

Utiliser l'urine humaine en agriculture

Fiches pratiques

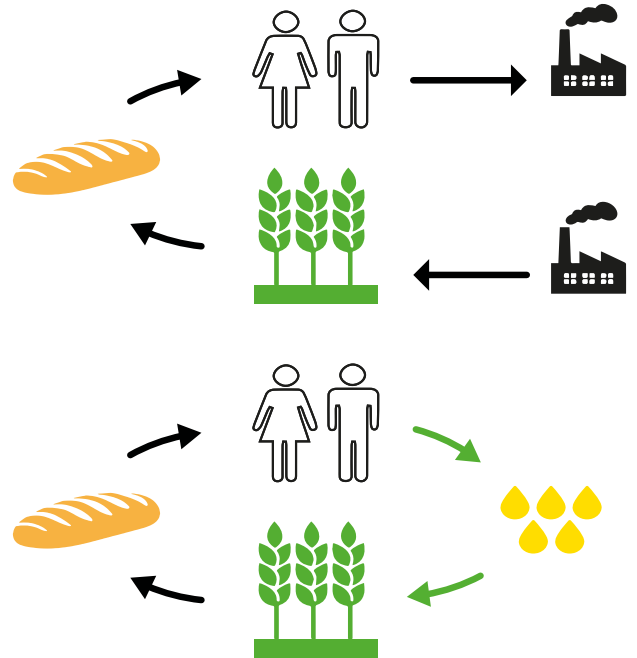


OCAPI

Seuls les urinofertilisants ayant un faible potentiel de volatilisation peuvent être épanchés avec un pulvérisateur.

La fertilisation et la gestion des nutriments

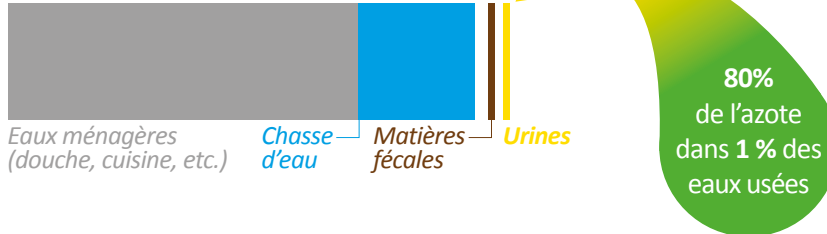
Les plantes ont besoin de nutriments pour leur croissance. Les trois principaux nutriments nécessaires aux plantes sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Les engrais azotés sont majoritairement synthétisés à partir de l'azote présent dans l'atmosphère, ce procédé consomme une grande quantité d'énergie (2% de la consommation énergétique mondiale)^{1,2}. Les engrais phosphatés et potassiques sont majoritairement issus de mines, ce sont donc des ressources non renouvelables. Nous absorbons une partie de ces nutriments via l'alimentation. Ils sont ensuite excrétés aux toilettes où ils sont orientés vers les stations d'épuration. Une proportion importante de l'azote, du phosphore et du potassium est rejetée vers les rivières causant de nombreuses pollutions. Seuls 5% de l'azote des eaux usées sont recyclés en agriculture alors que cet azote représente plus de 150% des besoins agricoles en Ile-de-France³.



Pourquoi et comment recycler l'urine ?

Parmi les différentes composantes des eaux usées, l'urine contient la majorité des nutriments (80% de l'azote)⁴. L'urine peut être collectée sélectivement par séparation à la source en utilisant des toilettes à séparation ou des urinoirs secs. Par la suite, de nombreux traitements peuvent être réalisés pour produire des urino-fertilisants aux caractéristiques variées.

Composition des eaux usées domestiques :



Toilette à séparation



Urinoir sec

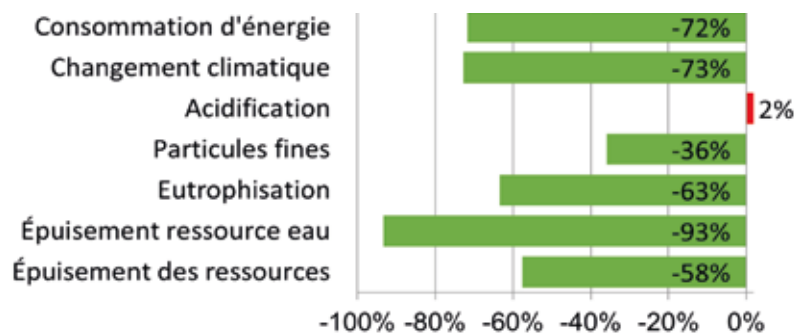
Des fertilisants efficaces et écologiques

L'efficacité fertilisante des urino-fertilisants a été étudiée en serre et au champ. Ces essais ont montré une forte efficacité en tant qu'engrais azoté, proche des engrais minéraux (efficacité relative de 70 à 110%) et plus élevée que les engrais organiques classiques⁵. Ci-dessous le bilan environnemental de la production de blé en utilisant du lisain (voir fiche lisain) en comparaison des pratiques actuelles (utilisation d'engrais minéraux et traitement de l'urine à la station d'épuration)⁶. Les impacts sont plus faibles pour la majorité des indicateurs. À noter que la volatilisation ammoniacale et la consommation d'énergie des traitements sont les deux éléments les plus sensibles du bilan environnemental.



Ray-grass avec urine

Ray-grass sans urine



Impact relatif de la filière lisain en comparaison des pratiques actuelles (base 0%).

Lisain

Urine stockée

Traitement

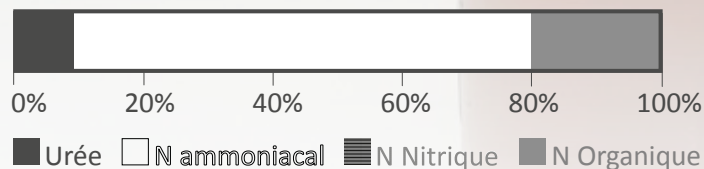
Stockage dans un contenant quasi-hermétique permettant de réduire la contamination en pathogènes. La durée de stockage recommandée varie de 1 à 6 mois¹.

NPK type : 0,6 / 0,05 / 0,1^a

Dose pour apport de 100kg N/ha : 17 t/ha ou 1,7 L/m²

Formes de l'azote²

Majoritairement ammoniacale

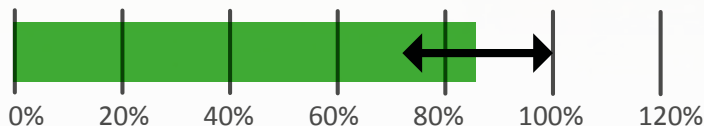


Efficacité fertilisante azotée à court terme²

Forte efficacité fertilisante si la volatilisation ammoniacale est limitée.

Efficacité légèrement inférieure aux engrais synthétiques en raison de la présence d'azote organique.

Coefficient d'équivalence engrais:



Potentiel de volatilisation²

Fort potentiel de volatilisation ammoniacale en raison de l'azote ammoniacal et du pH élevé.

Contaminants

Réduction de la contamination en pathogènes pendant le stockage en raison de la présence d'ammoniac¹. Léger abattement des résidus de pharmaceutiques³.

Efficacité du traitement :

Pathogènes ++
Pharmaceutiques +

Méthode d'apport

Grandes cultures	Maraîchage / Horticulture
<ul style="list-style-type: none">• Tonne à lisier (un pendillard / injecteur limite la volatilisation)• Épandeur sans tonne (limite la compaction de sols)	<ul style="list-style-type: none">• Fertirrigation (limite la volatilisation)• Manuel



Historique et utilisation actuelle

Le lisain ou « urine stockée » a été utilisé comme fertilisant depuis l'Antiquité dans de nombreux pays⁴. Plus récemment, des filières de valorisation ont été développées dans des pays où le tout-à-l'égout est la pratique majoritaire. C'est le cas par exemple en Suède dans des écovillages, ou en France avec des urinoirs secs lors d'événements temporaires.

Complément d'information sur le traitement

Pendant le stockage de l'urine, l'urée est rapidement hydrolysée en azote ammoniacal. L'hydrolyse de l'urée se produit plus rapidement en cas de contamination croisée fécale ou de présence de biofilms à la surface des canalisations. En général, elle se produit dans les quelques jours qui suivent le stockage. Elle fait augmenter le pH de l'urine autour de 9,1⁵. À ce pH, il est possible qu'une partie de l'azote ammoniacal présent en solution se volatilise dans l'atmosphère pendant le stockage (il ne doit pas être ventilé et doit simplement permettre l'équilibre des pressions⁶) ou au moment de l'apport au champ. Des taux de volatilisation entre 14 et 17% de l'azote apporté et jusqu'à 33% en conditions météorologiques favorables à la volatilisation ont été mesurés². L'augmentation du pH favorise également la précipitation du phosphore. Ainsi, environ 30% du phosphore précipite sous forme de struvite [$MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$] et d'hydroxyapatite [$Ca_5(PO_4)_3(OH)$] avec le calcium et le magnésium présents dans l'urine. Ces précipités forment des boues au fond de la cuve ou des dépôts dans les canalisations d'urine⁷. La boue peut être mélangée avec la partie liquide mais elle peut également être gérée séparément, comme un engrais phosphoré. En raison de la présence de divers composés volatils, l'odeur du lisain est forte.

Contaminants

L'ammoniac présent dans le lisain permet de réduire la contamination en pathogènes. L'OMS recommande entre 1 et 6 mois de stockage afin de réduire suffisamment la contamination¹. L'effet du stockage sur les résidus de pharmaceutiques est peu étudié. L'abattement est en général assez faible, mais varie fortement en fonction des molécules. Les effets liés à la présence de ces résidus restent à étudier.

Variabilité²

La concentration en azote est du même ordre de grandeur que celle des digestats ou lisiers animaux. Le lisain peut être plus ou moins dilué en fonction des volumes de chasses d'eau potentielles de la toilette. Ainsi la concentration en nutriment peut typiquement varier de 0,2 à 0,9% MB (Matière Brute) pour l'azote, de 0,02 à 0,08% MB pour le phosphore et de 0,05 à 0,2% MB pour le potassium. Pour l'azote, la concentration est du même ordre de grandeur que dans les digestats ou lisiers.

Impacts environnementaux²

La production de lisain ne nécessite pas de consommation d'énergie ou de réactifs. En revanche, elle nécessite des volumes de stockage de grande capacité et un transport de volume de fertilisant important.

Schéma de la filière



Séparation à la source et stockage au niveau du bâtiment



Transport



Stockage à la ferme

Références Voir la fiche Références en fin de dossier

Orin

Urine nitrifiée concentrée

Traitement¹

Le traitement se déroule en 2 étapes:

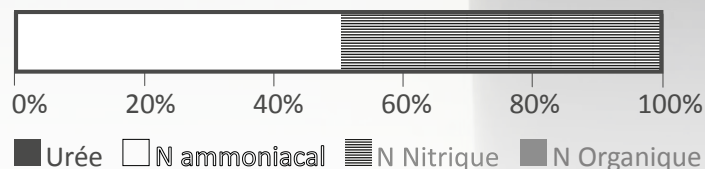
1/ Nitrification biologique 2/ Concentration par extraction d'une partie de l'eau de l'urine.

NPK type² : 5 / 0,3 / 3

Dose pour apport de 100kg N/ha : 2 t/ha ou 0,2 L/m²

Formes de l'azote²

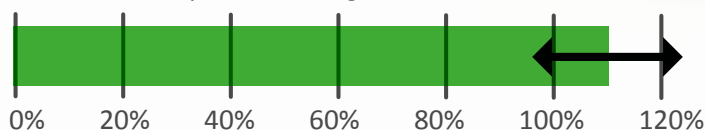
À moitié ammoniacale et à moitié nitrique². L'azote organique est minéralisé lors de la nitrification³.



Efficacité fertilisante azotée à court terme²

Très forte efficacité fertilisante en raison de l'absence d'azote organique et de la faible volatilisation.

Coefficient d'équivalence engrais:



Potentiel de volatilisation²

Très faible potentiel de volatilisation ammoniacale en raison de l'azote nitrique et du pH bas (autour de 4).

Contaminants

La concentration par distillation permet d'hygiéniser l'urine en raison de la température élevée¹. La nitrification peut augmenter la dégradation des résidus de pharmaceutiques⁴.

Efficacité du traitement :

Pathogènes +++
Pharmaceutiques ++

Méthode d'apport

Grandes cultures	Maraîchage / Horticulture
<ul style="list-style-type: none">Pulvérisateur	<ul style="list-style-type: none">Fertirrigation (après dilution)Manuel (après dilution)



Historique et utilisation actuelle

Ce procédé (nitrification partielle suivie d'une distillation) a été développé par l'Institut Fédéral Suisse des Sciences et Technologies de l'Eau (EAWAG) où une installation pilote y a été installée. Il est maintenant commercialisé par l'entreprise « VUNA ». L'urinofertilisant a été homologué par l'office fédéral de l'agriculture suisse et il est vendu sous l'appellation « Aurin ».

Complément d'information sur le traitement

La stabilisation de l'azote par nitrification permet de réduire la volatilisation et l'odeur liées à l'ammoniac. Elle permet aussi d'évaporer une partie de l'eau par distillation sans risque de perdre l'azote et ainsi de réduire le volume du produit final. La nitrification est une réaction qui acidifie l'urine. Environ 50% de l'ammonium contenu dans l'urine peut être transformé en nitrate avant d'approcher un pH limitant le développement des bactéries nitrifiantes (autour de 5,5)¹. Des bases telles que NaOH ou Na₂CO₃ peuvent être ajoutées pour garder le pH dans une gamme favorable et compléter la nitrification⁵. En raison des conditions aérobies lors de la nitrification, des bactéries hétérotrophes se développent et dégradent environ 90% de la matière organique contenue dans l'urine, ce qui participe à diminuer l'odeur du produit final³. La nitrification peut également être réalisée de manière passive (par exemple, filtration de l'urine sur du charbon actif, procédé pitribon⁶.) La concentration peut se faire par distillation : évaporation à haute température (par exemple 80°C) et à basse pression (par exemple 500 mbar)¹.

Contaminants

La distillation à haute température diminue très fortement les risques liés aux pathogènes. Jusqu'à 50% du chlorure de sodium peut être éliminé pendant la distillation (par distillation séquentielle), car c'est le premier sel à précipiter ; cela réduit le risque de salinisation du sol après l'utilisation des urinofertilisants¹. La nitrification peut augmenter la dégradation des résidus de pharmaceutiques et permet également de réduire les interactions entre la matière organique et les traitements des contaminants qui peuvent suivre (par exemple, par adsorption sur un filtre à charbon actif) augmentant ainsi leur efficacité⁴.

Variabilité²

La concentration en nutriment dans l'orin varie généralement de 4 à 6% MB (Matière Brute) pour l'azote, de 0,2 à 0,4% MB pour le phosphore et de 2 à 4% MB pour le potassium.

Impacts environnementaux²

La nitrification et la distillation sont des procédés consommateurs d'énergie.

Schéma du traitement



Nitrification



Distillation



Produit final

Granurin

Urine alcalinisée déshydratée

Traitement¹

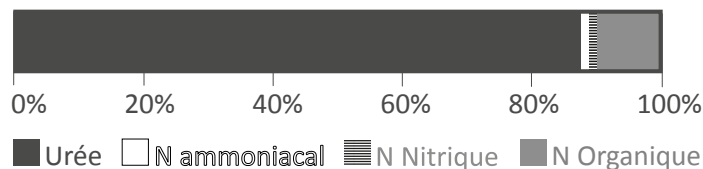
L'urine est séparée au niveau de la toilette puis l'azote est stabilisé sous forme d'urée par contact, typiquement avec de la chaux. Le mélange chaux/urine est ensuite déshydraté à l'aide d'un ventilateur¹. Une fois solide, le mélange peut être transformé sous forme de granulés.

NPK type² : 10 / 1 / 5

Dose pour apport de 100kg N/ha : 1 t/ha ou 0,1 kg/m²

Formes de l'azote²

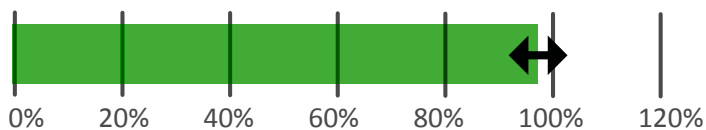
Majoritairement uréique.



Efficacité fertilisante azotée à court terme²

Forte efficacité fertilisante si la volatilisation ammoniacale est limitée.

Coefficient d'équivalence engrais :



Potentiel de volatilisation²

Fort potentiel de volatilisation ammoniacale en raison du pH élevé qui favorise la volatilisation une fois l'urée hydrolysée dans le sol.

Contaminants

L'alcalinisation et la déshydratation permettent de réduire fortement la contamination en pathogènes³. Léger abattement des résidus de pharmaceutiques⁴.

Efficacité du traitement :

Pathogènes +++
Pharmaceutiques +

Méthode d'apport

Grandes cultures	Maraîchage / Horticulture
<ul style="list-style-type: none">Épandeur centrifuge solide (enfouissement pour limiter la volatilisation)	<ul style="list-style-type: none">Épandeur centrifuge (limite la volatilisation)Manuel

} Enfouissement pour limiter la volatilisation



Historique et utilisation actuelle

Ce procédé a été développé par l'Université Suédoise des sciences agricoles (SLU). Des installations pilotes sont actuellement testées et le procédé arrive au stade de la commercialisation avec une entreprise suédoise : Sanitation360.

Complément d'information sur le traitement

Il est possible de stabiliser l'azote et de le conserver sous forme d'urée en alcalinisant l'urine fraîche. En effet, un pH élevé empêche l'enzyme uréase (secrétée par les micro-organismes) d'être active et de dégrader l'urée en azote ammoniacal. La base doit être ajoutée à de l'urine fraîche¹. Ajoutée à de l'urine hydrolysée, l'augmentation du pH favorisera la volatilisation de l'ammoniac. Différents types de base peuvent être utilisés tels que les hydroxydes de calcium, de magnésium ou de potassium ou encore la cendre de bois¹. Un exemple de base facilement disponible est l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 (chaux éteinte). L'ajout de 10 g de Ca(OH)_2 par litre d'urine fraîche permet la stabilisation de l'urée⁵.

Contaminants

L'alcalinisation semble avoir un effet limité sur la dégradation des résidus de pharmaceutiques⁴. Cependant, la chaux permet d'inactiver une grande partie des pathogènes. Cet effet est amplifié par la déshydratation³.

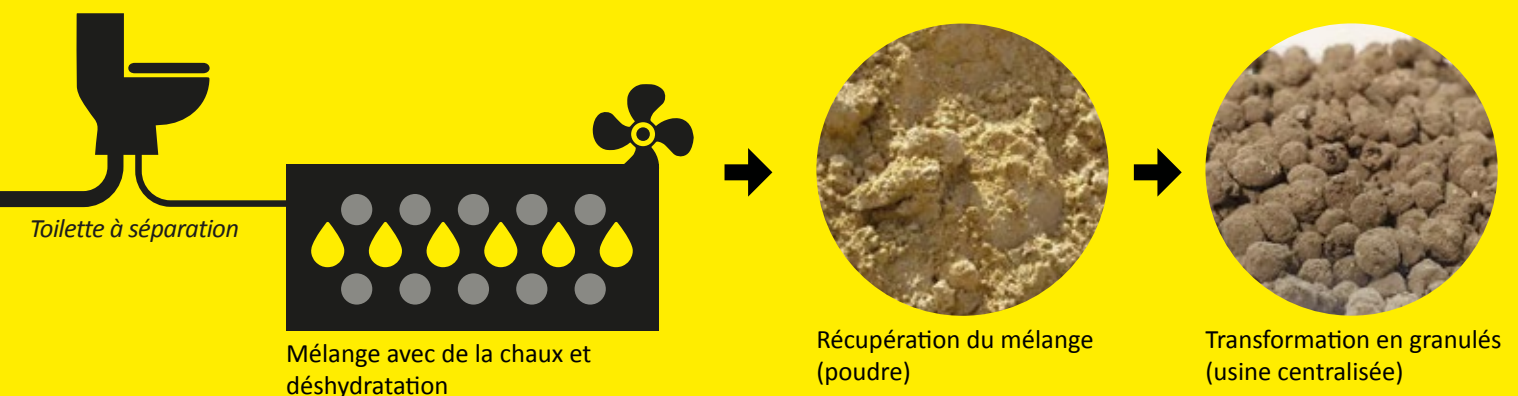
Variabilité²

La concentration en nutriment observée dans l'urine déshydratée peut varier de 5 à 24% MB (Matière Brute) pour l'azote, de 0,4 à 3,7% MB pour le phosphore et de 1,2 à 5,7% MB pour le potassium. Les valeurs hautes correspondent à la teneur de la matière sèche de l'urine sans mélange avec d'autres réactifs.

Impacts environnementaux²

Un tel procédé permet de se passer totalement de réseau pour la gestion de l'urine, mais il nécessite d'utiliser une base et consomme une quantité importante d'énergie.

Schéma du traitement



Urino-fertilisants

Organiques



Traitement

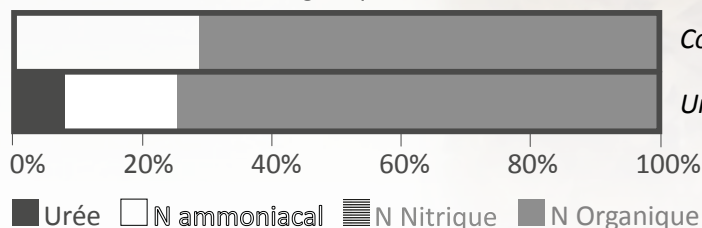
L'urine (fraîche ou hydrolysée) est mélangée avec des matières organiques (compost, sciure, copeaux de bois, biochar, etc.). Le processus peut aller d'un simple mélange à un co-compostage.

NPK type² : 0,7 / 0,2 / 0,4

Dose pour apport de 100kg N/ha : 15 t/ha ou 1,5 kg/m²

Formes de l'azote²

Au moins 50% d'azote organique.



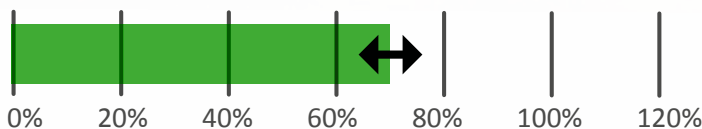
Compost imprégné de lisain

Urine fraîche + copeaux de bois (type urinoirs secs avec copeaux).

Efficacité fertilisante azotée à court terme¹

Efficacité fertilisante plus faible en raison de la plus forte proportion d'azote organique.

Coefficient d'équivalence engrais :



Potentiel de volatilisation¹

Le potentiel de volatilisation est fort si le mélange reste en surface du sol et qu'il contient de l'azote uréique ou ammoniacal. Le potentiel de volatilisation est faible si l'azote est organisé.

Contaminants

Pas d'études spécifiques trouvées.

Efficacité du traitement :

Pathogènes

Pharmaceutiques



Méthode d'apport

Grandes cultures	Maraîchage / Horticulture
<ul style="list-style-type: none">Épandeur à fumier (enfouissement pour limiter la volatilisation)	<ul style="list-style-type: none">Épandeur à fumierManuel <p>} Enfouissement pour limiter la volatilisation</p>



Historique et utilisation actuelle

Les urinofertilisants organiques sont produits dans de nombreux contextes. C'est par exemple le cas des toilettes sèches ou des urinoirs secs mobiles où des copeaux de bois sont utilisés pour limiter les odeurs².

Complément d'information sur le traitement

L'urine peut être mélangée à différents substrats organiques, tels que le compost, les copeaux de bois, la sciure de bois, le biochar ou les boues de station d'épuration. Les processus vont d'une simple imprégnation des substrats organiques (par exemple, l'ajout d'urine à des copeaux de bois dans des toilettes sèches) à une transformation complète (par exemple par compostage)¹. Le mélange avec des substrats organiques peut être un moyen de réduire les odeurs et les émissions d'ammoniac, comme cela est également utilisé pour la gestion des effluents d'élevage avec de la paille ou de la sciure de bois³. La stabilisation de l'azote peut se produire en raison des interactions avec la matière organique.

Contaminants

L'effet du mélange entre l'urine et les matières organiques sur les résidus de pharmaceutiques n'a pas été étudié à notre connaissance. Il reste aussi très peu étudié pour les pathogènes même si la présence d'ammoniac pourrait avoir un effet positif sur leur inactivation.

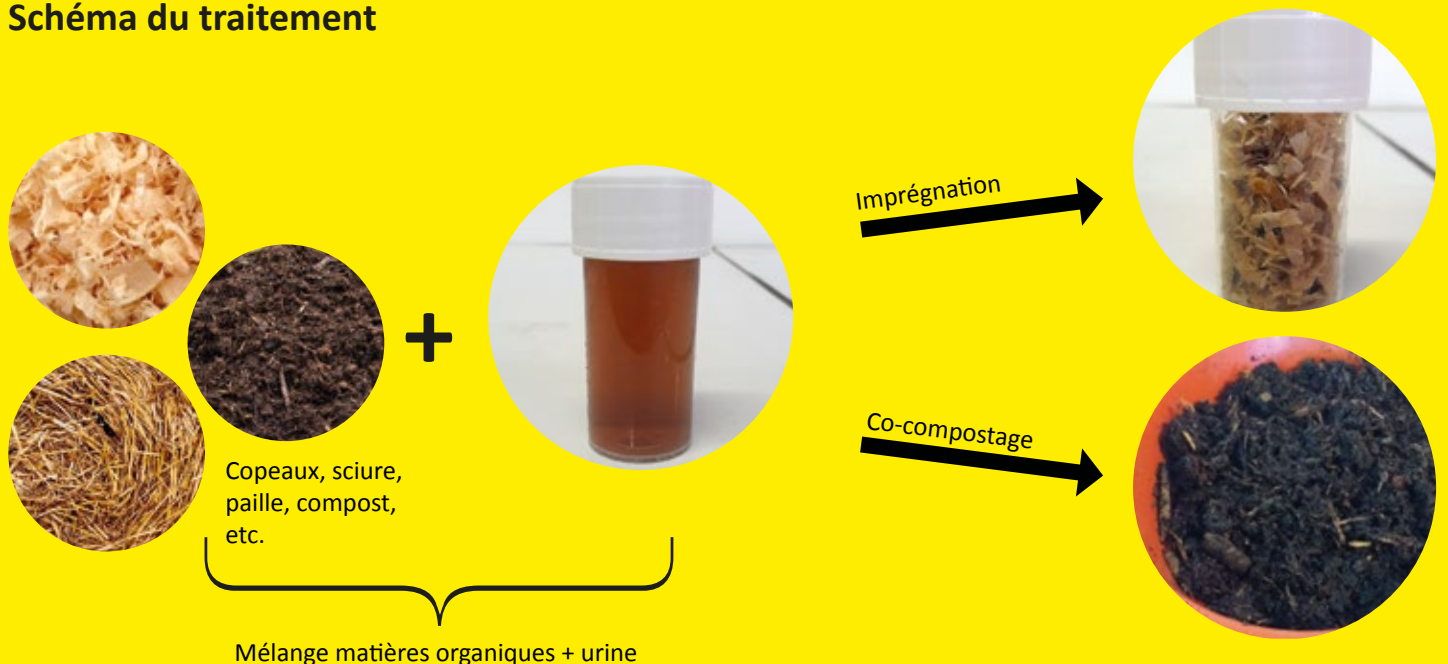
Variabilité¹

La teneur en azote varie considérablement selon le mélange. Les mélanges substrat organique-urine contiennent généralement moins de nutriments sous forme minérale que les autres urinofertilisants. Cependant, ils contiennent plus de matière organique et de nutriments sous forme organique. La concentration des échantillons testés dans nos essais varie de 0,4 à 1,1% MB (Matière Brute) pour l'azote, de 0,07 à 0,3% MB pour le phosphore et 0,01 à 0,7% MB pour le potassium.

Impacts environnementaux¹

La production des urinofertilisants organiques ne nécessite pas de consommation d'énergie. En revanche, elle nécessite des espaces de stockage de grande capacité et le transport de volume important.

Schéma du traitement



Fertilisants

Extraits de l'urine

Struvite



Traitement¹

Les traitements extractifs visent à récupérer un ou plusieurs nutriments présents dans l'urine pour obtenir un fertilisant concentré. L'azote peut, entre autres, être récupéré sous forme de sulfate d'ammonium (par exemple, stripping). Le phosphore peut être récupéré par précipitation (par exemple, struvite). Les nutriments peuvent aussi être récupérés sous forme de solution (par exemple via osmose).

	NPK type	Dose pour apport de 100kg N/ha
Sulfate d'ammonium solide (N)	21 / 0 / 0	4,7 t/ha ou 0,47 kg/m ²
Solution de nutriments (N)	6 / 0,5 / 1	1,7 t/ha ou 0,17 kg/m ²
Struvite*	5,7 / 12 / 0	9 t/ha ou 0,9 kg/m ²

*Dose apport pour apport de 50 kg P/ha

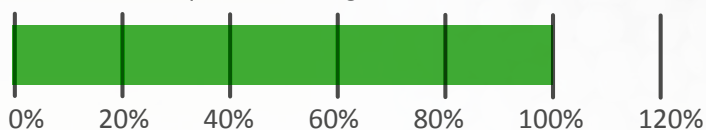
Formes de l'azote²

Généralement l'azote est extrait sous forme ammoniacale ou sous forme uréique si l'urine a été stabilisée avant extraction.

Efficacité fertilisante azotée à court terme²

Efficacité fertilisante estimée équivalente à celle des engrais minéraux classiques.

Coefficient d'équivalence engrais:



Potentiel de volatilisation²

Variable en fonction des formes de l'azote.

Contaminants

Très variable en fonction des composés ou des procédés.

Efficacité du traitement :

Pathogènes

Pharmaceutiques



Méthode d'apport

Grandes cultures	Maraîchage / Horticulture
<ul style="list-style-type: none">Épandeur centrifuge solidePulvérisateur	<ul style="list-style-type: none">Fertirrigation (après dilution)Manuel (après dilution pour les liquides)



Historique et utilisation actuelle

Depuis longtemps, de nombreux procédés extractifs des nutriments de l'urine ont été développés (par exemple, struvite et sulfate d'ammonium au XIXe siècle en France)². Aujourd'hui, la précipitation de struvite est un des procédés les plus développés et est mise en oeuvre dans certaines stations d'épuration. De nombreux autres traitements ont été développés, actuellement au stade d'installations pilotes¹.

Complément d'information sur le traitement²

Stripping de l'ammoniac Après l'hydrolyse de l'urée, l'ammoniac gazeux peut être extrait à basse pression et à haute température et récupéré dans une solution acide. Ensuite, la solution peut être concentrée par évaporation et même déshydratée.

Les systèmes bioélectrochimiques Dans une pile microbienne, des bactéries se développent sur une anode et oxydent la matière organique contenue dans l'urine ce qui crée un courant électrique. Les nutriments sous forme ionique peuvent être séparés par une membrane en raison du courant électrique et peuvent ensuite être récupérés dans un flux concentré.

Électrosorption Un potentiel électrique est appliqué entre 2 électrodes, et les ions présents dans la solution sont capturés sur les électrodes. Les ions peuvent ensuite être libérés dans un flux concentré.

Systèmes membranaires Comme pour le stripping, lors de la distillation membranaire, l'azote peut être extrait à travers une membrane perméable à l'ammoniac.

Processus d'adsorption L'urine passe à travers un milieu à forte capacité d'échange d'ions. Ce milieu peut être une résine échangeuse d'ions, de la zéolite, du charbon actif ou du biochar. Ensuite, ce milieu doit être rincé pour récupérer les nutriments ou, dans certains cas (zéolithe, biochar), il peut être directement épandu au champ.

Procédés de précipitation Certains traitements visent à faire précipiter les nutriments, comme le phosphore avec la struvite. La précipitation de struvite peut être effectuée en ajoutant du magnésium à l'urine hydrolysée. Le phosphore peut aussi précipiter sous forme d'apatite dans l'urine fraîche en ajoutant de l'hydroxyde de calcium (chaux éteinte). Pour l'azote, l'urée de l'urine fraîche peut précipiter sous forme d'isobuthylaldéhyde-di-urée (IBDU) ou de méthylène urée.

Contaminants¹

Généralement les procédés d'extraction permettent de réduire la contamination en pathogènes ou en résidus de pharmaceutiques. Cependant, leur efficacité est très variable en fonction des composés, des organismes pathogènes et des traitements.

Variabilité¹

La teneur en nutriments des produits extraits peut varier en fonction de l'efficacité d'extraction de chacun des procédés. Généralement, le produit final est plus concentré que l'urine brute.

Impacts environnementaux¹

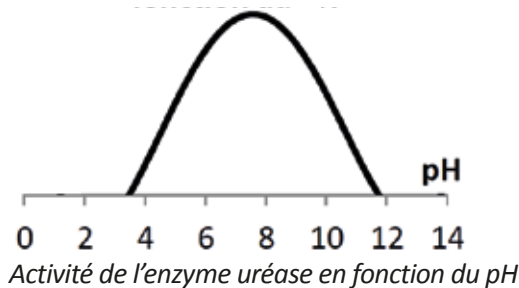
La plupart des traitements visant à extraire les nutriments nécessitent de consommer de l'énergie ou des réactifs (par exemple, du magnésium pour faire précipiter la struvite). En outre, le devenir de l'effluent dont ont été extraits des nutriments reste ouvert.

Stabilisation

Procédés

Stabilisation de l'Azote¹

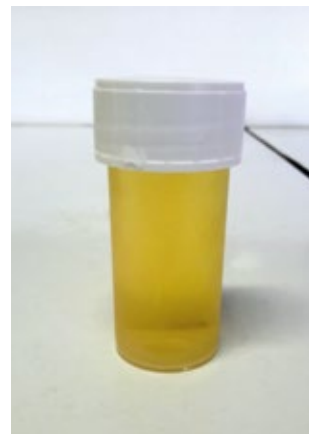
La majeure partie de l'azote est excrétée dans l'urine sous forme d'urée. Cependant, l'urée est rapidement hydrolysée en azote ammoniacal en raison de l'omniprésence de l'enzyme uréase sécrétée par certains micro-organismes. L'azote ammoniacal est très sensible à la volatilisation en raison du pH élevé de l'urine après hydrolyse de l'urée. La stabilisation correspond aux procédés qui maintiennent l'azote sous une forme qui limite les pertes par volatilisation et permet la concentration des urinofertilisants.



Urée ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)

Acidification avant hydrolyse

L'acidification de l'urine fraîche à un pH inférieur à 4 (ajout d'environ 60 mEq H^+ /L) empêche l'hydrolyse de l'urée et maintient l'azote sous forme d'urée². Différents acides forts ou faibles peuvent être utilisés tels que l'acide sulfurique, l'acide acétique ou l'acide citrique¹. Pour un acide fort concentré comme l'acide sulfurique (par exemple à 96%), 60 mEq H^+ /L représentent environ 3 g acide/L. Pour les acides faibles, une plus grande quantité d'acides faibles que d'acides forts doit être ajoutée¹. L'acidification peut être effectuée par fermentation lactique en ajoutant de la matière organique facilement minéralisable et des bactéries lactiques³. L'acidification permet de réduire la contamination en pathogènes et la volatilisation après apport au champ¹. Ce traitement nécessite l'utilisation de réactifs potentiellement impactants.



Urine fraîche acidifiée

Alcalinisation

Il est aussi possible de stabiliser l'azote et de le conserver sous forme d'urée en alcalinisant l'urine fraîche. En effet, un pH élevé empêche aussi l'enzyme uréase d'être active⁴. La base doit être ajoutée à de l'urine fraîche. Si elle est ajoutée à de l'urine hydrolysée, l'augmentation du pH favorisera la volatilisation de l'ammoniac. Différents types de base peuvent être utilisés, tels que les hydroxydes de calcium, de magnésium ou de potassium ou encore la cendre de bois. Un exemple de base facilement disponible est l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (chaux éteinte, 10 g par litre d'urine fraîche)⁵. L'alcalinisation permet de réduire la contamination en organismes pathogènes. Cependant, ce traitement nécessite l'utilisation de réactifs potentiellement impactants. Certaines bases telles que les cendres de bois peuvent contenir des métaux.



Urine fraîche alcalinisée

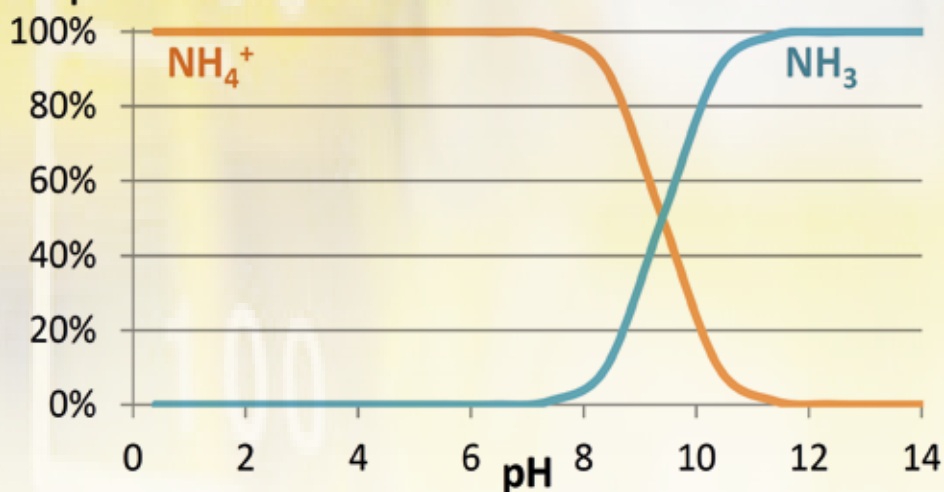
Ammonium (NH₄⁺)

Acidification après hydrolyse

L'urine stockée peut également être acidifiée pour maintenir l'azote ammoniacal sous la forme NH₄⁺ plutôt que sous la forme NH₃ (qui est la forme d'azote pouvant se volatiliser)¹. Cependant, 10 fois plus d'acide est nécessaire pour acidifier l'urine stockée en raison du pouvoir tampon élevé de l'urine stockée causé par l'ammoniac et les carbonates formés après l'hydrolyse de l'urée (600 à 650 meq H⁺/L soit 30 g acide sulfurique à 96% par litre urine)². L'acidification permet de réduire la contamination en pathogènes et la volatilisation après apport au champ¹. Ce traitement nécessite l'utilisation de réactifs potentiellement impactants.



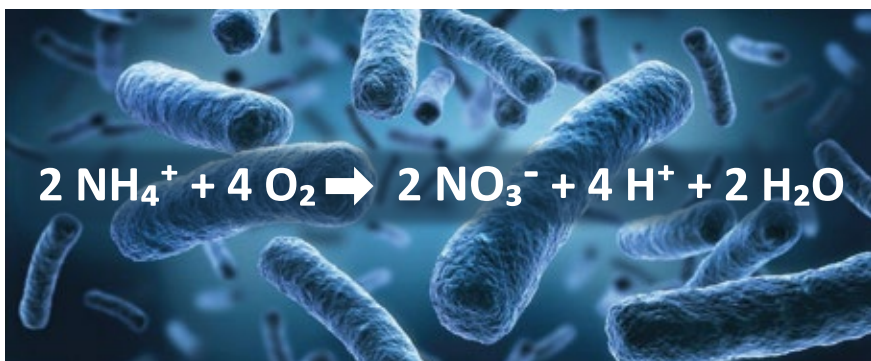
Proportion relative des formes azotées



Nitrate (NO₃⁻)

Nitrification

L'azote dans l'urine stockée peut être stabilisé par nitrification. Environ 50% de l'ammonium contenu dans l'urine peut être transformé en nitrate avant d'approcher un pH limitant le développement des bactéries nitrifiantes (autour de 5,5)⁶. Des bases telles que NaOH ou Na₂CO₃ peuvent être ajoutées pour garder le pH dans une gamme favorable et compléter la nitrification⁷. En raison des conditions aérobies lors de la nitrification, des bactéries hétérotrophes se développent et dégradent environ 90% de la matière organique contenue dans l'urine, ce qui participe à diminuer l'odeur du produit final⁶. Cela réduit également les interactions entre la matière organique et les traitements optionnels qui suivent (par exemple, l'adsorption sur un filtre à charbon actif pour éliminer les résidus pharmaceutiques), augmentant ainsi leur efficacité. La nitrification pourrait augmenter la biodégradation de certains composés pharmaceutiques⁸. La nitrification par aération forcée consomme de l'énergie⁶.



Crédits : Futura Sciences



Colonne de nitrification

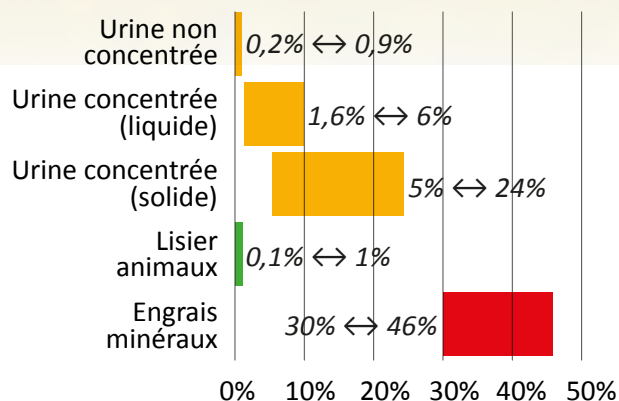
Crédits : VUNA

Concentration

Procédés

Concentration

Environ 95% du poids de l'urine fraîche correspond à de l'eau. Les urinofertilisants non concentrés ont une teneur en nutriments plus faible que les engrais minéraux de synthèse. Afin de réduire les besoins de transport, de stockage et d'épandage, les urinofertilisants peuvent être concentrés. La concentration théorique maximale lorsque l'urine est déshydratée est de 24% d'azote (% MB).



Comparaison des concentrations en azote dans les urinofertilisants avec les matières fertilisantes classiques (en % MB)

Évaporation

L'azote doit être stabilisé avant l'évaporation pour éviter la volatilisation de l'ammoniac. Ensuite, l'eau peut être évaporée en jouant sur la température, la pression et l'hygrométrie. Le produit final peut rester liquide (urine concentrée liquide) ou l'évaporation peut se poursuivre jusqu'à la déshydratation (urine déshydratée)¹. Lorsque l'hydrolyse de l'urée est inhibée, l'évaporation doit avoir lieu en dessous de 40 °C à 60 °C pour éviter la dégradation chimique de l'urée et les pertes d'azote². L'évaporation peut dégrader une partie des résidus de pharmaceutiques¹. La contamination en pathogènes peut être réduite à haute température ou par la réduction de la teneur en eau du produit final³. L'évaporation solaire permet de concentrer l'urine sans consommation spécifique d'énergie⁴.

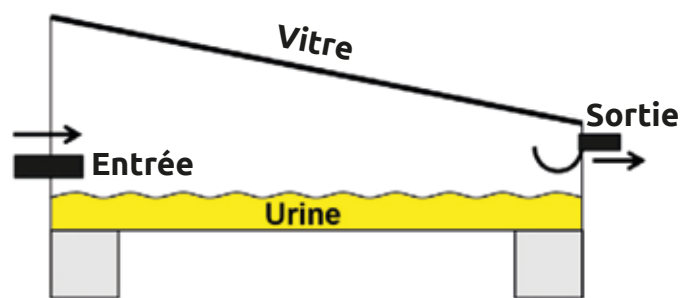


Schéma de principe d'un concentrateur solaire d'urine⁴

Distillation

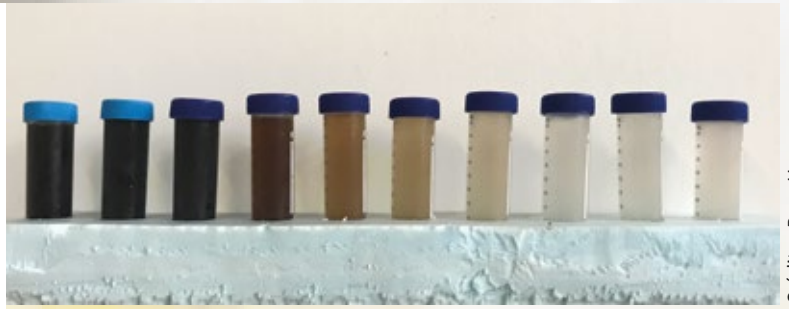
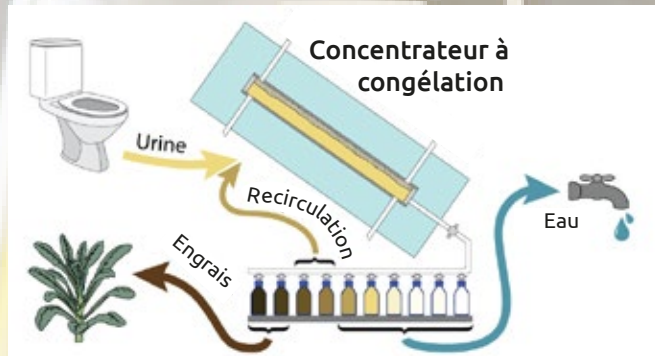
La distillation de l'eau consiste en une évaporation à haute température (par exemple 80 °C) et à basse pression (par exemple 500 mbar). L'azote doit d'abord être stabilisé sous une forme autre qu'ammoniacale (afin d'éviter la volatilisation) ou uréique (pour éviter l'hydrolyse chimique à haute température)¹. Jusqu'à 50% du chlorure de sodium peut être éliminé pendant la distillation (par une distillation séquentielle) car c'est le premier sel à précipiter (réduction du risque de salinisation des sols). Ce traitement consomme une quantité d'énergie potentiellement importante⁵. Les effets sur les résidus de pharmaceutiques et les pathogènes sont similaires à l'évaporation.



Distillateur

Congélation-décongélation

Lorsque l'urine est congelée lentement, les ions et autres composés chimiques sont exclus de la structure cristalline de la glace. Lors de la fonte, ils sont les premiers à se retrouver en solution et peuvent ainsi être séparés. Ce traitement permet de concentrer environ 90 % des nutriments dans 15 % du volume initial de l'urine⁶.

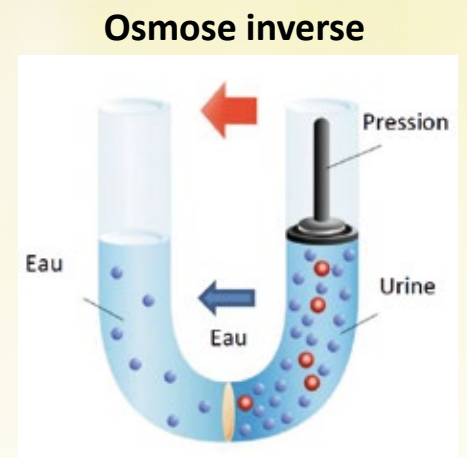
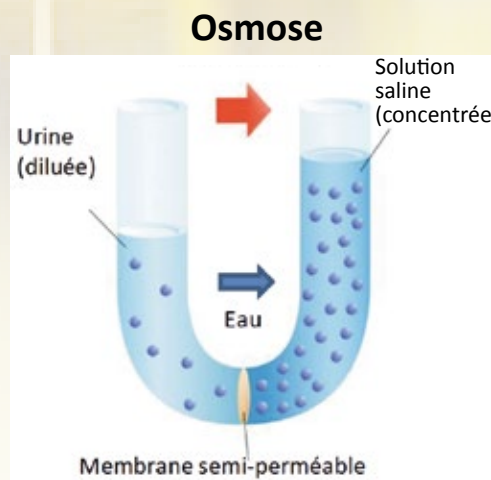


Crédits : Ryan Homeyer

Osmoses

En osmose directe, la pression osmotique plus faible de l'urine par rapport à une solution saline permet de séparer l'eau de l'urine. Ce processus nécessite une faible quantité d'énergie. Cependant, les membranes peuvent être perméables à l'urée ou à l'ammoniac, ce qui implique d'utiliser de l'urine acidifiée hydrolysée pour obtenir un taux de rétention de l'azote plus élevé. Le facteur de concentration volumique peut aller de 2,5 à 15 selon le degré de dilution initial de l'urine⁷.

Pour l'osmose inverse, l'eau de l'urine passe à travers une membrane semi-perméable en raison de l'application d'une pression supérieure à la pression osmotique. Comme pour l'osmose directe, les membranes ont tendance à être perméables à l'ammoniac, donc l'urine hydrolysée peut être acidifiée pour éviter les pertes⁸.

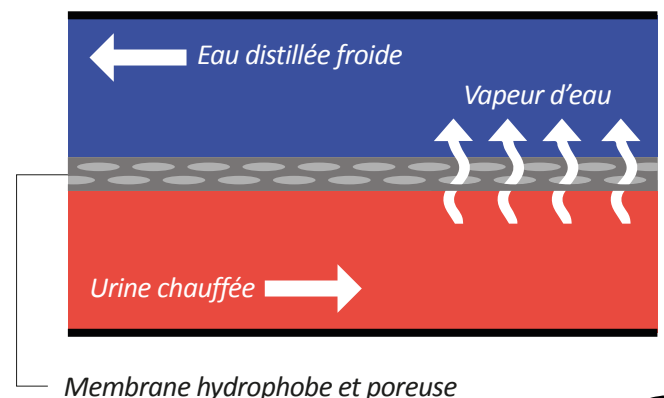


Lyophilisation

Pendant la lyophilisation, l'urine est dans un premier temps congelée. L'eau de l'urine est ensuite sublimée à faible pression. Sur la base de la déshydratation totale, le facteur de concentration de la lyophilisation est le même que celui de l'évaporation, mais le processus nécessite plus d'énergie⁹.

Distillation membranaire

Lors de la distillation membranaire, l'eau est extraite à travers une membrane hydrophobe microporeuse. L'eau est distillée en raison du gradient de pression de vapeur induit par la différence de température de chaque côté de la membrane. La température opérationnelle est inférieure à celle de la distillation classique. La consommation d'énergie devrait donc être plus faible. L'ammoniac pouvant passer à travers la membrane, un prétraitement (par exemple, par acidification) peut être pertinent. Environ 75 à 95% de l'eau peut être extrait¹⁰.



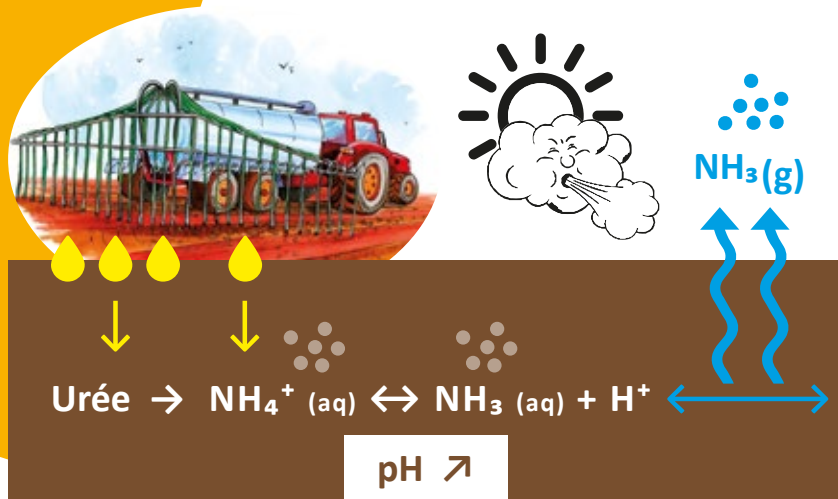
Membrane hydrophobe et poreuse

Vigilances

Émissions gazeuses (NH₃, N₂O)¹

La volatilisation ammoniacale entraîne une pollution de l'air (par exemple, formation de particules fines). Le potentiel de volatilisation dépend fortement des caractéristiques de l'urinofertilisant (en particulier de son pH), des méthodes d'apport et des conditions pédo-climatiques. Pour des urinofertilisants ayant un pH élevé et une forte teneur en azote ammoniacal comme le lisain, la volatilisation peut être importante (jusqu'à 30% de l'azote apporté perdu lors des essais réalisés en conditions favorables à la volatilisation). Elle est cependant faible et proche de 0% pour les produits acides ou pour l'urine nitrifiée. Pour les urinofertilisants ayant un potentiel de volatilisation élevé, il est nécessaire de prendre des précautions au moment de l'épandage (par exemple, apport avant pluie, enfouissement).

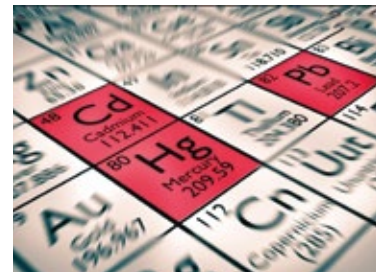
Le protoxyde d'azote est un gaz à effet de serre ayant un fort potentiel de réchauffement. Les émissions de N₂O après apport d'urinofertilisant ont été peu étudiées. Elle peuvent représenter une part importante du bilan carbone des fermes. Il conviendrait de réaliser de nouvelles études pour quantifier plus finement ces émissions.



Crédits illus. pendillard : Renault Bourdon

Éléments-traces métalliques

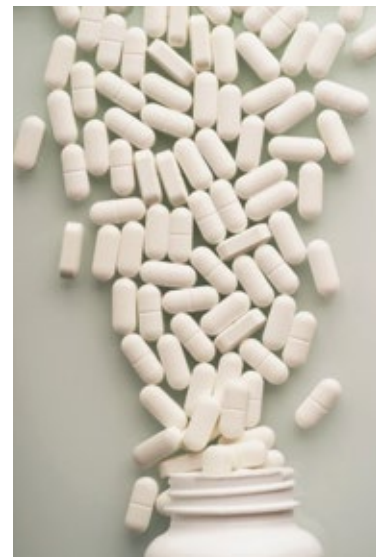
Les teneurs en métaux traces sont généralement faibles dans les urinofertilisants et sont le plus souvent inférieures à celles des engrais minéraux tels que les roches phosphatées ou les lisiers animaux². Les métaux dans les urinofertilisants sont généralement présents en dessous des seuils requis dans les réglementations relatives aux engrais ou à l'utilisation des boues d'épuration en agriculture. Il existe peu de données sur le comportement des métaux traces au cours des traitements. Cependant, certains réactifs utilisés au cours du traitement (par exemple, cendres de bois pour l'alcalinisation) peuvent apporter une contamination¹.



Crédits: confectionerynews.com

Résidus de pharmaceutiques

Concernant les différents contaminants présents dans les urines, les résidus de pharmaceutiques sont parmi les plus préoccupants en raison de leur potentiel écotoxicologique et de leur concentration potentiellement importante. Environ 70% des pharmaceutiques absorbés sont excrétés dans l'urine dont environ la moitié sous une forme métabolisée³. Ils ont été retrouvés présents dans les urinofertilisants testés au cours du projet à des concentrations allant de quelques µg/L à quelques mg/L⁴. La nécessité de traitement avant apport au champ est actuellement un sujet de débat. L'effet du stockage sur ces contaminants est peu étudié. Tous les traitements et post-traitements ont un impact sur les résidus pharmaceutiques, mais cet impact varie fortement en fonction du composé considéré⁵. Cependant, aucun des traitements ne permet une forte élimination des produits pharmaceutiques, à l'exception des traitements spécifiquement dédiés à leur élimination¹. La nitrification peut augmenter la dégradation des résidus pharmaceutiques par rapport au stockage⁶. À notre connaissance, aucun résidu pharmaceutique n'a été détecté dans les cultures après apport de lisain et certains auteurs supposent que les impacts négatifs sur le rendement ou la qualité des cultures sont négligeables¹.



Crédits: myloview.fr

Résidus de pharmaceutiques (suite) : D'autres considèrent que l'utilisation d'urine de personnes sous traitement médicamenteux n'est pas recommandée⁷. Des traitements tels que la filtration sur charbon actif peuvent être réalisés⁶. Le comportement des résidus de pharmaceutiques dans les sols après leur apport et les potentiels impacts écotoxicologiques à long terme sont encore peu connus. Une note spécifique produite au cours du projet AGROCAPI explicite ces enjeux⁸.

Pathogènes

La contamination des urinofertilisants par des organismes pathogènes est beaucoup plus faible que celle des eaux usées. Cependant, l'urine n'est pas stérile et de nombreuses bactéries peuvent y être présentes¹. La majorité d'entre eux provient de la potentielle contamination fécale liée à l'utilisation de toilettes à séparation⁹. La plupart des traitements ont un impact modéré sur les pathogènes¹. Les pathogènes sont en particulier sensibles à la teneur en ammoniac et à la température. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande un stockage de 1 à 6 mois (pour le lisain, voir tableau ci-dessous)¹⁰. Un pH très bas (< 3) augmente l'inactivation des bactéries¹¹. L'alcalinisation à un pH élevé (> 9) permet aussi l'inactivation des bactéries et des bactériophages même si la teneur en ammoniac est faible¹². La struvite séchée est dans la plupart des cas faiblement contaminée par des agents pathogènes, mais le niveau de contamination diffère selon les agents pathogènes¹³. Seuls certains des traitements de réduction de volume à haute température, tels que la distillation ou les traitements spécifiquement dédiés aux pathogènes (par exemple, traitement UV) ont un impact fort sur les pathogènes¹.



Contamination croisée fécale

Recommandation de l'OMS concernant le lisain¹⁰

Température de stockage	Durée de stockage	Pathogènes toujours présents	Cultures recommandées
4 °C	≥ 1 mois	Virus, protozoaires	Aliments et fourrages destinés à être transformés
4 °C	≥ 6 mois	Virus	Aliments destinés à être transformés, fourrage
20 °C	≥ 1 mois	Virus	
20 °C	≥ 6 mois	Probablement aucun	Tous types de cultures

Autres vigilances

Antibiorésistance La présence d'antibiotiques dans l'urine peut entraîner le développement de gènes d'antibiorésistance pour les bactéries. La présence de ces gènes a été mesurée dans les urinofertilisants testés au cours du projet et n'est pas supérieure à celle mesurée dans d'autres fertilisants organiques plus classiques.

Impact sur les vers de terre Le lisain peut avoir un impact négatif important à court terme sur les vers de terre en raison de la présence d'ammoniac¹⁴.

Germination L'application de lisain peut réduire la germination de certaines plantes en cas d'application directe sur les graines. Cet effet pourrait être dû à la forte concentration en sels, en ammoniac et au pH élevé du lisain¹⁴.

Salinisation des sols La concentration en sels et surtout en sodium (liée aux niveaux élevés de sel de table dans de nombreux régimes alimentaires) peut poser des problèmes de salinisation dans les zones semi-arides et arides où les sels ne sont pas lixiviés par la pluie¹⁵.

Acidification du sol L'utilisation d'urine animale ou d'engrais azotés minéraux acidifie le sol après application. Par conséquent, on peut s'attendre à ce que l'application d'urine humaine acidifie également le sol¹⁶.

Références Voir la fiche Références en fin de dossier

Références

³LE NPK type est exprimé en gN, gP2O5 et gK2O pour 100g de matière brute.

Dos de couverture

- ¹ Erisman JW, Sutton MA, Galloway J, Klimont Z, Winiwarter W (2008) How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nat Geosci* 1:636–639.
- ² Sutton MA, Bleeker A, Howard CM, et al (2013) Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution ; [gl obal overview on nutrient management]. Centre for Ecology & Hydrology, Edinburgh
- ³ Esculier F (2018) Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques. Thèse de doctorat, Université Paris-Est
- ⁴ Arceau Ile-de-France (2021). Quel intérêt pour la séparation à la source dans la gestion des eaux usées domestiques en France ?
- ⁵ Martin T (2020) L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay
- ⁶ Martin T.M.P., Aubin J., Gilles E., Auberger J., Esculier F., Levavasseur F., McConville J., Houot S. (2022) Comparative study of environmental impacts related to wheat production with human-urine based fertilizers versus mineral fertilizers. *Journal of Cleaner Production* 382 (2023):135123

Lisain

- ¹ OMS (2012) Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Organisation mondiale de la santé, Genève.
- ² Martin T (2020) L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay.
- ³ Jaatinen, S. T., Palmroth, M. R. T., Rintala, J. A., & Tuhkanen, T. A. (2016). The effect of urine storage on antiviral and antibiotic compounds in the liquid phase of source-separated urine. *Environmental Technology*, 37(17), 2189–2198.
- ⁴ Paulet, M. (1853). L'engrais Humain: Histoire des applications de ce produit à l'agriculture, aux arts industriels, avec description des plus anciens procédés de vidanges et des nouvelles réformes, dans l'intérêt de l'hygiène. Paris, France: Comptoir des imprimeurs-unis.
- ⁵ Udert, K. M., Larsen, T. A., & Gujer, W. (2006). Fate of major compounds in source-separated urine. *Water Science and Technology*, 54(11–12), 413–420.
- ⁶ Brun, F. (2019) Note pour concevoir et exploiter les réseaux de collecte de l'urine humaine. Programme OCAPI.
- ⁷ Höglund, C., Vinnerås, B., Stenström, T. A., & Jönsson, H. (2000). Variation of chemical and microbial parameters in collection and storage tanks for source separated human urine. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 35(8), 1463–1475.

Orin

- ¹ Etter, B., Udert, K. M., & Gounden, T. (2015). Valorisation of Urine Nutrients: Promoting Sanitation & Nutrient Recovery through Urine Separation Final Project Report 2015. Dübendorf, Switzerland: Eawag.
- ² Martin T (2020) L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay.
- ³ Fumasoli, A., Etter, B., Sterkele, B., Morgenroth, E., & Udert, K. M. (2016). Operating a pilot-scale nitrification/distillation plant for complete nutrient recovery from urine. *Water Science and Technology*, 73(1), 215–222.
- ⁴ Özel Duygan BD, Udert KM, Remmele A, McArdell CS (2021) Removal of pharmaceuticals from human urine during storage, aerobic biological treatment, and activated carbon adsorption to produce a safe fertilizer. *Resources, Conservation and Recycling* 166:105341.
- ⁵ Jiang F, Chen Y, Mackey HR, Chen GH, van Loosdrecht MCM (2011) Urine nitrification and sewer discharge to realize in-sewer denitrification to simplify sewage treatment in Hong Kong. *Water Science & Technology* 64:618.
- ⁶ Coopérative équilibre (2021). Des toilettes à compost en milieu urbain ? C'est possible. Notice à l'intention des maîtres d'ouvrages.

Granurin

- ¹ Simha, P., Senecal, J., Nordin, A., Lalander, C., & Vinnerås, B. (2018). Alkaline dehydration of anion-exchanged human urine: Volume reduction, nutrient recovery and process optimisation. *Water Research*, 142, 325–336.
- ² Martin T (2020) L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay.
- ³ Senecal, J., Nordin, A., Simha, P., & Vinnerås, B. (2018). Hygiene aspect of treating human urine by alkaline dehydration. *Water Research*, 144, 474–481
- ⁴ Schürmann, B., Everding, W., Montag, D., & Pinnekamp, J. (2012). Fate of pharmaceuticals and bacteria in stored urine during precipitation and drying of struvite. *Water Science & Technology*, 65(10), 1774.
- ⁵ Randall, D. G., Krähenbühl, M., Köpping, I., Larsen, T. A., & Udert, K. M. (2016). A novel approach for stabilizing fresh urine by calcium hydroxide addition. *Water Research*, 95, 361–369.

Urinofertilisants organiques

- ¹ Martin T (2020) L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay.
- ² Brun, F. (2017). Caractérisation des matières issues des Toilettes Sèches Mobiles et des risques sanitaires des filières d'assainissement associées. Angers, France: ADEME, Toilettes du monde.
- ³ van der Weerden, T. J., Luo, J., & Dexter, M. (2014). Addition of Straw or Sawdust to Mitigate Greenhouse Gas Emissions from Slurry Produced by Housed Cattle: A Field Incubation Study. *Journal of Environment Quality*, 43(4), 1345.

Fertilisants extraits de l'urine

- ¹ Martin T (2020) L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay.
- ² Esculier F (2018) Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques. Thèse de doctorat, Université Paris-Est

Procédés de stabilisation

- ¹ Martin T (2020) L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay.
- ² Hellström, D., Johansson, E., & Grennberg, K. (1999). Storage of human urine: Acidification as a method to inhibit decomposition of urea. *Ecological Engineering*, 12(3–4), 253–269.
- ³ Andreev, N., Ronteltap, M., Boincean, B., Wernli, M., Zubcov, E., Bagrin, N., Borodin, N., & Lens, P. N. L. Lactic Acid Fermentation of Human Urine to Improve Its Fertilizing Value and Reduce Odour Emissions. *Journal of Environmental Management*, 198 (2017): 63–69.
- ⁴ Simha, P., Senecal, J., Nordin, A., Lalander, C., & Vinnerås, B. (2018). Alkaline dehydration of anion-exchanged human urine: Volume reduction, nutrient recovery and process optimisation. *Water Research*, 142, 325–336.
- ⁵ Randall, D. G., Krähenbühl, M., Köpping, I., Larsen, T. A., & Udert, K. M. (2016). A novel approach for stabilizing fresh urine by calcium hydroxide addition. *Water Research*, 95, 361–369.
- ⁶ Fumasoli, A., Etter, B., Sterkele, B., Morgenroth, E., & Udert, K. M. (2016). Operating a pilot-scale nitrification/distillation plant for complete nutrient recovery from urine. *Water Science and Technology*, 73(1), 215–222.
- ⁷ Jiang, F., Chen, Y., Mackey, H. R., Chen, G. H., & van Loosdrecht, M. C. M. (2011). Urine nitrification and sewer discharge to realize in-sewer denitrification to simplify sewage treatment in Hong Kong. *Water Science & Technology*, 64(3), 618.
- ⁸ Özel Duygan BD, Udert KM, Remmele A, McArdell CS (2021) Removal of pharmaceuticals from human urine during storage, aerobic biological treatment, and activated carbon adsorption to produce a safe fertilizer. *Resources, Conservation and Recycling* 166:105341.

Procédés de concentration

- ¹ Martin T (2020) L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay.
- ² Simha, P., Lalander, C., Nordin, A., & Vinnerås, B. (2020). Alkaline dehydration of source-separated fresh human urine: Preliminary insights into using different dehydration temperature and media. *Science of The Total Environment*, 733, 139313.
- ³ Zanchetta, P. G., Heringer, O., Scherer, R., Pacheco, H. P., Gonçalves, R., & Pena, A. (2015). Evaluation of storage and evaporation in the removal efficiency of d-norgestrel and progesterone in human urine. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(10).
- ⁴ Antonini, S., Nguyen, P. T., Arnold, U., Eichert, T., Clemens, J. (2012). Solar thermal evaporation of human urine for nitrogen and phosphorus recovery in Vietnam. *Science of The Total Environment*, 414, pp. 592–599.
- ⁵ Etter, B., Udert, K. M., & Gounden, T. (2015). Valorisation of Urine Nutrients: Promoting Sanitation & Nutrient Recovery through Urine Separation Final Project Report 2015. Dübendorf, Switzerland: Eawag.
- ⁶ Noe-Hays, A., Homeyer, R. J., Davis, A. P., & Love, N. G. (2021). Advancing the design and operating conditions for block freeze concentration of urine-derived fertilizer. *ACS ES&T Engineering*, 2(3), 446-455.
- ⁷ Zhang, J., She, Q., Chang, V. W. C., Tang, C. Y., & Webster, R. D. (2014). Mining Nutrients (N, K, P) from Urban Source-Separated Urine by Forward Osmosis Dewatering. *Environmental Science & Technology*, 48(6), 3386–3394.
- ⁸ Ek, M., Bergström, R., Bjurhem, J.-E., Björleinius, B., & Hellström, D. (2006). Concentration of nutrients from urine and reject water from anaerobically digested sludge. *Water Science and Technology*, 54(11–12), 437–444.
- ⁹ Udert, K. M., & Wächter, M. (2012). Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation. *Water Research*, 46(2), 453–464.
- ¹⁰ Volpin, F., Jiang, J., El Saliby, I., Preire, M., Lim, S., Hasan Johir, M. A., ... Shon, H. K. (2020). Sanitation and dewatering of human urine via membrane bioreactor and membrane distillation and its reuse for fertigation. *Journal of Cleaner Production*, 122390.

Vigilances

- ¹ Martin T (2020) L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay.
- ² Ronteltap, M. (2009). Phosphorus recovery from source-separated urine through the precipitation of struvite (Doctoral dissertation). Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, Switzerland.
- ³ Lienert, J., Güdel, K., & Escher, B. I. (2007). Screening Method for Ecotoxicological Hazard Assessment of 42 Pharmaceuticals Considering Human Metabolism and Excretory Routes. *Environmental Science & Technology*, 41(12), 4471–4478.
- ⁴ Winker, M., Tettenborn, F., Faika, D., Gulyas, H., & Otterpohl, R. (2008). Comparison of analytical and theoretical pharmaceutical concentrations in human urine in Germany. *Water Research*, 42(14), 3633–3640.
- ⁵ Schürmann, B., Everding, W., Montag, D., Pinnekamp, J., 2012. Fate of pharmaceuticals and bacteria in stored urine during precipitation and drying of struvite. *Water Science & Technology* 65, 1774.
- ⁶ Özel Duygan BD, Udert KM, Remmele A, McArdell CS (2021) Removal of pharmaceuticals from human urine during storage, aerobic biological treatment, and activated carbon adsorption to produce a safe fertilizer. *Resources, Conservation and Recycling* 166:105341.
- ⁷ Winker, M. (2009). Pharmaceuticals residues in urine and potential risks related to usage as fertiliser in agriculture (Thèse de doctorat). Technischen Universität Hamburg-Harburg (Hamburg University of Technology), Hamburg, Germany.
- ⁸ Goulas et al., (2020). Principaux enjeux liés à la présence de micropolluants organiques dans les urino- fertilisants (résidus pharmaceutiques, hormonaux et de soins personnels)
- ⁹ Höglund, C., Stenström, T. A., Jönsson, H., & Sundin, A. (1998). Evaluation of faecal contamination and microbial die-off in urine separating sewage systems. *Water Science and Technology*, 38(6), 17–25.
- ¹⁰ OMS (2012) Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Organisation mondiale de la santé, Genève.
- ¹¹ Hellström, D., Johansson, E., & Grennberg, K. (1999). Storage of human urine: Acidification as a method to inhibit decomposition of urea. *Ecological Engineering*, 12(3–4), 253–269.
- ¹² Senecal, J., Nordin, A., Simha, P., Vinnerås, B., 2018. Hygiene aspect of treating human urine by alkaline dehydration. *Water Research* 144, 474–481.
- ¹³ Gell, K., Ruijter, F. J. de, Kuntke, P., Graaff, M. de, & Smit, A. L. (2011). Safety and Effectiveness of Struvite from Black Water and Urine as a Phosphorus Fertilizer. *Journal of Agricultural Science*, 3(3).
- ¹⁴ Muskolus, A. (2007). Anthropogenic plant nutrients as fertiliser (Thèse de doctorat). Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Germany
- ¹⁵ Jönsson, H., Richert Stinzing, A., Vinnerås, B., & Salomon, E. (2004). Guidelines on the Use of Urine and Faeces in Crop Production (Report 2004-2). Stockholm, Sweden: Stockholm Environment Institute (EcoSanRes Programme)
- ¹⁶ Black, A. S. (1992). Soil acidification in urine affected and urea affected soil. *Australian Journal of Soil Research*, 30(6), 989–999.





OCAPI

Crédits : chambre d'agriculture de région IDF

Ce travail a été soutenu par l'**ADEME**; **SEDE Environnement**; le **SIAAP** (Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne) et le **projet « IDI 2017 »** financé par l'**IDEX Paris-Saclay**, ANR-11-IDEX-0003-02. Il a été réalisé en collaboration avec la **chambre d'agriculture de région Ile-de-France**.

Contact : *Projet AGROCAPI, Programme OCAPI, LEESU, École des Ponts ParisTech*
6,8 avenue Blaise Pascal 77455 CHAMPS-SUR-MARNE
<https://www.leesu.fr/ocapi/les-projets/agrocapi/>
ocapi@enpc.fr

