

## **Le système alimentation/excrétion de Paris : oscillations passées, présentes et futures entre linéarité et circularité**

Fabien Esculier<sup>1,2\*</sup>, Julia Le Noë<sup>2</sup>, Sabine Barles<sup>3</sup>, Gilles Billen<sup>2</sup>, Benjamin Créno<sup>1</sup>,  
Josette Garnier<sup>2</sup>, Jacques Lesavre<sup>4</sup>, Jean-Pierre Tabuchi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains (LEESU). AgroParisTech, École des Ponts ParisTech (ENPC), Université Paris-Est Marne-la-Vallée (UPEMLV), Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (UPEC). UMR MA-102.

<sup>2</sup> Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols (METIS). École Pratique des Hautes Études (EPHE), CNRS, Université Paris VI Pierre et Marie Curie (UPMC). UMR7619.

<sup>3</sup> Géographie-Cités. CNRS, Université Paris I – Panthéon-Sorbonne, Université Paris VII – Paris Diderot. UMR 8504.

<sup>4</sup> Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN).

<sup>5</sup> Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP).

\* personne à contacter : fabien.esculier@ponts.org.

### ***Résumé***

*Selon la démarche de l'écologie territoriale, nous avons caractérisé le métabolisme de l'agglomération parisienne par une description quantitative des flux d'azote, de phosphore et de carbone associés au système alimentation/excrétion de ses habitants, offrant ainsi une vision systémique de la production agricole et alimentaire, de la production de biodéchets urbains et de la production d'urines et de matières fécales. Cette analyse permet tout d'abord de caractériser l'empreinte environnementale de l'approvisionnement en nourriture de l'agglomération parisienne, en termes de surfaces agricoles et de ressources requises, ainsi que d'émissions polluantes vers l'hydrosystème et l'atmosphère. Elle permet d'autre part de s'interroger sur le degré de circularité de la gestion des excréta humains. Une analyse historique du recyclage des excréta met en évidence la linéarité forte de cette gestion depuis la mise en œuvre du tout à l'égout et l'abandon de l'épandage des eaux usées collectées. Divers scénarios de gestion future des excréta humains, permettant une plus grande circularité, notamment par la collecte sélective des urines, sont envisagés.*

## Introduction :

L'humanité vit désormais à l'ère de l'Anthropocène : les activités anthropiques modifient profondément le fonctionnement du système Terre et mettent en péril l'épanouissement de l'humanité. Parmi les perturbations les plus intenses identifiées figure la modification des flux biogéochimiques d'azote et de phosphore. Pour leur part anthropique, ces flux sont principalement liés à un système que nous nommons alimentation/excrétion et qui correspond, à l'échelle d'un être humain, à l'absorption de nourriture et à l'excrétion d'urine et de matières fécales, et à l'échelle des villes du monde occidental, à l'approvisionnement en denrées provenant des agrosystèmes et aux systèmes de gestion des biodéchets alimentaires et des eaux usées.

L'impact des émissions d'azote et de phosphore issues des systèmes agricoles ou des systèmes de gestion des eaux usées a déjà été largement étudié, en particulier sur le bassin de la Seine dans le cadre du PIREN-Seine. Nous avons cherché à donner une vision globale de ces enjeux en mettant en évidence l'importance du métabolisme des habitants du bassin de la Seine comme élément central. Nous avons ainsi pris l'agglomération parisienne en 2013 comme cas d'étude et avons mis en œuvre une méthodologie d'analyse de flux de substances appliquée à l'azote et au phosphore pour permettre la caractérisation de son système alimentation/excrétion et le calcul de l'empreinte azote et phosphore du métabolisme de ses habitants.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme OCAPI (<https://www.leesu.fr/OCAPI>).

Le programme OCAPI vise à explorer les voies possibles de transition écologique des systèmes d'assainissement urbain dans les pays occidentaux. Il est aujourd'hui clair que l'assainissement doit se concevoir dans une vision intégrée des principaux enjeux auxquels il est confronté : la gestion durable et équilibrée des ressources en eau et la santé publique bien sûr, mais également les consommations d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre et la gestion systémique des nutriments qui intègre ainsi les questions relatives à la production agricole, à l'alimentation et aux biodéchets. Cette vision systémique de l'assainissement doit également prendre en compte les dimensions économiques et sociales de l'assainissement, sa gouvernance et la place de l'utilisateur et des différents acteurs urbains et agricoles dans ce service public. Le programme OCAPI s'intéresse plus particulièrement au cas de l'agglomération parisienne. Alors que la pression polluante de l'agglomération augmente avec la croissance du Grand Paris, le débit de la Seine est amené à baisser sous l'effet du changement climatique. La capacité de l'agglomération parisienne à faire face à cet effet ciseau ne paraît pas garantie avec les modalités actuelles de l'assainissement, en particulier pour permettre l'atteinte puis le maintien du bon état ou du bon potentiel écologique des cours d'eau qui traversent l'agglomération. Le bassin parisien est donc tout particulièrement concerné par les enjeux de la transition écologique de son système d'assainissement.

L'idée maîtresse de cette nouvelle appréhension de l'assainissement consiste à passer d'une logique linéaire de traitement de pollution à une logique circulaire de gestion intégrée des ressources. Cette vision s'est progressivement développée en Europe depuis une vingtaine d'années et un nouveau paradigme prometteur est ainsi apparu dans plusieurs pays, en particulier européens, qui consiste à introduire la séparation à la source des effluents, c'est-à-dire principalement une gestion différenciée des urines et/ou des matières fécales qui suivent alors une autre filière de gestion que le système traditionnel « toilette à chasse d'eau – égout – station d'épuration ». Alors que de multiples programmes de recherche et réalisations ont vu le jour ces vingt dernières années en Europe, la France y est encore peu investie et le programme OCAPI cherche ainsi à renforcer l'implication de la France sur cette vision intégrée de l'assainissement et des ressources carbone, azote et phosphore et sur l'analyse des potentialités offertes par la séparation à la source.

# 1 Une vue d'ensemble du système alimentation/excrétion de l'agglomération parisienne

Selon la démarche de l'écologie territoriale, nous avons caractérisé le métabolisme de l'agglomération parisienne par une description quantitative des flux d'azote associés au système alimentation/excrétion de ses habitants (Figure 1), offrant ainsi une vision systémique de la production agricole et alimentaire, de la production de biodéchets urbains et de la production d'urines et de matières fécales (Esculier et al. J. of Hydrology, in press).

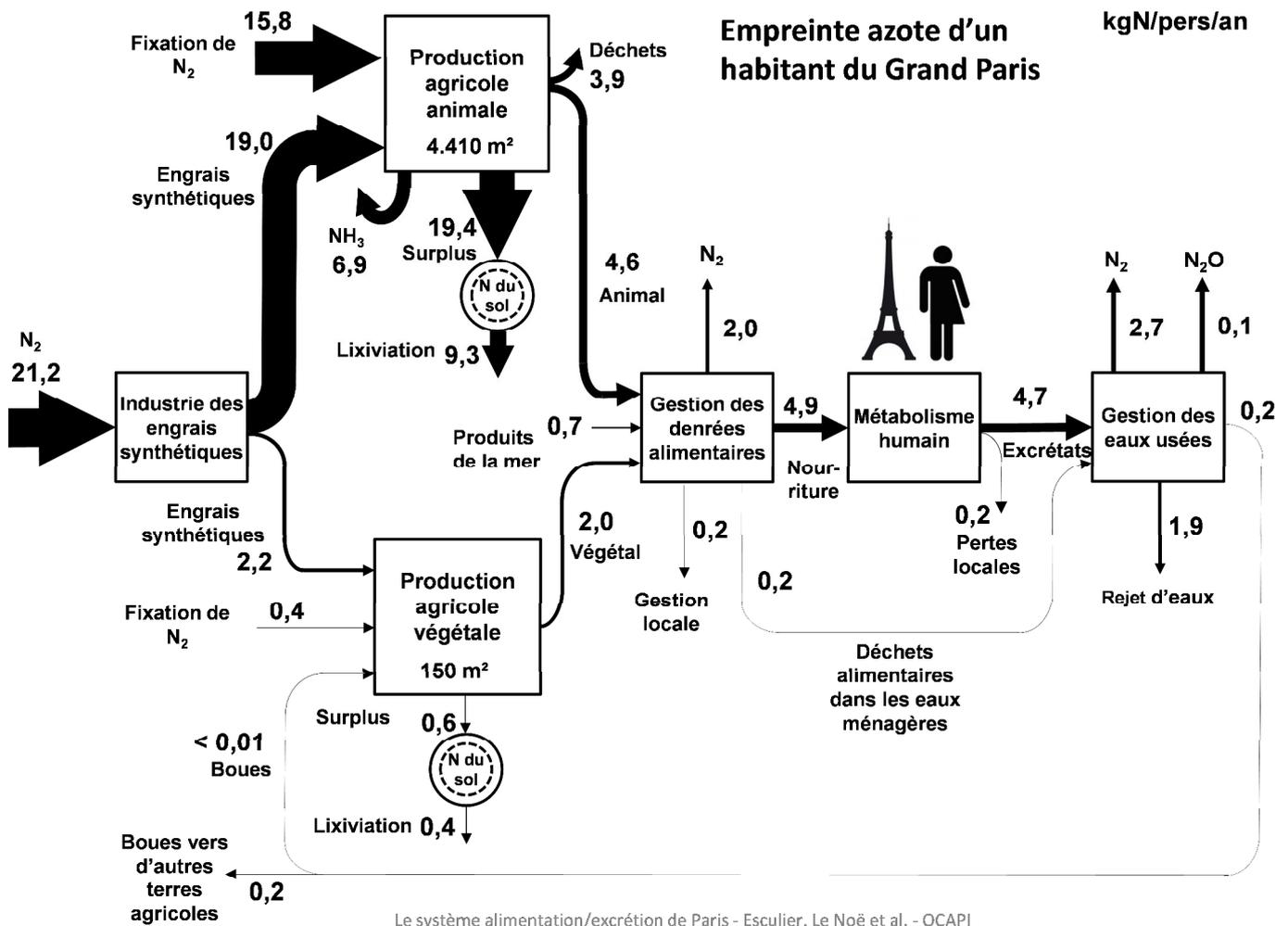


Figure 1. Flux d'azote associés au système alimentation/excrétion des habitants de l'agglomération parisienne en 2013. (flux en kgN/hab/an) (Esculier et al, in press)

## 2 Régime alimentaire et surfaces d'approvisionnement

Le régime alimentaire des habitants de l'agglomération parisienne est constitué pour deux tiers d'azote et de phosphore d'origine animale. Or les systèmes agricoles de production de nourriture d'origine animale alimentant Paris sont beaucoup plus impactants que les systèmes de production végétale. Ainsi, le tiers du régime alimentaire, constitué de produits végétaux, provient majoritairement de 150 m<sup>2</sup> de cultures céréalières du bassin parisien tandis que les systèmes de production animale sont constitués de 500 m<sup>2</sup> de cultures de soja en Amérique du Sud, 2.000 m<sup>2</sup> de prairies (principalement dans le grand est) et 2.000 m<sup>2</sup> de cultures fourragères (principalement dans le grand ouest et le grand est). La représentation graphique comparée de ces empreintes spatiales est particulièrement frappante (Fig. 2)

L'utilisation majoritaire d'engrais chimiques d'azotés induit une consommation totale de 21 kg d'azote par personne et par an, à 90% destinés à la production animale, pour seulement 5 kg d'azote réellement ingéré par habitant au final.

L'empreinte environnementale mesurée en termes de flux polluants d'azote est également très contrastée : 0,4 kg d'azote par personne et par an pour les systèmes de production végétale (principalement sous forme de nitrates lessivés vers l'hydrosystème) contre plus de 17 kg d'azote par personne et par an pour les systèmes de production animale (principalement nitrates et émissions gazeuses d'ammoniac). Ces impacts sont désormais presque tous externalisés c'est-à-dire que les impacts environnementaux de l'empreinte biogéochimique du métabolisme des parisiens ont des retombées directes très faibles sur le territoire même de l'agglomération parisienne et se situent à d'autres échelles que celle du territoire urbain (export de nutriments vers les nappes ou vers les rivières et la mer, émissions d'ammoniac sur les territoires agricoles, émissions de gaz contribuant à l'effet de serre au niveau mondial, etc.). Cette externalisation rend difficile l'appréhension, pour le citoyen, de son empreinte environnementale.

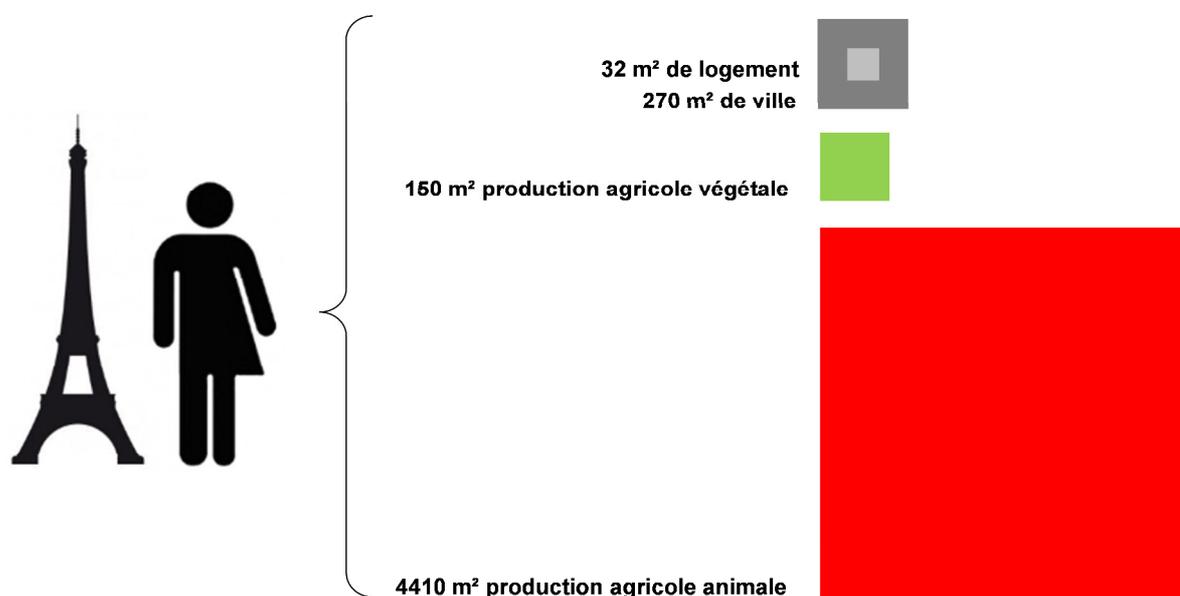


Figure 2. Surfaces associées à la production des flux alimentaires d'un habitant de l'agglomération parisienne en 2012, comparées à la surface moyenne d'habitation et de milieu urbain.

### 3 Devenir des excréta humains

De l'autre côté du système alimentation/excrétion, le triptyque toilette à chasse d'eau – égout – station d'épuration induit une pollution comparativement limitée (1,9 kg d'azote par personne et par an rejetés en rivière et 0,1 kg dans l'atmosphère sous forme de  $N_2O$ ) mais une linéarité très forte pour l'azote (5% de recyclage) et assez marquée pour le phosphore (40% de recyclage).

Nous avons plus particulièrement examiné les modalités de gestion des urines et matières fécales de l'agglomération parisienne en les resituant dans une perspective historique. Toutes les sociétés humaines sont confrontées à 2 enjeux, souvent antagonistes, vis-à-vis des urines et matières fécales : (i) la salubrité, en empêchant les transmissions de maladies oro-fécales et (ii) la circularité, en augmentant la fertilité des sols avec les nutriments provenant essentiellement des urines. Nous avons donc analysé l'histoire de Paris suivant la circularité de la gestion de ses excréta (Fig. 3).

Si dans une période ancienne, la faible population urbaine permettait sans problème de salubrité majeure d'évacuer les excréta humains directement vers la rivière (période salubre et linéaire), cette pratique est

devenue cause de problèmes de santé publique avec l'augmentation de la population urbaine. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, la production d'engrais à partir des vidanges de fosses d'aisance a entraîné une circularité qui culmine, dans les premières années du XX<sup>ème</sup> siècle, avec l'adjonction de l'épandage des eaux usées brutes pour les premiers habitants connectés au tout à l'égout et mène Paris aux alentours de 50% de recyclage de l'azote des excréta humains. La conjonction d'un approvisionnement en eau potable non contaminée par les matières fécales a permis l'émergence d'une courte période à la fois circulaire et salubre. Celle-ci se termine dans les années 60 avec les rejets directs d'eaux usées et l'épuration (retour à une période salubre et linéaire). La captation du phosphore dans les boues de station d'épuration permet aujourd'hui le retour d'une certaine circularité mais l'incinération de la moitié d'entre elles n'aboutit qu'à 40% de recyclage du phosphore, contre environ 70% au début du XX<sup>ème</sup> siècle, et une linéarité quasiment totale sur l'azote, le potassium et la plupart des autres nutriments.

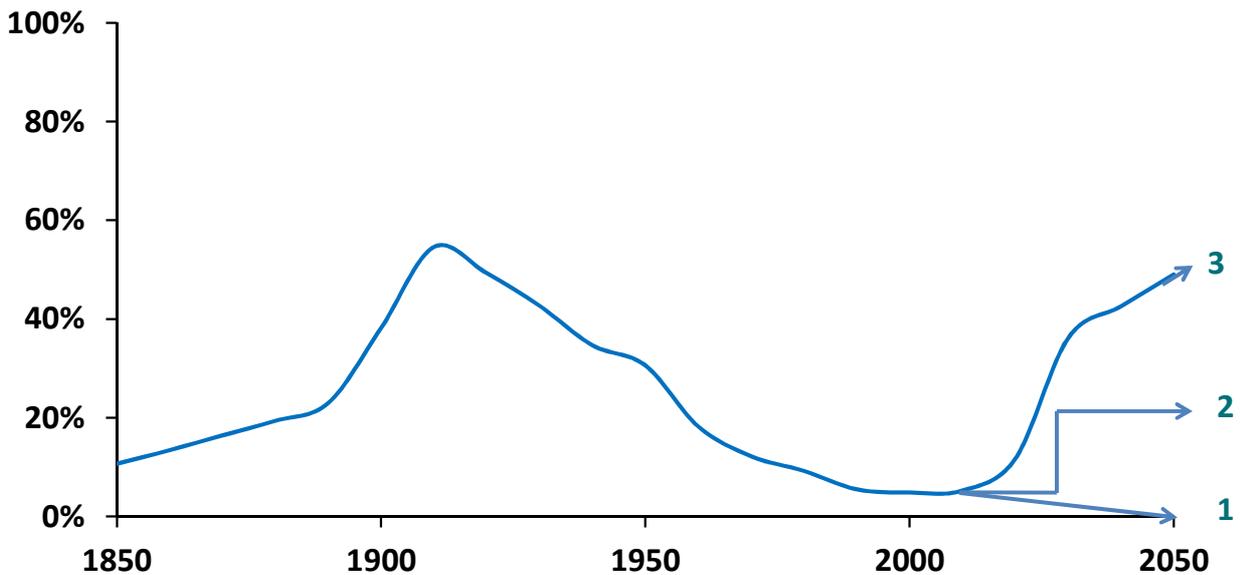


Figure 3. Taux de recyclage de l'azote des urines et matières fécales de l'agglomération parisienne depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, et pour 3 scénarios futurs : (1) scénario linéaire avec incinération ; (2) Scénario avec concentration des digestats ; (3) scénario (2) + séparation à la source et collecte des urines.

Quelles seront les modalités de gestion des urines et matières fécales de l'agglomération parisienne à l'avenir ? En restant dans le paradigme actuel du tout-à-l'égout, le développement de l'incinération augmenterait encore la linéarité de son système alimentation/excrétion, comme aujourd'hui Marseille ou Strasbourg presque totalement linéaires. Trois voies principales d'évolution semblent actuellement envisagées au niveau des stations d'épuration pour améliorer la circularité : l'épandage des boues, l'extraction de phosphore des cendres en cas d'incinération et la concentration des nutriments dans les flux déjà concentrés comme les digestats liquides. Mais la circularité restera nécessairement très limitée pour l'azote dans les stations utilisant la dénitrification. En complément, une politique de développement soutenu de la séparation à la source des urines (éventuellement conjointe avec les matières fécales) pourrait permettre de retrouver, en 2050, les taux de circularité de l'azote du début du XX<sup>ème</sup> siècle. Les techniques de séparation à la source sont encore en phase d'émergence mais bénéficient de 20 ans de retour d'expérience à l'étranger qui montrent qu'elles peuvent permettre également de répondre à d'autres enjeux comme la réduction des gaz à effet de serre, une adaptation plus fine des techniques en fonction des typologies urbaines locales, le développement de nouvelles filières économiques créatrices d'emplois locaux ou le développement d'un mutualisme ville-campagne entre l'agglomération parisienne et les agrosystèmes qui l'entourent.

L'analyse des expériences de séparation à la source des urines (et matières fécales) réalisées dans des contextes similaires ou transposables à ceux de l'agglomération parisienne dans divers pays d'Europe fait apparaître principalement deux grands types de gestion :

- 1) Par séparation à la source des urines et des matières fécales, gérées conjointement ;
- 2) Par séparation à la source exclusive des urines, les fèces étant gérées avec les eaux usées ;

Le premier type est aujourd'hui principalement représenté en Europe par deux alternatives, l'une high-tech et l'autre low-tech. L'alternative high-tech est représentée par les quartiers ayant mis en place des toilettes sous-vide traitées séparément des autres eaux usées. Leur circularité reste partielle dans les différents exemples analysés mais ils présentent un certain nombre d'avantages (traitement conjoint des biodéchets, création de produits tels que biométhane et struvite, etc.) et sont actuellement souvent proposés lors de la construction de nouveaux quartiers urbains européens, comme celui de Noorderhoek à Sneek, Frise, Pays-Bas. L'alternative low-tech est majoritairement représentée en France par le Réseau de l'Assainissement Ecologique qui prône le compost comme modalité de gestion des urines et matières fécales. Cette alternative, initialement surtout mise en œuvre pour des festivals ou des sites isolés tels que des gîtes de montagne ou des parcs, se développe de plus en plus aujourd'hui dans des habitations individuelles, des locaux de travail, des écoles, des toilettes publiques, etc. De plus en plus, un gradient complet de solutions du low-tech au high-tech apparaît, poussé entre autres par la recherche de solutions pour les pays en développement.

Le second type fait l'objet de nombreuses réalisations et recherches, particulièrement en Suède, pays pionnier dans l'installation en Europe de quartiers à séparation à la source de l'urine. Du fait de son potentiel bien adapté aux enjeux de l'agglomération parisienne tel que précédemment mis en exergue (Caby 2013), la séparation à la source des urines est plus particulièrement étudiée dans le programme OCAPI et fait ainsi l'objet de plusieurs opérations pilotes et études spécifiques. Ici aussi, il existe tout un gradient de solutions du low-tech au high-tech. Les évaluations du bilan environnemental de la séparation à la source de l'urine sont très nombreuses et concluent presque toutes à un bilan positif en faveur de la séparation à la source de l'urine (Jönsson, 2016).

La transition de régime de gestion des urines et/ou des matières fécales de l'agglomération parisienne vers l'un des systèmes mentionnés précédemment doit avant tout prendre en compte le verrouillage du système socio-technique actuel dû au quasi-monopole du système « toilette à chasse d'eau – égout – station d'épuration à boues activées ». En effet, alors que Paris a pu connaître des phases de cohabitation de différents systèmes de gestion des urines et matières<sup>1</sup>, les 123 années qui se sont écoulées depuis l'entrée en vigueur de la loi de 1894 sur le tout à l'égout ont consolidé les pratiques autour de ce modèle dominant. Le réseau d'acteurs, le corpus réglementaire, le modèle économique, les cultures professionnelles, le rapport culturel à nos déjections, les savoir-faire, etc. : tout ce qui caractérise notre régime socio-technique actuel de gestion des urines et matières fécales s'est progressivement auto-renforcé autour de ce paradigme. Ce verrouillage est d'autant plus fort que l'assainissement repose sur un important patrimoine infrastructurel en réseau. Et il s'est accompagné d'une réduction des champs du débat. Alors que le débat parisien de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle se concentre sur la meilleure manière possible de gérer les urines et matières fécales, le choix du tout à l'égout restreint le débat du début du XX<sup>ème</sup> siècle à la manière de gérer les eaux d'égout. Puis la station d'épuration à boues activées restreint le débat au devenir des boues jusqu'à ce que, dans des pays comme la Suisse, où l'épandage agricole des boues est interdit, le débat se restreigne au devenir des cendres d'incinération de boues.

---

<sup>1</sup> En 1893, un an avant l'adoption de la loi tout à l'égout, coexistent à Paris quatre modalités de gestion des urines et matières fécales : la fosse d'aisance fixe (51%), la tinette filtrante (27%), la fosse d'aisance mobile (13%) et l'écoulement direct à l'égout (9%) (d'après Jacquemet, 1979).

## 4 Conclusion

Le programme OCAPAPI rouvre ainsi des champs de débat quasiment disparus depuis un siècle. On constate alors qu'il n'y aurait pas un système alternatif, érigé en exemple et qui s'opposerait au modèle actuel, mais une pluralité de systèmes alternatifs, aux contraintes et aux contextes d'application différents les uns des autres, parfois plus complémentaires qu'opposés au modèle actuel. La transition d'un régime socio-écologique linéaire à un régime circulaire pourrait donc plus probablement se faire par la combinaison d'une évolution des stations d'épuration (évolution déjà en cours comme en témoigne le déploiement actuel de la méthanisation) et de la mise en œuvre de divers systèmes d'assainissement décentralisés et séparatifs adaptés aux contextes locaux. Le couplage de ces systèmes d'assainissement avec le développement d'autres formes de fertilisation des terres agricoles, et plus généralement avec d'autres formes de systèmes de production agricoles, plus connectés avec l'élevage et avec les besoins locaux d'approvisionnement des villes, doit faire partie des réflexions sur cette transition.

Par ailleurs, on notera que le verrouillage socio-technique actuel de l'assainissement, comme celui qui s'observe en faveur des systèmes de production agricole très dépendants des intrants industriels, se traduit également par autant de niches d'opportunité pour les acteurs désireux de proposer des techniques alternatives. Leur positionnement précurseur sur certains marchés de niche pourrait leur conférer une position avantageuse en cas de diffusion de ces innovations. L'engouement de ces dernières années pour favoriser le développement d'une économie circulaire et proposer des modèles innovants rend la période actuelle particulièrement propice à l'émergence de ces initiatives.

## Bibliographie

Besson, M. 2015. *Etude des réalisations internationales et simulation d'un scénario de séparation à la source*. Rapport de fin d'études d'Ingénieur en génie des procédés. INSA Toulouse.

Caby, A. 2013. *Quel intérêt et quelle opportunité de mettre en place une collecte sélective des urines en milieu urbain dense ? Etude sur le territoire du SIAAP*. Mémoire de mastère spécialisé. Ecole des Ponts ParisTech, AgroParisTech, SIAAP.

Esculier, F, Le Noë, J, Barles, S, Billen, G, Creno, B, Garnier, J, Lesavre, J, Petit L, Tabuchi JP (in press). The biogeochemical imprint of human metabolism in Paris Megacity: a regionalized analysis of a water-agro-food system. *J. of Hydrol.* (in press)

Fischer-Kowalski, Marina, Haberl, H. 2007, *Socioecological Transitions and GlobalChange: Trajectories of Social Metabolism and Land Use*, Cheltenham, Edward Elgar.

Jacquemet, Gérard. 1979. *Urbanisme parisien : la bataille du tout-à-l'égout à la fin du XIXe siècle*. *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, vol. 26-4, no. 4, 1979, pp. 505-548.

Jönsson, Håkan. 2016. *Meta-analysis of evaluations of source separating scenarios*. Presentation to OCAPAPI project during study trip. Uppsala, Sewden.

Larsen, Tove A., Kai M. Udert, et Judit Lienert (ed.) 2013. *Source Separation and Decentralization for Wastewater Management*. IWA Publishing.

MUSES, 2017. *La séparation à la source des effluents urbains : Intérêts et mise en pratique en Europe*. Projet MUSES, Modélisation Urbaine de Séparation des Effluents à la Source. Document de synthèse.

SuSanA. Sustainable Sanitation Alliance. Etudes de cas disponibles sur : <http://www.susana.org/fr/ressources/etudes-de-cas>