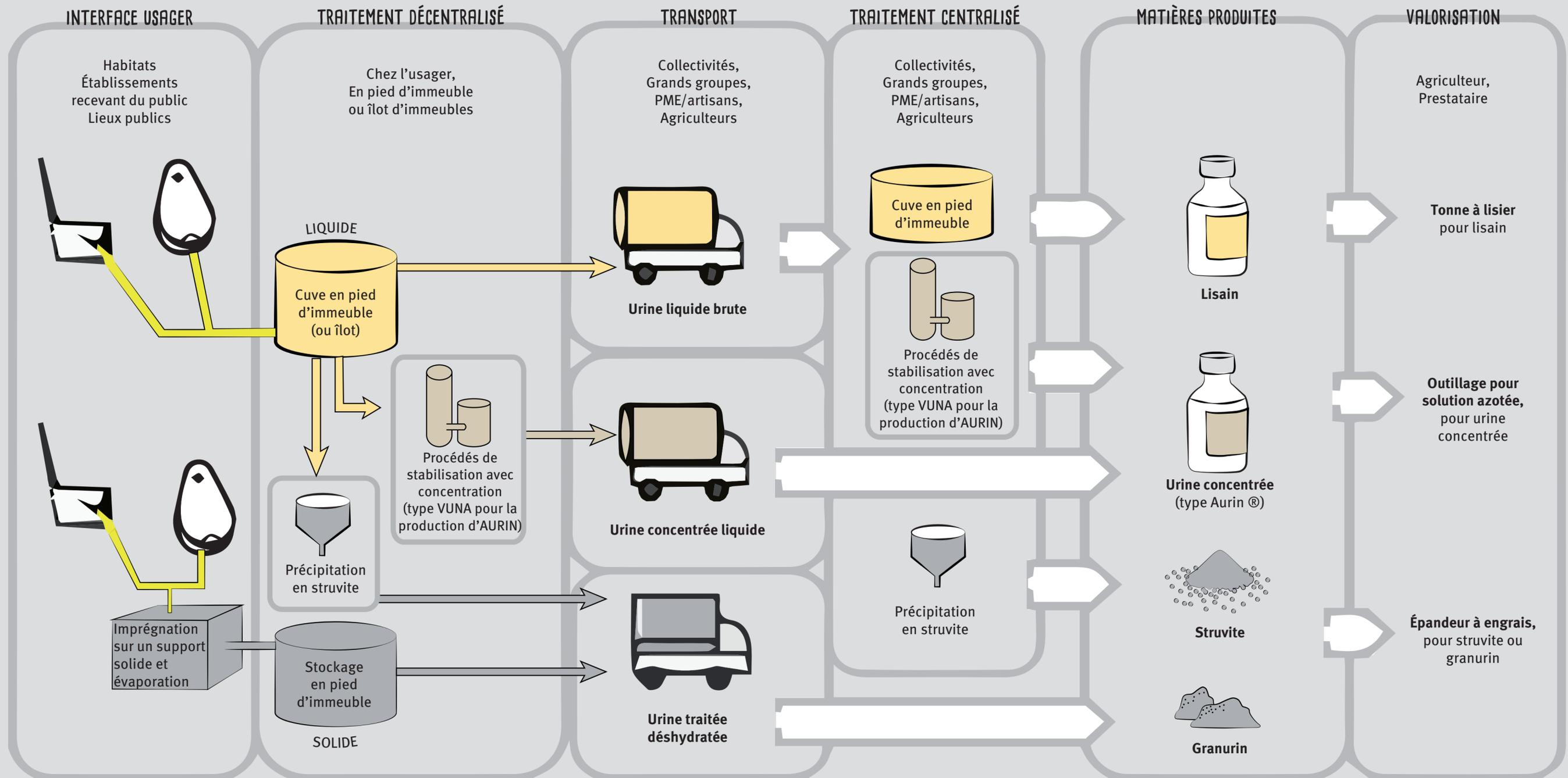
ARCHITECTES, BTP, INGÉNIEURS

ACTEURS DE L'ASSAINISSEMENT

COLLECTIVITÉS LOCALES ET BAILLEURS

HABITANTS ET USAGERS

AGRICULTEURS



EXPÉRIMENTER AU CHAMP

ET IMPLIQUER LE MONDE AGRICOLE

QUELS SONT LES RISQUES
SANITAIRES LIÉS À LA PRÉSENCE
DE MICROPOLLUANTS DANS L'URINE
HUMAINE ?

QUELLE EST L'EFFICACITÉ
AGRONOMIQUE DES
URINOFERTILISANTS ?

LES AGRICULTEURS SONT-ILS PRÊTS
À UTILISER CE TYPE D'ENGRAIS ?

EXPÉRIENCES EN SERRE

L'OBJECTIF

Caractériser l'efficacité d'utilisation de l'azote des urino-fertilisants par rapport aux engrais de synthèse et aux autres fertilisants organiques (lisiers animaux, composts...), et en fonction des types de traitement appliqués.

LA MÉTHODE

L'expérience dure 56 jours

7 traitements sont appliqués à du Ray Grass anglais

un traitement témoin

5 produits organiques : compost, lisier bovin, compost mélangé à de l'urine humaine, urine humaine, urine nitrifiée et concentrée (Aurin),

un engrais chimique: solution d'engrais chimique azoté (nitrate d'ammonium).

La biomasse aérienne a été récoltée à plusieurs reprises au cours de l'expérimentation.

Le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) a été calculé. Il permet de comparer l'efficacité d'utilisation de l'azote par les plantes entre les différents produits (figure 2).

LES RÉSULTATS

L'azote des urino-fertilisants est plus rapidement assimilée par rapport à celui du lisier car ils contiennent plus d'azote minéral (plus facilement assimilé que l'azote organique majoritaire dans le lisier).

L'efficacité est très proche de celle des engrais de synthèse.

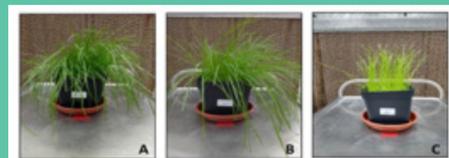


Figure 1 (Martin, 2017) Biomasse aérienne lors de la deuxième coupe pour les traitements urine (A), Aurin (B) et témoin (C).

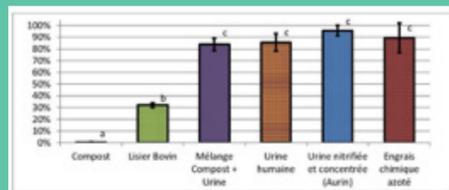


Figure 2 (Martin, 2017) Efficacité comparée de différents produits en tant qu'engrais azotés – Coefficient apparent d'utilisation de l'azote. Les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes d'un point de vue statistique.

EXPÉRIENCES EN PLEINE TERRE

Dans le cadre de la thèse de Tristan Martin, de premiers épandages d'urine ont été effectués sur les parcelles des exploitations partenaires de ces expérimentations (laboratoire ECOSYS, INRA).

C'est la première fois depuis un siècle que de telles expériences sont menées ! L'urine provient d'une collecte effectuée dans le cadre du projet AZURIS.

Ces épandages font partie d'une série d'expérimentations qui permettront de répondre à différentes questions sur l'utilisation des dérivés de l'urine comme engrais.



QU'EN DIT LE MONDE AGRICOLE

Quels sont les freins et leviers à l'emploi de fertilisants à base d'urine humaine en agriculture en Ile-de-France ?

L'OBJECTIF

L'étude sociologique menée par Florent Brun (2018) examine l'acceptabilité de l'emploi de fertilisants à base d'urine humaine, auprès d'agriculteurs et d'institutions du monde agricole.

LA MÉTHODE

Originale, cette enquête par entretiens s'appuie sur la collecte du ressenti vis-à-vis de l'emploi d'urine en agriculture puis la présentation d'échantillons à l'enquêté, invité à définir sa filière idéale de production.

LES RÉSULTATS

L'utilisation d'urinofertilisants ne repose pas que sur des représentations liées à l'urine. Elle s'insère dans des pratiques techniques agricoles et reçoit l'influence des filières de production-commercialisation.

La majorité des agriculteurs restent encore indécis du fait de l'absence de discours institutionnel sur la valorisation des urines et d'un manque de diffusion de la connaissance quant au pouvoir fertilisant de l'urine, des impacts de sa composition, et des implications de son utilisation.



SE PROJETER DANS CETTE TRANSITION

RECONSIDÉRER NOS RAPPORTS AU CORPS, AU TERRITOIRE ET À L'ENVIRONNEMENT

UN BÂTIMENT DÉMONSTRATEUR DE LA SÉPARATION À LA SOURCE : LE PROJET AZURIS

OBJECTIFS

Mise en œuvre technique à échelle réelle d'un système de séparation à la source avec récupération de l'urine

Evaluation des retombées environnementales, économiques et sociales

Mise en discussion du sujet du recyclage des urines auprès des agents et des étudiants de l'École

Implication d'acteurs voisins



ÉTAPE 1, DEPUIS 2016

Expérimentation menée sur 1 urinoir sec du bâtiment Coriolis



Prochaines étapes

ÉTAPE 2

Passer à un bâtiment entier en collecte continue

ÉTAPE 3

Elargir à l'échelle du Campus et des quartiers voisins en s'appuyant sur les nouveaux aménagements et les espaces publics et partagés

2000 L COLLECTÉS DEPUIS 2016

1m³ collecté c'est l'équivalent de 5000 dons d'urine ! Des engrais disponibles pour fertiliser 1000m² de terre agricole pendant un an.

FAITES LE CALCUL !



LE VOYAGE D'UN ATOME D'AZOTE

Imaginez un atome d'azote déposé dans cet urinoir à l'hiver 2017. Il est allé nourrir un plant de blé du plateau de Saclay au printemps 2018. Ce plant de blé a grandi et donné des grains, récoltés pendant l'été. Ces grains ont été moulus à l'automne. On en fera un pain cet hiver et cet atome d'azote sera à nouveau excrété dans l'urine... Ira-t-il polluer la Seine ? Sera-t-il envoyé à l'atmosphère ? Retournera-t-il sur un champ ? Qu'en dites-vous ?



À L'ÉCOUTE DES TRANSFORMATIONS CULTURELLES

Comme les larmes, la salive, la sueur, le sang...l'urine est un fluide corporel. C'est un déchet du corps humain mais elle est aussi considérée de longue date comme une ressource. Elle a eu de nombreux usages dans l'histoire : artisanaux, médicaux, mais aussi magiques. Des symboles complexes s'y rattachent.

La question des déchets corporels est profondément culturelle. Elle concerne donc aussi l'anthropologie. C'est en partant de l'expérience vécue par chacun (et chacune) que le projet « aux toilettes ... et après ? » mené par Marine Legrand, se penche sur la gestion des urines et matières fécales et de leur utilisation comme engrais.

LE PROGRAMME OCAPI



ÉTUDIER ET ACCOMPAGNER LA TRANSITION SOCIO-ÉCOLOGIQUE DES SYSTÈMES ALIMENTATION/EXCRÉTION URBAINS

Le programme de recherche et action OCAPI existe depuis 2014. Il s'intéresse aux cycles biogéochimiques en ville et en particulier à la gestion des excréments urbains de nutriments.

OCAPI participe à ré-ouvrir, un siècle après sa disparition, le débat sur les modalités de gestion des urines et matières fécales en ville et les multiples possibilités de gestion alternatives au tout-à-l'égout, communément appelées séparation à la source.

ÉQUIPE SCIENTIFIQUE

Fabien ESCULIER, Dr.,
Chercheur à l'ENPC,
Biogéochimie, Coordinateur du programme

Marine LEGRAND, Dr.,
Anthropologie, Recherche et animation

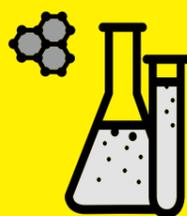
Tristan MARTIN, Doctorant,
Agronomie

Florent BRUN Ingénieur,
Assainissement écologique

Bernard DE GOUVELLO, ingénieur et Dr.,
chercheur au CSTB,
Sociologie

Bruno TASSIN, Dr.,
Directeur de recherche à l'ENPC,
Hydrologie urbaine

UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DE L'ASSAINISSEMENT



Biogéochimie



Agronomie



Ecologie territoriale



Sociologie et anthropologie

BIBLIOGRAPHIE

Productions du programme

Esculier, F. 2018. Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est

Esculier, F., Le Noë, J., Barles, S., Billen, G., Créno, B., Garnier, J., Lesavre, J., Petit L. et Tabuchi, J.-P. 2018 "The biogeochemical imprint of human metabolism in Paris Megacity: a regionalized analysis of a water-agro-food system". Journal of Hydrology. In press.

Brun, F., 2018. Freins et leviers à l'emploi de fertilisants à base d'urine humaine en agriculture en Île-De-France. 87 p.

Martin, T., 2017. Valorisation des urines humaines comme source d'azote pour les plantes : une expérimentation en serre. Rapport de Master 2 Systèmes Aquatiques et Gestion de l'Eau. Institut National de la Recherche Agronomique & École Nationale des Ponts et Chaussées.

Autres sources

Billen G. (dir.), 2011, La cascade de l'azote dans le bassin de la Seine – comprendre les processus pour inverser les tendances. PIREN-SEINE/AESN

De Looze R, 2016, L'urine, de l'or liquide au jardin – Guide pratique pour produire ses fruits et légumes en utilisant les urines et composts locaux. Terran

Girardin, J., 1876. Des fumiers et autres engrais animaux, Septième édition. Garnier frères, Paris.

PIREN-SEINE, 2018. La séparation à la source de l'urine. Fiche 4 pages.

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Folke, C. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 347(6223), 1259855.

PARTENAIRES



CRÉDITS

Conception et réalisation des textes :
Marine Legrand, Louise Raguet, Fabien Esculier, Tristan Martin, Florent Brun

Conception et réalisation graphique :
Louise Raguet

Images : C Ruester, Ecosys, Elisabeth von Münch, ENPC, Louise Raguet, Susana Secretariat, Tristan Martin, Caratello, RAE

Dessins : Louise Raguet, Marine Legrand