Quel potentiel changement d'échelle pour la valorisation de l'urine humaine en agriculture en France ?

VIDÉO DE PRÉSENTATION
tinyurl.com/ywb7t9w6

BENJAMIN **BEAUD**

MOTS-CLÉS : URINE, FERTILISATION, FILIÈRE, ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Face au dépassement de nombreuses limites planétaires qui fragilise l'avenir de nos sociétés et dans la quête d'une plus grande sobriété, nous cherchons des alternatives aux ressources non renouvelables. Le recyclage d'éléments essentiels à notre survie tels que l'azote et le phosphore est toutefois négligé. Nous retrouvons ces nutriments, qui sont nécessaires à la croissance des végétaux, dans notre alimentation et nous les excrétons majoritairement par nos urines. En France, ils sont évacués par nos canalisations, partiellement traités en station d'épuration, et une infime partie est restituée à la terre.

Pourtant, la valorisation des urines humaines en agriculture est une pratique multimillénaire. En Chine, des archives témoignent de l'utilisation d'urines et de matières fécales en agriculture plus de 1 000 ans avant J-C. Jusqu'à la fin du XIX^{e} siècle, une grande partie des excréments des Français était épandue pour fertiliser les champs. Progressivement rejetés dans les rivières, ils sont finalement évacués via le tout-à-l'égout qui se généralise au cours du XX^{e} siècle (Esculier, 2018). Alors que 70 % du phosphore et 50 % de l'azote de l'agglomération parisienne sont recyclés au début du XX^{e} siècle, aujourd'hui ces taux sont respectivement de 41 % et 4 % (Esculier et Barles, 2019). L'urine humaine n'est plus considérée comme une ressource dans l'imaginaire collectif mais comme un déchet (Drangert, 1998). Néanmoins, depuis les années 1990, on assiste en Europe au renouveau d'initiatives pour valoriser nos excréments. Il est donc pertinent d'expliquer cet engouement et d'évaluer son potentiel développement pour les années à venir. Cette étude porte précisément sur la valorisation des urines en France.

LE RECYCLAGE DES URINES, UN ENJEU AGRONOMIQUE ET ÉCOLOGIQUE

L'intérêt agronomique de l'urine et le système alimentation/excrétion

Il existe un lien ténu entre ce que nous mangeons et ce que nous excrétons. Ces deux besoins physiologiques, ainsi que toutes les activités connexes, forment le système alimentation/excrétion (Esculier, 2018). Une grande partie des nutriments que nous ingérons est excrétée dans les urines. Celles-ci concentrent en moyenne 90 % de l'azote (N), 60 % du phosphore (P) et 75 % du potassium (K), ainsi que du soufre, du calcium, du magnésium et des oligo-éléments. Dans nos sociétés occidentales, chaque personne absorbe et excrète en moyenne 4,6 kg d'azote et 550 g de phosphore par an (Martin, 2020).

L'azote, le phosphore et le potassium sont des éléments essentiels à la croissance des plantes. Selon la loi de Liebig sur le minimum (1855)[1], le rendement d'une culture est limité par le premier des éléments fertilisants qui vient à manquer. Alors que notre alimentation dépend essentiellement de l'agriculture, il est nécessaire de restituer les nutriments exportés depuis les sols pour reconstituer leur fertilité et de boucler ainsi

1. https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/Liebig_et_la_loi_du_minimum

le cycle du système alimentaire en y réintégrant l'excrétion. Le système alimentation/excrétion est aujourd'hui linéaire, résultat d'un processus conjoint d'urbanisation, d'industrialisation et de développement de l'hygiénisme qui date de plus d'un siècle (Esculier et Barles, 2019).

En France, la fertilisation des sols repose majoritairement sur le recours aux engrais minéraux d'origine industrielle, qui font aujourd'hui l'objet de nombreuses critiques. Selon l'Observatoire pour la fertilisation minérale et organique, 95 % des engrais minéraux utilisés en France sont importés[2]. La fabrication de l'azote est particulièrement énergivore et émettrice de gaz à effet de serre : elle repose sur l'utilisation de ressources fossiles. Le phosphore – comme le potassium – est issu de l'activité minière, et les réserves devraient s'épuiser d'ici 50 à 100 ans. La fabrication des engrais minéraux représente 1 à 2 % de la consommation énergétique mondiale. Dans l'optique d'une transition agroécologique et énergétique, des ressources alternatives sont déjà valorisées : effluents d'élevage, biodéchets, déchets verts, boues de stations d'épuration, etc. Ces pratiques demeurent à l'heure actuelle insuffisantes pour remplacer totalement les engrais minéraux.

L'utilisation des urines humaines comme fertilisants, à l'instar des effluents d'élevage, apparaît comme une solution supplémentaire pour réduire la dépendance aux fertilisants industriels. Des recherches ont par exemple montré qu'« *une substitution complète des engrais minéraux par des urinofertilisants (UF) semble possible sans perte de rendement ou de qualité de la récolte* » (Martin, 2020). Dans l'agglomération parisienne, les excrétats des 10,5 millions d'habitants pourraient fournir 140 % de l'azote, 75 % du phosphore et 156 % du potassium industriels actuellement utilisés pour fertiliser les 569 000 hectares de terres[3] de l'Île-de-France (Esculier *et al.*, 2018).

L'urine, d'un déchet à une ressource pour la transition écologique

Actuellement, la quasi-totalité de nos urines sont acheminées avec les matières fécales jusqu'aux stations d'épuration, via le système d'assainissement conventionnel. En station d'épuration, l'urine représente seulement 1 % du volume des eaux usées mais concentre 80 % de l'azote et 50 % du phosphore de ces eaux usées (Lienert et Larsen, 2007). Le phosphore est précipité et recyclé à 80 % dans les boues de station d'épuration, dont 60 à 70 % sont épandues dans les champs. La technologie actuelle permet de récupérer jusqu'à 30 % de l'azote des eaux usées au maximum, une autre partie est évaporée, et 25 %[4] à 40 % sont rejetés dans les cours d'eau. De plus, on constate que le phosphore et l'azote qui subsistent après traitements sont à l'origine de phénomènes d'eutrophisation dans les milieux naturels, renforcés par le réchauffement climatique.

Polluant et énergivore, le système d'assainissement conventionnel gaspille aussi une quantité importante d'eau potable. Les nutriments présents dans l'urine en font une ressource précieuse pour l'agriculture, mais constituent une contrainte, un coût et une source de pollution dans le système d'assainissement actuel. Ces constats expliquent l'émergence de l'assainissement écologique, qui propose une gestion différenciée des eaux usées avec une séparation à la source de l'urine pour en valoriser les nutriments.

LA NÉCESSITE DE CONSTRUIRE DES FILIÈRES DE COLLECTE ET DE VALORISATION

Une filière se structure pour la collecte

La séparation à la source de l'urine resurgit dans les années 1990 en Europe. En France, le « Réseau de l'Assainissement Écologique » (RAE) est créé à la fin des années 2000. Il s'agit alors d'un mouvement militant qui regroupe des fabricants et loueurs de toilettes sèches. Petit à petit, des entreprises et des laboratoires de recherche rejoignent l'association. Ce réseau facilite l'entraide et permet la diffusion de solutions innovantes. En se présentant comme un interlocuteur unique auprès des pouvoirs publics, le réseau souhaite aussi jouer un rôle de plaidoyer. L'association déplore par exemple que l'assainissement écologique soit ignoré par les associations environnementales, alors que certaines

2. https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/l-agriculture-ressources/article/les-livraisons-d-engrais-en-france

3. Cultivées essentiellement en grandes cultures.

4. Seuil minimal fixé par la législation en vigueur.

participent aux comités de bassin[5] en lien avec les agences de l'eau.

Il est difficile de quantifier la proportion d'urine « séparée à la source » en France. Le recours aux toilettes à séparation lors de l'organisation d'événements publics s'est néanmoins généralisé ces dernières années, représentant potentiellement jusqu'à 80 % des événements ponctuels festifs en Gironde (Préel, 2023). Le nombre de fabricants et loueurs de toilettes sèches a aussi augmenté et la capacité de collecte dépasse aujourd'hui les opportunités de valorisation. Dans certains cas, les loueurs passent donc des arrangements avec des agriculteurs locaux pour déverser l'urine collectée afin d'« *enrichir un tas de fumier, au fond du champ* », sans prise en compte des enjeux sanitaires et règlementaires (Préel, 2023).

Si la collecte séparée des urines se développe, elle nécessite aussi une filière de récupération et de valorisation en aval. Plusieurs expérimentations ont émergé à Paris, à Dol-de-Bretagne ou encore à Montpellier, où l'entreprise Ecosec constitue à elle seule une filière de collecte et de valorisation (Allebone-Webb, 2023).

D'autres initiatives existent, comme le projet ENVILLE[6] qui planche sur des protocoles simples de collecte individuelle de l'urine, avec une logistique de valorisation locale en circuit court. En venant chercher leur panier de fruits et légumes, les clients de l'AMAP en profitent pour livrer l'urine qu'ils auront collectée.

Ces projets se déploient principalement sur des territoires urbains denses, qui constituent des gisements importants. Selon Laura Leyrit (2023), la question de l'échelle pertinente des projets (logement individuel, bâtiment, quartier, ville) est cruciale pour la construction d'un modèle économique pérenne : elle est donc au cœur des réflexions.

L'installation de toilettes sèches est soumise à un verrouillage par le système d'assainissement conventionnel et du tout-à-l'égout, difficile à changer. Le remplacement des toilettes existantes est coûteux mais les toilettes écologiques pourraient être implantées plus fréquemment dans les nouvelles constructions et dans les zones non raccordées à l'égout. Les généraliser au sein des établissements recevant du public (ERP) permettrait aux acteurs publics de montrer l'exemple. Le comité de bassin Seine-Normandie, depuis la mise en œuvre de son programme « Eau et climat 2019-2024 », soutient la mise en place de la collecte sélective d'urine jusqu'à 80 % du montant total des travaux.

Le traitement des urines collectées

La réflexion autour de la construction de filières n'en est qu'à ses prémices, et elle doit intégrer les enjeux relatifs au traitement et à la valorisation des urines collectées.

De nombreux traitements de l'urine sont possibles. L'azote excrété sous forme d'urée s'hydrolyse rapidement en azote ammoniacal particulièrement volatile. Une grande partie de l'azote peut être perdue lors de ce processus. Certains traitements ont ainsi pour objectif de stabiliser l'azote (par acidification ou alcalinisation). D'autres visent à concentrer les éléments ou à les extraire, l'urine étant composée à 95 **%** d'eau. La concentration de l'urine fait appel à un procédé énergivore mais elle permet de réduire l'espace nécessaire au stockage, les besoins en transport ainsi que le travail lors de l'épandage (Martin, 2020). Enfin, des traitements particuliers sont destinés à réduire la présence de pathogènes et de résidus de produits pharmaceutiques, eux aussi excrétés par les urines. Les UF présentent donc des caractéristiques particulièrement variées (liquide/solide, forme et concentration de l'azote, etc.). Des fiches pratiques élaborées dans le cadre du programme de recherche-action « Organisation des cycles Carbone, Azote, Phosphore dans les territoires » (OCAPI)[7] détaillent la nature des UF et les modalités de leur usage en agriculture.

Peu d'études existent encore sur l'efficacité fertilisante de ces produits. Une analyse de cycle de vie (ACV) de la production de céréales comparant l'utilisation d'urinofertilisants et d'engrais minéraux a été réalisée (Martin, 2020). Elle met en lumière des impacts minorés sur le changement climatique, l'eutrophisation, l'utilisation d'eau et de ressources fossiles dans les scénarios impliquant l'utilisation des UF. L'acidification

5. Instances de concertation qui élaborent la politique de gestion de l'eau.

6. Plus d'informations sur le projet ENVILLE.

7. Utiliser l'urine humaine en agriculture ; fiches pratiques disponibles à l'adresse : https://www.leesu.fr/ocapi/wp-content/uploads/2022/04/Fiches-Agrocapi_écran_v2.pdf

et la formation de particules fines constituent néanmoins des points de vigilance. De plus, la consommation d'énergie de certains traitements de l'urine (extraction, concentration) égale ou dépasse parfois celle nécessaire à la production d'engrais de synthèse.

Un nouvel acteur dans le paysage de la valorisation : Toopi Organics

Outre des projets locaux portés ou animés par des collectivités, des associations et des laboratoires de recherche, peu d'acteurs privés ont misé sur cette filière. Les entreprises européennes valorisant l'urine humaine pour l'agriculture sont rares. L'entreprise suisse VUNA produit depuis 2016 des engrais certifiés bio pour les particuliers. VUNA a choisi de concentrer les urines pour en faire des engrais. Les produits obtenus sont efficaces mais leur fabrication est énergivore et leur prix n'est pas compétitif par rapport à celui des engrais de synthèse. L'entreprise suédoise Sanitation 360 propose des UF solides. Depuis 2019, la première entreprise française de valorisation de l'urine humaine ayant vu le jour se distingue de ses concurrentes à la fois par son procédé de transformation, son positionnement sur le marché et son modèle économique.

L'entreprise Toopi Organics naît de la rencontre entre Mathieu Préel, fondateur d'Un Petit Coin de Paradis, entreprise de toilettes sèches, et Michael Roes, fondateur d'une entreprise de fertilisants à base de plantes pour l'agriculture. De cette rencontre dans la région bordelaise émerge l'idée d'utiliser l'urine humaine comme substrat de fermentation pour le développement de micro-organismes d'intérêt agricole.

Consciente des limites du modèle de VUNA, Toopi Organics ne souhaite pas recourir à la concentration de l'urine. Pour autant, pour remplacer la fertilisation d'un hectare avec des engrais minéraux, il faudrait utiliser 30 à 40 000 litres d'urine brute (Esculier *et al.*, 2022). L'entreprise s'oriente ainsi vers la production de biostimulants : l'objectif est de faciliter l'assimilation par les plantes du phosphore du sol ou de l'azote atmosphérique. L'urine brute est utilisée pour favoriser le développement de bactéries lactiques : un litre d'urine permet de produire un litre de biostimulant. D'autres produits, destinés à jouer un rôle de fongicide ou de pesticide, sont aussi en développement. Depuis 2019, la société a levé près de 6 millions d'euros, dont plus de la moitié grâce à l'ADEME et elle compte aujourd'hui plus de vingt salariés. La société a obtenu fin 2022 une autorisation de mise sur le marché (AMM) délivrée par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) pour la commercialisation de son premier produit, *Lactopi Start™*. L'autorisation de commercialiser le premier UF français est un signe encourageant pour tout le secteur. Cette étape rend plus probable la reconnaissance d'un statut juridique pour l'urine et l'autorisation de son usage en agriculture biologique.

Toopi Organics a sécurisé un approvisionnement de 3 à 4 millions de litres d'urine par an pour les prochaines années. Elle souhaite ouvrir des unités locales de production en circuit court dans chaque métropole française. L'objectif est que ces unités soient cogérées en *joint venture* par des grandes coopératives agricoles et des collectivités.

Utilisant une matière première gratuite, abondante et un procédé *low-tech*, ses biostimulants urinosourcés sont compétitifs sur le marché. Mais cet avantage ne concerne encore qu'un marché de niche, celui des biosolutions (Saludas, 2023). Selon Toopi Organics, 10 à 15 % des agriculteurs recourent aujourd'hui à ces produits. Mais l'entreprise projette une progression à deux chiffres d'ici 2050.

Les produits proposés par Toopi Organics sont innovants, accessibles et leur impact environnemental est faible. L'objectif à terme est de collecter et de valoriser 1 % de l'urine en France.

Et le monde agricole ?

Chaque type d'UF présente des caractéristiques variées : efficacité fertilisante, consommation d'énergie liée au traitement, contraintes de transport et d'épandage, etc. Les forces et faiblesses de chaque produit ne peuvent masquer une autre limite majeure : celle de leur utilisation pratique en agriculture et de leur acceptabilité par les acteurs.

Une étude menée en 2009 auprès des populations suédoise, suisse et allemande montrait une adhésion de l'ordre de 85 % à l'utilisation d'urinofertilisants en agriculture (Lienert et Larsen, 2007). Chez les agriculteurs, seule la moitié considérait le projet comme une bonne idée. Au-delà de l'intérêt agronomique, de nombreux facteurs techniques et psychosociaux apparaissent comme des freins. La conscience du pouvoir fertilisant de l'urine a très largement disparu. De même que le recours aux toilettes sèches rebute certains usagers, les

représentations symboliques et les tabous liés aux excrétats influencent fortement leur utilisation par les agriculteurs (Brun *et al.*, 2020). Pourtant, les agriculteurs sont habitués à manipuler des fumiers ou lisiers animaux. Ainsi, les « *statuts associés aux matières à valoriser – ressource, déchet ou produit – et leurs implications réglementaires, politiques, économiques et sociales deviennent des éléments déterminants de l'adhésion des agriculteurs* » (Barbier et Lupton, 2003).

En 2018, l'équipe OCAPI mène une enquête sur l'acceptabilité des UF auprès des agriculteurs franciliens (Brun *et al.*, 2020). L'étude révèle que les UF solides seraient privilégiés par les personnes interrogées pour leurs propriétés de concentration et d'homogénéité, pour limiter les volumes à épandre et pour casser les représentations associées à l'urine. Par ailleurs, l'enquête montre un intérêt collectif pour une organisation de la production et de la commercialisation des produits encadrée par une règlementation. Les agriculteurs souhaiteraient que les filières soient organisées localement et gérées par le milieu agricole plutôt que par celui de l'assainissement. Enfin, l'enquête montre un intérêt *a priori* des acteurs concernés, à condition que le coût des UF soit compétitif et que des filières pilotes aient prouvé la viabilité du projet. Celles-ci doivent aussi permettre de renouer les liens de confiance et d'interdépendance entre agriculteurs et urbains.

La majorité des acteurs agricoles méconnaissent le sujet et n'ont pas de positionnement clair. De plus, il n'existe pas encore de réglementation sur l'utilisation de l'urine en agriculture en France. Plusieurs institutions soulignent la nécessité d'une reconnaissance réglementaire de l'urine maintenant que son usage est encouragé par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). L'utilisation de l'urine n'est pas encore autorisée en agriculture biologique (AB) malgré un plaidoyer grandissant, à la différence des excréments issus d'élevages non industriels. Le manque de données sur le devenir des résidus de produits pharmaceutiques et des micropolluants reste un frein majeur aux initiatives. Les lisiers des animaux d'élevage en présentent pourtant des concentrations égales ou supérieures à celles des urines humaines.

Les résidus de produits pharmaceutiques représentent ainsi une des principales menaces pesant sur la valorisation des urines humaines, alors que leur impact sur les milieux n'a pas été suffisamment étudié. À faible concentration, leur épandage ne paraît pas problématique : les acteurs interrogés au cours de cette étude considèrent que le rapport bénéfices/risques est largement favorable et que la capacité des sols à traiter ces particules est sous-estimée (Marsden, 2023). En outre, la principale expérimentation de l'impact des UF en France, menée dans le cadre du programme Agrocapi, est rassurante quant aux risques de volatilisation ammoniacale et d'antibiorésistance.

REPENSER LE SYSTÈME

L'emploi de l'urine humaine comme fertilisant n'a pas encore suffisamment convaincu le secteur agricole. Mais la Fédération nationale d'agriculture biologique a impulsé en 2023 un projet pour « *répondre à la tension sur l'approvisionnement en fertilisant d'origine organique par le développement de filières de compostage de matières organiques non agricoles* » (projet MONA[8]), qui mentionne la valorisation des excréments humains. La chambre d'agriculture d'Île-de-France a été conquise par l'expérimentation menée dans le cadre d'Agrocapi et travaille sur le sujet.

Cependant, ce sont aujourd'hui les acteurs de l'assainissement écologique qui portent principalement la cause et « *il manque un maillon entre ce monde et celui de l'agriculture* » (Ledoux, 2023). De manière générale, « *la sectorisation des compétences et des parties prenantes est devenue l'un des obstacles majeurs à la mise en circulation des matières organiques* » (Borraz, 2000). L'urine pourrait être considérée à cet égard comme un objet-frontière : tantôt considérée comme un déchet, une contrainte ou une ressource, l'évolution de sa gestion suppose que des acteurs hétérogènes interagissent et coopèrent : acteurs de l'assainissement, de l'agriculture, collectivités publiques, agences de l'eau, entreprises, particuliers.

Des acteurs publics[9] soutiennent depuis plusieurs années les projets impulsés sur le territoire français. La reconnaissance institutionnelle est cruciale pour le développement de toute la filière, de la séparation à la source à l'utilisation d'UF au champ. Les entités en charge de la gestion

8. https://territoiresbio.fr/wp-content/uploads/2022/08/Projet-MONA-presentation.pdf

9. Agence de la transition écologique, agence de l'eau Seine-Normandie, Ville de Paris, Métropole de Lyon.

de l'eau pourraient être de véritables leviers pour impulser le développement de filières de séparation à la source (Leyrit, 2023). Elles sont en effet soumises à des exigences réglementaires de plus en plus lourdes quant à la qualité de l'eau renvoyée en milieu récepteur. Les évolutions réglementaires à venir[10] ne vont faire qu'accentuer ces exigences. D'autres pistes commencent à se dégager, comme la mise en place d'un fond de garantie pour les agriculteurs recourant aux UF ; un tel dispositif avait été utilisé pour la valorisation des boues de stations d'épuration.

Si le rôle des politiques publiques semble fondamental, la conscience du pouvoir fertilisant de l'urine doit réémerger du milieu agricole. Comme le contexte actuel de guerre en Ukraine et de tension sur les approvisionnements en engrais azotés est favorable, les filières pilotes de valorisation de l'urine pourraient se multiplier pour prouver que cette alternative est viable. Le monde de la recherche scientifique s'est partiellement emparé de la question et constitue un autre élément moteur. Il est en revanche regrettable que la valorisation de l'urine en agriculture soit encore ignorée des scénarios de prospective français. Afterres2050 (Solagro) et *Ten Years for Agroecology in Europe* (TYFA) de l'Iddri envisagent les conditions d'une transition agroécologique à l'horizon 2050 en se passant du recyclage des nutriments présents dans les excrétats humains. Pourtant, à l'échelle mondiale, ces nutriments permettraient de remplacer 16 à 21 % des engrais azotés et 9 à 12 % des engrais phosphatés (Trimmer *et al.*, 2019). Bien évidemment, la substitution d'une partie des engrais minéraux par des urinofertilisants n'est qu'une des clés de la transition des systèmes alimentaires et de la réduction de leur impact environnemental. Cette transition doit aussi passer par une modification des régimes alimentaires et des pratiques agricoles. Des scénarios de prospective à l'échelle de l'Île de France incluent ainsi « *de façon systémique, une co-évolution des pratiques agricoles, des régimes alimentaires et des modalités de gestion de l'urine humaine [et] montrent la possibilité de réduire très sensiblement l'empreinte environnementale des systèmes alimentation/excrétion actuels* » (Martin, 2020). Davantage de scénarios de ce type devraient être élaborés, sur d'autres territoires, pour mettre en évidence les leviers d'action spécifiques localement.

Le recyclage de l'urine humaine et sa valorisation se situent au carrefour de préoccupations agricoles, écologiques, sanitaires et sociales. Réinstaurer une circularité des nutriments contenus dans l'urine nécessite de repenser la gestion des habitats, de l'énergie, de l'eau, des sols, ainsi que les relations et interdépendances entre villes et campagnes. Dans cette perspective, la valorisation de l'urine apparaît comme un maillon de la nécessaire transition (socio)(agro)écologique.

10. Directive sur les eaux résiduaires urbaines (DERU).

BIBLIOGRAPHIE

BARBIER R., LUPTON S. 2003. Jeux et enjeux autour de la réglementation des épandages, une analyse socio-économique. *Dossier de l'environnement de l'Inra*, 25, p. 139-148.

BORRAZ O. 2000. L'utilisation des boues d'épuration en agriculture : les ressorts d'une controverse. *Courrier de l'environnement de l'Inra,* 41, p. 25-32.

BRUN F., JONCOUX S., DE GOUVELLO B., ESCULIER F. 2020. Vers une valorisation des urines humaines : le regard des agriculteurs franciliens. *Études rurales*, 206(2), p. 200-220. Disponible sur : https://www.cairn.info/revue-etudes-rurales-2020-2-page-200.htm (Consulté le 28/02/2023).

DRANGERT J.O. 1998. Urine blindness and the use of nutrients from human excreta in urban agriculture. *GeoJournal,* 45, p. 201-208.

ESCULIER F. 2018. *Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques* (Ingénierie de l'environnement). Université Paris-Est, 535 p. Disponible sur : https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01976550 (Consulté le 28/02/2023).

ESCULIER F., LE NOË J., BARLES S., BILLEN G., CRENO B., GARNIER J., LESAVRE J., PETIT L., 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,* 573, p. 1028-1045. Disponible sur : https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.043 (Consulté le 28/02/2023).

ESCULIER F., BARLES S. 2019. Past and future trajectories of human excreta management systems : Paris in the XIXth to XXIst centuries. Dans : Flipo N., Labadie P., Lestel L. (éds). *The Seine River Basin*. Springer, p. 117-140. Disponible sur : https://doi.org/10.1007/698_2019_407 (Consulté le 28/02/2023).

ESCULIER F., HOUOT S., LEVAVASSEUR F., MARTIN T., DESCHAMPS M., NAZARET S., AUBRY C., BRUN F., AUBIN J. 2022. *Étude de filières de valorisation agricole d'urinofertilisants.* Rapport final. Paris, 55 p. Disponible sur : https://www.leesu.fr/ocapi/wp-content/uploads/2022/09/Rapport_Agrocapi_vf-2022_bis.pdf (Consulté le 28/02/2023).

LIENERT J., LARSEN T.A. 2007. *NoMix: A new approach to urban water management*. Eawag, Dübendorf, Switzerland : Novaquatis, 32 p.

MARTIN T. 2020. *L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable* (Alimentation et Nutrition). Université Paris-Saclay, 253 p. Disponible sur : https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03350482 (Consulté le 28/02/2023).

TRIMMER J.T., MARGENOT A.J., CUSICK R.D., GUEST J.S. 2019. Aligning Product Chemistry and Soil Context for Agronomic Reuse of Human-Derived Resources. *Environmental Science and Technology*, 53(11), p. 6501-6510. Disponible sur : doi.org/10.1021/acs.est.9b00504

Entretiens

ALLEBONE-WEBB S., chercheuse, Ecosec, entretien le 09/01/2023 en visioconférence.

LEDOUX V., membre, Réseau d'assainissement écologique, entretien téléphonique le 16/02/2023.

LEYRIT L., coordinatrice de programmes, Maison de la Matière Organique Oubliée, entretien le 18/01/2023 en visioconférence.

MARSDEN C., chercheuse, UMR Eco&Sols, entretien téléphonique le 30/01/2023.

PRÉEL M., fondateur, Un Petit Coin de Paradis, entretien le 17/01/2023 en visioconférence.

SALUDAS J., directeur R&D, Toopi Organics, entretien téléphonique le 03/02/2023.