

# Note de Synthèse

## Les éléments indésirables des urinofertilisants en agriculture



Parcelle de maïs du projet Kolos à Quincieux (69) ayant été fertilisée au lisain - juillet 2024



Avril 2025

---

## Avant-propos

---

Cette note s'inscrit dans la continuité du stage de fin d'études de Romain Guelorget pour le titre d'ingénieur agronome ISARA 2024. Le stage de Romain Guelorget visait à caractériser les impacts liés à l'épandage de lisain (urine humaine traitée par stockage), à travers un cas concret sur maïs-grain en plein champ : le démonstrateur Kolos<sup>1</sup>. Cet essai grandeur nature de fertilisation est un terrain d'analyse pour Florent Brun dans le cadre de son doctorat intitulé « *Vers un changement d'échelle de la séparation à la source ? Analyse des conditions d'utilisation du lisain en agriculture et de diffusion de la pratique.* »

Cette note s'appuie sur le travail déjà mené par Anaïs Goulas et ses collègues (2020) dans le projet Agrocapi ainsi que sur un ensemble de discussions transdisciplinaires portées avec le programme OCAPI et ses partenaires (chercheurs, stagiaires, agriculteurs, collectivités, acteurs de la filière, GTT « séparation à la source » d'Arceau-IdF...)<sup>2</sup>. Les auteurs remercient l'ensemble des personnes mobilisées pour leurs apports.

### Coordination

Florent Brun, doctorant en Sciences ingénierie et environnement, programme OCAPI, LEESU, Ecole nationale des ponts et chaussées, Institut Polytechnique de Paris, Univ Paris-Est-Créteil, Marne-la-Vallée, France

### Rédaction

Florent Brun, Marine Legrand et Fabien Esculier

### Contributions à la rédaction

Romain Guelorget, Maurane Valdelfener, Marjolaine Deschamps, Sylvie Nazaret, Julien Le Roux et Bilel Afrit.

### Pour citer cette synthèse

Florent Brun (coord.) 2025. Note de synthèse : les éléments indésirables des urinofertilisants en agriculture. Projet Kolos, Programme OCAPI, LEESU, Ecole nationale des ponts et chaussées, Institut Polytechnique de Paris, Univ Paris-Est-Créteil, 34 pages.

Sauf mention contraire, les tableaux et figures appartiennent aux auteurs ou sont libres d'accès.

Contact : [florent.brun@enpc.fr](mailto:florent.brun@enpc.fr)

---

<sup>1</sup> <https://www.leesu.fr/ocapi/les-projets/kolos/>

<sup>2</sup> La liste des membres du programme OCAPI est consultable ici : <https://www.leesu.fr/ocapi/presentation/lequipe/> et les partenaires au fil des projets sont précisés là : <https://www.leesu.fr/ocapi/presentation/partenaires/>

---

## Résumé

---

**Titre :** Note de Synthèse : les éléments indésirables des urinofertilisants en agriculture

**Title :** *Summary note: undesirable elements of urine based fertilisers (UBF) in agriculture*

Cette note vise à faire un tour d’horizon de ce qui pose problème dans le fait de mettre des fertilisants issus de l’urine humaine dans les champs. Plus précisément, c’est en se demandant ce qui peut rendre indésirable l’urine humaine en tant que fertilisant agricole que la question des risques et incertitudes est abordée. Pour cela, nous avons listé différentes familles de composés qui pourraient avoir des impacts négatifs au champ et qui seraient ainsi considérés comme indésirables. Après nous être interrogés sur les traitements, leur efficacité, le devenir des indésirables épandus et comment faire état des impacts, nous avons opté pour une étude de cas pratique s’appuyant sur l’épandage d’urine humaine traitée par stockage (lisain) issue d’un festival dans le cadre du projet Kolos. Cette étude de cas permet d’aborder différentes méthodes d’évaluation, de quantification et de comparaison. Ainsi des comparaisons sont réalisées avec les données concernant (i) la réglementation des matières fertilisantes et supports de cultures, (ii) les molécules couramment présentes dans d’autres matières fertilisantes (lisiers, fumiers, boues d’épuration, etc.), (iii) les pesticides épandus en France, (iv) les substances médicamenteuses présentes dans les eaux d’irrigation. Des comparaisons sont aussi réalisées avec (v) les limites maximales de résidus acceptées dans les denrées alimentaires.

Il ressort que pour un urinofertilisant comme le lisain, avec un traitement ne ciblant que les pathogènes, les concentrations mesurées sont inférieures aux seuils réglementaires et il paraît peu probable que les indésirables apportés engendrent un risque significativement plus élevé que les autres pratiques associées à des intrants agricoles. Comme pour les autres matières fertilisantes, à ce jour les outils et méthodes écotoxicologiques visant à rendre compte des impacts de ces indésirables au champ n’apportent aucune garantie explicite d’innocuité et sont en constante évolution. Réciproquement, aucune dangerosité avérée n’a été rapportée pour l’instant qui conduise à proscrire l’usage des urinofertilisants. Par rapport aux pratiques conventionnelles de gestion de l’urine humaine, où les indésirables de l’urine humaine ne font pas actuellement l’objet d’une gestion spécifique, les pratiques de séparation à la source de l’urine semblent permettre une meilleure maîtrise des risques.

Les incertitudes qui demeurent soulignent que le choix du recours à des urinofertilisants ne peut pas se réduire à la présence/absence de certaines molécules dont les impacts sont encore aujourd’hui difficilement quantifiables. Si évaluer les impacts de ces indésirables s’avère complexe, il apparaît de surcroît nécessaire de toujours coupler cette analyse avec celle du devenir de ces indésirables dans la gestion conventionnelle des urines et avec l’analyse des raisons fondamentales qui induisent la présence de ces indésirables dans les urinofertilisants.

**Mots-clefs :** urine, agriculture, fertilisants, éléments indésirables, impacts environnementaux et sanitaires

**Keywords :** *urine, agriculture, fertilisers, undesirable elements, environmental and sanitary impacts*

---

---

## Tables

---

### Table des matières

Avant-propos .....	2
Résumé .....	3
Tables.....	4
Acronymes.....	6
Introduction.....	7
Etat des connaissances.....	8
Pourquoi caractériser les indésirables des urino-fertilisants (UF) ? .....	8
Une préoccupation forte du monde agricole .....	8
Incertitudes, bénéfiques, alternatives et risques associés aux UF .....	9
Des multiples voies de transfert des contaminants .....	9
Différentes familles d'indésirables avec des impacts peu connus .....	11
Les éléments traces métalliques (ETM).....	11
Les agents pathogènes d'origine biologique .....	12
Les produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP).....	12
L'antibiorésistance .....	14
Les perturbateurs endocriniens .....	14
Autres indésirables .....	15
Quels traitements et effets sur les indésirables ? .....	16
De l'intérêt de réaliser des comparaisons <i>in situ</i> .....	16
Comment faire état de l'impact des indésirables au champ ? .....	17
Evaluation par les concentrations prédites sans effet .....	17
Evaluation via un cadre réglementaire existant .....	18
Etude de cas : le lisain du démonstrateur Kolos.....	19
Comparaison par cadre réglementaire des MFSC .....	19
Comparaison avec des MAFOR.....	21
Comparaison avec les pesticides .....	21
Comparaisons écotoxicologiques .....	23
Comparaison avec des limites maximales de résidus dans l'alimentation .....	24
Comparaison avec de l'eau d'irrigation de surface.....	26
Conclusion .....	28
Synthèse de l'étude de cas du démonstrateur Kolos .....	28
De l'intérêt d'une gestion à la source des contaminants... ..	29
Perspectives.....	30
Bibliographie.....	31

## Figures

Figure 1: Exemples de verbatims d'agriculteurs traduisant des inquiétudes autour de l'épandage d'urinofertilisants (issus de divers entretiens menés auprès d'acteurs du monde agricole par F. Brun dans le cadre de son doctorat). .....	8
Figure 2: Les urinofertilisants (en rouge) parmi les voies d'arrivée des résidus de médicaments dans les compartiments environnementaux par rapport aux contaminations des eaux destinées à la consommation humaine. Adapté de (Chocat 2014). .....	10
Figure 3: Schéma des devenir possibles d'indésirables après épandage. ....	11
Figure 4: Produits pharmaceutiques et de soins pour humains et animaux (photos Pixabay.com). ....	13
Figure 5: Charbon actif utilisé dans le traitement de l'eau et pour la production de certains urinofertilisants (photo Pixabay.com) .....	16
Figure 6: Comparaison d'indésirables et PNEC selon 2 scénarios d'infiltration exprimés en Log base 10 et pour 122 kgN/ha apportés .....	24
Figure 7: Concentrations en substances du lisain de Kolos comparées aux LMR du lait de vache (ng/L, log base 10) .....	26

## Tableaux

Tableau 1: Comparaison entre les apports d'ETM et les recommandations du socle commun des MFSC.....	20
Tableau 2 : Comparaison des teneurs en indésirables de résidus de médicaments dans le lisain de Kolos et médianes nationales en lisiers et boues de station d'épuration, ramenées à l'unité d'azote épandue ( $\mu\text{g}$ de molécule/kgN).....	21
Tableau 3: Comparaison entre résidus de médicaments du lisain du démonstrateur Kolos et pesticides .....	22
Tableau 4: Substances présentes dans le lisain de Kolos (en masse) .....	25
Tableau 5: Comparatif de substances présentes dans le lisain de Kolos et dans les rivières européennes utilisables en agriculture .....	27

## Encadrés

Encadré 1 : Quelle différence entre risque et incertitude ? .....	9
Encadré 2 : Posture de l'OMS concernant les résidus de médicaments .....	13
Encadré 3 : Les perturbateurs endocriniens.....	14
Encadré 4 : Un indésirable particulier, le sel de table .....	20

---

## Acronymes

---

AMM : Autorisation de mise sur le marché

CL50 : Concentration létale à 50 %

DERU : Directive européenne relative au traitement des eaux résiduaires urbaines du 27/11/2024

ETM : Eléments traces métalliques

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

ISARA : Institut supérieur d'agriculture Rhône-Alpes

LEESU : Laboratoire eau, environnement et systèmes urbains

MAFOR : Matières fertilisantes d'origine résiduaire

MFSC : Matières fertilisantes et supports de culture

NaCl : Chlorure de sodium (constituant principal du sel de table)

NOEC : No observed effect concentration ou concentration en dessous de laquelle aucun effet biologique significatif n'est observé dans un compartiment environnemental.

OCAPI : Organisation des cycles carbone, azote, phosphore dans les territoires

OMS : Organisation mondiale de la santé

PFAS : Substances per- et polyfluoroalkylées

PNEC : Predicted no effect concentration ou concentration en dessous de laquelle aucun effet néfaste sur l'écosystème n'est attendu

PPSP : Produits pharmaceutiques et de soins personnels

STEU : Station d'épuration des eaux usées urbaines

UF : Urinofertilisant

UMR : Unité mixte de recherche

UN : Unité d'azote en kg

---

## Introduction

---

Cette note s'inscrit dans le cadre du déploiement de filières circulaires de gestion des nutriments (azote, phosphore, potassium...) issus des excréments humains séparés à la source. Ces filières visent à répondre à de multiples enjeux, liés notamment à la résilience alimentaire, à la préservation de la ressource en eau, à la réduction de la production des gaz à effet de serre, à des économies d'énergie.... La fertilisation avec des urinofertilisants<sup>3</sup> (UF) permet cette circularité.

Comme pour toute matière mobilisée dans les pratiques agricoles, les UF font l'objet de préoccupations quant aux incertitudes liées à leur épandage. Si les épandages d'UF peuvent être associés à des cadres réglementaires, il subsiste des inquiétudes légitimes autour de leur usage, en lien avec les éventuels indésirables qu'ils peuvent contenir. Ces questionnements sont le reflet de préoccupations contemporaines vis-à-vis d'un environnement qui se dégrade, et fait notamment l'objet de nombreuses contaminations diffuses. Les préoccupations du monde agricole reposent également sur le fait qu'il s'agit d'apports de fertilisants exogènes aux exploitations.

Dans le cadre de cette note, un élément indésirable d'un UF est défini comme :

**« Un composant ou organisme présent dans l'urinofertilisant, sans intérêt agronomique, et susceptible d'avoir un effet délétère sur les agro- et écosystèmes et/ou sur la santé humaine ».**

L'urine est un produit du métabolisme humain. Dès lors, les éléments indésirables que celle-ci est susceptible de contenir proviennent soit (i) de l'alimentation ou d'autres substances ingérées ou absorbées volontairement ou non par le corps des personnes dont l'urine a été collectée, soit (ii) des matériaux ou produits d'entretiens ou réactifs avec lesquels l'urine a été en contact depuis sa collecte jusqu'à son traitement puis son épandage sous forme d'UF.

Bien qu'il convienne de traiter en priorité des dangers associés à ces indésirables de manière préventive (en évitant l'absorption initiale de ces éléments par le corps humain), leur présence *de facto* dans l'urine humaine nécessite de s'intéresser à leur devenir et aux conséquences associées. Les impacts liés aux UF et à leur épandage sont liés aux pratiques de fertilisation : quantités, qualités et modalités d'apports. Ainsi, pour permettre une utilisation sûre des UF en agriculture, il est nécessaire de caractériser (i) les éléments indésirables susceptibles d'être présents, (ii) leurs concentrations et les quantités apportées, (iii) leurs impacts sur les différents compartiments environnementaux.

Cette note de synthèse présente d'abord un état des connaissances qui ont pu être compilées, afin ensuite de les mettre en regard avec des observations sur le terrain du projet Kolos. Puis, on montrera que les outils et méthodes écotoxicologiques visant à rendre compte des impacts de ces indésirables au champ n'apportent à ce jour aucune garantie explicite d'innocuité et sont en constante évolution. Réciproquement, aucune dangerosité avérée n'a été rapportée à ce jour qui conduise à proscrire leur usage. Plusieurs facteurs participent aux décisions des modes de fertilisation, c'est pourquoi il est proposé dans cette note de comparer l'épandage d'urinofertilisants, avec les indésirables qu'ils pourraient contenir, à d'autres pratiques déjà admises (usages agricoles de fumiers et lisiers, composts, boues, pesticides et irrigation avec des eaux de surface).

Ce travail ouvre de nouveaux questionnements : alors que les urines et leurs indésirables sont majoritairement orientés vers les milieux aquatiques, quelles sont les meilleures organisations pour répondre aux enjeux systémiques de la gestion des urines et de leurs indésirables ?

---

<sup>3</sup> Un urinofertilisant est une matière fertilisante spécifique obtenue après traitement de l'urine humaine et permettant d'en valoriser les nutriments en agriculture.

---

## Etat des connaissances

---

### Pourquoi caractériser les indésirables des urino-fertilisants (UF) ?

Une préoccupation forte du monde agricole

Au même titre que d'autres fertilisants contiennent des indésirables (cadmium et uranium pour les engrais phosphatés miniers, résidus de médicaments<sup>4</sup> des fumiers et lisiers, etc.), les urino-fertilisants peuvent contenir différents types de substances, tels que les organismes pathogènes, résidus de médicaments, éléments traces métalliques, etc. En fonction des agriculteurs, les urines humaines peuvent faire l'objet de diverses représentations qui marquent des inquiétudes légitimes (Figure 1). En effet, plusieurs enquêtes<sup>5</sup> auprès de ceux-ci convergent vers un point de vigilance majeur autour de la présence d'indésirables dans les urino-fertilisants. Alors que certains indésirables sont présents dans les Matières Fertilisantes Organiques d'origine Résiduaire (MAFOR)<sup>6</sup> dont l'épandage agricole est largement pratiqué aujourd'hui en France, le cas des UF fait l'objet d'un focus spécifique sur la présence de résidus de médicaments, comme dans les eaux usées (Chocat, 2014).

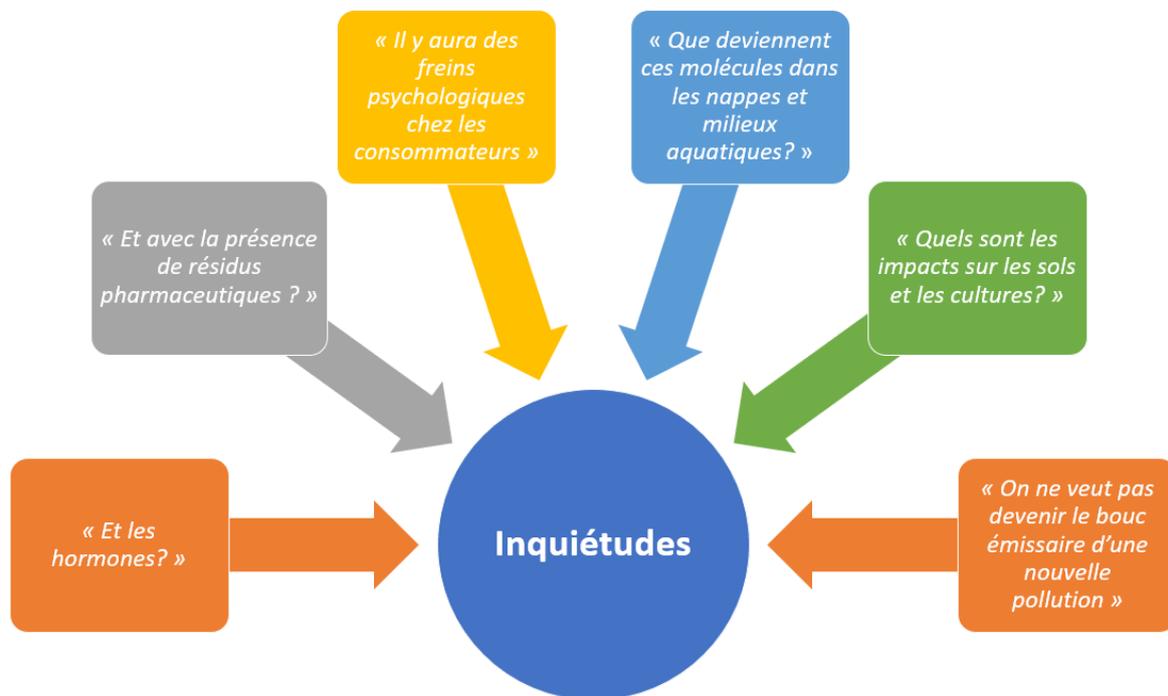


Figure 1: Exemples de verbatims d'agriculteurs traduisant des inquiétudes autour de l'épandage d'urino-fertilisants (issus de divers entretiens menés auprès d'acteurs du monde agricole par F. Brun dans le cadre de son doctorat).

Ces manières d'appréhender le sujet sont très hétérogènes et ne peuvent se résumer à des postures liées aux pratiques agricoles. Au sein même de l'agriculture conventionnelle ou de l'agriculture

---

<sup>4</sup> Nous faisons le choix dans cette note d'utiliser les termes de « produits pharmaceutiques » avant ingestion et de « résidus de médicaments » après excrétion, à l'instar de l'ANSES dans ses avis.

<sup>5</sup> Parmi celles-ci, il est possible de consulter une étude auprès des agriculteurs franciliens (Brun et al. 2020), la consultation des adhérents de la fédération nationale de l'agriculture biologique (FNAB) : [https://www.youtube.com/watch?v=Obnkn8\\_nkBY](https://www.youtube.com/watch?v=Obnkn8_nkBY) consulté le 01/12/2024 ou une enquête sur le plateau de Saclay (Terre et Cité 2022).

<sup>6</sup> Les MAFOR correspondent à une diversité de matières organiques : fumiers, lisiers, composts, boues de stations d'épuration, etc. Les pratiques sont hétérogènes en Europe. Pour le cas des boues de stations d'épuration par exemple, en France environ 75 % sont épandues en agriculture (directement ou après compostage) tandis qu'en Suisse cette pratique est interdite (Houot et al. 2014; Starck 2024).

biologique, il est possible de recenser une diversité de postures quant à l'usage d'urino-fertilisants et à la présence d'éventuels indésirables. Le cas de la contamination aux métaux des champs d'épandage de l'agglomération parisienne, où l'intégralité des eaux usées – contenant urines et matières fécales, mais aussi une contamination métallique provenant des eaux ménagères, des eaux pluviales et des eaux industrielles mélangées – qui ont été épandues pendant un siècle, a marqué les esprits (Mandinaud, 2005). Une préoccupation forte du monde agricole dans l'utilisation de nouveaux produits est de ne pas devenir le nouveau bouc émissaire d'une éventuelle pollution à venir dans un contexte de contaminations plurielles des sols, des masses d'eau (Figure 2) mais aussi de nos corps comme nous le verrons plus tard dans cette note.

#### Incertitudes, bénéfices, alternatives et risques associés aux UF

Toutes les substances éventuellement contenues dans les UF n'ont pas fait l'objet d'une évaluation des risques (Encadré 1). Il faudrait pour cela disposer des connaissances quant aux impacts de certains indésirables sur les santés humaine et environnementale. De ce fait, il semble aujourd'hui impossible de garantir l'absence totale de risques liées à l'utilisation d'UF en agriculture, notamment vis-à-vis de découvertes futures qui seraient faites. Cette note vise donc à décrire certaines familles d'indésirables en admettant que tous les effets de leur utilisation en agriculture ne sont pas connus.

##### *Encadré 1 : Quelle différence entre risque et incertitude ?*

Michel Callon et ses collègues (2014) distinguent (p.37-41) l'incertitude et le risque. Selon eux, pour **l'incertitude**, *on sait qu'on ne sait pas et c'est à peu près tout ce que l'on sait*. D'un autre côté, si le danger est bien identifié, il est possible d'évaluer **un risque**. Dans le cas des indésirables, il faut disposer d'une liste exhaustive des substances présentes, caractériser leurs potentiels impacts et interactions et enfin avoir une approche probabiliste d'occurrence de ces impacts. Il y a des risques quand des effets dommageables de certaines substances sont caractérisés et mis en évidence.

D'ailleurs, cette note dédiée aux indésirables s'inscrit pleinement dans une formulation de l'épilogue de cet ouvrage : « *Favoriser les controverses sociotechniques préventives sont des outils d'exploration active des incertitudes...* ».

Toutefois, malgré ce niveau d'incertitude élevé, il convient selon nous de poursuivre les expérimentations d'épandage au regard des intérêts que représente cette pratique comme notamment : répondre à la restauration des cycles de l'azote et du phosphore, disposer d'engrais locaux sans craintes de pénurie, limiter les contaminations des masses d'eau et la production de gaz à effet de serre liées à la production des engrais de synthèse et au traitement des eaux usées, etc. Cette note vise donc aussi à décrire ces incertitudes qui sont en constante évolution de manière à favoriser un dialogue ouvert autour de ces sujets.

#### Des multiples voies de transfert des contaminants

La figure ci-dessous rend compte des voies de transfert de contaminants dans le cas des résidus de médicaments (Figure 2)<sup>7</sup>.

Les indésirables dans les urino-fertilisants font l'objet d'une plus grande attention que ceux contenus dans les amendements issus des matières fécales, entre autres du fait de la plus grande facilité analytique à mesurer les indésirables dans les liquides, par rapport aux matrices complexes des amendements organiques. La littérature est donc plus étoffée sur les matrices liquides que solides, ce

---

<sup>7</sup> Les « pertes » ou contaminations atmosphériques sont présentes dans cette figure mais non reliées pour en alléger la lecture. Elles peuvent survenir à chaque étape du processus.

qui limite les référentiels mobilisables quand on parle du devenir de ces indésirables dans les sols agricoles.

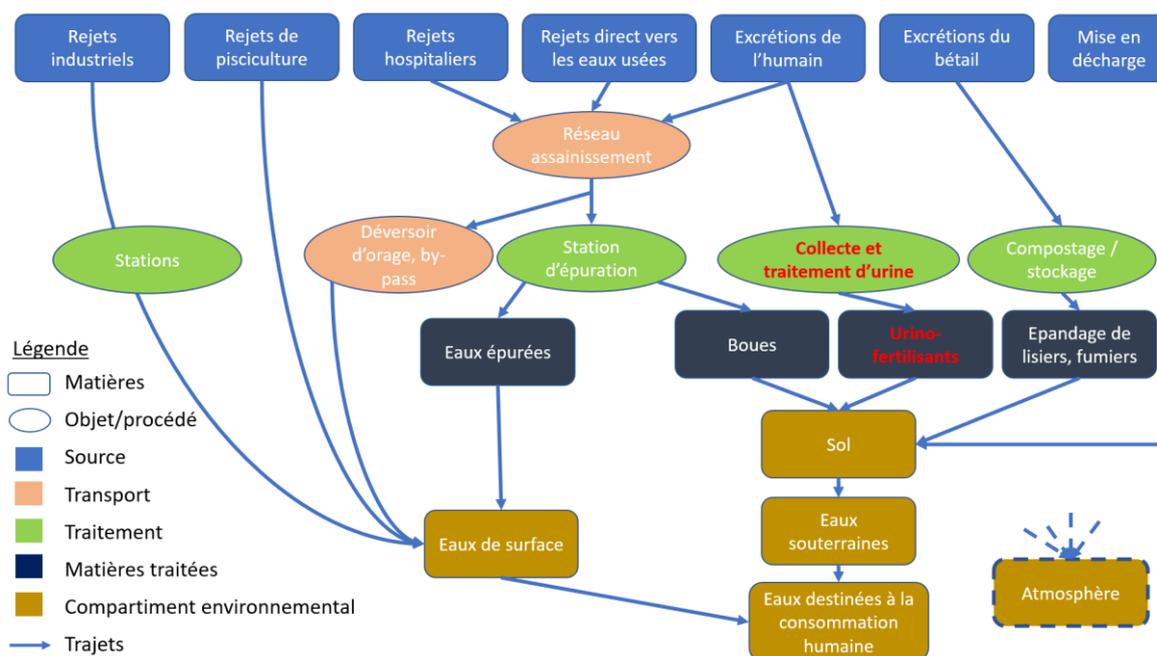


Figure 2: Les urinofertilisants (en rouge) parmi les voies d'arrivée des résidus de médicaments dans les compartiments environnementaux par rapport aux contaminations des eaux destinées à la consommation humaine. Adapté de (Chocat 2014).

De façon générale, les indésirables peuvent engendrer plusieurs types d'effets néfastes après épandage : toxicité sur les plantes ou la vie du sol, possible diffusion dans l'environnement par percolation vers les eaux souterraines ou par ruissellement, etc. (Houot *et al.*, 2014). Effectivement, certains indésirables s'accumulent dans les sols agricoles à l'instar des métaux lourds et des pesticides (Froger *et al.*, 2023). Il convient aussi de considérer le sol comme une ressource qu'il faut préserver. Toutefois, par divers mécanismes, le sol joue aussi un rôle actif qui peut induire un abattement des indésirables. Comme le précisent E. K. Bünemann et ses collègues (2024) en s'appuyant sur des expérimentations de terrain sur le long terme, les sols peuvent être plus résistants et capables de dégrader ou de stabiliser les polluants qu'on ne le pense souvent. La thèse de Noémie Etienne (2024) soutien ce constat en précisant que « les épandages à taux agronomiques de lisier et de boues n'engendrent pas d'accumulation significative de résidus pharmaceutiques et biocides dans les sols et que les flux de composés retenus dans le sol ou transportés vers les eaux souterraines représentent une faible fraction de ce qui est apporté ».

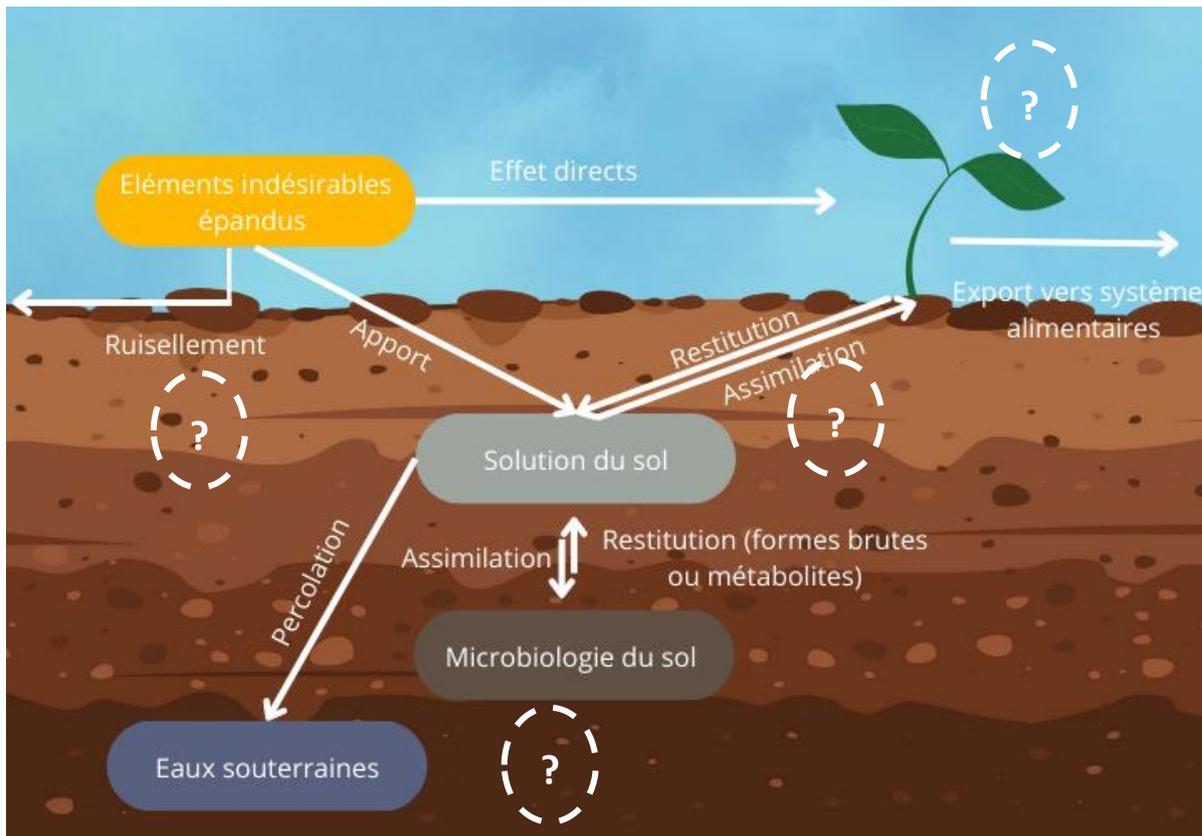


Figure 3: Schéma des devenir possibles d'indésirables après épandage.

De plus, de nombreux questionnements sont exprimés quant au possible transfert des indésirables dans les cultures puis de leur ingestion par l'humain lors de la consommation des produits agricoles. Chaque élément possède ses propres caractéristiques induisant différents mécanismes de mobilité dans les sols, de toxicité ou encore de disponibilité<sup>8</sup>. Les processus métaboliques des indésirables dans les sols agricoles sont donc propres à la fois à chaque indésirable mais aussi aux caractéristiques du sol ayant reçu un apport. Au-delà des devenir possibles présentés dans la Figure 3, on note que des transformations de ces molécules peuvent avoir lieu *via* des mécanismes plus ou moins connus comme la photolyse par le soleil, l'adsorption dans le sol ou d'autres réactions biogéochimiques...

### Différentes familles d'indésirables avec des impacts peu connus

Au-delà d'apporter des nutriments et des oligoéléments, l'urine humaine est susceptible de contenir des molécules à des concentrations variables qui peuvent en faire des indésirables. Cette variabilité peut s'expliquer par de nombreux facteurs comme le type de population excrétrice, le lieu et contexte de l'excrétion, le matériel utilisé pour le nettoyage, la collecte, le transport et le stockage des urines...

#### Les éléments traces métalliques (ETM)

Les éléments traces métalliques (ETM), habituellement suivis dans les boues d'épuration<sup>9</sup> du fait de contaminations venant des toitures, voitures, industries, etc. sont observables à des concentrations généralement très faibles dans les urines humaines. Beaucoup de ces éléments traces métalliques ne sont d'ailleurs pas des indésirables à faible dose : ce sont des oligoéléments vitaux pour le métabolisme des humains, des organismes du sol et des plantes (fer, cuivre, zinc, manganèse, molybdène, etc.). Les

<sup>8</sup> A l'instar des nutriments de fertilisation (azote, phosphore, potassium, etc.) et autres intrants comme les produits phytosanitaires, etc.

<sup>9</sup> Comme l'arsenic, le chrome VI, le cadmium, le cuivre, le mercure, le nickel, le plomb ou le zinc.

ETM présents dans les urines en faible quantité peuvent se retrouver dans les précipités comme la struvite (Ronteltap, Maurer, et Gujer, 2007) à des concentrations qui n'impacteraient pas les cultures (Simha *et al.*, 2020). De manière générale, les UF respectent les recommandations et seuils fixés par les textes réglementaires auxquels les ETM peuvent être rattachés comme ceux associés aux boues de station d'épuration<sup>10</sup> ou la norme française NF-U 44-095 (Martin, 2020).

Le **Cadmium** est un ETM préoccupant dans les systèmes agricoles car il est apporté par certains engrais miniers depuis des décennies (Jouany *et al.*, 2023; Secrétariat général à la planification écologique, 2024). Ce cadmium minier étant devenu une source de contamination générale de la population française, ainsi que des aliments, des animaux d'élevage et des sols (Agence Nationale de Sécurité sanitaire, alimentation Environnement, travail, 2015), il n'est donc pas absent des urines humaines. Toutefois, les concentrations retrouvées sont inférieures aux seuils réglementaires (Martin, 2020). En diminuant l'usage des engrais miniers du fait de l'usage des UF, les urines humaines pourraient ainsi s'avérer être une réponse possible pour limiter l'apport de cet indésirable, en parallèle bien sûr de limitations, à la source, d'entrées du cadmium dans les systèmes alimentaires.

#### Les agents pathogènes d'origine biologique

Les indésirables microbiologiques<sup>11</sup> des UF sont aussi considérés comme peu préoccupants car les risques associés sont bien caractérisés. Même si les urines collectées à grande échelle ne peuvent pas être considérées comme exemptes d'organismes potentiellement pathogènes<sup>12</sup> – d'origine fécale par contamination croisée, voire, plus rarement d'origine urinaire (OMS, 2012) –, il existe des traitements pour les hygiéniser, à savoir atteindre des taux de pathogènes sous un seuil acceptable. Le traitement le plus rustique est l'hygiénisation par stockage qui permet de réduire les risques de contamination lors de l'épandage de l'urine. En effet, l'hydrolyse de l'urée intervient spontanément lors du stockage et induit une libération d'ammoniac ainsi qu'une augmentation naturelle du pH qui concourent à l'hygiénisation<sup>13</sup> des urines stockées. Selon les cas d'utilisation au champ et les températures de stockage, l'OMS préconise un stockage des urines sans nouvel apport entre un et six mois (voir tableau 4.6 p. 78, Organisation Mondiale pour la Santé, 2012). La matière obtenue est appelée « le lisain ».

#### Les produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP)

Les PPSP<sup>14</sup> (Figure 4) sont une des préoccupations vis-à-vis des filières d'utilisation d'UF, menant jusqu'à une posture claire de l'OMS (Encadré 2). Les concentrations de ces derniers dans les MAFOR, y compris dans les lisiers, ne sont aujourd'hui pas encadrées d'un point de vue réglementaire. Elles vont de zéro à plusieurs centaines de µg/L et peuvent même atteindre des concentrations supérieures à quelques mg/L pour les individus sous traitement.

---

<sup>10</sup> Arrêté du 8 janvier 1998 modifié par l'arrêté du 15 septembre 2020.

<sup>11</sup> Virus, bactéries, archées, champignons, voire des organismes non microscopiques tels des protozoaires et des vers.

<sup>12</sup> Contrairement à une idée encore souvent véhiculée, il est acquis depuis plus de dix ans que les urines humaines, y compris chez un individu sain, ne sont pas stériles et qu'il existe une flore microbienne urinaire naturelle, qui est majoritairement protectrice pour la santé humaine (Esculier, 2018).

<sup>13</sup> C'est-à-dire à l'abattement de tous les pathogènes présents sous un seuil considéré comme acceptable par l'OMS.

<sup>14</sup> Impossible ici de lister les molécules tant elles sont variées. Parmi celles-ci des familles émergent comme les antidouleurs, les antibiotiques, les anti-inflammatoires ou les antidépresseurs.

*Encadré 2 : Posture de l'OMS concernant les résidus de médicaments*

Extrait des pages 136 et 137 : « *Les effets des produits pharmaceutiques biologiquement actifs sur l'écosystème et les animaux ne sont pas connus, mais on suppose que les effets négatifs sur la quantité ou la qualité des produits agricoles sont négligeables. En outre, la quantité d'hormone dans le fumier d'animaux d'élevage est nettement plus élevée que dans l'urine ou les fèces humaines. [...]* Ainsi, les évaluations comparatives portant sur le fumier indiquent clairement un risque très limité (Hanselman, Graetz, et Wilkie, 2003). [...] *Le sol constitue un système généralement mieux équipé que les cours d'eau pour la dégradation des résidus pharmaceutiques présents dans les fertilisants.* » (Organisation Mondiale pour la Santé, 2012)

Les travaux menés jusqu'à ce jour n'ont pas pu démontrer d'effets négatifs liés aux PPSP contenus dans les UF (Esculier *et al.*, 2022 ; Häfner *et al.*, 2023 ; Winker, 2009). À titre d'illustration des ordres de grandeur en jeu, des transferts à la plante ont pu être mesurés dans certains cas et il faudrait consommer plusieurs centaines de tonnes de légumes fertilisés à l'urine stockée pour retrouver l'équivalent d'un cachet de carbamazépine ou d'ibuprofène. Tous deux étant des indicateurs utilisés pour le suivi du devenir des résidus de médicaments. Cependant, ces travaux ne tiennent pas compte des éventuels effets cocktails<sup>15</sup> qui aujourd'hui ont été démontrés avec différents seuils de concentration pour des molécules présentes dans une substance (Gamet-Payrastre et Lukowicz, 2017) comme cela peut l'être pour les urines.

La variabilité des molécules est très grande. Certains types de molécules ont été moins étudiés à ce jour, entre autres du fait de contraintes analytiques, de procédures ou de craintes de contaminations pour les laborantins, comme les psychotropes ou les anticancéreux. En outre, de nombreuses molécules présentes dans les urines humaines ne sont pas les mêmes que les molécules médicamenteuses ingérées mais sont des métabolites produits par le corps humain avant leur excrétion. La variété des molécules à considérer est donc très importante. L'absence de référentiel partagé rend difficiles les approches comparatives pour ces molécules.

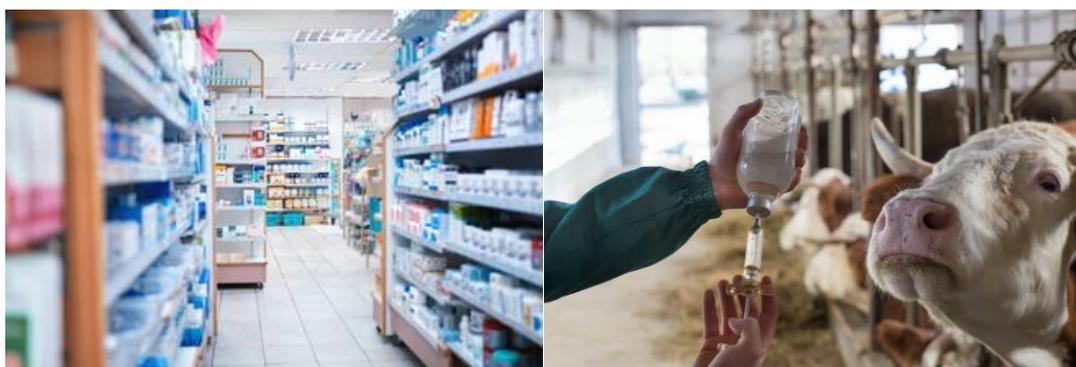


Figure 4: Produits pharmaceutiques et de soins pour humains et animaux (photos Pixabay.com).

D'autre part, il peut y avoir pour un certain nombre de molécules une absence de corrélation entre les doses et les réponses de l'organisme, ce qui rend la notion de seuil caduque pour celles-ci. C'est notamment le cas pour les perturbateurs endocriniens (voir ci-après). Également, certaines molécules comme les antibiotiques peuvent générer des effets d'antibiorésistance (voir ci-après) notamment sur la vie du sol et qui sont encore difficilement mesurables.

<sup>15</sup> Des substances sans danger pour l'humain individuellement, peuvent devenir nocives lorsqu'elles sont mélangées.

## L'antibiorésistance

L'antibiorésistance est le phénomène inquiétant et qui prend de l'ampleur qui consiste, pour une bactérie, à devenir résistante aux antibiotiques (Naghavi *et al.*, 2024)<sup>16</sup>. Il est amplifié par l'usage systématique en alimentation animale et par les mésusages et la surconsommation des antibiotiques en santé humaine ou animale<sup>17</sup>. L'emploi d'antibiotique est également étroitement lié à la qualité de vie et notamment de l'alimentation. Ce phénomène met en lien les pratiques agricoles et les médecines humaines et vétérinaires avec les écosystèmes.

L'étude de l'antibiorésistance est un sujet de recherche en forte croissance mais d'une portée encore limitée en termes d'évaluation des risques. Elle peut être basée sur le suivi de gènes d'antibiorésistance. Ce dernier est plus facile dans les milieux aquatiques pour lesquels il existe plus de référentiels (rejets d'assainissement, impacts sur les cours d'eau, etc.). Si des indicateurs standard commencent à être identifiés, les protocoles varient d'un laboratoire à l'autre et d'un pays à l'autre ce qui rend encore difficile les comparaisons. Des travaux émergent sur la circulation des gènes d'antibiorésistance d'un milieu à l'autre, sans que le sujet fasse encore l'objet d'analyses de routine. De plus, l'identification de la présence/absence de ces gènes et de leur concentration ne dit rien, en tant que telle, des risques encourus. Sur ce second point, il semble encore aujourd'hui difficile de produire des analyses d'évaluation des risques.

## Les perturbateurs endocriniens

Les perturbateurs endocriniens (PE) ne recouvrent pas qu'une seule famille de substances ce qui rend difficile leur identification (Encadré 3). Il existe des pesticides qui sont perturbateurs endocriniens, des médicaments, des hormones... Les PE sont donc complexes à aborder en chimie analytique et en écotoxicologie<sup>18</sup>. Si les effets que peuvent avoir ces molécules sur les écosystèmes sont connus (Adeel *et al.*, 2017), les références des concentrations de ces éléments dans les UF manquent.

### Encadré 3 : Les perturbateurs endocriniens

Un perturbateur endocrinien est une molécule ou un agent chimique composé, extérieur au corps humain, ayant des propriétés proches de certaines hormones produites par celui-ci. Ces perturbateurs sont présents dans de nombreux objets du quotidien (produits ménagers, cosmétiques, pesticides, aliments...) et pour certains déjà largement dispersés dans l'environnement (eau, air, sol, écosystèmes). Ils agissent, à très faibles doses, sur l'équilibre hormonal des humains mais aussi de nombreuses espèces sauvages ou domestiques tant animales que végétales. Ils ont souvent des effets indésirables sur la santé en altérant, parfois sur plusieurs générations, des fonctions vitales (croissance, développement, comportement, repos, reproduction, etc.). Ils affectent aussi la santé des écosystèmes (faune, biodiversité...).

Les perturbateurs endocriniens se situent ainsi au cœur des enjeux de santé environnementale par le fait que les perturbations qu'ils induisent portent sur l'ensemble du vivant.

Comme pour l'antibiorésistance, il existe plus de référence sur les milieux aquatiques que sur les milieux terrestres. Dès lors, la stratégie actuelle de la recherche porte plus sur une approche par modélisation, qui vise à prédire des effets à partir d'une comparaison entre structures moléculaires

<sup>16</sup> L'antibiorésistance est associée à 4,7 millions de morts dans le monde en 2021.

<sup>17</sup> Une réflexion est présentée ci-après dans l'étude de cas sur les limites maximales de résidus dans les denrées alimentaires. Certains de ces résidus, comme des antibiotiques animaux, génèrent de l'antibiorésistance et sont pour autant consommés par les humains carnivores.

<sup>18</sup> Contrairement à l'antibiorésistance l'approche pour les PE est moléculaire.

similaires. Cette stratégie permettrait à terme de prédire le devenir dans les écosystèmes et les effets écotoxicologiques de certaines molécules présentes dans des fertilisants ou compartiments environnementaux. Pour cela des outils de modélisation sont en cours de construction.

L'analyse des PE se heurte aussi à la question des effets et des risques au regard de leur devenir dans différents compartiments environnementaux. S'il est possible de donner des indicateurs de présence, les conséquences et l'interprétation de l'impact de ces concentrations (et leur variation) reste très difficile à définir en termes de risque.

#### Autres indésirables

De nombreux autres éléments soulèvent des questions, sans pour autant faire l'objet de préoccupations majeures ni d'une surveillance réglementaire spécifique comme **la caféine, le chlorure de sodium (NaCl), les nicotines, les produits d'entretien ménager...** Notons déjà que le sel de table (NaCl) ou la nicotine peuvent avoir, à partir d'une certaine dose, des effets néfastes sur la germination et la croissance végétale. S'il est facile de suivre le taux de sel dans les UF et les sols, le suivi de la nicotine et de ses métabolites est plus complexe (absence de norme d'analyse pour les laboratoires).

Les conditions (traitements, réactifs, etc.) nécessaires à la confection des différents UF peuvent aussi affecter l'état et les concentrations des indésirables présents dans l'urine, voire en apporter de nouveaux. En effet, certains métaux lourds peuvent être apportés par les cendres (Simha *et al.*, 2020) mais aussi des microplastiques lors des transvasements.

Pour ce qui est des micros ( $\mu\text{m} - 10^{-6}$ ) et nanos ( $\text{nm} - 10^{-9}$ ) plastiques leurs taux dans les UF restent dérisoires au regard des taux qu'ils atteignent dans d'autres fertilisants comme les composts. Bien que la littérature soit encore faible à ce sujet (Rotchell *et al.*, 2024; Song *et al.*, 2024), il est possible de souligner que ces plastiques ingérés par l'humain se retrouvent majoritairement dans les tissus de notre organisme et en particulier dans le système gastrique. Ceux qui sont excrétés se retrouvent majoritairement dans les matières fécales (Schwabl *et al.*, 2019) et dans une moindre mesure dans les urines. Les pesticides et les PFAS<sup>19</sup> suivent les mêmes chemins, d'abord les tissus puis les excréments. Pour les PFAS, leur présence dans les excréments est également très secondaire par rapport aux contaminations des écosystèmes liées à leur production pour des usages dans l'industrie (Simonnet-Laprade, 2017). Ils ont d'abord tendance à s'accumuler dans les tissus de nos organes de l'ordre de 1 à 10  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (Gaillard *et al.*, 2024) et s'ils doivent être excrétés c'est les voies urinaires et fécales qui semblent être privilégiées (Ducatman, Luster, et Fletcher, 2021) sans qu'elles n'aient fait l'objet d'une quantification précise (a priori du même ordre de grandeur). Ceux avec les chaînes les plus courtes ont tendances à être excrétés par voie urinaire (la majorité) et ceux aux chaînes les plus longues par voie fécale (Abraham *et al.*, 2024)<sup>20</sup>. Enfin, notons que les pesticides que l'on peut retrouver dans les urines humaines y apparaissent à des taux de l'ordre de 1  $\mu\text{g}/\text{L}$  (Grau *et al.*, 2022).

En conclusion, en l'absence d'une littérature étoffée sur la présence de ces indésirables dans les urines et de leurs effets au champ, il apparaît difficile d'établir des seuils à partir desquels les molécules ont

---

<sup>19</sup> PFAS : Vaste famille de plus de 4000 substances chimiques synthétiques persistantes dans l'environnement. Souvent appelées « polluants éternels » avec des temps de demi-vie de quelques jours à plusieurs décennies.

<sup>20</sup> Les ordres de grandeurs d'excrétion par jour de PFAS totaux sont estimés à 0,028  $\mu\text{g}$  pour l'urine et à 0,017  $\mu\text{g}$  pour les matières fécales selon une étude suédoise (Fletcher *et al.*, 2022). Ces valeurs peuvent être comparées à celle préconisée par l'ANSES en 2022 (Agence Nationale de Sécurité sanitaire, alimentation Environnement, travail 2022) comme limite de qualité dans l'eau potable de 0,1  $\mu\text{g}/\text{L}$  pour la somme des 20 PFAS les plus courants. Par ailleurs, les quantités rejetées par les STEU françaises vont de +/- 0,1 g/j à 10 000 g/j (Simonnet-Laprade 2017). Leur provenance est majoritairement issue de rejets industriels. Dans les boues suisses, les valeurs vont de 0,3 à 3700  $\mu\text{g}/\text{g}$  de matières sèches (Schinkel *et al.*, 2022).

un effet néfaste (seules ou en cocktail). Cette situation amène à souligner l'absence de risque zéro, quand bien même un traitement est réalisé (voir ci-après).

### Quels traitements et effets sur les indésirables ?

Les traitements appliqués aux urines pour en faire des UF ont des objectifs variés : stabiliser, concentrer, extraire les nutriments, etc. Ces traitements ont déjà en eux-mêmes un effet potentiel sur les indésirables. En outre, le traitement des indésirables peut être assuré par des procédés spécifiques (stockage, extraction, filtration...). Cependant, leur efficacité est très variable en fonction des substances et des traitements. Par exemple, la nitrification associée à la filtration sur charbon actif (Figure 5) est considérée comme efficace sans pour autant extraire 100 % des molécules présentes. En outre, ces traitements peuvent aussi avoir un impact négatif sur certains éléments utiles à la production végétale (captation non voulue de certains nutriments...).



Figure 5: Charbon actif utilisé dans le traitement de l'eau et pour la production de certains urinofertilisants (photo Pixabay.com)

Il apparaît difficile de mesurer en analyse de routine une liste exhaustive des molécules résiduelles dans les UF. A titre d'exemple, en Suisse, et dorénavant en Europe avec l'entrée en vigueur de la directive eaux résiduaires urbaines révisée, les molécules suivies en assainissement avec une obligation réglementaire de traitement sont uniquement celles dont les techniques d'identification et de quantification sont connues et accessibles auprès des laboratoires d'analyse. Allant plus loin, seules des molécules pour lesquelles des techniques de traitement efficaces sont disponibles ont été retenues, avec imposition d'objectifs réglementaires sur la qualité des eaux rejetées mais pas sur les boues produites.

Développer des traitements spécifiques pour éliminer ces molécules avant l'épandage sur les sols pose plusieurs questions sur le devenir des sous-produits de ces traitements, la capacité à généraliser ces traitements et les seuils attendus.

Ainsi, en fonction des procédés de traitement, il ne semble pas possible d'obtenir une absence totale d'indésirables. L'objectif est donc de réduire le niveau de risque et de réaliser des comparaisons avec les autres solutions actuelles de fertilisation et autres modes de gestion des urines. Afin de faire état de l'impact de chacune des molécules identifiées comme indésirables et ne possédant pas de cadre réglementaire, une méthodologie rigoureuse adaptée à chacune serait à mettre en place.

### De l'intérêt de réaliser des comparaisons *in situ*

Nous sommes face à un constat partagé que les conséquences de la présence de certaines molécules ou gènes dans les sols sont peu connues. Au regard des impacts sur les humains, il apparaît que les éléments bibliographiques présentés précédemment montrent que les transferts de substances issues de médicaments vers les plantes sont extrêmement faibles (Häfner *et al.*, 2023 ; Winker, 2009). Pour ce qui est des mécanismes associés aux sols et les impacts sur les compartiments associés, il semble que la comparaison avec d'autres MAFOR soit nécessaire.

---

## Comment faire état de l'impact des indésirables au champ ?

---

Deux méthodes d'analyse préférentielles sont utilisées de nos jours pour faire état de l'innocuité des fertilisants apportés aux champs. Nous décrivons ici ces cadres pour ensuite les mobiliser comme référentiels comparatifs aux résultats d'analyse du lisain (urine traitée par stockage) épandu sur la parcelle du démonstrateur Kolos. Effectivement, en l'absence de référentiel réglementaire, comparer les UF aux cadres existants pour d'autres pratiques et comparer les UF aux autres MAFOR permet *a minima* de vérifier que l'utilisation d'UF ne corresponde pas à des risques plus élevés que les pratiques existantes et admises (fumiers et lisiers, boues de STEU, pesticides, résidus dans l'alimentation, eau d'irrigation).

### Evaluation par les concentrations prédites sans effet

L'évaluation des risques liés à un épandage doit être réalisée pour chaque élément potentiellement indésirable qui serait identifié dans l'UF étudié. Pour faire état de l'impact d'un indésirable d'un UF, il faut évaluer sa capacité à avoir un effet toxique, qui peut être caractérisée avec l'aide des concentrations prédites sans effet (**PNEC**). Cet indicateur est obtenu de deux manières (Lecomte, 2012) sur la base :

- Des valeurs issues d'essais de toxicité chronique (**NOEC**) où la NOEC correspond à la concentration maximale testée à laquelle aucun effet sur des organismes vivants ciblés n'a été observée dans un cadre expérimental.
- De la plus faible concentration tuant 50 % des individus testés (**CL50**) dans un cadre expérimental. Cela permet de faire état de l'effet de la molécule en se basant sur l'organisme le plus sensible.

Un **facteur de sécurité** est ensuite appliqué à la NOEC ou à la CL50 pour déterminer le PNEC. Ce facteur est fixé par l'analyste et dépend du nombre de données à disposition, de la législation en place dans le pays où est menée l'étude<sup>21</sup> et du type de données sélectionnées. Cette approche comporte des limites. Elle est réalisée spécifiquement pour chaque molécule et ne comptabilise pas les interactions additives, synergiques ou antagonistes entre les différents composants de la matrice étudiée. C'est-à-dire que l'effet cocktail mentionné précédemment n'est pas pris en compte. Dans une telle situation, où il devient admis que l'adage « c'est la dose qui fait le poison » est en fait erroné dans de nombreux cas, il devient complexe de pouvoir appliquer des seuils réglementaires pour certaines molécules à l'instar des eaux de ruissellement urbain (Tedoldi, 2017).

Les possibilités de diffusion dans les écosystèmes des différents éléments indésirables associés à leurs mobilités, dépendent principalement de trois facteurs :

- Des propriétés physico-chimiques des molécules observées
- Des propriétés des sols bénéficiant de l'apport
- Des conditions d'épandage (date d'application, couverture du sol, contexte pédoclimatique...).

---

<sup>21</sup> Il existe un règlement européen (CE) n°1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/?uri=CELEX%3A32006R1907> consulté le 09/12/2024

## Evaluation via un cadre réglementaire existant

Pour certains types d'indésirables et notamment ceux qui sont communs à de nombreuses MAFOR, des cadres réglementaires existent. C'est le cas du **projet de socle commun des Matières Fertilisantes et Supports de Culture (MFSC)**<sup>22</sup> qui vise à définir des critères d'innocuité basés sur des seuils et à homogénéiser les caractéristiques de ces matières fertilisantes en termes d'indésirables. Ces textes concernent les ETM, organismes pathogènes, éléments inertes et certains composés traces organiques (CTO)<sup>23</sup>. Ils deviennent difficilement applicables pour les PPSP et les molécules qui ont des effets de perturbation endocrinienne.

Les homologations par une autorisation de mise sur le marché (AMM) sont délivrées suite à une évaluation par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), que ce soit pour les fertilisants pour permettre leur usage au champ ou pour les produits contenant des molécules (ou leurs métabolites) pouvant générer des perturbations endocriniennes ou de l'antibiorésistance. Cette évaluation exclusivement bibliographique pour avis d'expertise ANSES s'appuie sur les connaissances scientifiques disponibles quant à ces effets ou impacts et malheureusement ces derniers sont encore parcellaires, en particulier dans les matrices solides comme les sols.

Les seuils fixés par les cadres existants ou en devenir (projet de socle commun) sont considérés comme « *trop restrictifs* » par de nombreux acteurs des filières de valorisation des déchets organiques (Laperche, 2021) même si pour le cas des urines ils apparaissent pour l'instant comme peu contraignants.

Il est important de noter que le projet de socle commun, dans ses critères d'innocuité, se réserve la possibilité pour certains indésirables de réaliser des tests supplémentaires aux seuils indiqués concernant des effets de **perturbations endocriniennes** et des effets biologiques révélés par des tests **d'écotoxicité**.

En ce qui concerne la nouvelle DERU 2024 (Le parlement européen, 2024), ce sont les micropolluants<sup>24</sup> seuls qui sont convoqués avec une injonction à des traitements quaternaires pour toutes les STEU de plus de 150 000 EH et celles de plus de 10 000 EH dans les zones dans lesquelles les micropolluants présentent « *un risque pour l'environnement ou la santé humaine* ».

---

<sup>22</sup> <https://www.actu-environnement.com/ae/news/epandage-boues-stations-epuration-projet-textes-socle-commun-matieres-fertilisantes-supports-culture-inquiete-filiere-43142.php4> Consulté le 12/12/2024

<sup>23</sup> Les CTO peuvent être présents dans les produits organiques valorisés en agriculture. Deux types de molécules sont majoritaires comme les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et les PolyChloroBiphényles (PCB).

<sup>24</sup> "micropolluant" est une substance, y compris ses produits de dégradation, qui est généralement présente dans l'écosystème aquatique, dans les eaux résiduaires urbaines ou dans les boues et qui peut être considérée comme dangereuse pour les écosystèmes ou la santé humaine sur la base des critères pertinents énoncés **aux parties 3 et 4 de l'annexe I du règlement (CE) n° 1272/2008**, y compris à des concentrations faibles.

---

## Etude de cas : le lisain du démonstrateur Kolos

---

Le démonstrateur Kolos est pris pour étude de cas dans cette section. Toutes les analyses sur le lisain et ses effets agronomiques sont disponibles en ligne<sup>25</sup>. Ce contexte est fortement défavorable dans les scénarios et comparaisons mobilisés ci-après. En effet, le lisain utilisé pour fertiliser du maïs-grain<sup>26</sup> est peu concentré en azote (2,4 gN/L contre habituellement 6 gN/L). Les calculs sont basés sur une fertilisation à 168 unités d'azote (UN) correspondant à la pratique du démonstrateur<sup>27</sup> et donnant un rendement de 96 quintaux à l'hectare. Un tel niveau de fertilisation nécessiterait des apports de lisain très importants en volume, de l'ordre de 70 m<sup>3</sup>/ha<sup>28</sup> contre moins de 20 m<sup>3</sup> habituellement. Pour autant, les comparaisons réalisées amènent des constats intéressants en termes de taux de présence d'indésirables issus du lisain.

De façon générale, du fait d'une plus grande facilité analytique à mesurer les indésirables dans les liquides par rapport aux matrices complexes des amendements organiques, la littérature est plus étoffée sur les matrices liquides que solides, ce qui limite les référentiels mobilisables quand on parle du devenir de ces indésirables dans les sols agricoles<sup>29</sup>.

### Comparaison par cadre réglementaire des MFSC

Le démonstrateur Kolos est un essai de fertilisation au lisain, dans lequel une attention particulière a été portée sur les indésirables. Dans ce cadre, des analyses ont été menées au Laboratoire eau environnement et système urbain (Leesu) sur le lisain épandu sur la base des critères seuils du projet de socle commun<sup>30</sup> (voir Tableau 1). 33 des 35 molécules analysables ont été retrouvées et quantifiées par chromatographie en phase liquide couplée à une spectrométrie de masse (dont des PPSP et la caféine)<sup>31</sup>.

---

<sup>25</sup> [https://www.leesu.fr/ocapi/wp-content/uploads/2024/12/20241212\\_Cahier\\_expe\\_demo.pdf](https://www.leesu.fr/ocapi/wp-content/uploads/2024/12/20241212_Cahier_expe_demo.pdf)

<sup>26</sup> A destination d'une amidonnerie.

<sup>27</sup> Il semble également pertinent d'interroger la nécessité de fertiliser aussi abondamment une culture. Pour des niveaux inférieurs de fertilisation, les quantités d'indésirables apportées seraient également moins élevées.

<sup>28</sup> Une logistique difficilement gérable serait nécessaire pour apporter un tel volume à la parcelle avec des impacts sur les sols, le temps passé, les coûts en carburant et les émissions de carbone.

<sup>29</sup> Ainsi, par exemple, les indésirables dans les urino-fertilisants font l'objet d'une plus grande attention que ceux contenus dans les amendements issus de matières fécales.

<sup>30</sup> Dans sa version mise en consultation publique en décembre 2023.

<sup>31</sup> Selon les capacités d'analyse de notre laboratoire avec le matériel disponible. Ces analyses ne peuvent être réalisées en routine par des professionnels.

Tableau 1: Comparaison entre les apports d'ETM et les recommandations du socle commun des MFSC.

	ETM (g/ha)	Apport lisain Kolos pour 168 UN	Apport annuel autorisé	Exporté par la culture****
Oligo-éléments essentiels aux plantes	Zinc (Zn)	14,00	6000,00	26,88
	Cuivre (Cu)	7,00	1000,00	4,80
	Nickel (Ni)**	<LD*	900,00	
Oligo-éléments non essentiels aux plantes	Chrome trivalent (Cr)***	8,40	1800,00	
Contaminants	Arsenic (As)	85,40	270,00	
	Chrome VI	0,00	1800,00	
	Plomb (Pb)	<LD	2700,00	
	Cadmium (Cd)	<LD	15,00	
	Mercuré (Hg)	<LD	30,00	
* : Limite de détection ** : Essentiel aux plantes mais pas aux humains *** : Essentiel aux humains et potentiellement pour certains organismes du sol, mais pas aux plantes **** : D'après la base Ciqual pour de l'amidon de maïs - <a href="https://ciqual.anses.fr">https://ciqual.anses.fr</a>				

Les résultats montrent que ce lisain (urines humaines stockées 4 mois à température ambiante titrant à 2,4 gN/L pour une fertilisation à 168 UN), concernant les éléments relatifs au socle commun des MFSC, ne présente aucun élément préoccupant. En effet, les analyses n'ont pas révélé non plus la présence de pathogènes et d'éléments inertes. Les concentrations en ETM sont bien en dessous des seuils fixés. Un comparatif entre les apports autorisés et les apports réels a révélé que les épandages étaient en adéquation avec les recommandations du projet de socle commun des MFSC (Tableau 1). D'autre part, nous avons fait l'exercice de regarder les quantités de zinc et de cuivre exportés par la culture (en considérant ici uniquement le minima qui est le grain de maïs pour produire de l'amidon). Les apports par le lisain semble insuffisants pour le zinc et potentiellement satisfaisants pour le cuivre, sans considérer les besoins totaux de la plante.

D'autre part, la concentration de NaCl (sel de table) est ici de l'ordre de 0,5 g/l et ne devient à cet effet pas un indésirable dans l'apport au champ de ce lisain (voir Encadré 4). Ce point mérite vigilance tant la consommation de sel en France reste élevée, de l'ordre de 7 à 8 g/pers/j, au regard des préconisations maximales à ne pas dépasser de 5 g/j/pers de l'OMS (Agence Nationale de Sécurité sanitaire, alimentation Environnement, travail, 2012).

*Encadré 4 : Un indésirable particulier, le sel de table*

Le sel de table (Chlorure de sodium ou NaCl) a un effet phytotoxique. Le ratio N/NaCl de l'urine est estimé à 1/1,4 ce qui signifie que pour 1 kg d'azote épandu, on apporterait 1,4 kg de NaCl. Avec de telles valeurs, en fonction des conditions de traitement et d'épandage (sols, météo, plantes, etc.), l'urine pourrait être responsable de la salinisation des sols avec des effets néfastes sur la germination et la nutrition des plantes. Cet effet dépressif peut être de nature osmotique mais aussi toxique. Cependant, dans le cadre d'une étude danoise visant à utiliser du lisain à répétition (11 ans successifs, 100 kgN/ha/an), aucun effet négatif lié au sel n'a pu être prouvé (Gómez-Muñoz *et al.*, 2017). Certains procédés de traitement de l'urine par concentration ou extraction peuvent permettre d'abaisser cette teneur en sel.

## Comparaison avec des MAFOR

Concernant les PPSP, il est proposé de comparer les indésirables présents dans le lisain du démonstrateur Kolos avec ceux présents dans les boues de station d'épuration et les lisiers animaux (voir Tableau 2). Le choix a été fait de ramener les concentrations à la quantité d'azote apportée (Fuchs *et al.* 2014; Lévasséur *et al.*, 2019). Les données mobilisées proviennent de différentes sources bibliographiques pour les boues (Agence Nationale de Sécurité sanitaire, alimentation Environnement, travail, 2020; Esculier, Houot, *et al.*, 2022; Gay et Dalvai, 2014; Patureau *et al.*, 2013) et les lisiers (Patureau *et al.*, 2013)<sup>32</sup>. Pour le démonstrateur Kolos, les molécules de médicaments ont pu être quantifiées de 5 ng/L à 2,86 mg/L pour une somme totale de molécules de 7,3 mg/L.

Tableau 2 : Comparaison des teneurs en indésirables de résidus de médicaments dans le lisain de Kolos et médianes nationales en lisiers et boues de station d'épuration, ramenées à l'unité d'azote épandue ( $\mu\text{g}$  de molécule/kgN)

Pharmaceutique	Type de molécule	Lisain de Kolos	Boues de station d'épuration		Lisiers de porc	
			Médianes	Sources	Médianes	Sources
Triméthoprim	Antibiotique	2,3	125	(Anses, 2020)	200483	(Patureau <i>et al.</i> , 2013)
Sulfaméthoxazole	Antibiotique	13,6	500	(Patureau <i>et al.</i> , 2013)	-	-
Tétracycline	Antibiotique	31,7	1185175	(Esculier <i>et al.</i> , 2022)	3833	(Patureau <i>et al.</i> , 2013)
Carbamazépine	Anticonvulsivant	174,1	1150	(Esculier <i>et al.</i> , 2022)	-	-
Diclofénac	Anti-inflammatoire	526,5	1475	(Patureau <i>et al.</i> , 2013)	-	-
Ciprofloxacine	Antibiotique	5493,7	70400	(Esculier <i>et al.</i> , 2022)	837	(Patureau <i>et al.</i> , 2013)
Ibuprofène	Anti-inflammatoire	74911,7	4750	(Esculier <i>et al.</i> , 2022)	-	-
Caféine	Stimulant - insecticide naturel	391150,6	1587,5	(Patureau <i>et al.</i> , 2013)	-	-
Tramadol	Antidouleur	357564,3	875	(Gay et Dalvai, 2014)	-	-

Cette comparaison montre qu'au-delà de la caféine, seules des molécules antidouleurs et anti-inflammatoires sont apportées en plus grande quantité que les molécules présentes dans des boues de STEU lorsqu'elles sont recherchées, tout en restant en dessous des concentrations en antibiotiques. Notons que la ciprofloxacine présente dans les boues et lisiers a tendance à s'agréger en surface du sol avant d'être dégradée, ni accumulation ni lessivage ne sont observés selon Noémie Etienne (2024). Elle a également regardé le Kétoprofène (la moitié en masse de l'Ibuprofène dans notre échantillon), et souligne que les masses récupérées le sont uniquement dans les eaux infiltrées des dix premiers centimètres de sol dans son dispositif expérimental *in situ* et correspondent à 1 % de la quantité totale appliquée en surface. Seule cette molécule semble avoir une tendance à la lixiviation. Elle souligne que globalement les molécules présentes dans les boues et lisiers ont des mobilités différentes allant de la rétention-dissipation de surface pour l'essentiel des résidus de médicaments et biocides, à des transferts soit verticaux (qui sont plutôt restreints) soit autres (ruissellements horizontaux possibles) en fonction des sols.

## Comparaison avec les pesticides

Les pesticides, ou produits phytosanitaires, sont des molécules apportées volontairement sur des cultures et qui sont considérées comme indésirables pour les écosystèmes et pour la santé humaine. À défaut de pouvoir réaliser une comparaison (éco)toxicologique de l'impact des pesticides et des indésirables des urino-fertilisants, nous proposons de comparer *a minima* – avec une portée certes limitée – les masses de matière mises en jeu. L'idée d'une telle comparaison permet de se rendre compte des quantités de molécules apportées par une fertilisation au lisain vis-à-vis de celles apportées lors de l'emploi de pesticides.

<sup>32</sup> Le faible nombre de travaux ayant étudié les métabolites ne permet pas, ici et dans la suite de cette note, de faire une analyse de la présence des métabolites. Nous nous cantonnons donc aux molécules primaires.

On ne sait pas exactement quelle quantité des pesticides épandus en agriculture reste sur le sol et atteint l'aquifère ou l'océan. Une étude de 2023 portée par Maggi et ses collègues montrent que 82 % des 92 molécules phytosanitaires mesurées sont dégradées biologiquement, 10 % restent sous forme de résidus dans le sol et 7,2 % sont lessivés en dessous de la zone racinaire. Les sols peuvent jouer un rôle de rétention plus que de dilution pour ces molécules avec des effets de dégradation notamment dues à la présence de champignons (que l'on ne retrouve pas dans les milieux aqueux).

Toutefois, le suivi du devenir des pesticides dans l'environnement est difficile, et une image détaillée de leur mobilité dans le temps et l'espace fait aujourd'hui encore largement défaut.

Nous avons réalisé l'exercice de comparer les consommations en pesticides en France vis-à-vis des molécules présentes dans le lisain du démonstrateur Kolos (voir Tableau 3). La consommation de pesticides a été évaluée dans le cadre du programme du PIREN-Seine (Blanchoud, 2011) en 2009 avec 63 700 tonnes de substances actives vendues et n'a guère évolué depuis selon la Stratégie Ecophyto 2030 du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Seule la part utilisable en agriculture biologique, qui est d'origine naturelle<sup>33</sup>, a sensiblement augmentée passant de 13,4 % à 33,3 % (Parisse, 2023). Le glyphosate reste la seconde substance active la plus utilisée en France<sup>34</sup> avec 7900 t vendues en France en 2021 (Parisse, 2023). Il est retrouvé dans les urines humaines pour 99,8 % des échantillons de 6795 personnes enquêtées partout en France (Grau *et al.*, 2022). Cette étude, ainsi qu'une revue de la littérature (Gillezeau *et al.*, 2019) montrent que la France est le pays européen qui consomme le plus de glyphosate et que les taux de cette molécule dans les urines, très variables en fonction de l'exposition des individus, sont de l'ordre de 1 µg par litre d'urine.

Tableau 3: Comparaison entre résidus de médicaments du lisain du démonstrateur Kolos et pesticides

	Quantité totale	Précisions	Sources
<b>Quantité de pesticides apportée au champ lors de traitements</b>	5,7 kg/ha (tous pesticides)	Basé sur la consommation moyenne annuelle de pesticides calculée en 2009 en France rapportée à la SAU cultivée hors prairies permanentes et cultures AB.	(Blanchoud <i>et al.</i> , 2011)
	1 à 14,5 kg/ha (tous pesticides)	En fonction des départements français ces données moyennes de 2022 sont rapportées à la SAU.	(Stratégie Ecophyto, 2030)
	40 à 2000 g/ha (glyphosate)	Panel de pratiques de dosages du glyphosate en agriculture	(Ineris, 2020)
<b>Quantité de résidus médicamenteux apportée au champ avec un urinofertilisant</b>  (somme des poids des molécules identifiées)	101 g/ha (tous résidus)	Par calcul avec apport de 15 m3 de lisain titrant à 10 gN/L	(Wincker, 2009)
	7,3 mg/L de lisain (tous résidus)	Somme des 33 molécules retrouvées dans le lisain	Lisain Kolos
	470 g/ha (tous résidus)	Par calcul pour 168 UN apportés sur la parcelle du démonstrateur avec du lisain titrant à 2,4 gN/L	Lisain Kolos
	0,07 g/ha (glyphosate)	Par calcul pour 168 UN apportés sur la parcelle du démonstrateur avec du lisain titrant à 1 µg de glyphosate/L et 2,4 gN/L	Lisain Kolos d'après (Grau <i>et al.</i> , 2022)

La parcelle du démonstrateur Kolos est menée en agriculture conventionnelle. Dans le tableau 3, les poids par litre d'urine ou de lisain exprimés correspondent à la somme de toutes les molécules de médicaments identifiées en spectrométrie de masse haute résolution.

On observe, en masse, que lorsque l'on fertilise avec un produit issu de l'urine (pour lequel le traitement impacte relativement peu les résidus de médicaments comme c'est le cas du lisain de Kolos), on apporte de 10 à 50 fois moins de masses de molécules que lorsque l'on traite une parcelle avec des pesticides d'origine chimique (deux traitements ont été réalisés sur la parcelle Kolos, un contre le liseron et un insecticide) ou naturelle comme dans le cas de l'agriculture biologique. Pour le glyphosate, le rapport est de 600 à 30 000 fois inférieur aux pratiques agricoles en utilisant le lisain de Kolos.

<sup>33</sup> Comme le cuivre, le soufre, les pyréthrinés ou le spinosad.

<sup>34</sup> Après le soufre pour 15 000 tonnes.

Il convient de garder à l'esprit que la comparaison massive des molécules de médicaments et des pesticides ne peut se substituer à une évaluation des effets écotoxicologiques. Pour des effets similaires, les quantités de pesticides épandues ont tendance à diminuer au fil des années. En effet, les molécules désormais utilisées sont actives à de plus faibles concentrations. Par ailleurs, certaines molécules peuvent être abondantes en masse et ne présenter presque aucun effet alors que d'autres molécules très limitées en masse peuvent avoir un effet très important. Pour autant, eu égard aux difficultés à analyser précisément les risques liés à la présence d'indésirables dans les UF, la comparaison massive avec les pesticides épandus permet au moins de donner un ordre de grandeur des masses de matières mises en jeu.

## Comparaisons écotoxicologiques

Comme nous l'avons vu, en écotoxicologie, il existe peu de données sur les milieux terrestres contrairement aux milieux aquatiques. L'évaluation des risques sanitaires basée sur les NOEC et la CL50 fonctionne toutefois bien sur les milieux aquatiques. Ainsi, les résultats présentés ci-après restent exploratoires dans un contexte de faible référentiel en quantité de données comparatives.

Les concentrations de PPSP et de caféine, contenues dans le lisain du démonstrateur Kolos, ont été mises en forme selon **deux scénarios**<sup>35</sup> d'infiltration dans le sol :

- Le premier scénario (points orange de la Figure 6) correspond aux plus fortes concentrations pouvant être observées en surface du sol. Il a été considéré ici que les indésirables épandus ne percolaient pas et ne bénéficiaient d'aucun effet de dilution ;
- Le deuxième scénario (points gris de la Figure 6) correspond à une infiltration des indésirables à 30 cm de profondeur. Les concentrations prédites au regard du sol de la parcelle du démonstrateur Kolos<sup>36</sup> sont ainsi diluées.

Ces scénarios se basent sur l'apport maximum de lisain dans le démonstrateur soit pour 122 unités d'azote (UN) et compare les quantités d'indésirables avec leurs PNEC respectives (barres bleues / histogramme de la Figure 6). Les PNEC disponibles dans la littérature correspondant aux indésirables identifiés dans ce lisain ont été produites :

- Soit par Bourdat-Deschamps et ses collègues en 2017, correspond aux indices 1 sur les substances de l'axe des abscisses de la Figure 6 ;
- Soit grâce aux fiches de données de sécurité conformes au règlement européen CE n°. 1907/2006 qui correspondent aux indices 2 sur les substances de la Figure 6<sup>37</sup>.

---

<sup>35</sup> Ainsi, les éléments présentés ci-dessous ne sont pas des mesures comparatives mais bien le résultat d'une construction prospective à partir d'un scénario. Aucune mesure n'a ici été réalisée.

<sup>36</sup> Sol argilo-limoneux profond, possédant un taux de matière organique supérieur à 2%, et ayant des tendances à la prise en masse avec une sensibilité à la battance.

<sup>37</sup> Les sources détaillées des PNEC mobilisés sont disponibles sur demande.

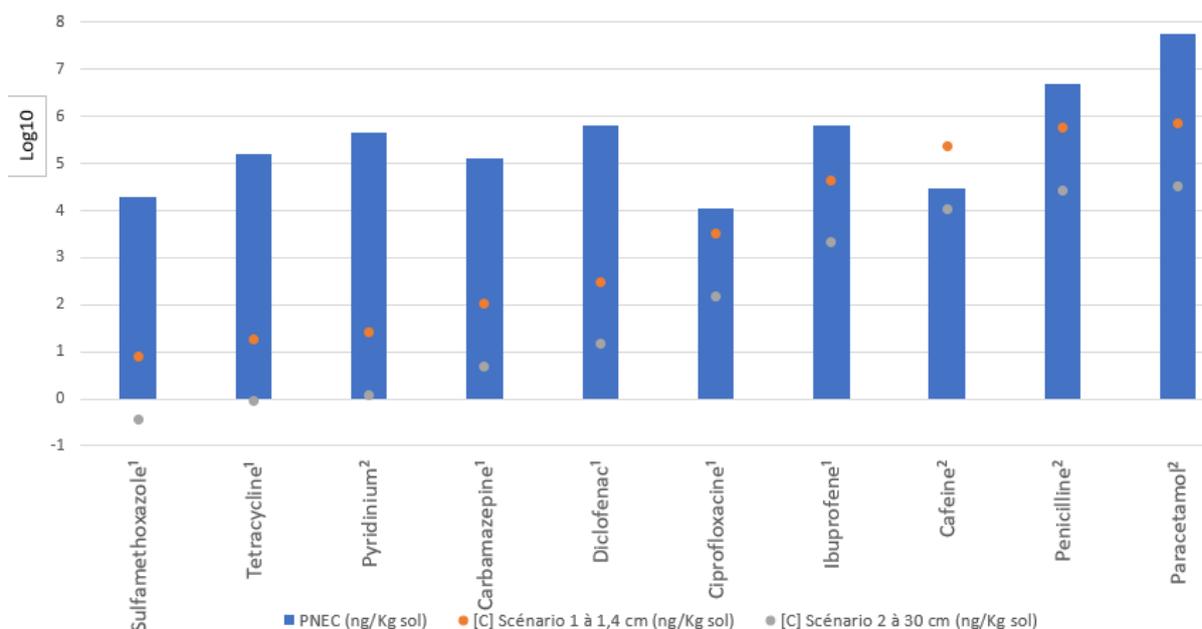


Figure 6: Comparaison d'indésirables et PNEC selon 2 scénarios d'infiltration exprimés en Log base 10 et pour 122 kgN/ha apportés

Par comparaison, seule la caféine semble pouvoir induire des effets néfastes<sup>38</sup> sur les cultures et sur les écosystèmes suite aux épandages réalisés car les points orange et gris encadrent la valeur de la PNEC (barre bleue) en fonction des scénarios. Cependant, au vu des pluviométries réellement mesurées sur la parcelle du démonstrateur Kolos suite aux épandages, le scénario 2 (points gris) est plus représentatif des conditions météorologiques de l'essai avec un effet de dilution. De plus, aucun effet néfaste n'a été observé au champ ce qui est compréhensible car la caféine a été bien plus diluée que les valeurs prises pour hypothèse.

La réalisation de cet exercice scénaristique montre que les données écotoxicologiques à disposition manquent pour établir des référentiels pour les 33 molécules identifiées sur les 35 mesurées. De plus, les seuils de toxicité des molécules sont généralement issus d'essais de toxicité chronique, réalisés selon des méthodologies différentes. Il est donc difficile de pouvoir les utiliser sans passer par des modifications d'unités qui nécessitent des approximations. Il conviendrait de construire une base de données, référençant les PNEC et caractéristiques des différents indésirables des urino-fertilisants pour disposer d'un référentiel spécifique d'évaluation des UF concernant les indésirables.

### Comparaison avec des limites maximales de résidus dans l'alimentation

Avant de mettre sur le marché des produits alimentaires le ministère de l'agriculture et de l'alimentation fixe des limites maximales de résidus (LMR) autorisés dans ou sur les denrées alimentaires. C'est le cas par exemple pour la viande et le lait mais aussi les fruits et légumes. Il est proposé ici de comparer<sup>39</sup> les indicateurs disponibles de ces LMR aux substances mesurées dans le lisain de Kolos. Attention, cette comparaison vise surtout à donner des ordres de grandeur mais n'est pas applicable pour évaluer la nocivité du lisain de Kolos. En effet, les LMR sont utilisées pour des denrées consommées ou ingérées par les humains alors que le lisain est épandu sur les champs.

<sup>38</sup> La caféine peut avoir un effet antigerminatif.

<sup>39</sup> Sur une idée de Robert Cossette

Pour cela, on se base sur le règlement européen N° 281 /96<sup>40</sup>, traduit par l'ANSES<sup>41</sup> et qui encadrant la présence des résidus dans les denrées alimentaires via la définition de LMR. Le règlement européen (CE) n° 396/2005 harmonise au niveau communautaire les LMR des pesticides autorisés dans les produits d'origine animale ou végétale destinés à la consommation humaine ou animale. Il existe une LMR définie pour beaucoup de couples « denrée - substance active »<sup>42</sup> celles-ci varient entre 1 et 20 000 µg/kg. Pour les autres, il y a une LMR moyenne à ne pas dépasser qui est fixée à 0,01 mg de substance par kilogramme de denrée fraîche. Dans le cas du lisain de Kolos (qui va être épandu sur un sol et non pas consommé) quelques substances (9) sur les 33 identifiées dépassent cette norme générique (cf. Tableau 4, les 19 substances présentes dans le lisain et qui n'apparaissent pas dans ce tableau ont des concentrations inférieures à 0,001mg/L).

Tableau 4: Substances présentes dans le lisain de Kolos (en masse)

	mg/L
Diclofenac	0,0012
Amisulpride	0,0016
Lidocaine	0,0017
Citalopram	0,0041
Amoxicilline	0,0055
Ciprofloxacine	0,0129
Naproxene	0,0214
Saluamine	0,0649
Ketoprofene	0,0849
Ibuprofene	0,1762
Tramadol	0,8410
Cafeine	0,9200
Penicilline	2,3030
Paracetamol	2,8592
<b>Total</b>	<b>7,30</b>

Bien que le lisain soit épandu sur le sol et non consommé, on observe des ordres de grandeur pour la majorité des molécules en dessous du seuil générique de LMR. A titre d'exemple et pour les couples disponibles « lait de vache – substance présente dans le lisain », la Figure 7 met en relation les seuils identifiés. Seules trois substances sont au-dessus des LMR : le diclofénac (anti-inflammatoire), l'amoxicilline (antibiotique) et la pénicilline (antibiotique).

<sup>40</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996R0281&from=EN>

<sup>41</sup> <https://www.anses.fr/fr/system/files/RegLMR.pdf>

<sup>42</sup> La liste des couples « denrée-substance » avec sa LMR associée et actualisée en 2024 est disponible ici : <https://www.anses.fr/fr/content/limites-maximales-de-residus-lmr-de-medicaments-veterinaires>

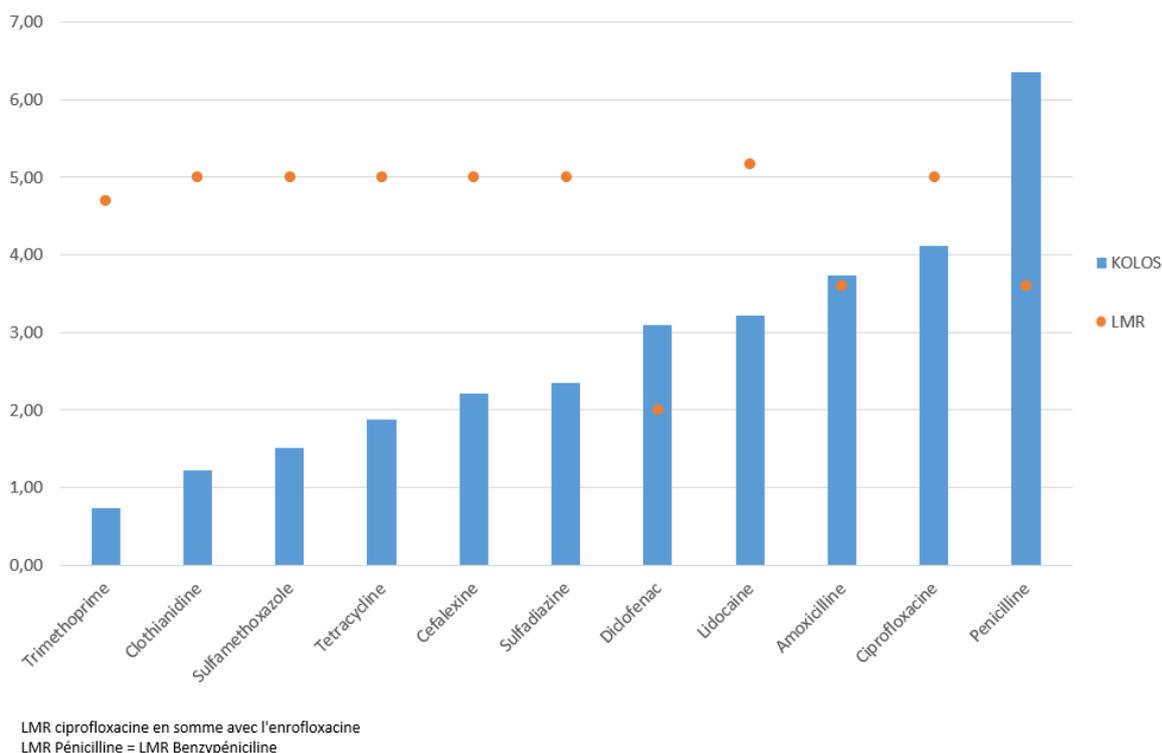


Figure 7: Concentrations en substances du lisain de Kolos comparées aux LMR du lait de vache (ng/L, log base 10)

Les résultats de la Figure 7 et du tableau 4 peuvent paraître contradictoires, il convient de souligner que les LMR sont fonction d'un couple « denrée-substance » car certaines molécules sont plus ou moins aptes à la mobilité ou au stockage dans le tissu de la denrée. Ce tableau et cette figure montrent que pour tramadol, caféine, pénicilline, paracétamol et amoxicilline ou diclofénac les concentrations sont supérieures aux LMR recommandés. Une fois de plus, les LMR ne peuvent pas être utilisées pour évaluer la toxicité du lisain qui n'a pas vocation à être ingéré !

### Comparaison avec de l'eau d'irrigation de surface

En agriculture, y compris biologique, il est possible d'irriguer ses terres avec de l'eau de surface (rivières, lacs, etc.) correspondant à 60 % environ des prélèvements agricoles contre 40 % pour les eaux souterraines (nappes profondes ou nappes alluviales). En 2020, les quantités d'eau moyennes utilisées varient fortement selon les territoires, s'échelonnant entre 40 m<sup>3</sup>/ha irrigués en Meurthe-et-Moselle à plus de 9 700 m<sup>3</sup>/ha irrigués dans les Pyrénées-Orientales (Pages et Sandrine Parisse, 2024) avec une moyenne à 1 900 m<sup>3</sup>/ha en 2020.

La question de la contamination de ces eaux utilisées en agriculture se pose au même titre qu'une fertilisation avec du lisain. Shangbo Zhou et ses collègues (2019) font une revue de concentrations de substances médicamenteuses dans les rivières d'Europe. Les résultats sont comparés aux substances que l'on a retrouvé dans le lisain de Kolos (Tableau 5).

Tableau 5: Comparatif de substances présentes dans le lisain de Kolos et dans les rivières européennes utilisables en agriculture

	En concentration			En apport au champ		
	Kolos	Rivières européennes		Kolos	Rivières européennes irrigation à 1 900 m <sup>3</sup> /ha	
	ng/L	médiane (ng/L)	maximum (ng/L)	168 UN (mg/ha)	médiane (mg/ha)	max. (mg/ha)
Sulfamethoxazole	32	200	11 920	2	380	22 648
Ranitidine	64	34	136	4	65	258
Irbesartan / Telmisartan pour les rivières	70	110	110	5	209	209
Tétracycline / Oxytétracycline pour les rivières	74	101	680	5	192	1 292
Atenolol	380	232	390	27	441	741
Carbamazépine	410	183	11 561	29	348	21 966
Ethinylestradiol	981	10	57	69	19	108
Diclofenac	1 238	247	18 740	87	469	35 606
Citalopram	4 059	45	120	284	86	228
Amoxicilline	5 510	201	622	386	382	1 182
Ciprofloxacine	12 921	657	13 567	904	1 248	25 777
Ibuprofène	176 192	337	31 323	12 333	640	59 514
Tramadol	840 991	1 127	7 731	58 869	2 141	14 689
Caféine	919 986	885	39 813	64 399	1 682	75 645
Paracétamol	2 859 209	515	2 382	200 145	979	4 526
<b>Total</b>	<b>4 822 117</b>	<b>4 884</b>	<b>139 152</b>	<b>337 548</b>	<b>9 280</b>	<b>264 389</b>
<b>Total (toutes molécules)</b>	<b>7,3 mg</b>	<b>0,016 mg</b>	<b>0,236 mg</b>	<b>511 g/ha</b>	<b>30 g/ha</b>	<b>448 g/ha</b>

Le Tableau 5 présente les concentrations médianes et maximales obtenues sachant que l'irrigation a souvent lieu en été, période d'étiage des rivières. Les apports au champ de ces molécules via l'utilisation d'UF par rapport aux eaux d'irrigation sont du même ordre de grandeur, voire nettement inférieurs, pour un grand nombre de molécules et nettement supérieurs, y compris par rapport aux maxima observés en rivières, pour une seule molécule (le paracétamol). On notera également que les eaux d'irrigation apportent des milliers de types d'autres molécules indésirables que les seules substances médicamenteuses ici analysées.

---

## Conclusion

---

L'objectif de cette note est de préciser les incertitudes relatives aux impacts des substances éventuellement présentes dans les urinofertilisants (UF) en agriculture. Pour cela, un exposé succinct des connaissances disponibles autour des indésirables que ce type de fertilisants pourrait contenir est réalisé. Ces connaissances sont ensuite associées à des méthodes d'évaluation, de quantification et de comparaison, en particulier pour le lisain<sup>43</sup> utilisé dans le projet Kolos. Différentes sources d'indésirables actuellement étudiés (pathogènes, inertes, métaux lourds, résidus de médicaments...) sont ainsi abordées.

### Synthèse de l'étude de cas du démonstrateur Kolos

C'est en se plaçant dans un contexte comparatif défavorable avec une grande quantité de lisain (issu d'urine de festival) apportée à l'hectare au regard des pratiques préconisées, que des comparaisons sont émises. Pour autant, les comparaisons réalisées amènent aux constats suivants :

- Le lisain apporté respecte les seuils réglementaires établis dans le projet de socle commun des matières fertilisantes et supports de culture ;
- Il est possible de s'interroger sur les effets des teneurs en sel de table et en caféine de ce lisain même si aucun effet délétère n'a été observé à la parcelle ;
- Seules quelques molécules antidouleurs et anti-inflammatoires sont apportées avec ce lisain en plus grande quantités que les molécules présentes dans des boues d'épuration ou dans les lisiers animaux lorsqu'elles sont recherchées, tout en restant en dessous des concentrations en antibiotiques dans ces deux matières fertilisantes d'origine résiduaire ;
- La totalité de la masse des molécules d'origine pharmaceutique apportées pour une fertilisation avec ce lisain (168 unités d'azote) correspond à 10 à 50 fois moins, en masse, qu'un traitement classique avec un pesticide sur une telle culture ;
- Les niveaux de concentration des résidus de médicaments dans ce lisain sont de l'ordre de grandeur des limites maximales de résidus dans les denrées alimentaires, c'est-à-dire au niveau des concentrations admises pour des aliments destinés à être ingérés par des humains ;
- Irriguer un champ avec des eaux de surface ou le fertiliser avec ce lisain semble apporter des quantités relativement similaires de résidus de médicaments.

Le constat est fait de la présence d'indésirables dans les urines humaines collectées pour ce projet. Nous avons identifié les éléments traces métalliques, les agents pathogènes, les résidus de médicaments et de produits de soins personnels avec les micropolluants, le sel de table, la nicotine ou la caféine. Certains indésirables peuvent avoir des effets d'antibiorésistance et de perturbation endocrinienne. Les résultats obtenus dans le démonstrateur Kolos sont le signe d'une contamination ambiante. On retrouve effectivement les composés chimiques qui imprègnent notre monde dans nos corps et donc, dans nos excréments. Les données collectées comparées à d'autres pratiques agricoles de fertilisation, d'irrigation ou de traitements phytosanitaires ne semblent à première vue pas apporter de contaminations supplémentaires de manière significative.

---

<sup>43</sup> Urine humaine brute traitée par stockage, permettant l'utilisation comme engrais après hygiénisation (OMS, 2012).

Nous constatons aussi qu'il apparaît difficile d'établir des seuils à partir desquels les molécules ou gènes d'antibiorésistance ont un effet néfaste (seules ou en cocktail<sup>44</sup>). Cette situation souligne l'absence de risque zéro d'autant qu'il apparaît impossible de traiter 100 % des molécules présentes tout en conservant les nutriments des urinofertilisants. Comme pour toute matière fertilisante, il convient donc d'opérer un arbitrage entre les indésirables admis dans un urinofertilisant et la proportion de nutriments retournés au sol. **Pour un urinofertilisant comme le lisain, dont le traitement ne cible que les pathogènes, il semble peu probable que les indésirables apportés engendrent un risque significativement plus élevé que les autres pratiques associées à des intrants agricoles.**

### De l'intérêt d'une gestion à la source des contaminants...

L'objectif est ici de témoigner au mieux de l'état des connaissances dont nous disposons aujourd'hui sur un sujet qui sera éminemment évolutif dans les années à venir. Notre question est liée à l'organisation des sociétés industrielles, via la production et la diffusion d'une grande diversité de molécules potentiellement toxiques, ainsi qu'un mode de vie favorisant la présence d'indésirables dans les urines<sup>45</sup>. Il n'est pas envisageable qu'il n'y ait pas d'indésirable dans l'urine humaine mais il existe de très grandes marges de manœuvre sur la nature et la quantité de ces indésirables en fonction de l'organisation générale d'une société. La situation française est aujourd'hui celle d'une contamination généralisée des systèmes alimentation/excrétion par une très grande variété de molécules.

Les processus de dégradation des molécules dans les sols et leurs effets restent majoritairement méconnus, peu étudiés et génèrent parfois de nombreuses et nouvelles molécules complexes (des métabolites) qui elles aussi peuvent être inconnues. Toutefois, il y a de plus en plus l'objectif de rechercher et réduire les substances dangereuses dans l'environnement. Par exemple, des traitements quaternaires vont être imposés aux plus grandes stations d'épuration dans le cadre de la nouvelle directive européenne sur le traitement des eaux résiduaires urbaines (DERU) adoptée à l'automne 2024 (Le parlement européen 2024). Ces solutions dites « en bout de tuyau » (qui ne concernent que les eaux rejetées dans le milieu naturel et pas les boues de stations d'épuration épandues aux champs) se développent en parallèle de mises sur le marché de nouvelles substances toujours plus nombreuses. Nous nous situons ainsi dans un contexte où les actions de prévention à la source de la mise en circulation de substances dangereuses sont encore largement défailtantes (Oertel *et al.*, 2018).

Ainsi, un résultat de cette note est d'insister sur la nécessité d'une approche systémique de gestion des urines mais aussi des indésirables. Dans cette perspective, il conviendrait d'arrêter l'introduction de molécules nocives dans les chaînes de production alimentaire et biens de consommations plutôt que d'essayer de les identifier, d'en caractériser les impacts puis de les bannir le cas échéant une fois qu'elles sont diffusées dans l'environnement. De fait, déployer une politique à la source sur les molécules indésirables pourrait permettre de maîtriser les enjeux de leur devenir dans les différents compartiments environnementaux. Le même constat est valable, en partie, pour certaines substances médicamenteuses : leur présence dans les urines humaines signale entre autres que certains problèmes de santé, non résolus de façon préventive, sont sources de traitements curatifs avec une consommation de médicaments dont l'on retrouve certaines molécules dans les urines.

Cette note invite donc à renforcer notablement les politiques de gestion à la source des indésirables. Les co-bénéfices en seraient très importants, pour le retour au sol des excréments comme pour toute autre pratique touchant aux systèmes alimentation/excrétion, ainsi que pour la santé humaine.

---

<sup>44</sup> L'effet cocktail correspond à la toxicité d'un mélange de molécules qu'il devient difficile d'évaluer.

<sup>45</sup> Notons que dans les sociétés plus faiblement industrialisées, il est probable qu'il y ait moins d'indésirables dans les urines humaines du fait d'un moindre contact avec des sources de contaminations.

## Perspectives

Les indésirables analysés que l'on retrouve en plus grandes quantités dans les urinofertilisants sont la caféine, le sel de table, le paracétamol, l'ibuprofène et des antibiotiques comme l'amoxicilline. Quoiqu'en quantités nettement plus faibles, on retrouve également des traces de l'imprégnation générale de l'environnement en molécules toxiques telles que le cadmium, les PFAS ou les pesticides.

Retenons toutefois que le transfert de ces molécules dans les productions végétales comestibles est faible. En multipliant les comparaisons avec les données issues de la réglementation des matières fertilisantes et supports de cultures, des pesticides épandus, des molécules présentes dans les eaux d'irrigation ou d'autres matières fertilisantes mais aussi avec les limites maximales de résidus acceptées dans les denrées alimentaires, on se rend compte que les substances contenues dans nos urines ne semblent pas apporter de contaminations présentant un risque significativement plus élevé. La majorité de ces molécules est dégradée biologiquement et le reste est soit stocké sous forme de résidus dans le sol soit lessivé. **Les incertitudes qui demeurent incitent à insister sur le fait que le choix du recours à des urinofertilisants ne peut pas se réduire à la présence/absence de certaines molécules dont les impacts sont encore aujourd'hui difficilement quantifiables.**

Cette note n'a pas pour objectif d'être rassurante ou alarmiste à l'excès mais fait le constat que de multiples études seraient à réaliser afin d'alimenter un débat qui reste ouvert au regard des connaissances actuelles. **Si évaluer les effets de ces indésirables s'avère complexe, il apparaît de surcroît nécessaire de toujours coupler cette analyse avec celle du devenir de ces indésirables dans la gestion conventionnelle des urines et avec l'analyse des raisons fondamentales qui induisent la présence de ces indésirables dans les urinofertilisants.** Il convient donc de regarder les impacts sur la santé humaine et des écosystèmes<sup>46</sup> de l'ingestion et de la production de ces substances et d'envisager une gestion à la source de ces indésirables. Dès lors, deux questions beaucoup plus générales émergent :

- L'utilisation de l'urine en agriculture reconnecte l'excrétion humaine avec l'ensemble du système alimentaire dont elle est inséparable. Quelle(s) contamination(s) des systèmes alimentation/excrétion considère-t-on comme admissible au regard des incertitudes, des bénéfices, des alternatives ou des risques associés ?
- Sachant que les urines humaines contiennent à la fois les nutriments liés à notre alimentation et les indésirables liés à nos modes de vie, quel(s) mode(s) de gestion de ce fluide convient-il de mettre en œuvre ?

---

<sup>46</sup> Ce sujet doit être replacé dans une approche « Une seule santé » entre humains, animaux et environnement.

---

## Bibliographie

---

- Abraham, Klaus, Helena Mertens, Lennart Richter, *et al.*, 2024. « Kinetics of 15 Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) after Single Oral Application as a Mixture – A Pilot Investigation in a Male Volunteer ». *Environment International* 193:109047. doi: 10.1016/j.envint.2024.109047.
- Adeel, Muhammad, Xiaoming Song, Yuanyuan Wang, *et al.*, 2017. « Environmental impact of estrogens on human, animal and plant life: A critical review ». *Environment International* 99:107-19. doi: 10.1016/j.envint.2016.12.010.
- Agence Nationale de Sécurité sanitaire, alimentation Environnement, travail, 2012. *Avis relatif au suivi des teneurs en sel des principaux vecteurs entre 2003 et 2011 et simulation des impacts sur les apports en sel de la population française. Avis de l'Anses - Rapport d'expertise*. Saisine n°2012-SA-0052. Maisons-Alfort: Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
- Agence Nationale de Sécurité sanitaire, alimentation Environnement, travail, 2015. *Exposition au cadmium (CAS n°7440-43-9) – Propositions de valeurs toxicologiques de référence (VTR) par ingestion, de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques (sang, urine, ...) et de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales. Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective*. Saisine n°2015-SA-0140. Maisons-Alfort: ANSES.
- Agence Nationale de Sécurité sanitaire, alimentation Environnement, travail, 2020. *Antibiorésistance et environnement : État et causes possibles de la contamination des milieux en France par les antibiotiques, les bactéries résistantes aux antibiotiques et les supports génétiques de la résistance aux antibiotiques. Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective*. Saisine n°2016-SA-0252. Maisons-Alfort: ANSES.
- Agence Nationale de Sécurité sanitaire, alimentation Environnement, travail, 2022. *Note d'appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif au recensement de valeurs de référence (VR) pour l'eau de boisson existantes pour les 20 PFAS listés dans la directive 2020/2184. Note*. Saisine n°2022-SA-0198a. Maisons-Alfort: Agence Nationale de Sécurité sanitaire, alimentation Environnement, travail.
- Blanchoud, Hélène. 2011. *Les pesticides dans le bassin de la Seine : comprendre les origines et le transfert des pesticides pour en évaluer l'impact sur l'homme et l'environnement*. Nanterre: Agence de l'eau Seine-Normandie.
- Bourdat-Deschamps, Marjolaine, Sabrina Ferhi, Nathalie Bernet, *et al.*, 2017. « Fate and Impacts of Pharmaceuticals and Personal Care Products after Repeated Applications of Organic Waste Products in Long-Term Field Experiments ». *Science of The Total Environment* 607-608:271-80. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.240.
- Brun, Florent, Steve Joncoux, Bernard de Gouvello, *et al.*, 2020. « Vers des filières de valorisation des urines humaines. Le regard des agriculteurs franciliens. » *Etudes rurales* 206:200-220. doi: <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.24043>.
- Bünemann, E. K., M. Reimer, E. Smolders, *et al.*, 2024. « Do Contaminants Compromise the Use of Recycled Nutrients in Organic Agriculture? A Review and Synthesis of Current Knowledge on Contaminant Concentrations, Fate in the Environment and Risk Assessment ». *Science of The Total Environment* 912:168901. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168901.
- Chocat, Bernard. 2014. « Nos médicaments peuvent-ils être dangereux ? »
- Ducatman, Alan, Michael Luster, et Tony Fletcher. 2021. « Perfluoroalkyl substance excretion: Effects of organic anion-inhibiting and resin-binding drugs in a community setting ». *Environmental Toxicology and Pharmacology* 85:103650. doi: 10.1016/j.etap.2021.103650.
- Esculier, Fabien, Sabine Houot, Florent Levavasseur, *et al.*, 2022. *Projet Agrocap: Etude de filières de valorisation agricole d'urinofertilisants - Rapport final*. ADEME.

- Etienne, Noémie. 2024. « Transferts et processus associés aux résidus de médicaments humains et vétérinaires et aux biocides des boues urbaines et des lisiers utilisés comme fertilisants ». phdthesis, INSA de Lyon.
- Fletcher, Tony, Axel Andersson, Ying Li, *et al.*, 2022. « The relative importance of faecal and urinary excretion of PFAS and implications for epidemiological studies ». *ISEE Conference Abstracts* 2022(1). doi: 10.1289/isee.2022.O-OP-024.
- Froger, Claire, Claudy Jolivet, Hélène Budzinski, *et al.*, 2023. « Pesticide Residues in French Soils: Occurrence, Risks, and Persistence ». *Environmental Science & Technology* 57(20):7818-27. doi: 10.1021/acs.est.2c09591.
- Fuchs, Jacques, Sophie Générumont, Sabine Houot, *et al.*, 2014. « Effets agronomiques attendus de l'épandage des Mafor sur les écosystèmes agricoles et forestiers ».
- Gaillard, Lucas, Kévin Bernal, Xavier Coumoul, *et al.*, 2024. « Polluants éternels et contamination humaine : état des lieux et enjeux autour des substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) ». *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 59(6):349-61. doi: 10.1016/j.cnd.2024.10.003.
- Gamet-Payrastré, Laurence, et Céline Lukowicz. 2017. « Les effets des mélanges de pesticides ». *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 52(5):234-38. doi: 10.1016/j.cnd.2017.03.002.
- Gay, Guillaume, et Julien Dalvai. 2014. *Substances « émergentes » dans les boues et composts de boues de stations d'épuration d'eaux usées collectives - Caractérisation et évaluation des risques sanitaires. Rapport final de projet de recherche*. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME, le SYPREA-FNADE, la FP2E, le SIAAP, (Contrat N°1006C0122). INERIS - DRC-14-115758-08437A.
- Gillezeau, Christina, Maaïke Van Gerwen, Rachel M. Shaffer, *et al.*, 2019. « The Evidence of Human Exposure to Glyphosate : A Review ». *Environmental Health* 18(1):2. doi: 10.1186/s12940-018-0435-5.
- Goulas, Anaïs, Marjolaine Deschamps, Sabine Houot, *et al.*, 2020. *Principaux enjeux liés à la présence de micropolluants organiques dans les urinofertilisants (résidus pharmaceutiques, hormonaux et de soins personnels). Rapport de recherche*. Paris: INRAE - Ecosys - ENPC - Leesu.
- Grau, Daniel, Nicole Grau, Quentin Gascuel, *et al.*, 2022. « Quantifiable Urine Glyphosate Levels Detected in 99% of the French Population, with Higher Values in Men, in Younger People, and in Farmers ». *Environmental Science and Pollution Research* 29(22):32882-93. doi: 10.1007/s11356-021-18110-0.
- Häfner, Franziska, Oscar Rodrigo Monzon Diaz, Sarah Tietjen, *et al.*, 2023a. « Recycling fertilizers from human excreta exhibit high nitrogen fertilizer value and result in low uptake of pharmaceutical compounds ». *Frontiers in Environmental Science* 10.
- Houot, Sabine, Marie-Noëlle Pons, Marilys Pradel, *et al.*, 2014. « Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier ».
- Jouany, C., F. Vertès, L. Fourrié, *et al.*, 2023. « Spécificité des besoins de recherche sur la qualité des sols en Agriculture Biologique ». *Etude et Gestion des Sols* (30):97-111.
- Laperche, Dorothee. 2021. « Boues de station d'épuration : les inquiétudes montent autour du futur décret socle ». *Actu-Environnement*, avril 12.
- Le parlement européen. 2024. *Directive du parlement européen et du conseil relative au traitement des eaux résiduaires urbaines (refonte). Directive européenne*. 2024/3019. Bruxelles: Journal officiel de l'Union européenne.
- Lecomte, Vivien. 2012. « Méthode d'évaluation du risque environnemental lié à un polluant ». *Ecotoxicologie.fr*. Consulté 9 juillet 2024 (<https://ecotoxicologie.fr/methode-evaluation-risque-polluant>).
- Levasseur, Pascal, Thierry Morvan, Aurore Toudic, *et al.*, 2019. « Chapitre 4 : Connaître la composition des effluents d'élevage avec précision ». P. 55-66 in *Pratiques d'élevage et environnement : Mesurer, évaluer, agir, Savoir-faire*. Versailles: Editions Quae.

- Maggi, Federico, Fiona H. M. Tang, et Francesco N. Tubiello, 2023. « Agricultural Pesticide Land Budget and River Discharge to Oceans ». *Nature* 620(7976):1013-17. doi: 10.1038/s41586-023-06296-x.
- Martin, Tristan, 2020. « L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable ». phdthesis, Université Paris-Saclay.
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. 2024. *Stratégie Ecophyto 2030. Stratégie nationale*. Gouvernement français.
- Naghavi, Mohsen, Stein Emil Vollset, *et al.*, 2024. « Global Burden of Bacterial Antimicrobial Resistance 1990–2021: A Systematic Analysis with Forecasts to 2050 ». *The Lancet* 404(10459):1199-1226. doi: 10.1016/S0140-6736(24)01867-1.
- Oertel, Angelika, Katrin Maul, Jakob Menz, *et al.*, 2018. « REACH Compliance: Data Availability in REACH Registrations Part 2: Evaluation of Data Waiving and Adaptations for Chemicals  $\geq$  1000 Tpa ». *Umwelt Bundesamt* (64/2018):205.
- Organisation Mondiale pour la Santé, 2012. *Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères - Volume IV Utilisation des excréta et des eaux ménagères en agriculture. Directive*.
- Pages, Emmanuel et Sandrine Parisse, 2024. *L'irrigation des surfaces agricoles : évolution entre 2010 et 2020*. Paris: Ministère de la transition écologique et de la transition des territoires.
- Parisse, Sandrine, 2023. *État des lieux des ventes et des achats de produits phytosanitaires en France en 2021*. Paris: Ministère de la transition écologique et de la transition des territoires.
- Patureau, Dominique, Mathilde Luneau, Nadine Delgenes, *et al.*, 2013. *Evaluation des flux de micropolluants prioritaires et émergents sur les sols via les apports de produits résiduels organiques : efficacité des procédés de traitement et impact potentiel sur les plantes et les écosystèmes aquatiques. Rapport de recherche*. Paris: ONEMA / INRA.
- Ronteltap, Mariska, Max Maurer, et Willi Gujer, 2007. « The Behaviour of Pharmaceuticals and Heavy Metals during Struvite Precipitation in Urine ». *Water Research* 41(9):1859-68. doi: 10.1016/j.watres.2007.01.026.
- Rotchell, Jeanette M., Chloe Austin, Emma Chapman, *et al.*, 2024. « Microplastics in human urine: Characterisation using  $\mu$ FTIR and sampling challenges using healthy donors and endometriosis participants ». *Ecotoxicology and Environmental Safety* 274:116208. doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116208.
- Schinkel, Lena, Pablo A. Lara-Martín, Walter Giger, *et al.*, 2022. « Synthetic Surfactants in Swiss Sewage Sludges: Analytical Challenges, Concentrations and per Capita Loads ». *Science of The Total Environment* 808:151361. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151361.
- Schwabl, Philipp, Sebastian Köppel, Philipp Königshofer, *et al.*, 2019. « Detection of Various Microplastics in Human Stool: A Prospective Case Series ». *Annals of Internal Medicine* 171(7):453-57. doi: 10.7326/M19-0618.
- Secrétariat générale à la planification écologique, 2024. « Agriculture : synthèse de la mise en œuvre du plan ».
- Simha, Prithvi, Cecilia Lalander, Annika Nordin, *et al.*, 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. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139313.
- Simonnet-Laprade, Caroline, 2017. « Ecodynamique des substances poly- et perfluoroalkylées (PFAS) dans les systèmes aquatiques: identification des sources en milieu urbain et évaluation du transfert trophique ». Chimie analytique, Université de Bordeaux.
- Song, Xuan, Tian Chen, Zongwen Chen, *et al.*, 2024. « Micro(nano)plastics in human urine: A surprising contrast between Chongqing's urban and rural regions ». *Science of The Total Environment* 917:170455. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170455.

- Starck, Thomas, 2024. « Vers une gestion circulaire de l'azote et du phosphore dans les excréments humains : état des lieux, potentiel agricole global et contrainte spatiale en France ». Paris-Est, Champs sur marne, France.
- Tedoldi, Damien, 2017. « Mesure et modélisation de la contamination du sol dans les ouvrages de gestion à la source du ruissellement urbain ». Sciences et Techniques de l'Environnement, Paris-Est, Champs sur marne, France.
- Terre et Cité, 2022. *Synthèse - Valorisation des urines humaines en agriculture sur le Plateau de Saclay*. Igny: Terre et Cité.
- Winker, Martina, 2009. *Pharmaceutical Residues in Urine and Potential Risks related to Usage as Fertiliser in Agriculture*.
- Zhou, Shangbo, Carolina Di Paolo, Xinda Wu, *et al.*, 2019. « Optimization of Screening-Level Risk Assessment and Priority Selection of Emerging Pollutants – The Case of Pharmaceuticals in European Surface Waters ». *Environment International* 128:1-10. doi: 10.1016/j.envint.2019.04.034.