

Évaluation de filières passées ou existantes de séparation à la source de l'urine

Les mises en œuvre de séparation à la source de l'urine que nous avons brièvement présentées dans la quatrième partie montrent une imbrication de multiples facteurs qui influent sur l'effectivité de la réalisation d'une séparation à la source et d'une valorisation d'urines ainsi que sur le bilan environnemental, économique ou social de telles opérations. En outre, les modalités pratiques de mise en œuvre de projets de séparation à la source de l'urine et leur succès dépendront de multiples facteurs : l'échelle de réalisation des projets, les caractéristiques des bâtiments et des populations concernées (densité, quartier résidentiel ou tertiaire, caractéristiques socio-démographiques des populations, degré d'engagement bénévole des habitants, etc.), le soutien de la démarche par les acteurs de régulation publics, le modèle économique mis en place, etc.

À travers la très grande variété possible de chaînes de gestion de l'urine, nous constatons que les chaînes complètes circulaires bénéficient de retours d'expérience en nombre assez restreint et que beaucoup de chaînes sont encore à un stade précoce de recherche et développement. Leur évaluation en est rendue d'autant plus délicate que les chaînes complètes de valorisation d'urine présentent à chaque fois des particularités locales de mise en œuvre dont on peut légitimement questionner les possibilités de généralisation. Elles sont toutefois déjà riches en enseignements et les nombreux travaux de recherche réalisés à leur sujet ainsi que le retour que nous avons pu en avoir par notre démarche de recherche-action et nos évaluations complémentaires permettent déjà de profiter d'une certaine maturité du sujet. Comme l'indique Tove Larsen, la conjoncture actuelle est beaucoup plus favorable que lors de l'engouement initial suédois pour la séparation à la source car les projets qui sont lancés aujourd'hui peuvent bénéficier de plus de vingt ans de retour d'expérience en Europe (Larsen, 2017).

Dans ce chapitre, nous allons dresser un rapide bilan du retour d'expérience que l'on peut tirer des réalisations de séparation à la source de l'urine en Europe depuis vingt ans.

5.1.1. Bilan des réalisations suédoises : engagement citoyen et volonté politique

Les premiers projets suédois de séparation à la source de l'urine ont rencontré de nombreuses difficultés dans leur mise en œuvre et ont essuyé les plâtres du déploiement très rapide de nouvelles techniques pour lesquelles personne ne disposait de retour d'expérience. En effet, nous avons montré à

la section 4.1.2 en quoi la Suède a connu un engouement pour la séparation à la source de l'urine au début des années quatre-vingt-dix. Les premiers projets de recherche visant à accompagner ces développements et à fournir des recommandations pour la mise en œuvre de la séparation à la source de l'urine ont commencé à la fin des années quatre-vingt-dix et ont rendu leurs conclusions au début des années deux mille dont

- un rapport porté, entre autres, par la Compagnie des Eaux de Stockholm²⁴⁶ en 2000 (Johansson *et al.*, 2000) ;
- un rapport porté, entre autres, par le Conseil pour la Recherche en Construction²⁴⁷ en 2000 également (Jönsson *et al.*, 2000).

Or un grand nombre d'initiatives ont été lancées dans les années quatre-vingt-dix, sans pouvoir bénéficier de ces travaux et sans nécessairement mesurer pleinement les contraintes et les limites du déploiement de la séparation à la source de l'urine. En particulier, de nombreuses initiatives ont été lancées par des sociétés immobilières dans une logique de verdissement de leur offre et elles ont pris en charge la construction de systèmes de séparation, collecte et stockage d'urine au niveau du bâtiment (Vinnerås & Jönsson, 2013). Mais les modalités de répartition des responsabilités, des financements et des tâches pour faire fonctionner ces nouvelles chaînes de gestion de l'urine dans leur entier (c'est-à-dire au niveau du bâtiment déjà, mais également dans les maillons complémentaires « transport », « traitement » et « usage final ») n'ont souvent pas été définies à l'avance. En particulier, les collectivités locales n'ont souvent pas été impliquées pour le transport ou la valorisation future de cette urine. Personne n'a ainsi pris la responsabilité de porter et d'organiser la chaîne au-delà du maillon « stockage ». Les urines n'ont donc pas été utilisées et la maintenance complémentaire nécessaire pour l'entretien des toilettes et des tuyaux de collecte d'urine, encore mal connue à l'époque en outre, a représenté une contrainte dont l'unique contrepartie était l'éventuelle économie d'eau de chasse et qui s'est avérée trop faible pour justifier les efforts complémentaires nécessaires. Dans la majorité de ces projets où l'urine n'était pas valorisée, les toilettes ont été changées pour des toilettes conventionnelles unitaires au bout de cinq à dix ans (*ibid.*).

²⁴⁶ « Stockholm Water Company » en anglais (trad. personnelle), ainsi que d'autres initiateurs et de nombreux cofinanceurs.

²⁴⁷ « Council for Building Research » en anglais (trad. personnelle) ainsi que d'autres financeurs. Nous n'avons pas consulté ce rapport qui est en suédois : Jönsson, H., Vinnerås, B., Höglund, C., Stenström, T. A., Dalhammar, G., Kirchmann, H., 2000. Källsorterad humanurin ikretslopp (Recycling source separated human urine). VA-FORSK Report 2000-1. VA-FORSK/VAV. Suède (en suédois).

En outre, fin 2006, la Suède connaît une alternance politique : la coalition formée autour du parti social-démocrate avec l'ancien parti communiste et le parti des Verts, perd les élections générales de septembre 2006 au profit de l'opposition des partis de droite. Ce revirement politique, après douze années de gouvernement par les partis de gauche, marque la fin du soutien politique au déploiement de cette alternative au tout-à-l'égout, portée principalement jusqu'alors par des considérations écologiques. Dans le même temps, une certaine défaveur apparaît vis-à-vis d'un système dont beaucoup de réalisations ont montré des difficultés de maintenance et n'ont pas duré plus de dix ans. La même année, le groupe EcoSanRes publie une nouvelle synthèse de recommandations très complète et analyse les retours d'expérience des plus importantes réalisations de séparation à la source de l'urine (Kvarnström *et al.*, 2006). Malheureusement, peu de nouvelles initiatives seront lancées en Suède après la publication de cet ouvrage et le changement politique est fréquemment mentionné par les acteurs suédois que nous avons rencontrés pour expliquer la retombée de cet engouement. Pourtant, à ce moment, une communauté scientifique et technique émergeait qui possédait désormais les compétences nécessaires pour permettre de faire fonctionner convenablement, sur le plan de la réalisation technique, des chaînes complètes de séparation à la source et de valorisation des urines.

Une des autres limitations importantes au déploiement de la séparation à la source de l'urine en Suède réside dans son modèle économique. Comme le résume Pascal Dauthuille, directeur chez Suez (Annexe 1), « il n'y a pas de *business model* » associé à ces chaînes de valorisation de l'urine. Pour préciser ce point, nous dirons que la séparation à la source induit un certain nombre de charges, traduisibles éventuellement sous forme financière :

- des charges d'investissement, liées à la mise en place des toilettes à séparation d'urine, du réseau de tuyaux correspondant et des cuves de stockage. Ces charges sont relativement faibles et représentent un surcoût assez mineur au regard du coût global d'une opération de construction d'un nouveau bâtiment (15 €/pers en résidentiel dans l'hypothèse d'un marché arrivé à maturité – Crolais *et al.*, 2016). La faiblesse relative de ce coût participe à notre sens à expliquer la possibilité d'un engouement assez fort de la part de nombreux acteurs, dont ceux de la construction, en Suède dans les années quatre-vingt-dix, car la réalisation d'une opération immobilière avec séparation à la source permettait pour un faible surcoût de se démarquer concurrentiellement par l'affichage d'une plus-value écologique (théorique) forte au projet tout en s'inscrivant dans une mode et une logique d'innovation également valorisées ;
- des charges d'exploitation, liées à la gestion courante et à l'entretien des toilettes, des tuyaux et des cuves, ainsi que les charges de vidanges de cuves, de transport, de stockage éventuel au champ et d'épandage. Ce sont ces charges qui n'ont pas été couvertes dans les projets suédois où la séparation à la source a été mise en place mais

où l'urine n'a pas été utilisée. Nous traduisons cette absence de « business model » par le fait que, dans la logique d'une régulation spontanée du marché, les conditions économiques de réalisation de nombreux projets n'ont pas entraîné de mise en place spontanée d'un marché de l'urine. Personne n'a assumé ces charges, en particulier aucun acteur économique du secteur concurrentiel n'a pu trouver une manière de récupérer les coûts.

Les contreparties de ces charges n'apparaissent effectivement pas spontanément. Le bénéficiaire direct de la valorisation des urines est l'agriculteur mais les urines brutes sont entachées d'un certain nombre de handicaps pour l'agriculteur : taux de dilution élevé des nutriments (cf. sous-sections 4.2.6.2 et 4.2.6.3) qui rend l'épandage moins avantageux que les autres produits concentrés disponibles, en particulier par rapport aux engrais chimiques de synthèse ; absence de garantie sur la composition du produit ; méconnaissance du produit (dans les phases initiales en tout cas), etc. Les bénéficiaires indirects peuvent être nombreux mais ils n'ont pas été intégrés économiquement dans ces projets, voire ils n'ont pas ou très peu de traduction économique quand la nature des bénéfices est une baisse de l'eutrophisation des rivières, une baisse des émissions de gaz à effet de serre, etc.

Dans les éco-villages suédois et danois que nous avons visités, comme Understenshöjden, les charges d'exploitation sont intégralement assumées par les habitants. Ce sont eux qui se chargent de l'entretien de leurs toilettes et de leurs canalisations de collecte. La vidange de l'urine est effectuée directement par un agriculteur qu'ils rémunèrent pour l'opération : environ 70 € par foyer et par an dans le cas d'Understenshöjden²⁴⁸. À Hyldebjerg, au Danemark, c'est l'université de Copenhague qui prend en charge l'épandage des urines dans le cadre de son programme de recherche. En outre, les éco-villages que nous avons visités avaient tous une densité relativement faible et le nombre d'habitants connectés était usuellement inférieur à 200 personnes (Figure 5.1). Les éco-villages suédois et danois représentent donc de ce point de vue une typologie d'habitat et des contextes très particuliers et la reproductibilité telle que celle de ces modèles, dont on voit qu'elle n'a pas fonctionné dans de nombreux cas, est limitée.

²⁴⁸ Pour donner un ordre de grandeur de comparaison, nous estimons que la part « assainissement » de la facture d'approvisionnement en eau potable dans l'agglomération parisienne est d'environ 250 € par an pour un foyer de deux personnes pour les urines, les matières fécales et les eaux ménagères – voire pluviales (hypothèses de calcul : 4 €/m³ pour la facture d'eau, deux tiers de part assainissement en incluant les taxes et redevances Agence de l'Eau et 50 m³/pers/an). Nous donnons ces deux montants à titre purement indicatif et ne développerons pas davantage l'analyse de ce qu'ils recouvrent l'un et l'autre. Il est donc impossible sur cette base d'aller plus loin dans l'analyse des coûts économiques de la gestion des urines.



Figure 5.1 : Vue sur des maisons de l'éco-village Understenshøjden.

Source personnelle.

Ces éco-villages sont effet caractérisés par :

- une implication forte des habitants pour le bon fonctionnement de la chaîne complète de valorisation des urines. Cette implication peut se traduire de multiples façons, en termes de temps passé ou de moyens financiers alloués par exemple. C'est aussi le reflet d'une implication globale dans le quartier, tel qu'illustré par Nils Söderlund à Understenshøjden qui est un des architectes ayant conçu cet éco-village et qui y réside depuis le début ;
- la présence d'une ou plusieurs personnes-pivots, particulièrement impliquées dans le système de gestion des urines du quartier, et qui sont garantes de son bon fonctionnement par l'investissement bénévole qu'ils y consacrent. Ce caractère de personne-pivot a ainsi été noté chez Povl Markussen dans l'éco-village danois de Hyldebjergdelt ou encore chez Bodil Arlif et Lotte Kjærgård, responsables de l'assainissement de l'éco-village danois de Munksøgård.



Figure 5.2 : Povel Markussen, habitant et responsable assainissement du quartier Hyldespjældet, debout sur le regard de la cuve de stockage d'urine.

Source personnelle.

Aucun nouveau projet de grande ampleur avec séparation à la source de l'urine ne semble avoir été construit en Suède après 2010 et seuls subsistent donc les projets tels que ceux décrits ci-dessus. Leur pérennité est liée à une implication permanente des habitants et des personnes-pivots qui fragilise la possibilité de leur maintien dans le temps et de nombreux projets ont ainsi été arrêtés. On notera toutefois l'exception de la municipalité de Tanum, relativement unique à notre connaissance, où la séparation à la source de l'urine et la mise en relation entre habitants et agriculteurs est organisée par la municipalité et semble permettre un fonctionnement pérenne d'une chaîne complète de valorisation de l'urine humaine depuis une vingtaine d'années (Vinnerås & Jönsson, 2013).

5.1.2. Bilan des réalisations allemandes et néerlandaises : micropolluants et modèle économique

En Allemagne, la séparation à la source de l'urine a visiblement rapidement buté sur une méfiance de la communauté scientifique vis-à-vis de l'innocuité de l'urine humaine en tant qu'engrais directement appliqué sur les champs après stockage, du fait de la présence de résidus médicamenteux dans l'urine. Ainsi, la thèse de Martina Winker (Winker, 2009), bien qu'elle aboutisse à une absence ou à une limite

de détection des molécules pharmaceutiques recherchées dans le sol et dans la plante²⁴⁹, n'en conclut pas moins ainsi : « Aucune évaluation des effets toxiques des produits pharmaceutiques ingérés pas les humains via les cultures n'est possible pour le moment au regard des résultats de cette recherche. Toutefois, les craintes existent et tant que ces craintes ne sont pas dissipées, il est recommandé que l'urine des personnes prenant des médicaments ne soit pas utilisée pour la fertilisation des cultures destinées à l'alimentation. »²⁵⁰ Cette recommandation est plus restrictive que celle de l'OMS qui, dans son rapport postérieur de trois années (2012a), indique : « Les effets [des résidus de produits pharmaceutiques ou des produits résultant de leur métabolisme] 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 ». L'OMS ne formule pas de restriction à l'usage agricole de l'urine lié à la présence de résidus médicamenteux et la position allemande apparaît ainsi nettement plus restrictive.

L'Allemagne est progressivement en train d'interdire l'épandage des boues de stations d'épuration dans cette même logique de primauté d'une précaution vis-à-vis de risques encore inconnus. Dans le même temps, l'Allemagne prévoit l'extraction sélective du phosphore des cendres de boues de station d'épuration pour maintenir ou mettre en œuvre, sur cet élément, une circularité (cf. sous-section 4.3.3.1). L'épandage d'urine humaine, pratique inexistante avant les premières expérimentations de ces dernières années, arrive donc dans un contexte où l'épandage agricole de matières fertilisantes d'origine urbaine est fortement remis en cause et où les méthodes extractives sont réglementairement prônées. Nous n'avons toutefois pas connaissance du fait que l'épandage des urines animales, dont les niveaux de contamination en certains médicaments peuvent être largement supérieurs à ceux de l'urine humaine (cf. section 2.2.3), soit remis en cause en Allemagne, même s'il constitue certainement un sujet de préoccupation.

²⁴⁹ Trois types de molécules ont été recherchés. Pour l'ibuprofène et pour les différentes formes d'estradiol, aucune trace n'a été détectée dans le sol ou dans la plante, même en augmentant artificiellement les doses d'un facteur quarante. Pour la carbamazépine, les concentrations moyennes dans l'urine et une fertilisation équivalente à environ 400 kgN/ha aboutissent à une concentration détectée dans les plantes de 75 µg/kgMS. En extrapolant ces résultats dans le scénario que nous développerons ultérieurement (cf. section 5.4.2 où les taux de fertilisation à l'urine sont beaucoup plus bas), il faudrait consommer exclusivement des céréales provenant de champs fertilisés à l'urine pendant plus de 2 000 ans pour obtenir une dose thérapeutique de carbamazépine. Ce résultat pourra bien sûr être affiné en prenant en compte les seuils de préoccupation.

²⁵⁰ « No evaluation of toxic effects of pharmaceuticals ingested by humans through crops is possible at the moment from the findings of this research. However, concerns exist and as long as the concerns are not dispelled, it is recommended that urine from people under medication should not be used for fertilisation of food crops. » (trad. personnelle).

À notre connaissance, aucun projet allemand ne fonctionne aujourd'hui dans lequel les urines humaines sont séparées à la source et valorisées et les rares initiatives locales sont aujourd'hui pénalisées par ces nouvelles réglementations. Les projets passés, dont les visées étaient principalement de recherche ou démonstratives, ont à notre connaissance majoritairement été arrêtés (station d'épuration de Stahnsdorf à Berlin, Bâtiment GIZ à Eschborn). La question des résidus médicamenteux a donc clairement été un facteur de frein en Allemagne.

Nous avons également interrogé le groupe Véolia, qui a participé au projet pilote de Stahnsdorf (Berlin – projet SCST), afin de connaître les conclusions qu'ils en ont tirées en interne. Le retour anonyme que nous en avons eu indique entre autres que ces projets « [péchaient] au niveau économique » et que les personnes qui prônaient la séparation à la source de l'urine « avaient tendance à négliger cet aspect car cela allait à l'encontre de leur parti-pris idéologique ». En outre, les principaux bénéfices économiques envisagés étaient permis par les économies de consommation d'eau potable et le paiement réduit des factures correspondantes. Or l'importance « des prix fixes liés aux réseaux » combinée à la nécessité de maintenir une connexion aux réseaux municipaux induit que la rentabilité éventuelle liée à la baisse des coûts de consommation d'eau d'un usager n'est pas généralisable et que de tels systèmes ne peuvent être rentables que « par effet de [parasitisme] sur le système établi ».

Nous retrouvons donc ici une argumentation économique assez similaire à celle que nous avons exposée dans le cas de la Suède. Elle introduit aussi la question de la prise en charge du coût lié aux infrastructures d'eau potable et d'eaux usées dans l'hypothèse où seule la séparation à la source de l'urine se fait et où les charges fixes liées à l'approvisionnement en eau potable et à la collecte et au traitement des eaux usées, contenant désormais matières fécales et eaux ménagères, doivent continuer à être couvertes.

On notera que le modèle économique actuel de l'eau en France est déjà souvent présenté comme présentant des défaillances, indépendamment de l'introduction de séparation à la source de l'urine. Nous pouvons l'illustrer par la question du recouvrement des charges correspondant au renouvellement des réseaux d'eau potable et d'eaux usées. Le rapport SISPEA portant sur 2014 (Eaufrance, 2017) indique ainsi que le taux de renouvellement théorique actuel des réseaux d'eau potable français est de 170 ans, ce qui questionne la soutenabilité du modèle actuel de l'eau potable du fait qu'une durée de 170 ans est *a priori* incompatible avec la durée de vie effectivement envisageable pour un réseau d'eau potable.

Ainsi, deux cas de figure peuvent à notre sens être envisagés par rapport à cette question de la couverture des coûts liés à l'approvisionnement en eau potable et à la collecte et au traitement des eaux usées :

- le premier correspond à des systèmes dans lesquels les matières fécales sont, comme les urines, gérées dans une chaîne quasiment indépendante du sous-système eau. Dans ce cas de figure, le découplage des systèmes alimentation/excrétion et eau est quasiment total. La question du recouvrement des charges liées à l’approvisionnement en eau et à la gestion des eaux ménagères n’a (presque) plus de lien avec la question de l’approvisionnement en denrées alimentaires et la gestion des urines et matières fécales. Il y aurait donc effectivement une nouvelle économie de la gestion des urines et matières fécales à mettre en place et une nouvelle économie du système eau. On peut trouver des exemples similaires dans les changements de modalités physiques de transport de l’information dans les systèmes de télécommunications (réseaux filaires cuivre, réseaux filaires fibre optique, réseaux hertziens, réseaux satellites, etc.). Ce découplage peut d’ailleurs s’accompagner d’une remise en cause plus ou moins totale du système eau par une gestion éventuellement totalement décentralisée, comme illustré par exemple par Larsen *et al.* (2013), Larsen (2016) ou Vinnerås (2017). Dans le modèle extrême totalement décentralisé, les bâtiments sont autonomes en eau et les infrastructures d’approvisionnement ou d’évacuation d’eau n’existent potentiellement plus. Les modèles économiques qui accompagnent ces nouvelles organisations des sous-systèmes eau et alimentation/excrétion sont alors effectivement à revoir totalement. Mais il ne semble pas que la question de la gestion des urines et matières fécales soit à analyser dans le cadre de la gestion du système eau. Au XIX^e siècle à Paris, la loi relative au tout-à-l’égout n’est d’ailleurs promulguée qu’en 1894 alors que l’approvisionnement en eau et la construction d’égouts est déjà largement préexistante pour les autres usages de l’eau. On peut donc imaginer une reprise inverse du système avec une loi « rien-à-l’égout » posant les prémices de sa disparition. Dans les sociétés déjà équipées comme l’agglomération parisienne, la question de la transition entre les deux modèles nécessite d’étudier les modalités possibles de sa mise en œuvre technique et économique ;
- le second cas de figure correspondrait au cas où les matières fécales sont comme aujourd’hui couplées au sous-système eau. Dans ce cas, la séparation à la source de l’urine apparaît effectivement comme une nouvelle chaîne de gestion ne remettant pas en cause le couplage des systèmes eau et alimentation/excrétion si ce n’est que l’enjeu de la salubrité²⁵¹ resterait dévolu au système eau quand l’enjeu de la circularité résiderait principalement dans la chaîne de gestion des urines. Nous avons vu que la sortie des urines apportait de nombreux bénéfices au système eau mais il ne remet pas

²⁵¹ Et accessoirement les flux de carbone et donc le couplage potentiel avec le système énergie.

en cause la nécessité de disposer de l'égout pour assurer le transport des matières fécales. Il consistera donc toujours une charge importante liée au système alimentation/excrétion. On peut dans ce cas effectuer plutôt un parallèle avec la séparation à la source des biodéchets qui est une forme de mise en œuvre de circularité dans les systèmes alimentation/excrétion en cours de transition dans la société française actuellement. Les circuits préexistants de gestion des ordures ménagères, avec lesquelles les biodéchets étaient précédemment mélangés, continuent d'exister et de nouvelles chaînes de gestion sont mises en place pour les biodéchets (gestion locale par compostage, collecte pour valorisation, etc.).

La question de l'économie des chaînes de gestion des urines soulève donc de très nombreuses autres questions, économiques mais aussi politiques, qui ouvrent la voie à d'autres recherches. On notera le couplage des réglementations et des modèles économiques tel qu'illustré par la collecte des biodéchets pour laquelle le nouveau modèle économique associé à cette collecte se fait dans le cadre de la mise en place d'une nouvelle réglementation. Ce fut aussi le cas pour la mise en place de la dénitrification dans la majorité des stations d'épuration française, avec un intérêt économique évident des acteurs de la construction et de l'exploitation des nouveaux systèmes réglementairement imposés.

Il semble que les projets néerlandais de séparation à la source de l'urine ont été arrêtés ou qu'ils sont le fait d'organismes de recherche avec une logique de traitement plutôt extractive. En Suisse, nous avons déjà mentionné les nombreux projets de recherche relatifs à l'urine menés par l'EAWAG et la réalisation exemplaire de séparation à la source de l'urine dans bâtiment Forum Chriesbach mais ces projets restent très fortement connectés à une recherche scientifique plus qu'à une appropriation sociale.

En conclusion, le bilan de la prise de conscience relative à l'urine apparaît relativement contrasté vingt ans plus tard. En Allemagne, il s'est confronté à une prise de conscience plus générale sur les diverses ressources présentes dans les eaux usées et les efforts semblent plutôt se concentrer sur d'autres approches alternatives au tout-à-l'égout que la séparation à la source de l'urine, telles que la collecte sous-vide des urines et matières fécales. Elles ne correspondent toutefois pas aujourd'hui à l'émergence d'un système alimentation/excrétion circulaire comme nous l'avons montré à la section 4.3.2 même si l'extraction et le recyclage du phosphore dans de tels systèmes constitue évidemment une amélioration par rapport aux systèmes totalement linéaires de tout-à-l'égout avec incinération des boues. De même aux Pays-Bas, avec malgré tout une recherche toujours active sur l'urine dans une logique de traitement extractive.

En Suisse, la prise de conscience peine à sortir de la communauté de la recherche. Enfin, en Suède et au Danemark, si l'engouement initial est retombé, ces deux pays offrent à notre connaissance les uniques démonstrations d'Europe occidentale de mise en pratique de régimes socio-écologiques circulaires basés sur la séparation à la source et la valorisation des urines, appropriées par les habitants des éco-villages qui mettent en œuvre cette alternative depuis parfois plus de vingt ans.

On notera d'ailleurs que la Suède montre à nouveau un intérêt pour les techniques alternatives d'assainissement. Si la recherche sur les systèmes alimentation/excrétion à circularité intégrale par la séparation à la source de l'urine ne s'est jamais arrêtée (cf. recherches continues menées à SLU), un nouveau projet a récemment commencé à Malmö, porté par le service public de l'eau et de l'assainissement de Malmö et ses environs (VASYD) et nommé SUNHa, pour « Sustainable Urban Nitrogen Handling ». La focalisation de ce projet sur la question de l'azote l'amène, comme dans la réflexion que nous menons ici, à faire ressortir la séparation à la source de l'urine comme un sujet d'intérêt majeur. Comme en Allemagne et aux Pays-Bas, il se développe également en Suède un intérêt pour la collecte sous-vide des urines et matières fécales ainsi que nous l'avons déjà brièvement présenté dans le cas du nouveau quartier H+ de Helsingborg.

L'analyse de l'émergence de ces nombreux quartiers équipés de collecte sous-vide des urines et matières fécales se révèle toutefois féconde pour mieux cerner quels sont les facteurs qui participent à l'apparition d'une alternative au tout-à-l'égout. Ainsi, Skambraks *et al.* (2017) ont mis en exergue le fait que les objectifs des politiques publiques, au niveau national et local, avaient été des leviers systématiques de l'émergence de ces projets. Lennartsson *et al.* (2017) ont montré quant à elles, en comparant deux projets d'aménagement suédois, la criticité de la bonne synergie entre les services de la municipalité en charge de cet aménagement et les services publics en charge de l'eau et de l'assainissement. Enfin, Kerber (Annexe 3) a montré l'importance de trois acteurs-clés au sein des structures concernées par un nouvel aménagement innovant dans sa gestion des eaux usées : un incitateur, un coordinateur et un pilote d'ensemble. On voit ainsi l'importance de la conjonction de facteurs locaux et globaux dont la bonne imbrication a été un facteur-clé de la possibilité d'émergence de chaînes alternatives de gestion des urines et matières fécales.

5.2. Le verrouillage socio-technique du XX^e siècle autour du tout-à-l'égout : le cas parisien

Avant d'étudier les conditions dans lesquelles il nous semble possible que la séparation à la source de l'urine puisse émerger dans le contexte actuel de l'agglomération parisienne, voire qu'elle constitue les prémices d'une transition socio-écologique de son système alimentation/excrétion, il nous paraît pertinent d'analyser plus en détails pourquoi il n'existe aujourd'hui pas, ou presque, de séparation à la source et valorisation des urines. Nous avons montré à la section 3.1.4 la linéarisation du système alimentation/excrétion de l'agglomération parisienne durant le XX^e siècle par l'analyse des flux de substances correspondants. Nous allons ici chercher à comprendre en quoi cette linéarisation s'est accompagnée d'une transformation plus générale du cadre du système alimentation/excrétion de l'agglomération parisienne.

Ce mouvement général de linéarisation et ses éléments contextuels ont déjà été mis au jour par Barles (2005) et synthétisés par le titre de son ouvrage : « l'invention des déchets urbains ». Barles a montré un cloisonnement progressif entre les mondes urbains et agricoles²⁵², qui commence dans les années 1880 et qui est presque totalement consommé à la fin de la période qu'elle a étudiée, à savoir les années 1970. Nous chercherons ici à compléter ces travaux en étudiant plus particulièrement leur traduction pour la gestion des urines et leur suite après les années soixante-dix.

5.2.1. La disparition de l'urine avec les matières fécales dans l'assainissement

Les excréments des habitants de l'agglomération parisienne ont progressivement disparu tout au long du XX^e siècle. Ils sont présents dans la vie des Parisiens au XIX^e siècle, et encore davantage avant, comme nous l'avons illustré dans la troisième partie avec l'usage des urines par les tanneurs, l'utilisation des pots de chambre, la présence d'excréments dans la rue ou la vidange des fosses d'aisance. Cette présence se manifeste sensoriellement *a minima* par la vue et l'odorat, avec une relation que l'on peut supposer neutre ou positive, comme dans le cas de l'utilisation d'urine par les tanneurs, ou *a contrario* négative dans le cas de la vidange des fosses d'aisance.

²⁵² Et industriels.

Avec le tout-à-l'égout, les urines et matières fécales disparaissent de la sphère proche des urbains. L'odeur de l'urine disparaît avec la déportation de l'hydrolyse de l'urée derrière le siphon hydraulique et l'odeur des matières fécales n'est plus présente qu'à l'excrétion et dans le court trajet entre l'anus et la toilette²⁵³. La chasse d'eau et le tout-à-l'égout emportent ensuite, souterrainement, au loin, les urines et les matières fécales. L'éventuelle manifestation de leur présence est alors déportée dans l'espace et dans le temps et ne concerne plus les urines et matières fécales mais le produit qu'ils sont devenus dans la chaîne de gestion (eaux usées, boues de station d'épuration, etc.). Cela suit le phénomène général d'externalisation des nuisances par la ville que nous avons mis en exergue (chapitre 3.2 ; Barles, 2015b)²⁵⁴.

On retrouve cette disparition de l'urine et des matières fécales dans les textes réglementaires qui régissent leur gestion. Ainsi, dans l'arrêté du 14 juin 1969 relatif aux « Fosses septiques et appareils ou dispositifs épurateurs de leurs effluents des bâtiments d'habitation », qui ne s'applique donc plus alors que dans les zones urbaines périphériques ou rurales, on retrouve encore les termes « matières excrémentielles », « fèces » et « urine ». Dans les deux arrêtés suivants de 1982 et 1996²⁵⁵, ces termes ont disparu et on n'y retrouve plus que les termes « eaux-vannes », « eaux ménagères » et « eaux usées domestiques ».

Les risques d'insalubrité liée aux maladies féco-orales et les régulières épidémies de choléra que connaît l'agglomération parisienne tout au long du XIX^e siècle font entrer les matières fécales, et plus généralement les excréments, dans la sphère de l'indésirable et du dangereux. Ce phénomène a été étudié par de nombreux auteurs. Mentionnons par exemple Harpet (1998) qui parle de « phénomène Pasteur » : « C'est donc le 19^{ème} siècle, un passé si proche, qui, selon nous, a vu surgir une

²⁵³ On notera deux points à ce titre : d'une part la supériorité des toilettes sèches ventilées vis-à-vis des odeurs par rapport aux toilettes à eau du fait que le flux d'air descend dans le réceptacle de la toilette sèche emportant avec lui les odeurs de l'excrétion de matières fécales, contrairement à la chasse d'eau (cf. par exemple Figure 4.40) ; deuxièmement, la différence entre les toilettes où les matières fécales tombent directement dans l'eau, majoritaires en France, et celles où les matières fécales tombent sur un réceptacle sec qui permet de les voir et que l'on retrouve fréquemment en Allemagne par exemple,. Nous supposons que ces modèles de toilettes sont liés à l'intérêt de la possibilité d'un auto-diagnostic médical par l'examen visuel de ses matières fécales avant de les évacuer par la chasse d'eau.

²⁵⁴ Pour une analyse de la transformation de la sensibilité aux odeurs, cf. Corbin, A., 1983. *Le miasme et la jonquille : L'odorat et l'imaginaire social aux XVIII^e et XIX^e siècles*. Éd. Aubier Montaigne.

²⁵⁵ Arrêté du 3 mars 1982 fixant les règles de construction et d'installation des fosses septiques et appareils utilisés en matière d'assainissement autonome des bâtiments d'habitation et arrêté du 6 mai 1996 fixant les prescriptions techniques applicables aux systèmes d'assainissement non collectif.

incomparable répression sur ce qui a trait de près ou de loin à l'excrémentiel dans notre civilisation. Et ce à travers toutes les disciplines : cette répression est partie de la médecine pour rayonner vers tous les secteurs de la science ».

Anne Delmaire, alors directrice de l'association Toilettes du Monde, analyse la relation des sociétés vis-à-vis de leurs excréments comme étant une caractéristique socio-culturelle qu'elle nomme « fécopobie » (Berger, 2016)²⁵⁶. Elle considère la société française aujourd'hui comme étant fécophobe : les excréments inspirent le dégoût et la société française a déporté les excréments humains hors de la sphère de son intérêt.

Disparues et détruites avec les matières fécales, les urines ne sont presque plus présentes que dans des sphères restreintes (examen médical, bas-âge, etc.) et par le désagrément olfactif de la rencontre entre la minéralité de la ville et les mictions urinaires urbaines en plein air, qui transfèrent la quasi-intégralité de l'azote urinaire sous la forme odorante de l'ammoniac.

Combiné au désintérêt agricole du pouvoir fertilisant des urines et matières fécales, ce tabou hygiéniste répressif autour des matières fécales est déjà largement dominant dans les années 1930 quand le CSHPF indique qu' « il faut détruire les eaux usées » (cité par Barles, 2005) et toujours, plus récemment, quand les eaux usées sont définies comme des « eaux souillées par la vie humaine » (cf. sous-section 3.3.2.1). Or la chaîne de gestion des urines et matières fécales progressivement mise en place dans l'agglomération parisienne est unitaire (urine + matières fécales) et elle fait alors disparaître conjointement ces deux formes principales de l'excrétion humaine²⁵⁷ de la sphère des urbains.

Si l'épandage des eaux usées a permis à l'agglomération parisienne de connaître l'apogée de la circularité de son système alimentation/excrétion au tout début du XX^e siècle, le caractère de plus en plus marginal de cette circularité tout au long du XX^e siècle a entraîné les urines dans une chaîne de gestion linéaire, indifférenciée des matières fécales, dont l'objectif premier est la salubrité, « l'assainissement ».

Cette définition de l'assainissement est celle que donne par exemple le TLFi : « ensemble des travaux que doivent effectuer, en se conformant aux règles de l'hygiène, les particuliers, les collectivités, les pouvoirs publics, pour faire disparaître dans les agglomérations toute cause d'insalubrité ». Avec la définition que nous avons proposée de l'insalubrité, certes restrictive mais dont l'élargissement ne

²⁵⁶ Cf. également Aguerre (2003) pour une analyse de la différence entre urbains et ruraux vis-à-vis des excréments humains.

²⁵⁷ Hors excréments gazeux – cf. chapitre 1.2.

changerait pas nos conclusions, l'urine seule n'est donc *a priori* pas concernée par l'assainissement²⁵⁸. Mais la conformation anatomique de l'être humain qui rapproche autant les appareils excrétoires de l'urine et des matières fécales induit certes une facilité de mélange spontané des urines avec les matières fécales.

Dans l'encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement (Chocat, 1997), l'assainissement est défini ainsi : « ensemble des stratégies utilisées par les habitants des villes, responsables officiels ou non, pour essayer de répondre aux problèmes posés par la circulation de l'eau en excluant la production et la distribution d'eau potable ». Avec cette définition, c'est l'eau qui apparaît comme étant au centre de la question de l'assainissement, indépendamment donc des urines et même des matières fécales. Elle correspond bien aux premières mesures d'assainissement mises en place à Paris avec par exemple le règlement de 1350 qui impose la construction de fossés d'évacuation d'eau couverts pour éviter les odeurs, supposées être à l'origine de la transmission des maladies (Paulet, 1853). Mais avec cette définition de l'assainissement, le tout-à-l'égout apparaît non pas comme une solution d'assainissement mais comme la création même d'une circulation d'eau, contenant urines et matières fécales, qui auto-alimente le besoin en approvisionnement en eau (pour la chasse d'eau) et le besoin d'assainissement (en créant un problème de circulation d'eau contenant des matières fécales). Et cette circulation d'eau est induite elle-même par l'approvisionnement en eau de la ville. Il se crée donc un renforcement mutuel entre les deux réseaux d'eau potable et d'eaux usées en ville, qui répondent aux problèmes causés par l'un et par l'autre. D'où par exemple les propositions déjà mentionnées à la section précédente (section 5.1.2) de nouveaux paradigmes décentralisés sans adduction d'eau potable ni évacuation d'eaux usées.

²⁵⁸ Les témoignages des auteurs anciens, rapportés par Paulet (1853), indiquent que les foulons, dont les pieds baignaient constamment dans l'urine, étaient préservés de la maladie de la goutte. L'urine avait également divers emplois médicaux que nous avons mentionnés à la section 3.1.1. On pourrait donc même penser que l'urine, conservée à part, a pu participer d'une certaine salubrité.

Ainsi, l'assainissement semble en toute situation toujours devoir être concerné par la question de la circulation des eaux pluviales en ville et des questions de salubrité qui y sont liées. Mais la gestion des matières fécales en ville ne repose aujourd'hui sur la bonne gestion des eaux usées que par un renforcement mutuel historique des réseaux d'adduction et d'évacuation d'eau. Et dans ce renforcement mutuel, le caractère liquide des urines et leur similitude excrétoire avec les matières fécales a facilité la mise en place de la chaîne de gestion unitaire du tout-à-l'égout. C'est dans un esprit relativement similaire que Victor Hugo écrit cette phrase que nous reprenons ici dans une maxime (Maxime 8) (Hugo, 1862).

Maxime 8 : « Un égout est un malentendu » (Victor Hugo)

5.2.2. L'uniformisation des chaînes de gestion et la réduction des champs du débat

Cette disparition de l'urine avec les matières fécales dans l'assainissement s'est accompagnée d'un double mouvement durant le XX^e siècle. D'une part, nous l'avons déjà présenté dans la troisième partie de cette thèse, les chaînes de gestion des urines et matières fécales se sont progressivement uniformisées jusqu'à aboutir au monopole quasiment complet du tout-à-l'égout²⁵⁹.

D'autre part, ce mouvement d'uniformisation s'est accompagné de ce que nous proposons de nommer une « réduction des champs du débat » lié à la gestion des urines et des matières fécales. Nous nous appuyons ici sur le cas de la gestion des urines et matières fécales à Paris pour argumenter l'existence de cette réduction des champs du débat. La notion de débat est ici à entendre au sens du débat public, principalement caractérisé par les objets de discussion des citoyens et des différentes autorités publiques en charge de la gestion des urines et matières fécales. Nous utiliserons principalement les textes réglementaires, les décisions publiques et les constructions d'ouvrages comme témoins d'une certaine forme de résolution, ou non, de ces débats publics.

Avant 1894 et la promulgation de la loi du tout-à-l'égout, les débats portent sur la meilleure manière de gérer les urines et matières fécales. Les ouvrages que nous avons déjà mentionnés dans les parties précédentes, tels que celui de Paulet (1853), détaillent la composition de urines et des matières fécales et les innombrables manières dont on peut imaginer les gérer de manière optimale. Le débat est vif entre les partisans du tout-à-l'égout, ceux de la vidange des fosses d'aisance et des multiples autres procédés imaginés ou mis en œuvre. De très nombreuses commissions ont été réunies par les pouvoirs

²⁵⁹ En 1893, un an avant la loi tout-à-l'égout, Jacquemet (1979) donne la répartition suivante des chaînes de gestion dans Paris : fosses fixes (51 %), tinettes filtrantes (27 %), fosses mobiles (13 %), tout-à-l'égout (9 %).

publics pour étudier cette question qui témoignent d'un débat public intense (Jacquemet, 1979 ; Barles, 2005). Jusqu'à l'adoption de la loi sur le tout-à-l'égout de 1894, le débat porte donc sur la meilleure manière de gérer les urines et les matières fécales ainsi que sur les très nombreux enjeux sociaux, économiques et politiques qui y sont liés (intérêts économiques des entreprises de vidange, charges des propriétaires, etc.). Tant que le choix de l'interface usager n'est pas arrêté sur la toilette à chasse d'eau, le débat porte encore sur toutes les chaînes de gestion possibles. Nous illustrons cette période dans la figure suivante (Figure 5.3).



Figure 5.3 : Débat sur le devenir des urines et matières fécales

Après 1894, la toilette à chasse d'eau reliée à l'égout va rapidement devenir dominante : elle dépasse les 50 % dans les années 1910 et les 90 % dans les années 1930 (cf. section 3.1.4) dans la commune de Paris. Le débat se décale alors de deux crans dans la chaîne de gestion. Les débats ne portent plus sur le devenir des urines et matières fécales dont la destination qui s'impose est la toilette à chasse d'eau et les égouts, mais sur le produit résultant à savoir les eaux usées. Les deux débats n'ont bien sûr pas été totalement disjoints, en particulier à Paris, puisqu'au moment de l'adoption de la loi sur le tout-à-l'égout, l'épandage des eaux usées doit justement permettre de continuer à tirer profit de la fertilité des urines et des matières fécales (Barles, 2005 ; Bellanger, 2010). Et le débat sur le devenir des eaux usées était également préexistant à 1894 puisque le rejet des eaux usées constituait déjà un sujet d'intenses débats publics (*ibid.*). Mais dans les années qui suivent la promulgation de la loi sur le tout-à-l'égout, celui-ci va devenir la norme et les eaux usées sont réglementairement admises comme le véhicule des urines et matières fécales. Les débats relatifs aux possibilités de gérer différemment urines et matières fécales vont progressivement s'éteindre (Figure 5.4).

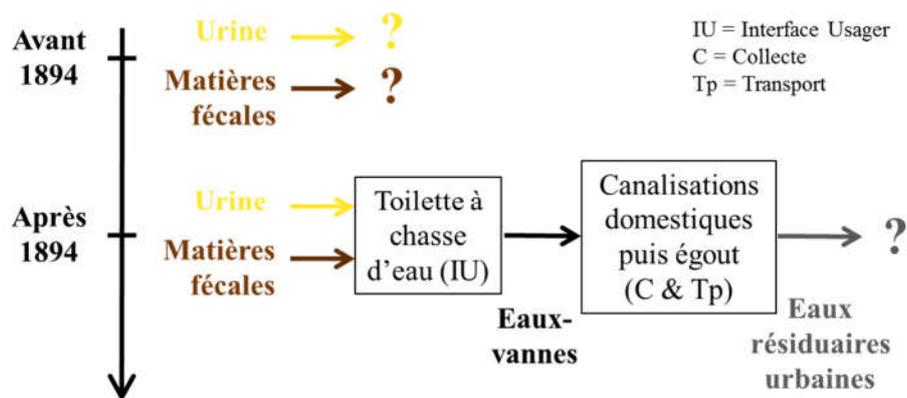


Figure 5.4 : Réduction au débat sur le devenir des eaux usées

Si l'épandage des eaux usées est la voie privilégiée, il reste relativement marginal à l'échelle de la France et nous avons vu à la section 3.1.4 qu'il s'avère rapidement insuffisant à Paris. Le pic de valorisation agricole des eaux usées parisiennes, atteint dans les années 1900 aux alentours de 85 %, décroît assez vite pour n'atteindre plus que 35 % dans les années 1930. Le rejet direct en rivière étant insatisfaisant du fait des pollutions induites, le débat relatif aux modalités de gestion des eaux usées finit par converger autour du traitement intensif. Le programme d'assainissement prévoyant la construction de la station d'épuration d'Achères est validé par le conseil général de la Seine dès le 8 juillet 1914 (Bellanger, 2010). La première guerre mondiale retardera l'exécution de ce programme et nous proposons de choisir la date de l'inauguration de la première tranche de la station d'épuration d'Achères, en 1940, comme marqueur du choix du traitement intensif (*ibid.*). En effet, la mise en route de cette station d'épuration, conjointement à des proportions désormais très réduites de l'épandage d'eaux usées, parachève la démonstration que la station d'épuration est désormais la seule voie possible de gestion des eaux usées. C'est donc à cette date que nous proposons de situer la nouvelle réduction des champs du débat illustrée par la figure suivante (Figure 5.5).

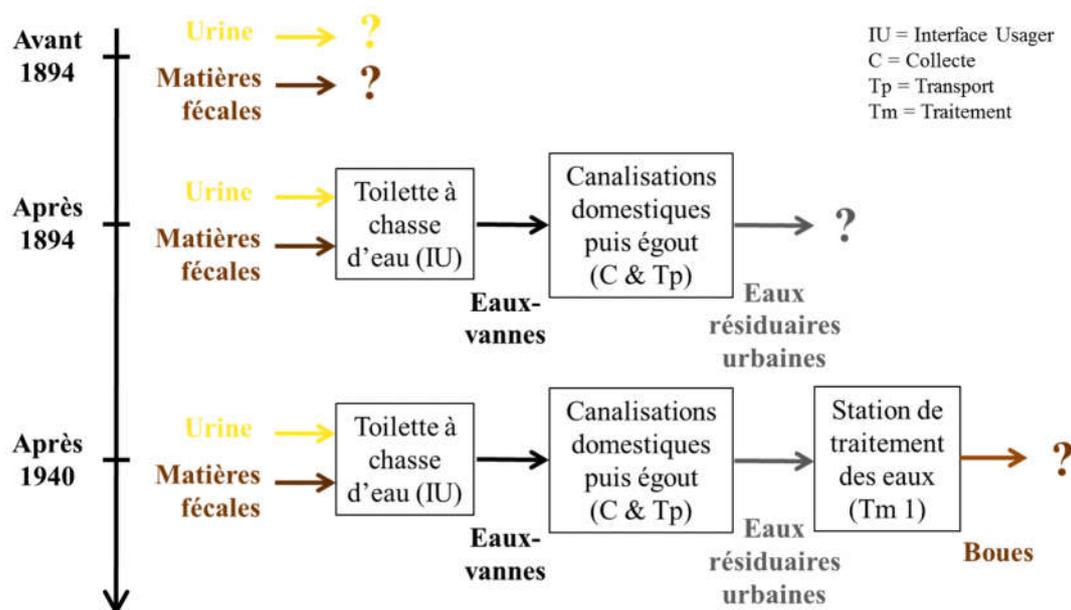


Figure 5.5 : Réduction du débat sur le devenir des boues

À partir du moment où il est acté que la modalité principale de gestion des eaux usées doit être la station d'épuration, le débat est déporté vers la gestion des boues. On ne peut bien sûr pas découpler le débat de la modalité de gestion des eaux (résolu par la station d'épuration) et celui de la gestion des boues désormais produites. Dans le cas de Paris et d'Achères, la valorisation agricole apparaît comme la voie de valorisation logique. Dans les années 1940, les champs d'épandage sont toujours en activité même s'ils ne concernent plus que 25 % des eaux usées. Les boues produites à Achères sont alors initialement refoulées dans l'émissaire d'alimentation des champs d'épandage (Bellanger 2010). Mais l'augmentation des quantités de boues et la baisse progressive de l'utilisation des champs d'épandage, jusqu'à l'arrêt de la pratique en l'an 2000, ouvre le débat des modalités optimales de leur gestion. Ce débat est toujours ouvert en France comme le montrent les différentes modalités concomitantes de gestion des boues et les controverses sur l'épandage agricole des boues d'épuration depuis les années 1990, que nous avons présentées à la sous-section 3.3.3.5.

Toutefois, à Paris, à partir de la construction de la station d'épuration de Noisy-le-Grand en 1976, l'incinération des boues est introduite comme modalité de gestion, en réponse en particulier aux contraintes d'exiguïté des stations d'épuration dans des zones urbaines relativement denses. Cette incinération ouvre alors un nouveau champ de débat sur le devenir des cendres d'incinération de boues. Ce débat est parallèle à celui du devenir des boues puisque la pratique d'incinération coexiste avec d'autres modalités de gestion en France. On notera que, dans les pays qui interdisent l'épandage agricole des boues d'épuration tels que la Suisse, le débat sur le devenir des boues d'épuration est réglementairement fermé et une réduction supplémentaire du débat s'opère alors, qui ne porte plus que

sur le devenir des cendres d'incinération des boues. Nous l'illustrons par la figure suivante (Figure 5.6).

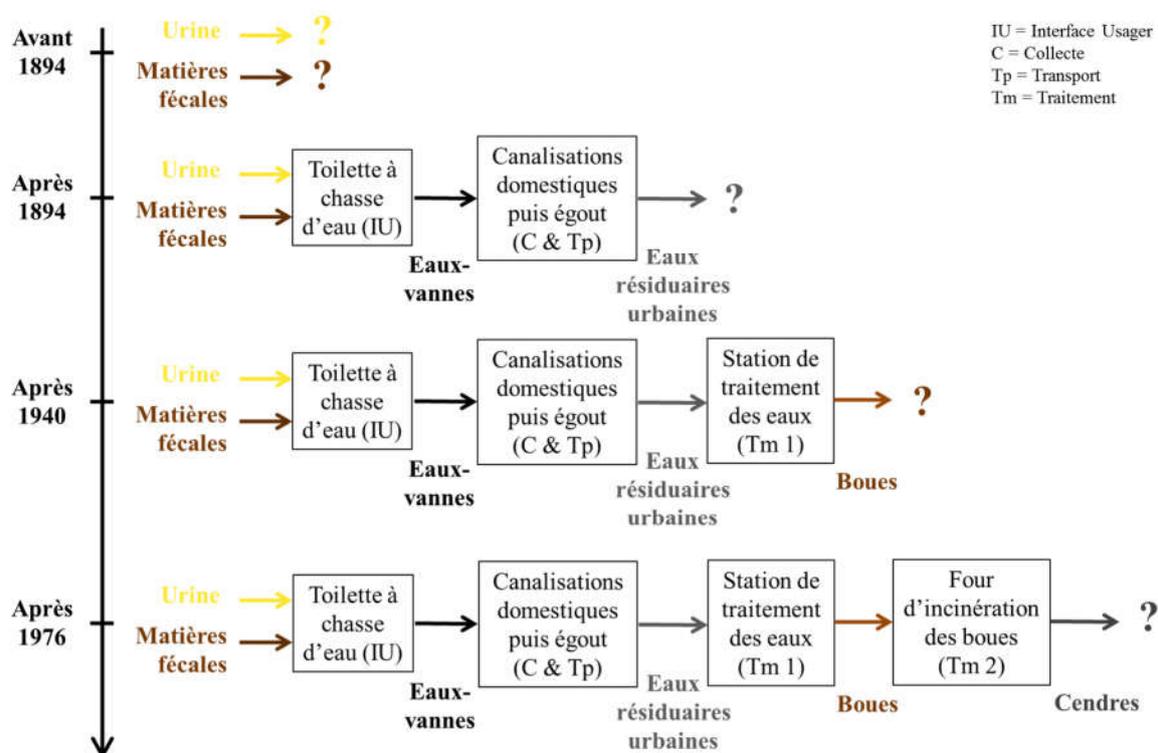


Figure 5.6 : Réduction du débat sur le devenir des cendres

Au cours du XX^e siècle, le premier débat relatif aux urines et matières fécales, qui avait duré longtemps au XIX^e siècle, s'éteint donc assez rapidement après 1894. Le second débat sur le devenir des eaux usées s'éteint également progressivement : son extinction est parachevée par la Directive ERU en 1991 qui ne remonte pas plus haut que les eaux ménagères usées dans la chaîne de gestion²⁶⁰ et qui impose un traitement aux eaux résiduaires urbaines. Les deux autres débats sont toujours ouverts en parallèle même si nous avons vu que celui portant sur les boues a pu être fermé dans d'autres pays. Enfin, une dernière réduction du débat a déjà eu lieu dans d'autres pays et il n'est pas exclu qu'il puisse concerner la France à l'avenir. Il s'agit de l'obligation de mettre en place une extraction du phosphore des cendres d'incinération de boues (cf. sous-section 3.3.3.5). Le débat est alors encore déplacé d'un cran dans la chaîne de gestion qui compte désormais trois maillons de traitements obligatoires successifs (cf. ci-après Figure 5.7). Cette inflation des traitements réalisés sur les eaux usées n'est pas sans rappeler celle que nous avons présentée dans la Figure 3.28. Nous présentons

²⁶⁰ Les « eaux ménagères usées » sont toutefois définies comme « produites essentiellement par le métabolisme humain et les activités ménagères ».

donc ici cette ultime réduction des champs du débat comme une hypothèse potentiellement réalisée dans le courant du XXI^e siècle à Paris.

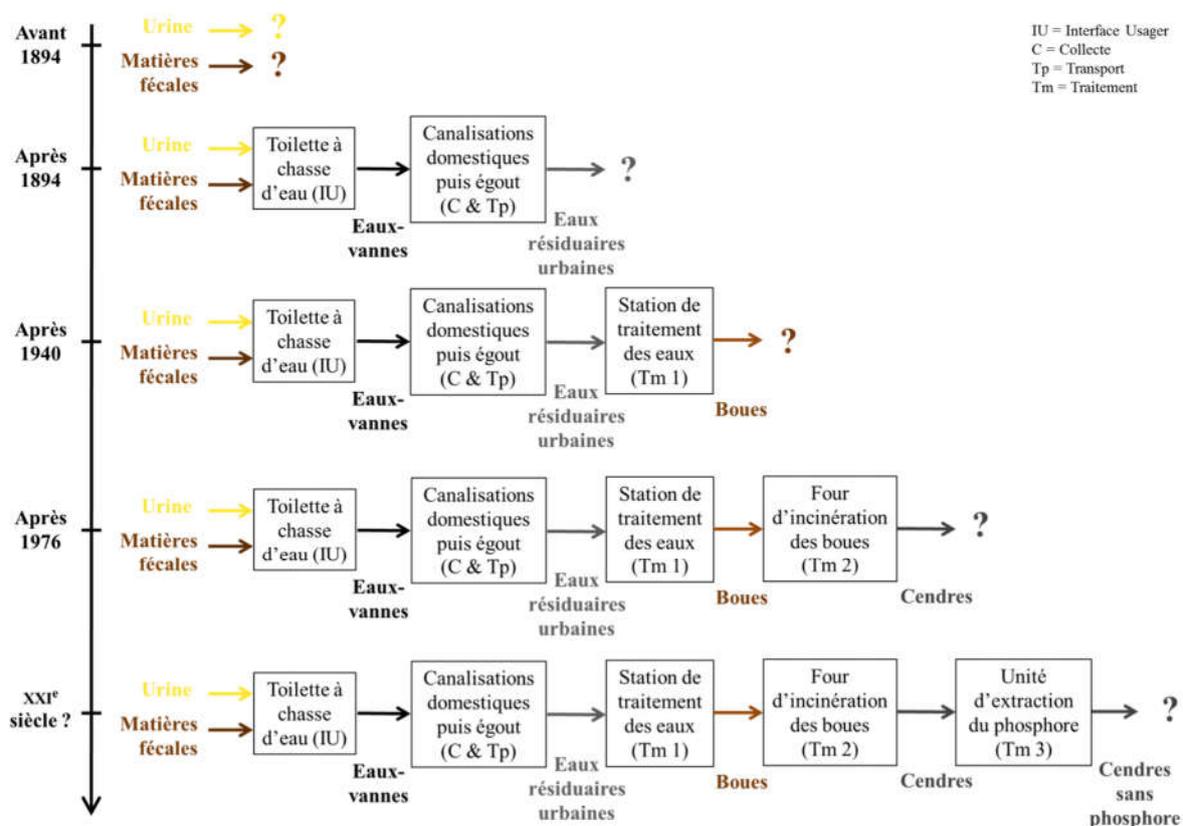


Figure 5.7 : Réduction du débat sur le devenir des cendres sans phosphore ?

Cette réduction des champs du débat au début du XXI^e siècle est bien illustrée par le Plan Régional d'Élimination des Déchets Ménagers et Assimilés d'Île-de-France de 2009 (CR IDF, 2009), dont le titre porte déjà en lui-même peu d'espoirs quant à la possibilité de mise en place de valorisation puisqu'il s'agit d'« éliminer » les déchets. Ce plan présente de façon totalement différente les déchets ménagers collectés à sec et ceux collectés par les égouts. Pour les premiers, il analyse en détail les gisements des différents types de déchets (verre, emballages, etc.) pouvant être collectés sélectivement et analyse les possibilités de gestion optimale en termes de collecte, de traitement et d'usage final. Pour les seconds, la première phrase du paragraphe correspondant indique déjà la réduction des champs du débat par rapport aux déchets collectés à sec : « les usines d'épuration des eaux usées produisent des boues [...] ». Seul le devenir des boues est ensuite débattu, excluant *de facto* urines, matières fécales et eaux usées des champs du débat. L'objectif de valorisation organique des boues y est fixé à 60 % mais cet objectif de circularité partielle ne porte plus que sur les éléments captés dans les boues, qui sont très minoritaires par rapport aux éléments produits à la source.

Nous avons ainsi montré que, tout au long du XX^e siècle, s'est opérée une uniformisation des chaînes de gestion et une réduction progressive des champs du débat relatif aux modalités de gestion optimales des urines et des matières fécales. Au début du XXI^e siècle, le débat ne porte plus que sur les modalités de gestion des boues de station d'épuration. Les urines ont disparu physiquement dans les eaux usées, elles ont aussi disparu des débats sur les possibilités de leur gestion alternative au tout-à-l'égout.

5.2.3. Le couplage actuel de la gestion des urines avec le régime socio-technique verrouillé du tout-à-l'égout

La disparition de l'urine avec les matières fécales dans l'assainissement, l'uniformisation des chaînes de gestion et la réduction des champs du débat participent finalement d'un verrouillage socio-technique autour de la chaîne de gestion dominante d'aujourd'hui du tout-à-l'égout. Le verrouillage socio-technique relève des études des sciences et techniques et de l'économie de l'innovation. On peut l'illustrer par les travaux de Geels portant sur l'analyse de la transition technologique dans le domaine maritime par le passage de la voile à la vapeur (Geels, 2002). Nous reproduisons ici une adaptation du schéma qu'il présente dans cet article (Figure 5.8).

diffusion et d'appropriation, constituant alors une véritable innovation. Selon le degré de leur diffusion, elles peuvent aller jusqu'à modifier le régime socio-technique et participer d'une nouvelle organisation des acteurs autour d'un régime socio-technique modifié dans lequel elles sont passées du statut de niche à celui de régime.

Le mécanisme de verrouillage socio-technique désigne le fait que, dans la constitution d'un régime socio-technique, des mécanismes d'auto-renforcement se mettent en œuvre, tel que nous l'avons illustré à la section 5.2.1 par le renforcement mutuel du réseau d'eau potable et du réseau d'eaux usées. Il n'y a finalement pas une seule variable ou seul acteur qui pourrait être considérée l'unique responsable d'un verrouillage mais un processus général qui, par les mécanismes d'auto-renforcement autour d'un choix socio-technique collectivement effectué, verrouille globalement le système dans un certain régime socio-technique.

Le système alimentation/excrétion est concerné par des verrouillages socio-techniques à différents niveaux :

- par les sous-systèmes avec lesquels il est couplé : système transport, système énergie, système eau, etc. ;
- par les modalités de fonctionnement des deux principaux sous-ensembles qui le constituent à savoir l'alimentation et l'excrétion.

On pourra se référer par exemple à Meynard *et al.* (2013) pour une illustration de verrouillage socio-technique dans le domaine de la production agricole. Le verrouillage socio-technique autour du réseau d'eaux usées (et d'eau potable) est illustré par Souami dans le cas de l'utilisation d'eau pluviale (Souami, 2012).

Dans le tout-à-l'égout, le verrouillage socio-technique présente au moins deux caractéristiques notables :

- le verrouillage socio-technique s'effectue sur le temps long. Au vu de nos analyses historiques précédentes, nous proposons de considérer dans le cas parisien que 1894 constitue la date qui marque le début du verrouillage socio-technique²⁶². Il y a donc aujourd'hui un passif de verrouillage socio-technique de plus d'un siècle et de plus de quatre générations ;

²⁶² À cette époque, l'utilisation de l'égout constitue un verrouillage mais la destination des eaux usées est encore ouverte (champs d'épandage).

- le tout-à-l'égout est caractérisé par un patrimoine infrastructurel très important. Lesavre estime ainsi que le patrimoine infrastructurel de l'assainissement français représente un capital d'environ 4 000 €/pers (communication personnelle). Toute transition socio-technique du tout-à-l'égout pose donc la question du devenir de ce patrimoine et des modalités de son entretien et de sa gestion, en particulier dans le cas d'un abandon progressif, comme on peut le trouver pour d'autres systèmes socio-techniques (parc nucléaire, voies de chemin de fer ou de tramway, etc.).

Les régimes socio-écologiques qui nous intéressent ici et que nous avons principalement caractérisés par des flux de matières (cf. section 1.3.1) sont bien sûr intimement liés aux technologies sur lesquelles ils reposent et sont donc associés à des régimes socio-techniques. Nous avons esquissé des liens entre les caractéristiques des régimes socio-écologiques alimentation/excrétion et les régimes socio-techniques correspondants, avec par exemple les notions de circularité extractive et intégrale (cf. sous-section 4.3.2.3) ou encore le niveau de technologie requis (cf. sous-section 4.2.7.3). L'analyse des possibilités de transition socio-écologique nécessite donc de questionner la possibilité de déverrouillage du régime socio-technique.

La séparation à la source de l'urine présente un potentiel technique pour être le support d'une transition socio-écologique (quatrième partie). Or dans le paysage socio-technique actuel, la séparation à la source de l'urine présente clairement un caractère de niche. Deux phases temporelles semblent alors se distinguer dans une éventuelle transition socio-écologique à laquelle la séparation à la source de l'urine contribuerait :

- à court terme, une phase d'émergence. Dans ce cas, la question qui se pose est de savoir si l'introduction de la séparation à la source de l'urine est susceptible d'intervenir dans le cadre du régime socio-technique (et socio-écologique) actuel. Il s'agira donc d'appréhender le degré de verrouillage du régime socio-technique vis-à-vis de l'introduction de séparation à la source de l'urine ;
- à plus long terme, une phase de diffusion de cette innovation, susceptible d'entraîner une modification du régime socio-technique et par là-même une transition socio-écologique globale.

La séparation à la source de l'urine peut en outre être mise en œuvre suivant deux logiques radicalement différentes vis-à-vis du patrimoine infrastructurel d'égout (cf. section 5.1.2) :

- elle peut être simplement greffée sur le système existant, n'entraînant alors pas de remise en cause fondamentale de l'égout ;

- elle peut s’accompagner d’une remise en cause beaucoup plus générale du système eau et nécessiter alors de revisiter beaucoup plus en profondeur le régime socio-technique de l’égout.

Dans l’analyse de court terme que nous présentions précédemment, les mécanismes d’auto-renforcement du régime socio-technique du tout-à-l’égout sont *a priori* très forts. Or nous avons vu que les modifications de gestion des urines seules, à l’exclusion des matières fécales et des eaux ménagères, pouvaient déjà constituer la base d’une transition socio-écologique par les modifications de flux induites. Il paraît donc intéressant d’analyser en quoi l’introduction à court terme de séparation à la source de l’urine, greffée sur le régime socio-technique dominant du tout-à-l’égout, est aujourd’hui envisageable car elle peut déjà porter les prémices d’une transition socio-écologique. Le découplage entre le système alimentation/excrétion et le système eau n’est alors que partiel mais il permet déjà des modifications profondes des flux de matières et la séparation à la source de l’urine introduit ainsi la possibilité de l’existence d’une alternative.

Dans le temps long, la question des modalités de réalisation de transitions socio-écologiques et socio-techniques deviennent éminemment plus complexes. Selon les modalités d’évolution du paysage socio-technique et des différents autres sous-systèmes énergie, transport, etc., l’opportunité et les possibilités de réalisation d’une transition socio-écologique par la séparation à la source de l’urine sont beaucoup plus difficiles à établir clairement.

Nous essaierons tout de même de faire un travail prospectif de long terme dans une perspective de transition socio-écologique accomplie. La plupart des acteurs des techniques alternatives d’assainissement que nous avons interrogés s’accordent pour dire qu’il n’y a pas une seule technique alternative d’assainissement qui serait susceptible de contester le monopole actuel du tout-à-l’égout et de s’imposer comme technologie dominante d’un nouveau régime socio-technique mais toute une panoplie de techniques envisageables dont les cadres d’application seront différents, de même que les motivations des acteurs qui les auraient portées. Au vu du potentiel que nous avons identifié pour la séparation à la source de l’urine dans le cadre de notre intérêt premier pour la transition socio-écologique des systèmes alimentation/excrétion urbains vers la circularité, nous étudierons donc préférentiellement la séparation à la source de l’urine dans le court terme et essaierons d’analyser les multiples autres évolutions possibles dans une perspective de plus long terme.

5.3. Le contexte favorable parisien aujourd'hui

Nous avons vu dans la quatrième partie de cette thèse qu'une prise de conscience relative à l'urine avait émergé en Europe scandinave et germanique à partir des années 1990. Nous avons également vu que de nombreuses chaînes de gestion de l'urine circulaires étaient aujourd'hui envisageables dans le contexte de l'agglomération parisienne et qu'elles pouvaient bénéficier du retour d'expérience de vingt années de séparation à la source de l'urine en Europe. L'émergence d'une niche de développement socio-technique de la séparation à la source de l'urine semble donc envisageable dans l'agglomération parisienne aujourd'hui et elle nous intéresse tout particulièrement pour le potentiel de transition socio-écologique qu'elle peut représenter. Nous allons ainsi essayer d'analyser dans les sections suivantes en quoi le régime dominant du tout-à-l'égout pour la gestion des urines dans l'agglomération parisienne est susceptible de permettre l'apparition voire le développement de cette niche.

5.3.1. La diffusion récente de la prise de conscience relative à l'urine en France

5.3.1.1. Antériorité des mouvements militants d'assainissement écologique

La diffusion de la prise de conscience relative à l'urine dans l'Europe germanique entre les années quatre-vingt-dix et deux mille dix ne semble presque pas avoir concerné la France. Nous avons présenté à la section 4.3.1 le développement de mouvements écologiques prônant l'utilisation d'interfaces usagers sèches dans une logique de préservation des ressources en eau et de fermeture des cycles biogéochimiques. Il s'agit *a priori* de l'unique voie de développement d'une prise de conscience relative à l'urine, ou plus généralement aux excréments et aux eaux usées, en France à cette époque.

Beaucoup de ces initiatives ont d'ailleurs une origine plus lointaine, en particulier avec le mouvement issu de Mai 68 que l'on peut illustrer par Pierre Colombot, fondateur de l'entreprise Sanisphère. Titulaire d'un poste de maître de conférences en urbanisme, il est arrivé dans la Drôme en 1976-77 pour vivre en communauté et élever des chèvres (Annexe 2). Comme beaucoup de communautés de l'époque, leurs toilettes sont sèches et Pierre Colombot s'intéresse aux potentialités du développement des toilettes sèches. Il effectue ainsi un voyage d'étude en Norvège et en Suède en 1982-83 où il découvre toute une industrie très développée autour de la toilette sèche. Il s'y intéresse progressivement de plus en plus jusqu'à fonder son entreprise en 1991 et développer en 1996 la toilette sèche à séparation d'urine sur tapis roulant que nous avons présentée à la sous-section 4.2.1.3.

L'utilisation de toilettes sèches, principalement dans trois contextes à savoir les sites isolés, les familles militantes et l'événementiel, amène petit à petit cette solution technique à se déployer en France, non pas dans la continuité de la toilette au fond du jardin mais bien dans le cadre d'une nouvelle alternative au tout-à-l'égout ayant le potentiel de se développer. Jusqu'à la fin des années deux mille, il semble toutefois que les toilettes sèches aient conservé un statut de technique relativement marginale et inapplicable en dehors de ces trois contextes spécifiques²⁶³. Nous ne connaissons aucune référence de mise en œuvre de techniques alternatives de gestion des urines et/ou matières fécales, en dehors de ces contextes d'application, pour les années quatre-vingt-dix à deux mille.

Dans le domaine académique en particulier, alors que nous avons montré la forte implication des scientifiques scandinaves et germaniques sur le sujet dès les années quatre-vingt-dix, les organismes de recherche travaillant sur les procédés techniques de gestion des urines et matières fécales (et donc des eaux usées) ne semble explorer une alternative au tout-à-l'égout des urines et matières fécales que dans le cas contraint de l'assainissement autonome. S'il a pu y avoir quelques initiatives, elles n'ont semble-t-il pas eu de postérité²⁶⁴ et la recherche d'alternatives à l'égout se concentre principalement sur la gestion des eaux pluviales, voire les eaux ménagères et bien sûr le traitement des eaux usées en zone d'assainissement non collectif²⁶⁵.

En revanche, au sein des structures militantes, telles celles que fédère aujourd'hui le Réseau de l'Assainissement Écologique, on trouve de nombreuses réflexions et recherches relatives à l'alternative au tout-à-l'égout. Dans les années deux mille, au moment où ce réseau se structure, de nombreux travaux émergent qui montrent un premier développement de compétences françaises sur le sujet. Parmi de nombreuses productions sur les manières de construire des toilettes sèches ou sur des critiques du tout-à-l'égout, on notera deux ouvrages qui ont particulièrement retenu notre attention :

- une étude bibliographique de 2006, menée au sein de Sanisphère (alors nommée Ecosphère), sur les traitements possibles de l'urine (Perrier, 2006). Les uniques références françaises mentionnées par Perrier datent toutes de 1991 et concernent

²⁶³ Mis à part bien sûr les applications à l'étranger où sont impliqués des Français, principalement dans les pays du Sud, dans le cadre de l'aide au développement.

²⁶⁴ Une étude plus systématique des initiatives de recherche et développement à des alternatives au tout-à-l'égout et des raisons de leur absence de postérité mériterait d'être menée.

²⁶⁵ Ce constat n'inclut pas les recherches françaises en sciences humaines et sociales de cette époque sur ce sujet qu'il serait pertinent d'analyser.

uniquement le Centre d'Expérimentation et de Documentation sur les Énergies Renouvelables²⁶⁶ ;

- une critique assez large et étayée du tout-à-l'égout et les modalités possibles de transition vers un assainissement écologique en 2009 (Lanoé, 2009).

La possibilité d'un paradigme alternatif au tout-à-l'égout trouve aussi une certaine forme d'écho institutionnel par les propositions mentionnées dans le rapport de l'Institut Français de l'Environnement de 2008 (IFEN, 2008). Aux dires de l'auteur de ces lignes, que nous avons interrogé, il y a toutefois eu une très grande réticence à pouvoir inclure ces propositions alternatives à la continuation du régime socio-technique dominant. On notera également que l'Institut Français de l'Environnement, relativement indépendant, a été dissous en 2008.

D'après la cartographie des membres du Réseau de l'Assainissement Écologique, il semble que trois grandes zones françaises soient le creuset plus particulier du développement de recherches et de mises en œuvre d'alternatives au tout-à-l'égout :

- la Drôme et l'Ardèche, que nous avons déjà mentionnée et dont nous avons indiqué la relation avec Mai 68 (Annexe 2) ;
- le Sud-Ouest pour lequel on peut émettre l'hypothèse que le climat sec n'est pas indifférent à une sensibilité locale aux baisses de consommation d'eau permises par les toilettes sèches. L'explosion de l'usine AZF en 2001 est également fréquemment mentionnée comme le déclencheur d'une réflexion sur les limites du modèle industriel de production d'engrais et l'alternative possible de valorisation des engrais humains ;
- la Bretagne²⁶⁷.

La faible implication des structures académiques françaises dans les alternatives au tout-à-l'égout centralisé se retrouve par exemple dans les nationalités des organismes de rattachement des auteurs du récent ouvrage de référence que nous avons abondamment cité ici : Larsen *et al.*, 2013. Co-édité par trois auteurs suisses, donc voisins géographiques de la France, cet ouvrage regroupe cinquante-cinq auteurs et co-auteurs de chapitres dont aucun ne travaille dans un organisme français. Treize pays y sont représentés dont huit pays européens différents. On ne retrouve par exemple pas non plus la France dans le récent projet européen ValueFromUrine qui regroupe pourtant presque tous les pays frontaliers de la France. Pareillement, alors que la DWA allemande a créé une commission de travail

²⁶⁶ Les productions de ce centre et leur postérité après 1991 mériteraient d'être analysées.

²⁶⁷ L'origine de la forte implication sur l'assainissement écologique en Bretagne serait intéressante à investiguer.

sur les nouvelles techniques alternatives d'assainissement en 1999 qui possède aujourd'hui 200 membres actifs (cf. section 4.1.5 et Annexe 3), son équivalent français, l'ASTEE, ne possède aucun groupe de travail équivalent à ce jour.

L'émergence d'un intérêt de la communauté académique et technique française pour les alternatives au tout-à-l'égout en général, et pour la séparation à la source de l'urine en particulier, ne semble émerger qu'au début des années deux mille dix. Sa première concrétisation à notre connaissance est la thèse soutenue par A. Triger en 2012 à l'Université de Toulouse (Triger, 2012). Là encore, le fait que l'urine humaine soit l'objet fondamental de la recherche qu'il a menée apparaît timidement dans le titre, ce qui rappelle la dénomination ANS du premier article suisse de 1996 (cf. section 4.1.5). Le mot urine apparaît en effet seulement entre parenthèses dans le titre : « Procédé hybride cristallisation/séparation membranaire pour le traitement d'un fluide complexe (urine) ». À nouveau, nous n'avons trouvé aucune référence à des travaux français dans la bibliographie de cette thèse soutenue en 2012.

C'est finalement très récemment, en 2014, qu'émergent deux foyers académiques français s'intéressant à la séparation à la source de l'urine. Le premier est l'Université de Toulouse qui avait accueilli la thèse d'A. Triger. Le laboratoire LISBP y est lauréat d'un projet nommé SMS (Séparation des Micropolluants à la Source) dans le cadre de l'appel à projets Micropolluants lancé par les six Agences de l'Eau et l'ONEMA. La séparation à la source de l'urine n'y est donc investiguée que par l'angle principal d'approche de traitement des micropolluants. Au dire des porteurs du projet que nous avons interrogés, l'idée de travailler sur ce sujet existait depuis déjà longtemps, au-delà de la question des micropolluants mais plus généralement sur les possibilités d'alternatives au tout-à-l'égout. Toutefois aucune opportunité de pouvoir trouver des financements n'avait encore été possible jusqu'alors. Ce foyer se développe depuis par le financement d'une thèse sur la modélisation urbaine de séparation des effluents à la source (projet MUSES, thèse en cours de M. Besson).

Le second foyer nous met en abyme par cette thèse puisqu'il s'agit du territoire parisien et donc entre autres du programme de recherche et action OCAPI, dont cette thèse est le livrable principal de la première phase 2014-2018. Nous décrivons dans la partie suivante cette émergence d'intérêt parisienne. Nous cherchons ici à conserver une description la plus objective possible de la manière dont cette émergence a eu lieu mais on comprendra aisément les limites qu'il peut y avoir pour l'auteur de cette thèse à décrire ce processus tout en y baignant totalement. Il nous paraît toutefois important d'analyser cette émergence pour comprendre en quoi le territoire parisien peut aujourd'hui correspondre à une situation éventuellement favorable à l'émergence de la séparation à la source de l'urine. L'objectivité de toute activité scientifique nous paraissant de toute façon toujours limitée (Hache, 2011), nous devons ici assumer une subjectivité nécessairement présente pour une telle analyse.

5.3.1.2. Émergence d'intérêt du territoire parisien pour la séparation à la source de l'urine

Parmi les principaux acteurs parisiens de l'assainissement que nous avons pu interroger, la première personne qui aurait considéré favorablement l'idée que les urines puissent être collectées à grande échelle sur un territoire comme l'agglomération parisienne semble avoir été Jean-Pierre Tabuchi, alors en poste à l'Agence de l'Eau Seine Normandie. Il eut connaissance de cette possibilité à la lecture d'un ouvrage de 2001 (Maksimovc & Tejada-Guibert, 2001). En 2008, l'auteur de cette thèse rencontre Jean-Pierre Tabuchi dans le cadre de son projet de fin d'études et découvre les travaux suisses et suédois sur la séparation à la source de l'urine (Esculier, 2008). Dans ce travail, aucune autre des personnes interrogées n'avait émis l'hypothèse que la séparation à la source de l'urine puisse être une alternative crédible au tout-à-l'égout et la réaction de la plupart des acteurs de l'assainissement parisien interrogés était assez semblable à la réticence, voire au dénigrement, que décrit T. Larsen dans les premières années de présentation de ses hypothèses de travail (cf. section 4.1.5). Il ne semble pas y avoir d'avancées particulières sur la question de la séparation à la source de l'urine à Paris entre 2008 et 2012. C'est à cette date que la séparation à la source de l'urine passe d'un stade très hypothétique à celui d'une éventualité à envisager pour l'avenir de la gestion des urines sur l'agglomération parisienne.

En effet, en 2012 est réuni un groupe de travail regroupant la majorité des acteurs de l'eau et de l'assainissement de l'agglomération parisienne, sous l'égide du préfet de la région Île-de-France. Ce groupe de travail a pour vocation d'analyser en quoi le projet politique du Grand Paris, initié en 2007 par le président de la République et précisé par la loi n° 2010-597 du 3 juin 2010, est soutenable du point de vue du développement de cette agglomération au regard des ressources en eau et de la gestion des eaux usées. L'auteur de cette thèse participait alors à ce groupe de travail en tant que responsable du service police de l'eau de la Seine à la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie d'Île-de-France, de même que Jean-Pierre Tabuchi, désormais chargé de mission innovation au SIAAP.

Or un point de tension pour le développement de l'agglomération parisienne ressort assez rapidement avec le tout-à-l'égout et Jean-Pierre Tabuchi l'illustre par l'image d'un effet ciseau. En effet, l'agglomération parisienne est une agglomération à P/Q très grand (cf. sous-section 3.3.1.2). Celui-ci vaut $112 \text{ EH}/(\text{L/s})^{268}$, soit environ 100 fois le ratio P/Q de $1 \text{ EH}/(\text{L/s})$ dont nous avons montré à la section 3.3.1.2 qu'il correspondait à une agglomération dont le rejet direct des eaux usées par le

²⁶⁸ Hypothèses de calcul : équivalents-habitants de l'agglomération parisienne estimé par la population de l'unité urbaine de Paris en 2012 soit 10 550 350 EH et QMNA5 de $94 \text{ m}^3/\text{s}$ dans la Seine à Paris (DRIEE-IF, 2014).

tout-à-l'égout ne constituerait pas une pollution au sens de la DCE. Autrement dit, au QMNA5, avec les hypothèses de calcul choisies, il faut donc obtenir un rendement de traitement de l'azote réduit des eaux usées de 98 % pour respecter les seuils de la DCE. L'effet ciseau consiste en une augmentation future prévue du P/Q par la modification conjointe de ses deux facteurs constitutifs :

- une hausse de la population, sur 2008-2012 de l'ordre de 0,5 % par an en moyenne sur l'Île-de-France et sur la zone de collecte du SIAAP (données INSEE) et *a priori* soutenue à l'avenir par le projet politique du Grand Paris. En supposant un maintien de ce taux de croissance jusqu'en 2050, cela donne une hausse de la population de 21 %.
- une baisse du débit de la Seine estimée à environ 30 % à horizon 2050 (Habets *et al.*, 2011).

Voici comment J.-P. Tabuchi l'illustre (Figure 5.9).



Figure 5.9 : Effet ciseau auquel est soumis l'assainissement de l'agglomération parisienne

Source : J.-P. Tabuchi.

Avec les hypothèses indiquées ci-dessus, le P/Q de l'agglomération parisienne augmente d'environ 70 % et passe à 194 EH/(L/s) en 2050. Cela correspond à l'exigence d'un rendement de 99 % sur l'azote réduit soit une performance de traitement de l'azote près de deux fois plus élevée. Or, à ces niveaux de performance, les coûts marginaux (économiques, énergétiques, etc.) de traitement de l'azote sont croissants, en particulier du fait qu'ils nécessitent la mise en œuvre de procédés technologiques plus intensifs tels que les traitements membranaires²⁶⁹.

²⁶⁹ On notera que l'intérêt de la séparation à la source de l'urine est *a fortiori* encore plus important dans les grandes communes situées sur des tout petits cours d'eau, à P/Q parfois nettement plus élevé que Paris sur la Seine, comme Versailles sur le ru de Gally ou Rambouillet sur la Guéville et pour lesquelles le tout-à-l'égout est

D'après le SDAGE du bassin Seine-Normandie en vigueur (AESN, 2015), il est évalué que la Seine n'est déjà pas au bon état au sens de la DCE sur le paramètre NH_4^+ , du fait du problème structurel indiqué précédemment mais également par les déversements de temps de pluie du réseau unitaire de l'agglomération parisienne. La continuation du modèle du tout-à-l'égout, par dilution des effluents traités dans l'exutoire principal de l'agglomération parisienne qui est la Seine, devient donc de plus en plus critique à l'avenir et le groupe de travail de 2012 a mis au jour ce point lors de ses travaux. La criticité du P/Q de l'agglomération parisienne est particulièrement bien illustrée par les photographies de la Seine à Paris qui ont été prises durant la Seconde Guerre mondiale²⁷⁰. On constate alors visuellement à quel point l'agglomération de plus de 10 millions d'habitants de Paris est construite sur un fleuve relativement petit et peu propice à l'application du tout-à-l'égout (Figure 5.10).



Figure 5.10 : Photographie de la Seine à Paris durant l'été 1942.

Source : Voies Navigables de France.

Avec le soutien de son directeur, l'auteur de cette thèse a pu présenter à ce groupe de travail Grand Paris les résultats de son projet de fin d'études et l'hypothèse que l'étude d'alternatives au tout-à-l'égout, dont la séparation à la source de l'urine, pouvait s'avérer judicieuse au vu des contraintes

structurellement incompatible avec les objectifs de la DCE et a fait l'objet de nombreux contentieux depuis sa mise en place (Dmitrieva, 2018).

²⁷⁰ Le barrage de Suresnes, qui maintient la hauteur d'eau du bief de la Seine à Paris, a été abaissé durant l'été 1942 pour permettre d'y faire des travaux. Ces photographies permettent donc de constater quel est le niveau d'eau de la Seine en l'absence du soutien artificiel de cette hauteur par les barrages de navigation (et sans le soutien des quatre grands barrages-réservoirs non plus à cette époque).

actuelles et anticipées du développement du Grand Paris. Les réactions à cette présentation furent très diverses. Les représentants des deux entreprises privées présentes estimèrent que ces alternatives n'étaient pas sérieuses. D'autres acteurs publics se sont *a contrario* montrés curieux et intéressés par une idée qu'ils ne connaissaient pas ou presque et dont le potentiel de bénéfices environnementaux semblait mériter qu'on s'y intéresse.

En parallèle, les travaux d'analyse du potentiel des techniques alternatives au tout-à-l'égout et les développements et projets pilotes se poursuivaient toujours en Europe scandinave et germanique. En France, le Réseau de l'Assainissement Écologique venait de se constituer officiellement en association et de plus en plus d'entreprises se créaient pour proposer, dans des contextes de plus en plus élargis, des applications des principes de l'assainissement écologique.

Dans ce contexte, début 2013, le SIAAP recrute Amandine Caby, étudiante du Mastère spécialisé Politique et Action Publique pour le Développement Durable de l'École des Ponts ParisTech, afin d'étudier durant quatre mois, dans le cadre de sa thèse professionnelle de Mastère, l'intérêt et l'opportunité de mettre en place une collecte sélective des urines en milieu urbain dense (Caby, 2013). Son rapport rendu durant l'été 2013 est très positif et conclut que la mise en place de séparation à la source de l'urine ne présente pas de freins techniques ou réglementaires majeurs, que son acceptabilité sociale serait plutôt bonne et que son bilan environnemental global est très positif. Il invite en outre à lancer des projets pilotes afin de confronter la théorie de l'intérêt de la séparation à la source étudiée avec les problèmes pratiques qui pourraient être rencontrés.

5.3.1.3. Orthogonalité et opportunité du programme OCAP

Enthousiasmé par la lecture de ce rapport, l'auteur de cette thèse contacte alors fin 2013 de très nombreuses personnes qui pourraient être intéressées par la séparation à la source de l'urine afin de mettre en pratique les recommandations faites par Caby (2013) et de mieux évaluer le potentiel de la séparation à la source de l'urine et plus généralement les potentialités de transition socio-écologique et socio-technique qu'elle semble receler. Pour de très nombreuses personnes contactées, ce projet est orthogonal aux pratiques et aux cultures existantes et suscite très peu d'intérêt, voire il est réprouvé. Deux types d'acteurs s'y montrent toutefois intéressés :

- certains chercheurs, pour lesquels ce sujet se rapproche de leurs axes de recherche et dont les laboratoires formeront finalement le cœur du comité OCAP, à savoir le laboratoire METIS, le laboratoire LEESU et le laboratoire Géographie-Cités ;
- deux structures publiques parties prenantes du sujet, le SIAAP et l'AESN.

Pour le SIAAP, l'intérêt pour la séparation à la source de l'urine est nécessairement ambivalent : séparer les urines à la source pour en valoriser l'azote peut être perçu comme une remise en cause de

plusieurs décennies de développement du traitement des eaux usées, dont l'apogée est justement l'installation intégrale de la dénitrification de l'azote sur toutes les stations d'épuration du SIAAP, en 2012.

L'émergence d'un intérêt pour la séparation à la source de l'urine est fondamentalement liée à un changement du contexte dans lequel s'inscrit l'assainissement, ou tout au moins de l'analyse que l'on peut en faire, et où la protection seule des milieux aquatiques ne suffit pas nécessairement à garantir la soutenabilité du système. Avec la linéarisation du système alimentation/excrétion au XX^e siècle, il n'y a pas nécessairement d'attente que le traitement des eaux usées puisse fournir des ressources car il répond avant tout à une demande de salubrité et de gestion la moins coûteuse possible d'un déchet dont la ville se débarrasse. La séparation à la source de l'urine remet ainsi en cause non seulement le régime socio-technique mais également le cadre de pensée qui l'accompagne, ce qui ne peut se faire sans difficultés. Le président de l'époque du SIAAP, Maurice Ouzoulias, réagit ainsi à la présentation de la séparation à la source de l'urine qui lui fut faite en 2015 : « Le SIAAP est comme un TGV lancé à pleine vitesse et vous me dites qu'il faut faire un virage à quatre-vingt-dix degrés ? »²⁷¹ L'idée d'orthogonalité décrit ainsi probablement assez bien la façon dont la séparation à la source de l'urine peut alors, et toujours aujourd'hui, s'inscrire dans le régime socio-technique.

Par difficulté méthodologique liée à la subjectivité, nous n'analyserons pas ici en détails les mécanismes qui ont pu faire que le programme OCAPÉ émerge mais il est bien sûr fortement lié à des paramètres comme les personnalités, les réseaux, les intérêts variés des acteurs, etc. On notera toutefois certains éléments qui expliquent en quoi la séparation à la source de l'urine peut constituer un intérêt pour le SIAAP, malgré son orthogonalité, et qui permettent en partie son émergence aujourd'hui à Paris.

En effet, nous avons vu dans les chapitres précédents que la séparation à la source de l'urine, greffée sur le tout-à-l'égout existant, pouvait avoir des caractéristiques qui peuvent être analysées comme des avantages pour ce système. Elle peut en effet permettre entre autres (cf. principalement la sous-section 4.2.7.2) :

- de ne pas avoir à financer ni construire une infrastructure complémentaire de traitement de l'azote ;
- un rééquilibrage du ratio BDO5:N:P des effluents ;
- une augmentation de la production de biogaz ;

²⁷¹ La citation n'est pas textuelle car elle n'a pu être enregistrée sur l'instant mais il ne nous semble pas trahir l'esprit de la phrase qui avait alors été prononcée.

- une diminution des impacts environnementaux globaux du système d’assainissement.

Dans un contexte de développement de l’intérêt pour la méthanisation et de projets de valorisation des biodéchets de l’agglomération parisienne par méthanisation sur les installations du SIAAP, toute initiative qui permet de continuer à véhiculer le carbone par les égouts, entre autres celui des matières fécales, sans azote excédentaire peut être intéressante. Dans le cas de la séparation à la source de l’urine, elle se confronte toutefois à une question d’échelles temporelles et spatiales. En effet, nous avons montré que le système d’assainissement actuel s’était construit sur une échelle de temps du siècle. Toute transition socio-technique profonde est ainsi difficile à concevoir sur une échelle de temps nettement inférieure ce qui pose la question de la possibilité de l’insérer aujourd’hui dans une stratégie d’action au vu de l’importance des contraintes du système, de son inertie et du cadre temporel relativement bref de l’action politique. La séparation à la source de l’urine relève également de dynamiques locales dont l’échelle spatiale ne coïncide pas avec celle de la gestion des effluents de l’agglomération parisienne dans son ensemble. La résultante de toutes ces contraintes est toutefois positive et le SIAAP inscrit ainsi la séparation à la source de l’urine comme une action pertinente de sa stratégie SIAAP 2030.

De nombreuses collectivités territoriales sont également intéressées par ces initiatives. OCAPI porte ainsi un groupe de travail relatif à la séparation à la source au sein de l’association ARCEAU IDF (Association Recherche et Collectivités dans le domaine de l’Eau – Ile-de-France).

Pour l’AESN, la diversité des acteurs qui constituent le comité de bassin entraîne également une diversité d’intérêts pour la séparation à la source. Cette initiative a toutefois été positivement reçue dans l’ensemble, entre autres du fait de l’amélioration de la qualité des milieux aquatiques qu’elle permet, et figure aujourd’hui dans deux documents majeurs :

- le SDAGE du bassin Seine-Normandie actuellement en vigueur (AESN, 2015) et sa disposition L1.162 « Promouvoir l’expérimentation des solutions émergentes d’adaptation aux changements globaux pour préserver la ressource et les milieux aquatiques », qui préconise de mener des expérimentations de collecte sélective des urines pour permettre de baisser qualitativement les pressions sur les milieux aquatiques ;
- l’action E.5 de la stratégie d’adaptation au changement climatique du bassin Seine-Normandie qui invite à développer « des solutions alternatives en matière d’assainissement écologique, comme la gestion séparative des urines ou les toilettes sèches », et de mettre en place une animation autour de cette thématique.

Le programme OCAPI s'inscrit ainsi temporellement à un moment opportun du fait d'une prise de conscience générale sur les limites des modalités du développement du monde occidental²⁷², d'un intérêt pour l'économie circulaire²⁷³ et d'une multiplication des initiatives de gestion alternative des urines et matières fécales.

Ainsi, sans viser l'exhaustivité, on notera une multiplication des projets liés à une séparation à la source de l'urine et des matières fécales depuis 2010 en France qui contraste avec les initiatives beaucoup moins nombreuses ou développées des décennies précédentes :

- construction du premier établissement scolaire français exclusivement pourvu de toilettes sèches à Saint-Germé (Gers) en 2012 ;
- construction du premier bâtiment de Paris équipé de toilettes sèches en 2015 (siège de la Fondation Charles-Léopold Meyer pour l'Homme) ;
- développement des toilettes sèches sur les festivals et sur les chantiers (Annexe 2)²⁷⁴ ;
- élaboration d'une charte pour des événements écoresponsables à Paris, qui préconise « l'installation de toilettes sèches ou toilettes hybrides en lieu et place des toilettes chimiques, selon la taille de l'événement » ;
- propositions régulières de constructions de bâtiments avec séparation à la source de l'urine pour des concours parisiens (Réinventer Paris, Réinventer la Seine, Paris-Saclay, etc.) ;
- mise en place d'urinoirs publics à Paris avec valorisation agricole des urines collectées (Uritrottoir) ;
- développement du module de sensibilisation UriBoost (cf. sous-section 4.2.5.3) par la start-up Ecosec et financé par l'entreprise WCLoc qui ne proposait jusqu'alors à notre connaissance aucune solution de valorisation agronomique des urines et matières fécales.

Les deux projets permanents les plus importants de séparation à la source de l'urine de Paris ne sont pas encore terminés à l'heure où sont rédigées ces lignes. Il s'agit de l'équipement de deux bâtiments

²⁷² Cf. pour ne donner qu'une seule illustration l'accord de Paris de la COP21 en décembre 2015.

²⁷³ Cf. sous-section suivante.

²⁷⁴ À l'étranger, on notera par exemple le succès de la campagne de communication autour du « Beercycling » qui consiste à collecter l'urine du festival de Roskilde en 2015 pour servir d'engrais à des cultures d'orge qui doivent permettre la production de bière.

du SIAAP, à Clichy et à Achères, de respectivement environ 50 et 350 personnes, où sont prévues d'être collectées sélectivement les urines masculines, sur urinoir sec, à partir de 2018.

Le contexte dans lequel s'inscrivent ces initiatives est un mouvement général décrit par Hache (2011), qui reprend les écrits de Larrère et Latour, où la crise environnementale correspond à une « manifestation de choses qui allaient de soi » et une « révolte généralisée des moyens » qui sont désormais à traiter également comme des fins. Malgré le tabou socio-culturel qui entoure les excréments humains, cette révolte généralisée des moyens concerne également aujourd'hui les urines et matières fécales humaines qui suivent ainsi une réapparition, en mouvement inverse à la disparition que nous avons décrite à la section 5.2.1. La crise environnementale remet ainsi en question le principe même de la toilette à chasse d'eau, décrit Figure 4.5 comme étant par essence une façon d'oublier les excréments, dès lors que ceux-ci se rappellent à nous par d'autres biais.

Il nous semble donc que, si la prise de conscience relative à l'urine avait très peu concerné la France entre 1990 et 2010, en particulier au niveau institutionnel, les dernières années ont vu nettement progresser la diffusion de cette prise de conscience dans différentes sphères de la société. Cette thèse nous paraît être une des manifestations de la réouverture des champs du débat relatif aux urines et matières fécales.

5.3.2. Un contexte de régulations publiques et de réglementations plutôt favorable

5.3.2.1. Une possibilité de mise en œuvre à court terme

Cette réapparition des urines et matières fécales se retrouve ainsi par exemple dans la réglementation. Nous avons montré à la section 5.2.1 qu'elles avaient disparues des textes régissant l'assainissement non collectif entre l'arrêté de 1969 et celui de 1982. Or elles réapparaissent dans l'arrêté du 7 septembre 2009²⁷⁵ et son article 17 « cas particuliers des toilettes sèches ». Celui-ci prévoit par dérogation au cas général l'autorisation des toilettes sèches. Seules deux modalités sont prévues dans cet arrêté : les toilettes sèches unitaires à compost et les toilettes sèches à séparation d'urine où les matières fécales doivent être séchées et les urines être mélangées à la chaîne de gestion linéaire des eaux ménagères. Il est également indiqué que les sous-produits doivent être valorisés sur la parcelle.

²⁷⁵ Arrêté du 7 septembre 2009 fixant les prescriptions techniques applicables aux installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5 (NOR : DEVO0809422A)

Ces deux potentialités sont bien entendu limitées dans le cadre d'une transition vers des régimes socio-écologiques circulaires du fait de l'importance de séparer à la source les urines pour pouvoir valoriser l'azote et de l'impossibilité structurelle de valoriser sur la parcelle l'azote urinaire d'un foyer, à moins qu'il soit lui-même producteur de végétaux dans des proportions similaires à l'approvisionnement alimentaire de ce foyer.

La réapparition des excréments dans un texte réglementaire montre toutefois une sortie du statut de marginalité des procédés de séparation des urines et matières fécales des eaux ménagères. De nombreux autres textes favorisent la démarche que nous menons dans cette thèse.

Ainsi, l'article L541-1 du Code de l'Environnement, indique à l'alinéa I-9° : « les politiques publiques promeuvent le développement de l'écologie industrielle et territoriale, qui consiste, sur la base d'une quantification des flux de ressources, et notamment des matières, de l'énergie et de l'eau, à optimiser les flux de ces ressources utilisées et produites à l'échelle d'un territoire pertinent, dans le cadre d'actions de coopération, de mutualisation et de substitution de ces flux de ressources, limitant ainsi les impacts environnementaux et améliorant la compétitivité économique et l'attractivité des territoires » ce qui correspond assez bien au travail que nous menons ici. Ce même code indique depuis le 19 août 2015, à l'article L110-1-1, que « la transition vers une économie circulaire » est d'intérêt général. Elle est définie comme une économie qui « vise à dépasser le modèle économique linéaire consistant à extraire, fabriquer, consommer et jeter en appelant à une consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires ainsi que, par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, notamment par le réemploi des produits, et, suivant la hiérarchie des modes de traitement des déchets, à une réutilisation, à un recyclage ou, à défaut, à une valorisation des déchets ». Le Code de l'Environnement indique donc que le modèle économique dans lequel s'inscrit la linéarité doit être dépassé, ce qui rejoint l'analyse que nous présentions en conclusion de la quatrième partie de cette thèse et assoit donc fortement la légitimité réglementaire toute récente du dépassement de la linéarité du système alimentation/excrétion actuel.

Dans le même ordre d'idée, l'Union Européenne a récemment classé le phosphore comme un étant un élément critique de l'approvisionnement de l'Union Européenne (Commission Européenne, 2014), favorisant également en cela les démarches visant à permettre d'améliorer son taux de recyclage. Or le taux de recyclage du phosphore des excréments humains est estimé, en France, à 28 % en 2002-2006 par Senthilkumar *et al.* (2014), ce qui laisse encore de notables marges de progrès pour aller vers une plus grande circularité sur ce paramètre²⁷⁶.

²⁷⁶ Cette valeur a augmenté avec les mises en œuvre de traitement du phosphore en station d'épuration mais dans des proportions sûrement relativement faibles.

Pour autant, la séparation à la source de l'urine dans le cadre de chaînes de gestion circulaires telles que nous avons pu les analyser au chapitre 4.2 n'est pas aujourd'hui encadrée par la réglementation. Ce point est tout à fait normal puisqu'il est consubstantiel à l'élaboration d'une réglementation que celle-ci puisse porter sur un objet existant. Or nous avons justement montré que les chaînes de gestion circulaires de l'urine étaient quasiment inexistantes jusqu'à très récemment. Ce vide juridique pose question pour mettre en place des projets de séparation à la source de l'urine : d'une part, rien ne l'interdit expressément ; d'autre part, de nombreux acteurs auront du mal à s'engager dans un projet qui ne bénéficie pas d'un encadrement juridique clair, en particulier pour la définition du partage des responsabilités. Ainsi, pour la construction de ses deux bâtiments, le SIAAP a sollicité un cadrage réglementaire préalable auprès des services de l'État mais n'a pas obtenu de réponse.

L'analyse juridique que nous faisons de ce type de gestion, par collecte d'urine sur urinoir sec masculin, stockage et épandage agricole, est qu'il ne présente pas d'empêchement juridique majeur. Les urines collectées auraient aujourd'hui un statut de déchet qui nécessite que le transport soit soumis à la déclaration de transport pour les déchets non dangereux (Code de l'environnement, articles R 541-49 à R 541-64) lorsque la quantité transportée est supérieure à 0,5 tonne par chargement (Brun *et al.*, 2017). Du fait de leur similitude avec la collecte et l'épandage de matières de vidange de l'assainissement non collectif, il nous semble que l'épandage d'urine peut dès aujourd'hui entrer dans le cadre de la rubrique 2.1.3.0 de la loi sur l'eau, comme l'épandage de boues de station d'épuration, ou à défaut de la rubrique 2.1.4.0. Les démarches réglementaires à effectuer seraient donc celles d'une déclaration ou d'une demande d'autorisation au titre de la loi sur l'eau, en fonction des seuils de ces rubriques qui sont d'ailleurs justement définies par rapport à l'azote et correspondent ainsi très bien au cas de l'épandage d'urine (déclaration à partir de respectivement 1 ou 0,15 tonne d'azote par an et autorisation à partir de 40 ou 10 tonnes d'azote). L'application de la loi sur l'eau pour l'épandage d'urines brutes l'exclurait *de facto* de la réglementation relative aux ICPE²⁷⁷.

Plusieurs autres éléments vont dans le sens de permettre la séparation à la source de l'urine. D'une part, une question d'une députée de la treizième législature au ministre en charge de l'écologie²⁷⁸ à laquelle il fut répondu que les toilettes sèches sont autorisées même en zone d'assainissement collectif. Ensuite l'encadrement de la pratique donné au niveau international par l'OMS (OMS, 2012a). Enfin, le dispositif France Expérimentation permet aujourd'hui aux porteurs de nouveautés n'ayant pas encore d'encadrement juridique clair de bénéficier d'une certaine facilité juridique de mise en œuvre par ce dispositif.

²⁷⁷ Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.

²⁷⁸ Question n° 73941 publiée au Journal Officiel du 16 mars 2010 page 2849.

La situation française actuelle est en effet plutôt favorable au soutien de l'innovation comme en témoigne ce dispositif. Ce soutien reste toutefois ambivalent comme l'analyse Gaglio (2011) du fait du contraste entre une « appréhension consensuelle de l'innovation dans les discours politiques » et le caractère fondamentalement « déviant » de l'innovation qui est « en butte avec les règles organisationnelles » établies et « [antagoniste avec l'] ordre social ».

Il serait donc candide de présenter la séparation à la source de l'urine comme une chose aisée à réaliser. Pour autant les différents éléments que nous avons présentés ci-dessus nous semblent montrer que, nonobstant toutes les difficultés consubstantielles à une innovation comme celle-ci, elle arrive aujourd'hui dans une situation générale française, et parisienne en particulier, qui paraît particulièrement favorable. Il sera nécessaire d'investiguer plus précisément certains points, comme l'appréhension de la pratique d'épandage d'urine par les instances sanitaires françaises, aujourd'hui en faveur du modèle actuel de l'unicité de l'approvisionnement en eau potable et de l'évacuation des excréments loin des foyers par l'eau. Nous avons toutefois montré dans les chapitres précédents que le caractère salubre des urines (cf. Maxime 6) et la présence d'éléments indésirables à des teneurs plutôt plus faibles que dans les lisiers et fumiers animaux et les boues d'épuration (cf. sections 2.2.3, 4.2.6.3 et 5.1.2), dans un pays comme la France qui les épand majoritairement, correspondait *a priori* à une situation compatible, sur le plan sanitaire, avec la mise en place de valorisation des urines. Son identification dans le SDAGE du bassin Seine-Normandie (AESN, 2015) et dans la stratégie d'adaptation au changement climatique du bassin Seine-Normandie lui confère en outre une légitimité supplémentaire.

5.3.2.2. Des modifications plus profondes à long terme

Si les conditions actuelles rendent l'émergence de la séparation à la source de l'urine possible, sa diffusion plus générale à moyen et long terme nécessitera toutefois des changements plus conséquents en matière de réglementation et de régulation. Nous venons d'indiquer que l'absence de mention claire du cadrage de cette pratique serait un frein à son déploiement, en particulier en termes de clarification des responsabilités. C'est ce qu'a montré par exemple la mise en œuvre de collecte sous-vide des urines et matières fécales à Jenfelder Au (Annexe 3). La question de la nature juridique des produits se pose également et le statut de déchet est moins favorable que celui de produit pour la mise en place d'un marché de ces produits. Ainsi, l'AURIN a obtenu le statut de produit en Suisse mais n'a pas cette reconnaissance en France. Le même cas de figure se présente aujourd'hui pour la struvite produite en station d'épuration et la complexité et le coût des démarches administratives à mettre en œuvre pour demander que la struvite ait un statut de produit peut freiner le déploiement de sa valorisation (cf. le cas de Castres à la sous-section 4.3.3.1).

L'engagement indiqué dans le Code de l'Environnement à « dépasser le modèle économique linéaire » actuel (cf. sous-section 5.3.2.1) risque de ne pas pouvoir se faire spontanément sans un accompagnement par les différentes échelles de régulation publique depuis les collectivités locales jusqu'aux régulations européennes voire mondiales. En particulier, les politiques sectorielles qui encadrent le fonctionnement actuel du système alimentation/excrétion sont cloisonnées, à l'issue du mouvement amorcé à la fin du XIX^e et décrit par Barles (2005). Le fort couplage avec le système eau induit aussi que la priorité des politiques actuelles de gestion des urines et matières fécales est portée sur la limitation des pollutions des milieux aquatiques plutôt que sur celle de la valorisation des ressources des eaux usées (AESN, 2015 ; CR IDF, 2009).

La France n'a pas mis en place de politique générale sur les nutriments qui puisse faciliter la résolution de sa double perception actuelle : ressource pour les systèmes agricoles, pollution pour l'environnement. Ce point a été largement étudié au niveau mondial pour le phosphore (Rosemarin, 2010). Nous avons montré que les incitations à la valorisation matière étaient encore très parcellaires, comme dans le PREDMA (CR IDF, 2009 – cf. section 5.2.2). On le retrouve également dans les réglementations relatives aux biodéchets. Ainsi la loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte mentionne dans son article 70 (alinéa V. I. 4°) : « Le service public de gestion des déchets [...] progresse dans le développement du tri à la source des déchets organiques [...] afin que ceux-ci ne soient plus éliminés, mais valorisés. »

Or la nature de cette valorisation est mal définie. La forte appétance actuelle pour la production d'énergie à partir de sources renouvelables induit un risque de focalisation exclusive sur la valorisation du carbone sous forme énergétique au détriment de la valorisation matière des autres nutriments. En particulier, la méthanisation des biodéchets nécessite de s'assurer de la mise en place d'une valorisation effective des différents nutriments à partir des digestats.

Le développement d'une politique intégrée des nutriments est encore timide en France aujourd'hui. On peut probablement considérer qu'elle est émergente sur le phosphore (cf. par exemple le rapport récent du MTES sur le sujet – Facq, 2015). Sur l'azote, il ne semble pas encore y avoir d'émergence, contrairement par exemple à l'Allemagne dont le Conseil sur l'Environnement a récemment publié une proposition de politique intégrée azote (SRU, 2015).

5.3.3. Possibilités de modifications systémiques induites par la circularité

Finalement, l'émergence d'une politique intégrée des nutriments du système alimentation/excrétion est très dépendante du lien pouvant exister entre la partie urbaine et la partie agricole de ce système. Or, dans un système alimentation/excrétion linéaire, les flux entre les parties urbaines et agricoles sont à sens unique de l'hinterland agricole nourricier vers la ville. Il existe néanmoins une forme de rétroaction de la ville sur son hinterland puisque la demande en denrées alimentaires de la ville va influencer sur les modalités de fonctionnement de l'hinterland agricole nourricier. Mais en termes de flux, un système alimentation/excrétion linéaire ne produira aucun élément susceptible de servir d'intrant à l'hinterland agricole nourricier. Les modalités d'organisation de l'hinterland agricole nourricier pour garantir son approvisionnement nécessaire en ressources, et tout particulièrement en engrais, vont donc se faire de façon quasiment indépendante des modalités de gestion de l'urine urbaine. De la même manière, l'organisation des chaînes de gestion de l'urine en ville se fera de façon totalement indépendante de l'hinterland agricole nourricier, consommant ainsi une rupture complète entre le secteur de l'assainissement urbain et celui de l'approvisionnement alimentaire.

Même dans le cas où les boues de station d'épuration sont utilisées en agriculture, celles-ci peuvent difficilement représenter une source d'engrais azotés notable par rapport aux productions qui alimentent la ville du fait de la linéarité consubstantielle aux modalités du traitement en station d'épuration tel qu'il est pratiqué aujourd'hui (cf. chapitre 3.3). La mondialisation des marchés alimentaires et des engrais participe également bien sûr à cette déconnexion (Billen *et al.*, 2012b).

Or le potentiel de transformation de ce lien entre la ville et son hinterland agricole nourricier par la circularité des systèmes alimentation/excrétion est considérable. Si nous reprenons la Figure 2.4 et que nous supposons la mise en œuvre d'une circularité du système alimentation/excrétion sur l'urine avec un taux de valorisation de l'azote de 90 % (cf. sous-section 4.2.7.1), on voit que la ville peut fournir près de 50 % des intrants azotés d'un système agricole de production de blé d'aujourd'hui (en dehors de toute autre modification) et augmenter ainsi considérablement l'autonomie du système. Au-delà d'une modification des flux d'azote, cette circularité entraînerait également une modification beaucoup plus générale de l'organisation du système socio-technique et de ses acteurs autour de cette nouvelle relation entre la ville et son hinterland agricole nourricier par une relation désormais à double sens.

Finalement, l'émergence d'un système alimentation/excrétion circulaire pose la question de la possibilité de co-évolution des systèmes urbains et agricoles qui rendrait possible la mise en place de cette circularité. Les systèmes socio-techniques envisageables issus d'une mise en place de circularité

peuvent être très différents dans leur nature. La nature des systèmes circulaires qui peuvent émerger, à court ou à long terme, vont donc être très dépendants des trajectoires des systèmes socio-techniques urbains et agricoles et de la possibilité de leur rencontre en fonction de la compatibilité de leurs caractéristiques.

C'est aussi en ce sens que l'alimentation/excrétion nous paraît pouvoir faire système mais les caractéristiques de ce système, dans une hypothèse circulaire, vont être très dépendantes des modalités de sa mise en œuvre. Plus les modifications vont intervenir à l'aval de la chaîne de gestion des urines et moins leur impact sur les systèmes en place devrait être important. Par exemple, la récupération du phosphore sur les cendres de station d'épuration, telle qu'elle est aujourd'hui envisagée par certains industriels, n'apporterait quasiment aucune modification du système socio-technique puisque les cendres d'incinération de boues de station d'épuration seraient envoyées dans les usines qui produisent déjà aujourd'hui les engrais phosphatés mis sur le marché international. Il n'y aurait donc pas de nouveau point de rencontre direct entre l'hinterland agricole nourricier et la ville puisque les excréments de la ville seraient en connexion avec le système industriel de production d'engrais mondial. *A contrario*, l'épandage d'urines humaines après stockage tel qu'il est pratiqué dans les éco-villages suédois modifie en profondeur l'intégralité de la chaîne de gestion des urines et crée un nouveau point de rencontre direct et local entre ville et campagne, correspondant alors à l'émergence d'une nouvelle relation entre la ville et son hinterland agricole nourricier. Cette modification profonde peut être appréciée de deux manières :

- d'une part, son émergence peut sembler plus difficile car elle nécessite que des modifications interviennent à tous les niveaux de la chaîne de gestion et concerne donc tous les acteurs correspondants : usagers pour l'interface usager, acteurs du bâtiment pour la collecte et le stockage, acteurs du transport, acteurs du traitement, acteurs agricoles pour le dernier maillon de la valorisation ;
- d'autre part, cette modification profonde peut être vue comme une opportunité de création d'une économie circulaire locale et de création de nouveaux liens entre ces différents acteurs. Pour l'utilisateur, on voit par exemple que l'assainissement a été réinvesti à un niveau très local par les « responsables assainissement » des éco-villages suédois et danois (cf. section 5.1.1), ce qui modifie profondément le contrat social de relation des usagers avec les structures publiques organisatrices du service public correspondant, passant d'une logique d'utilisateur-consommateur à celle d'un utilisateur-acteur.

La séparation à la source de l'urine recèle ainsi le potentiel de modifications profondes du système qui l'accompagne :

- peut-on encore considérer les urines comme un déchet, au sens du Code de l'Environnement, à savoir « tout bien [...] dont le détenteur se défait [...] » (article L 541-1-1), à partir du moment où l'utilisateur conserve ses urines dans une citerne au pied de son bâtiment en vue de les valoriser ?
- comment s'opère la division du travail et comment est défini le contrat social entre les citoyens et les services publics de gestion de ces déchets/ressources quand une interface usager comme celle de la toilette à séparation d'urine nécessite un investissement de l'utilisateur pour garantir le bon fonctionnement de la chaîne de gestion qui suit ?

Ces questions s'insèrent dans un contexte où elles font écho à d'autres modifications en cours des services publics d'eau, d'assainissement et des déchets avec des pratiques comme le tri des déchets solides, le compostage local des biodéchets, la réutilisation des eaux ménagères, l'utilisation des eaux de pluie, etc. On assiste finalement à une forme de réinvestissement des citoyens dans des champs précédemment dévolus à des services techniques et où le comportement des usagers n'était pas de nature à remettre en cause le fonctionnement de ces services publics²⁷⁹. Après « l'invention des déchets urbains » de la fin du XIX^e siècle, la logique de la transition vers une économie circulaire du début du XXI^e siècle ne trouverait-elle pas une résolution par une « abolition des déchets urbains » ? Il reste encore à trouver les modalités de sa mise en place mais, comme quelques abolitions précédentes auxquelles on peut penser (abolition de l'esclavage, abolition de la peine de mort, etc.), l'abolition des déchets urbains peut à la fois paraître inconcevable dans le contexte actuel et à la fois être la source de nouvelles formes d'organisations sociales.

Si l'on analyse le positionnement de la séparation à la source de l'urine sur les sept dimensions du régime socio-technique actuel mises en exergue par Geels (2002 – cf. section 5.2.3), on constate :

- pour les technologies, un foisonnement de technologies potentielles en émergence (cf. chapitre 4.2) ;
- pour le positionnement des usagers, à travers leurs pratiques et la dimension culturelle et symbolique associée à ces technologies, des postures *a priori* très variées en fonction des usagers (Annexe 3) ;

²⁷⁹ On peut voir un autre exemple d'émergence de ce réinvestissement citoyen dans les urines avec l'économie des urines mise en place autour du Rich Earth Institute aux États-Unis (<http://richearthisstitute.org/>).

- pour les marchés, l’opportunité (ou le risque) de l’émergence de nouveaux marchés ;
- pour la structure et les stratégies des réseaux industriels, des possibilités d’appréhension très diverses en fonction des industries et de leur positionnement par rapport à ces marchés. On pourra trouver des résistances par le danger que représente toute niche vis-à-vis du régime socio-technique établi comme on trouvera des acteurs porteurs de cette transition, en particulier ceux qui seraient acteurs des nouveaux marchés entourant la séparation à la source de l’urine ;
- pour les infrastructures, une difficulté de mise en place sur les infrastructures existantes qui place *a priori* la séparation à la source de l’urine sur le temps long de la construction de nouveaux bâtiments et de reprise des bâtiments existants ;
- pour les régulations politiques sectorielles, un contexte actuel *a priori* favorable mais des évolutions nécessaires de long terme ;
- enfin, pour les savoirs scientifiques et techniques, la situation française est aujourd’hui clairement celle d’un niveau de compétence général très faible qui nécessite une attention particulière à l’appropriation des spécificités de la séparation à la source de l’urine par les différents acteurs de la chaîne de gestion (usagers, plombiers, aménageurs, architectes, etc.).

Afin de pouvoir décliner les résultats de cette analyse dans une contextualisation territoriale, nous avons encadré le travail de quatre étudiants du Mastère de Politique et Action Publique pour un Développement Durable qui a permis d’explorer les possibilités de création de chaînes de gestion des urines sur le territoire du plateau de Saclay (Crolais *et al.*, 2016). Dans ce cas d’analyse territoriale de scénarios de séparation à la source de l’urine, il s’est avéré que l’éventail des possibilités de mises en œuvre était *a priori* très large avec onze scénarios envisageables qui sont ressortis des enquêtes réalisées auprès des acteurs. Nous avons déjà indiqué en conclusion de la section 5.2.3 que le monopole du tout-à-l’égout n’était pas confronté à l’émergence d’une unique solution technique alternative qui serait susceptible de devenir également monopolistique mais à un ensemble d’alternatives actuellement en émergence. La séparation à la source de l’urine en constitue une et permet d’envisager une nouvelle variété de systèmes socio-techniques dont les possibilités de mise en place vont relever de la compatibilité de l’option socio-technique en question avec les différentes caractéristiques locales de sa mise en place (échelles concernées, type d’habitat, type de population, portage politique, investissement des usagers, etc.).

Dans le chapitre suivant (chapitre 5.4), nous proposons ainsi de décrire quelques réalisations possibles de mise en place de séparation à la source de l’urine dans l’agglomération parisienne, dont il nous

semble qu'elles peuvent s'insérer dans le contexte socio-technique que nous avons décrit dans ce chapitre 5.3.

5.4. Scénarios de transition socio-écologique

Au vu de la très grande variété de scénarios envisageables issus des analyses que nous avons menées dans les quatrième et cinquième parties de cette thèse, nous choisissons de nous concentrer sur trois récits fictifs. Ils illustrent comment la transition socio-écologique par la séparation à la source de l'urine est susceptible de pouvoir émerger (section 5.4.1). Nous choisissons volontairement de construire ces scénarios en cohérence avec une évolution des systèmes alimentation/excrétion vers le scénario bio-autonome-demitarien dont nous avons montré en quoi son couplage avec la séparation à la source de l'urine pouvait faire sens et faire système (cf. sous-section 4.2.6.2). Après la présentation de ces trois récits fictifs, nous évaluerons les caractéristiques d'un système alimentation/excrétion envisageable pour l'agglomération parisienne suivant une trajectoire socio-écologique allant vers la circularité.

5.4.1. Récits de séparation à la source de l'urine

Pour présenter ces trois récits fictifs de séparation à la source de l'urine, nous choisissons de les relater sous la forme de questions/réponses entre une personne qui cherche à se renseigner sur la démarche de séparation à la source de l'urine mise en place et une personne qui témoigne de cette mise en place. Les trois récits sont construits selon l'intérêt et la cohérence qu'ils présentent, au vu de l'analyse effectuée tout au long de cette thèse, pour constituer une illustration d'une amorce possible de transition socio-écologique de l'agglomération parisienne vers la circularité. Ils intègrent autant que possible toutes les facettes socio-techniques impliquées et portent chacun sur trois échelles de mise en œuvre possibles : le premier récit se place à l'échelle du domicile et se rapproche ainsi du projet Azuradom ; le second à l'échelle du bâtiment comme le projet Azuris ; le dernier se situe à l'échelle du quartier.

5.4.1.1. Premier récit : l'engagement d'un citoyen membre de l'association

4981

- « Monsieur, apparemment vous faites partie de ce nouveau groupe de citoyens qui n'envoient plus leurs urines à l'égout ?
- Oui, autant que possible, j'ai décidé de limiter l'envoi de mes urines à l'égout et de chercher à les recycler en agriculture. Je suis locataire d'un petit appartement, au sein d'un immeuble de plusieurs étages, dans un quartier dense du centre-ville de Paris. Autant vous dire que presque toutes les difficultés sont réunies pour ce projet ! Je ne peux pas apporter de modifications aux toilettes de mon appartement, encore moins aux canalisations de

l'immeuble et je dois traverser l'agglomération parisienne sur plus de vingt kilomètres avant d'accéder à la première surface productive d'au moins 300 m² qui pourrait éventuellement me permettre la valorisation de mes urines.

- Alors comment avez-vous procédé ?
- J'ai d'abord cherché un moyen de concentrer mes urines, ce qui faciliterait à la fois le stockage chez moi et le transport. Malheureusement je n'ai rien trouvé de simple à réaliser moi-même. J'ai vu sur le site de l'association 4981 – c'est le nom de l'association qui fédère ceux qui n'envoient plus leurs urines à l'égout, vous aurez reconnu la date de la loi tout-à-l'égout inversée – que des équipes suisses et suédoises réalisaient la stabilisation des urines par une base (chaux ou cendre) avant leur séchage mais c'est un peu compliqué à construire chez soi et ils ne le vendent pas pour les particuliers. Je pense qu'à l'avenir j'essaierai de me construire un petit stabilisateur-sécheur d'urine rudimentaire, peut-être plutôt à l'acide pour éviter les pertes d'ammoniac. En attendant, j'ai découvert que des voisins du quartier faisaient déjà collecter leur urine brute, simplement stockée, alors j'ai décidé de faire au plus simple et de me joindre à eux.
- Comment faites-vous concrètement ?
- Je me suis procuré un urinoir sec portable, un produit qui vient tout juste d'être conçu par des adhérents de 4981 et j'en suis un des testeurs. C'est tout simple : une interface en plastique, un siphon sec et une outre de dix ou vingt litres qui se gonfle au fur et à mesure du remplissage. Le tout tient sur 0,05 m² : même dans un cabinet de toilette parisien ça rentre !
- Et ça ne sent pas mauvais ?
- Le siphon sec bloque très bien les odeurs qui pourraient venir de l'outre où sont stockées les urines. Le matériau de l'interface est conçu pour que les gouttelettes d'urine ruissellent au maximum. En outre, ils testent également un couvercle pour être sûr de ne pas avoir d'odeurs ainsi que pour l'esthétique.
- Bon, vous m'invitez dans vos toilettes pour que je me rende compte si vous dites vrai ! Et quand l'outre est pleine, que faites-vous ?
- J'ai opté pour l'outre de vingt litres et constaté qu'il me faut environ un mois et demi pour la remplir. Je dois donc prendre une demi-heure toutes les six semaines pour la vidanger. Alors je la détache de l'urinoir et je la descends à la cave.
- Vous êtes plutôt bien loti, vous avez une cave ! Et j'espère que vous avez aussi un ascenseur !
- Oui, ce serait plus difficile sans cave. Il se trouve que mon immeuble est équipé d'un ascenseur donc je me fatigue peu. Mais j'ai lu que les parisiens produisent en moyenne un

kilogramme d'ordures ménagères par personne et par jour : ils doivent bien trouver un moyen de les descendre de chez eux ! Moi j'ai réduit considérablement mes déchets alors ça s'équilibre au total et mes urines sont comme une nouvelle poubelle de tri à descendre toutes les six semaines. En tout cas, ça ne prend pas trop d'espace dans la cave : quatre fûts bleus de 60 L chacun soit 40 cm par 80 cm au sol et 1,30 m de haut.

- Pourquoi stocker l'urine dans des fûts bleus et ne pas la transporter directement à l'endroit où elle serait valorisée ?
- Ça pourrait être une option. Je n'ai pas de voiture donc il n'est pas facile pour moi de sortir mes urines de Paris. J'avais également pensé à des filières locales. Tant que cette pratique est très peu répandue, il y a encore quelques niches de valorisation envisageables : l'agriculture urbaine, les espaces verts, etc. Mais je n'ai rien trouvé de pratique dans le quartier pour l'instant. Alors je me suis joint à la filière déjà en place de mes voisins et je trouve que c'est un bon compromis entre le coût économique et le temps consacré. Ils font appel à l'entreprise qui collecte l'urine des nouveaux urinoirs publics du métro de Paris pour la valoriser en agriculture. Comme cette entreprise utilise des fûts bleus de 60 L, c'est ce mode de stockage en cave que j'ai privilégié. Avec quatre fûts, ça me permet de tenir facilement une année.
- Et alors que donne votre compromis entre le coût économique et le temps consacré ?
- Eh bien en termes de temps consacré, je gère moi-même au niveau de mon stockage : cela me prend donc environ une demi-heure toutes les six semaines. Et pour le transport, le stockage avant épandage et l'épandage, j'ai tout sous-traité donc j'y consacre peu de temps moi-même. Nous nous synchronisons avec quatre autres voisins pour faire venir l'entreprise de collecte et je paye 25 € pour un enlèvement annuel. Sachant que nous payons environ 100 €/an pour dénitrifier nos urines ou pour incinérer nos biodéchets – la facture globale du service public de notre assainissement ou de nos ordures ménagères –, je me dis qu'à quelques-uns, on arrive à un coût très raisonnable pour un résultat qui me convient beaucoup plus ! Un peu comme pour le compostage local des biodéchets finalement.
- Oui mais les 100 € de facture de l'assainissement ou des ordures ménagères ne concernent pas que les urines ou les biodéchets.
- Bien sûr, je voulais surtout donner un ordre de grandeur de comparaison. En tout cas, je ne pensais pas pouvoir payer seulement deux euros par mois pour recycler mes urines en plein cœur de Paris avec un système aussi simple monté avec quelques voisins motivés. Deux euros par mois ! C'est de la roupie de sansonnet !
- Vous voudriez que tout le monde fasse comme vous en fait ?

- Je ne veux pas particulièrement que tout le monde fasse comme nous. Notre système fonctionne aussi ainsi parce qu'il est à petite échelle et je pense qu'il faudrait mettre d'autres choses en place s'il devait fonctionner à plus grande échelle.

J'ai été assez marqué par la lecture du livre *Ce à quoi nous tenons* d'Émilie Hache²⁸⁰. Face à l'importance et à l'urgence d'agir vis-à-vis de la crise écologique globale que vit aujourd'hui l'humanité, cette philosophe met en garde contre l'attitude qui consisterait à dire « ce qu'il faudrait faire » et à faire culpabiliser ceux qui ne font pas « comme il faudrait ». Je la rejoins dans son analyse et je pense qu'il s'agit d'un écueil. Avant toute chose, à mon sens, il importe de sentir le tragique de la situation²⁸¹.

- Sentir le tragique en allant aux toilettes ? On croirait que vous plaisantez !
- Pas du tout. Avec la crise écologique globale, on peut sentir le tragique dans presque toutes les actions de sa vie : prendre une voiture, allumer un radiateur ou une lumière, manger un steak, utiliser un ordinateur, etc. Comme pour toutes ces actions, aller aux toilettes pose des questions quant à la soutenabilité de la façon dont on procède dans notre société aujourd'hui. Notre système d'assainissement doit à mon sens évoluer pour être soutenable. Or cela fait plus d'un siècle que notre système d'assainissement s'est développé pour devenir ce qu'il est. On ne pourra pas claquer des doigts et espérer qu'il devienne soutenable du jour au lendemain. Et en attendant, il faut bien aller aux toilettes !
- Alors comment sent-on le tragique ?
- Chacun à sa manière, comme il le peut surtout ! Pour ma part, je ressentais surtout initialement le tragique du déversoir d'orage et des mauvais branchements, quand les égouts se rejettent directement en rivière, et je me sentais assez impuissant. Et puis j'ai senti le tragique de la linéarité de la gestion de nos urines aujourd'hui, renforcé par le tragique du plan d'épandage des eaux d'égout de l'agglomération parisienne, qui a effectivement permis une circularité pour Paris – pendant si peu de temps ! – mais qui a aussi contaminé des sols agricoles du fait du mélange des urines, dans les eaux d'égout, avec d'autres éléments qui n'ont rien à voir avec le système alimentation/excrétion comme la plupart des métaux.
- Et vous êtes donc allé plus loin que simplement sentir le tragique ?
- Nous partageons tous une forme de responsabilité face à la crise écologique globale. La question principale c'est « comment répondre ? ». Sur ce problème de linéarité, mon

²⁸⁰ Hache, 2011.

²⁸¹ Émilie Hache se réfère elle-même aux travaux de William James.

parcours, ma sensibilité, mes connaissances ont fait que j'ai pu dépasser ce tragique et trouver une forme de réponse que je peux mettre en œuvre à mon échelle. Mais je ne suis pas nécessairement si satisfait pour autant. Par exemple, je n'ai pas encore trouvé de réponse au problème posé par le transport de mes urines en véhicule essence : j'en ressens encore le tragique.

Certains font venir leur eau de boisson par camion depuis les Pyrénées et rejettent leurs urines dans un tuyau. Je ne porte pas de jugement sur ces modes de vie qui sont aussi des formes de réponses (à une crainte de contamination, à une préférence gustative, à un confort de vie, etc.). Moi je bois l'eau de mon territoire apportée par tuyau et je fais transporter mes urines par camion. Je suis content de témoigner de ce que ma compréhension du problème de soutenabilité du tout-à-l'égout me *fait* faire. Mais je ne saurais pas dire ce qu'il *faut* faire.

- Merci pour votre témoignage. Une dernière question : et vos matières fécales, qu'en faites-vous ?
- J'en suis encore au stade du tragique. Je ne suis pas satisfait que les rivières soient contaminées par mes matières fécales mais je n'ai pas encore pu y répondre, comme je ne réponds pas non plus à des dizaines d'autres tragiques écologiques de ma vie quotidienne. Mais beaucoup de personnes apportent des réponses et c'est ce qui nous permet collectivement d'avancer. Petit à petit. »

5.4.1.2. Second récit : ici on mange bio et on urine bio

- « Madame, vous faites partie d'une organisation qui a mis en place une collecte d'urine ?
- Tout à fait. Nous devons réaménager nos locaux qui étaient vétustes et comme nous travaillons sur l'alimentation et l'environnement, il nous a paru important que nos toilettes reflètent nos préoccupations. Lors des réunions du personnel pour discuter de ce réaménagement, l'idée de mettre en place une collecte sélective des urines a très rapidement émergé.
 - Comment vous y êtes-vous pris concrètement ?
 - Nous avons la chance d'avoir des gaines techniques dans le bâtiment donc il nous a paru très simple de mettre des tuyaux descendants de collecte d'urine jusqu'au sous-sol et deux cuves de stockage. Toutefois, aucune des toilettes à séparation d'urine existantes ne nous convenait car elles présentaient toutes des taux de dilution important des urines et nous ne voulions pas faire transporter par camion des urines diluées.
 - Comment collectez-vous les urines alors ?

- Initialement, nous avons pensé ne séparer que les urines masculines par urinoir sec. Mais beaucoup de femmes ont considéré que ce n'était pas possible de réserver ce privilège aux hommes. Elles ont annoncé qu'elles iraient uriner chez les hommes avec un entonnoir féminin ! Alors nous avons installé des urinoirs aussi chez les femmes !
- Des urinoirs féminins ?
- Tout à fait ! Au début, nous avons pensé installer des urinoirs secs masculins et utiliser des entonnoirs féminins. Mais ça n'aurait pas été très pratique et nous avons fini par trouver une entreprise qui commercialise des urinoirs secs féminins. Ainsi les toilettes des femmes sont équipées, comme les toilettes des hommes, avec des toilettes unitaires d'un côté et des urinoirs secs de l'autre. Il a fallu apprendre à s'en servir initialement mais cela vient très vite et maintenant nous sommes toutes habituées. Ça me fait même bizarre maintenant dans les toilettes publiques de ne pas pouvoir utiliser un urinoir ! Encore une marque d'inégalité hommes/femmes de notre société !
- Ce n'est donc pas si compliqué de séparer les urines, pour les hommes et pour les femmes alors ! Et que deviennent vos urines ?
- Nous nous sommes mis d'accord avec un agriculteur bio en polyculture/élevage qui stocke déjà du lisier animal et qui stocke désormais aussi nos urines sur son exploitation. À deux cents personnes, nous produisons environ 25 m³ d'urine par an. Dans son mode de fertilisation variée et raisonnée, nous contribuons ainsi à la fertilisation d'environ quatre hectares de céréales²⁸².
- Mais est-il conforme au cahier des charges de l'agriculture biologique d'épandre des urines humaines ?
- Vous savez, il y a la loi et il y a l'esprit de la loi. Ce qui est sûr c'est que ça nous semble correspondre à l'esprit de l'agriculture biologique car cela s'inscrit dans le principe d'écologie et c'est même la seule façon de réellement boucler les boucles de l'agriculture sur les nutriments. Dans le cahier des charges de l'agriculture biologique, il y a écrit que les excréments d'animaux liquides sont autorisés s'ils ne proviennent pas d'élevages industriels²⁸³. Nous avons donc créé une charte pour nos toilettes qu'il faut signer et dans laquelle chacun doit préciser, en son âme et conscience, s'il considère qu'il provient d'un élevage industriel. Si la réponse est positive, il n'est pas possible d'utiliser les urinoirs.

²⁸² Hypothèses de calcul : 600 mL d'urine par personne et par jour, 5 gN/L, 200 jours travaillés par an, contribution des urines à hauteur de 30 kgN/ha/an, le reste de la fertilisation étant endogène à l'exploitation.

²⁸³ Cf. sous-section 4.2.6.2.

- Si je comprends bien, c'est comme quand on doit valider des conditions d'utilisation avant de se connecter à un réseau sans fil, chez vous il faut valider les conditions d'utilisation des toilettes ?
- Exactement ! Mais nous permettons tout de même à ceux qui ne signent pas la charte d'utiliser les autres toilettes. Ce sont majoritairement des toilettes sèches reliées à une fosse de stockage au sous-sol donc même ceux qui se sentent en élevage industriel peuvent recycler leurs urines et matières fécales... mais pas aussi efficacement et pas en agriculture biologique !
- Et que disent les organismes certificateurs de l'agriculture biologique au sujet de votre charte sur l'élevage industriel des humains ?
- Ils ont beaucoup apprécié ! Notre cantine sert à 80 % des aliments provenant de l'agriculture biologique et ils ont compris que cela s'inscrivait dans une démarche globale. Alors ils ont sollicité l'Union Européenne... qui a accepté notre démarche à titre expérimental !
- Vous pensez que votre projet est reproductible ?
- Bien sûr. Il y avait déjà quelques bâtiments comme le nôtre mais personne n'avait fait de démarche auprès des organismes de certification biologique. Maintenant que nous avons eu cette autorisation officielle, je crois que beaucoup de personnes vont s'y mettre également car ils ont bien conscience de la cohérence à manger bio et à uriner bio ! D'ailleurs, pour la deuxième année de fonctionnement de notre collecte d'urine, nous avons recueilli beaucoup plus d'urine que l'an dernier parce que certaines personnes se sont mises à collecter leur urine à domicile et à l'apporter au travail ! La collecte d'urine s'étend, petit à petit. »

5.4.1.3. Troisième récit : la première commune en séparation à la source de l'urine de France

- « Madame, on parle beaucoup de vous car vous êtes élue dans la première commune de France qui a mis en place la collecte sélective d'urine pour deux mille personnes. Pouvez-vous nous expliquer comment cela s'est passé ?
- Je crois que c'était surtout un concours de circonstances. Notre commune est jumelée avec une commune suédoise où la collecte sélective d'urine est pratiquée depuis plus de vingt ans. Beaucoup d'habitants avaient donc déjà entendu parler de la collecte sélective d'urines. Alors quand nous avons décidé de construire un nouveau quartier mixte à la place du grand centre commercial et de son parking immense, il y a eu de nombreuses propositions pour mettre en place cette collecte.
 - Comment avez-vous procédé ?

- Le deuxième concours de circonstances c'est que notre commune est également le siège social d'un fabricant de toilettes. Or aucun modèle existant ne nous convenait et le fabricant de toilettes de la commune a proposé de créer un nouveau modèle de toilettes qui permette de collecter les urines à sec tout en conservant la chasse d'eau pour les matières fécales. Ils ont eu une idée géniale pour réaliser cette séparation, à laquelle personne n'avait encore pensé jusqu'alors. Et ça fonctionne très bien !
- Alors tous les bâtiments sont équipés de toilettes à séparation d'urine ?
- Tout à fait. Le premier bâtiment construit était une résidence étudiante et les jeunes se sont parfaitement approprié cette collecte sélective. Dans la résidence, il y a un responsable compost et un responsable urine comme il y a un responsable soirées et un responsable sport. Dans les habitations qui ont été construites après, nous avons même laissé la possibilité d'installer également, dans les cabinets de toilette, des urinoirs secs mixtes hommes/femmes. La commune a aussi mis en place un service de maintenance des canalisations d'urine, pour le réseau public mais également chez l'habitant.
- Et que deviennent les urines ?
- Nous avons installé un petit réseau de collecte par tuyau pour ce nouveau quartier. En tout deux mille personnes sont désormais connectées. Il y a deux zones de regroupement d'urines ce qui permet de limiter la collecte à deux cents mètres maximum²⁸⁴. À chaque point de regroupement des urines, il y a une petite unité de stabilisation et concentration des urines qui produit 35 m³ d'urines concentrées par an²⁸⁵. Elles sont livrées à quatre exploitations agricoles voisines qui fertilisent ainsi deux cents hectares²⁸⁶.
- Et comment ce système est-il financé ?
- Nous avons proposé à l'Agence de l'Eau et à l'ADEME de tester une expérimentation de dispositif fiscal incitatif sur l'économie circulaire. La facture d'assainissement est désormais déconnectée de la facture d'eau : son montant est assis sur la surface habitable. Quand les foyers participent à une collecte sélective d'urine, ils reçoivent une rétribution sous la forme d'avoirs en produits agricoles auprès des producteurs bio et locaux. Suite à une proposition citoyenne, la quasi-totalité des habitants redistribue finalement ces avoirs pour les personnes en situation précaire ce qui fait que les bénéfices de la collecte sélective nous permettent finalement de financer de l'aide aux plus démunis.

²⁸⁴ Hypothèses de calcul : densité de 10 000 pers/km² ce qui donne deux disques de 175 m de rayon chacun.

²⁸⁵ Hypothèses de calcul : 1,3 L/pers/j d'urine, 75 % d'efficacité de collecte et concentration par dix des urines.

²⁸⁶ Hypothèses de calcul : 11 gN/pers/j et contribution à la fertilisation à hauteur de 30 kgN/ha/an.

- Et quels sont vos projets pour les autres habitants de la commune ?
- Nous imaginons développer progressivement la collecte sélective d'urines. Certains sont aussi intéressés par l'installation de toilettes sèches car la nouvelle facture assainissement permet aux foyers de faire des économies quand les toilettes ne sont plus connectées au tout-à-l'égout. Mais c'est surtout la collecte sélective d'urines qui est incitée et nous pensons pouvoir progressivement installer des collectes sélectives d'urine pour toute la commune. Ça prendra du temps mais ça se fait petit à petit. »

5.4.2. Prospective de transition socio-écologique de l'agglomération parisienne

Les trois récits fictifs que nous avons présentés dans la section précédente (section 5.4.1) avaient pour but d'illustrer en quoi des initiatives de séparation à la source de l'urine paraissent aujourd'hui envisageables sur le territoire de l'agglomération parisienne. L'analyse effectuée dans les trois premiers chapitres de cette partie a montré que le contexte de l'agglomération parisienne est aujourd'hui favorable à cette émergence mais que les différentes chaînes de gestion envisageables doivent être adaptées en fonction des contextes socio-techniques locaux et des caractéristiques des projets concernés en termes d'échelles de mise en œuvre, de modèle économique, de réglementation applicable, etc. Par ces trois récits, nous avons ainsi voulu montrer à chaque fois des formes d'émergence qui proviennent d'une volonté forte d'une entité locale, condition retrouvée dans la plupart des projets existants et qui nous semble nécessaire pour les premières réalisations d'un système aussi novateur. Nous avons également illustré la possibilité de ce montage à trois échelles différentes : un citoyen, une organisation de deux cents personnes, un quartier de deux mille habitants.

Toutes les facettes de ces trois récits n'ont pas été décrites avec minutie mais il nous semble que l'analyse que nous avons effectuée dans la quatrième et la cinquième partie de cette thèse montre leur plausibilité.

Sur cette base, il nous paraît donc possible de construire un scénario prospectif de transition socio-écologique de l'agglomération dans lequel la circularité de son système alimentation/excrétion augmenterait progressivement, principalement par la collecte sélective des urines. Par rapport aux trois récits de la section précédente (section 5.4.1), nous proposons donc ici d'effectuer deux changements d'échelles simultanés : un changement d'échelle spatiale en considérant la mise en place de collecte sélective d'urine à l'échelle de toute l'agglomération parisienne ; un changement d'échelle temporelle en se plaçant désormais sur le temps long.

Une prospective à large échelle spatiale et temporelle nécessite de se projeter dans des modifications importantes de l'agglomération parisienne dans son ensemble et la possibilité d'un tel scénario dépendra bien entendu des trajectoires socio-techniques et socio-écologiques des autres sous-systèmes de l'agglomération parisienne : système énergie, système eau, système transport, etc. Nous ne nous concentrerons ici que sur le cœur de notre caractérisation du système alimentation/excrétion, à savoir l'évaluation des flux d'azote, phosphore et potassium. Nous n'entrerons donc pas dans le détail de l'évolution de l'interaction entre le système alimentation/excrétion et celle des autres sous-systèmes mais nous préciserons, dans leurs grands traits, les orientations socio-techniques envisageables qui peuvent correspondre au scénario prospectif que nous décrivons.

5.4.2.1. Hypothèses d'un scénario prospectif de transition vers la circularité du système alimentation/excrétion de l'agglomération parisienne

Sur la base des analyses réalisées tout au long de cette thèse, voici les principales hypothèses sur lesquelles repose notre scénario de transition socio-écologique de l'agglomération parisienne vers la circularité de son système alimentation/excrétion.

Le système socio-technique qui accompagne l'émergence de la circularité est la séparation à la source de l'urine. Les premières années voient le développement d'initiatives locales, dans l'esprit de celles que nous avons décrites dans nos trois récits fictifs (cf. section 5.4.1). Elles sont rendues possibles par l'implication forte d'acteurs locaux pionniers et diffusent principalement à petite échelle (individus, bâtiments) et encore assez secondairement à plus large échelle (quartier, commune). Elles sont principalement le fait d'opportunités liées à la construction ou à la reconstruction de bâtiments ou de quartiers, mais certaines initiatives locales sont également opérées sur des bâtiments existants.

La phase de mise en œuvre par des pionniers serait suivie par une phase de diffusion beaucoup plus large au sein de la société. Le principal facteur limitant la vitesse de diffusion de la séparation à la source serait la difficulté de reprise des bâtiments existants. La phase de diffusion serait rendue possible par la conjonction de multiples facteurs dont :

- une volonté et un soutien politiques aux niveaux local et national, voire européen, dans le cadre de l'établissement d'une politique intégrée des nutriments et d'une réforme plus générale des systèmes alimentation/excrétion vers un scénario bio-autonome-démocratique et des systèmes de gestion des urines et matières fécales circulaires ;
- un encadrement réglementaire incitatif voire progressivement contraignant ;
- une régulation économique (taxes, crédits d'impôt, etc.) incitative, en particulier par le fait d'une traduction économique des externalités positives ;

- une évolution culturelle du rapport à nos excréments, facilitée initialement par le cantonnement à la séparation à la source de l'urine, sans modification des modalités de gestion des matières fécales ;
- un développement des compétences des différents acteurs sur les modalités de mise en œuvre de la séparation à la source de l'urine.

Deux exemples de diffusion de changements de pratiques dans le secteur du bâtiment nous semblent pouvoir illustrer la façon dont cette transition peut se dérouler dans l'agglomération parisienne. D'une part, l'exemple de la valorisation des biodéchets alimentaires. La mise en œuvre en France a commencé par ne concerner, de manière obligatoire, que les très gros producteurs de biodéchets, puis a été progressivement étendue entre 2012 et 2016 à des producteurs de moins en moins gros²⁸⁷. Dans le même temps, de nombreuses initiatives locales ont émergé, parfois accompagnées par les pouvoirs publics (de nombreuses communes soutiennent ainsi le compostage individuel ou collectif par des subventions, des accompagnements, des formations, et.). Et la diffusion à l'ensemble de la population a ensuite été prévue réglementaire pour 2025²⁸⁸.

On peut ainsi imaginer une phase durant laquelle cohabiteraient des initiatives locales et une incitation voire une obligation de collecte sélective des urines pour les gros producteurs (urinoirs masculins déjà existants des lieux de passage ou d'événementiel tels que aéroports, stades, gares, salles de spectacles, etc.). Ces gros producteurs représentent en effet des lieux pour lesquels les bénéfices globaux de la collecte sélective des urines sont assez évidents : économies d'échelle par la mutualisation des équipements auprès d'un très grand nombre de personnes, simplicité pour l'utilisateur de la collecte sélective d'urines sur urinoirs secs masculin²⁸⁹, gestion du système par une entité spécialisée, bénéfices pour les stations d'épuration de la baisse des teneurs en azote et phosphore, proximité éventuelle avec les zones de valorisation agricole²⁹⁰, etc. Puis cette diffusion pourrait être progressivement étendue aux producteurs de plus petite taille.

²⁸⁷ Article 204 de la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement dite loi Grenelle 2, codifié à l'article L. 541-21-1 du code de l'environnement et précisé par la circulaire du 10 janvier 2012 de la ministre de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement relative aux modalités d'application de l'obligation de tri à la source des biodéchets par les gros producteurs (NOR : DEVP1131009C).

²⁸⁸ Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, article 70, alinéa V. I. 4°.

²⁸⁹ On peut imaginer un cantonnement initial aux urinoirs secs masculins.

²⁹⁰ On peut penser par exemple à l'aéroport Charles de Gaulle.

D'autre part, l'isolation thermique des bâtiments peut aussi être servir d'illustration. On retrouve en effet une problématique similaire à la collecte d'urines, à savoir la reprise de l'existant, qui limite beaucoup plus fortement que pour la collecte des biodéchets alimentaires la possibilité de mise en œuvre rapide. Dans le cas de l'isolation thermique des bâtiments, plusieurs mécanismes se conjuguent : des changements progressifs de la réglementation concernant les nouveaux bâtiments qui doivent garantir une bonne isolation thermique pour les nouveaux bâtiments (cf. les réglementations thermiques successives), des incitations à la reprise de l'existant par des crédits d'impôts pour les travaux d'isolation des particuliers, etc. On peut imaginer de la même manière une incitation voire une obligation réglementaire de collecte sélective d'urine sur les nouveaux bâtiments ou sur les reconstructions et dans le même temps des mécanismes incitatifs à la reprise de l'existant.

En outre, on peut imaginer que, dans une seconde phase, l'établissement d'une circularité puisse passer par d'autres chaînes de gestion de l'urine que celles que nous avons décrites comme socio-techniquement mûres actuellement (cf. quatrième partie et section 5.4.1). On peut par exemple imaginer le déploiement de systèmes totalement décentralisés, tels que développés actuellement par l'équipe de recherche de SLU (cf. sous-section 4.2.5.2). Dans ce cas, on peut beaucoup plus facilement envisager un déploiement sur les bâtiments existants puisqu'il n'y a aucun élément structurel à changer dans le bâtiment mais uniquement les toilettes individuelles et les modalités de collecte des produits du traitement décentralisé au niveau des toilettes. On se rapproche alors beaucoup plus d'une diffusion similaire à celle de la mise en place de collecte sélective de biodéchets alimentaires par camion plutôt que celle de l'isolation des bâtiments.

Parallèlement, on peut imaginer une évolution des stations d'épuration vers une plus grande circularité, en particulier par le traitement des flux concentrés de sortie de digestion, la mise en œuvre de collectes conjointes des urines et matières fécales non mélangées aux eaux ménagères avec des systèmes de gestion circulaires, etc. Selon les contextes locaux, de multiples solutions techniques peuvent être envisagées à l'avenir mais qui seraient, dans notre scénario, mises en œuvre à la condition qu'elles permettent une circularité intégrale dans l'idéal, et à défaut une circularité extractive portant au moins sur l'azote et le phosphore, voire le potassium.

Les hypothèses relatives à la gestion des urines et matières fécales que nous prenons pour notre scénario prospectif pour l'agglomération parisienne sont donc les suivantes :

- notre caractérisation du système alimentation/excrétion de Paris étant effectuée en 2013 dans le chapitre 3.2, nous nous plaçons ici en 2053. Nous considérons que les premières modifications interviennent en 2020 ;
- le taux d'accroissement de la population est stable à 0,5 % par an (cf. sous-section 5.3.1.2). Cela correspond à une nouvelle population de 1,9 million de personnes en

2053 par rapport à 2020 dont nous supposons qu'elle est entièrement logée dans des nouveaux bâtiments ;

- tous les nouveaux bâtiments résidentiels construits à partir de 2020 sont considérés comme équipés d'une collecte sélective d'urine²⁹¹. Pour le reste du résidentiel, nous supposons une reprise de l'existant à raison de 1 % par an entre 2020 et 2030, de 2 % par an entre 2030 et 2040 et de 2,5 % par an à partir de 2040²⁹² ;
- nous considérerons une efficacité de collecte des urines de 80 % en 2050. Le reliquat, c'est-à-dire les urines qui auraient pu être collectées mais qui ne le sont pas, est supposé être collecté par les égouts. Ce chiffre correspond à une hypothèse relativement optimiste au regard des systèmes socio-techniques existants aujourd'hui. Nous considérons d'une part qu'il constitue la résultante d'une croissance de l'efficacité de collecte sur 2020-2053 et d'autre part qu'il intègre des nouveaux systèmes socio-techniques à partir de 2030 pour lesquels on peut imaginer des efficacités supérieures de collecte par au moins trois voies combinées : par le comportement de l'utilisateur ; par une modification technique de l'interface utilisateur ; enfin par des modalités de gestion des matières fécales qui deviennent également circulaires, auquel cas ce chiffre de 80 % intègre une circularité sur les urines qui ne sont pas séparées à la source mais recyclées avec les matières fécales. Nous prendrons en conséquence des hypothèses plutôt prudentes sur la circularité des systèmes de gestion des matières fécales ;
- nous considérons une perte atmosphérique au stockage d'urine (ou éventuellement à la collecte ou au transport) de 5 %, ce qui est relativement élevé mais nous paraît prendre en compte la réalité du dysfonctionnement attendu de certaines des collectes sélectives d'urine qui seraient mises en place (ventilation inappropriée, stockage non étanche, etc.) ;
- pour les bâtiments non résidentiels, nous considérerons que la population y excrète en moyenne 30 % de ses excréments et que le taux d'équipement y est légèrement plus

²⁹¹ Ils peuvent également être équipés d'autres systèmes que la collecte sélective d'urine mais nous considérerons alors que ces systèmes sont d'une performance équivalente à celle de la collecte sélective d'urine.

²⁹² Les chiffres compilés par Jacquemet (1979) montrent une proportion moyenne de 1,1 % par an de nouvelles chutes de tout-à-l'égout par rapport aux autres modalités de gestion des urines et matières fécales dans la période 1885-1893 soit la décennie qui précède la loi tout-à-l'égout. Pour les deux décennies suivantes, la proportion des immeubles nouvellement connectés au tout-à-l'égout est en moyenne de 2,4 % par an.

élevé : toujours 100 % des bâtiments nouveaux à partir de 2020 et 2,5 % de reprise de l'existant à partir de 2020. L'efficacité de collecte y est également estimée à 80 %.

- enfin, pour le reliquat des excréments, à savoir les matières fécales, ainsi que les urines non collectées séparément, nous considérerons qu'ils rejoignent des stations d'épuration conventionnelles ou de nouvelles unités décentralisées, avec un taux de collecte de 97 % (cf. chapitre 3.2)²⁹³. Nous intégrons l'efficacité d'éventuelles nouvelles unités décentralisées circulaires dans une efficacité globale du système que nous considérons être de 30 % sur l'azote (typiquement par valorisation totale de l'azote des boues – aujourd'hui environ 10 % de l'azote entrant – et par valorisation de flux concentrés tels que les digestats)²⁹⁴, de 85 % sur le phosphore (typiquement par valorisation totale du phosphore des boues de station d'épuration avec un abattement à 85 %) et de 5 % pour le potassium. Cette mise en œuvre se fait progressivement à partir de 2030. Nous conservons une hypothèse plutôt basse sur les taux de recyclage de l'azote et du potassium au regard de l'absence de mise en œuvre aujourd'hui de gestion circulaire de l'azote ou du potassium en station d'épuration et pour contrebalancer l'hypothèse plutôt haute prise sur le taux de collecte de l'urine.

Par ailleurs, afin de développer l'analyse complète du système alimentation/excrétion au regard des critères de caractérisations développés dans la deuxième partie de cette thèse, il convient de prendre également des hypothèses sur les pollutions induites, sur la gestion des biodéchets, sur le régime alimentaire et sur le fonctionnement de l'hinterland agricole. Nous proposons de décrire brièvement ci-après ces hypothèses, en conformité avec le scénario bio-autonome-démocratique (Billen *et al.*, 2017a) et donc assez proche également du scénario Afterres 2050 (Solagro, 2017), pour l'azote uniquement :

- régime alimentaire sobre à 3,9 kgN/pers/an ingéré et 33 % de protéines d'origine animale ;
- gestion efficace des biodéchets avec un taux de biodéchets égal à 15 % ;
- gestion circulaire également sur les biodéchets avec un taux de recyclage de l'azote des biodéchets de 80 % ;

²⁹³ L'excrétion des différents nutriments dans les urines par rapport aux matières fécales est supposée être de 85 %, 65 % et 75 % respectivement pour l'azote, le phosphore et le potassium.

²⁹⁴ Une valeur supérieure à 30 % serait même aisément envisageable car l'augmentation du ratio DBO5/N en entrée de station d'épuration, consécutive à la séparation à la source de l'urine, induirait un taux de captation plus important de l'azote dans les boues.

- autonomie maximale de l'agglomération parisienne avec un recyclage de l'azote issu des biodéchets, des urines et des matières fécales sur les territoires voisins de l'agglomération parisienne qui sont son hinterland agricole nourricier ;
- pour la pollution, nous proposons de considérer que les égouts et stations d'épuration améliorent leurs performances et ne rejettent plus que 20 % de l'azote sous forme réactive (principalement sous forme de nitrates et secondairement d'azote réduit et de nitrites) ;
- enfin, nous supposons des systèmes agricoles biologiques intégrant polyculture et élevage pour lesquels le seul intrant azoté autre que les produits de recyclage urbains (et les boucles de recyclage internes agricoles) est la fixation symbiotique d'azote.

Les hypothèses agricoles choisies pour 2053 correspondent à des pratiques déjà réalisées aujourd'hui en agriculture biologique et sans difficulté technique majeure de mise en œuvre. Elles sont les suivantes :

- les apports de produits urbains issus des urines, des matières fécales, des eaux usées et des biodéchets sont fixés par les hypothèses indiquées préalablement. Ils sont épandus sur les terres arables ;
- l'efficacité de conversion azotée des animaux est fixée à 10 %, correspondant à l'efficacité actuellement observée en France en polyculture-élevage ;
- le taux de déchets d'abattage est le même que celui évalué pour 2013 (cf. sous-section 3.2.2.1) ;
- les animaux sont nourris pour moitié en prairie, pour moitié en fourrages produits localement ;
- les excréments animaux se font pour moitié directement en prairies, l'autre moitié se fait en bâtiment et elle est épandue sur les terres arables ;
- le taux de volatilisation de l'ammoniac des excréments est fixé à 10 % au champ et à 30 % en bâtiment ;
- la productivité des prairies est fixée à 50 kgN/ha/an ;
- la fixation symbiotique et les surplus en prairies ont été calculés suivant les mêmes ratios qu'aujourd'hui dans le Grand Est (cf. sous-section 3.2.2.1) ;
- la valeur asymptotique de la relation de productivité des terres arables en fonction de la fertilisation azotée totale (Y_{\max}) est fixée à 400 kgN/ha/an ;
- la lixiviation est nulle sur les prairies et égale à 70 % du surplus sur les terres arables ;

- l'assolement des terres arables correspond à des rotations comportant trois années sur huit de légumineuses fourragères qui fixent 300 kgN/ha/an en moyenne.

5.4.2.2. Un régime socio-écologique concevable du système alimentation/excrétion de l'agglomération parisienne en 2053

L'illustration suivante montre une des possibilités de mise en œuvre de la collecte sélective d'urine dans notre scénario. Nous avons figuré une collecte locale par tuyau depuis les habitations jusqu'à une unité de concentration de l'urine. Les eaux usées (matières fécales, eau de chasse et eaux ménagères) sont toujours collectées par égout et envoyées vers les stations d'épuration existantes.

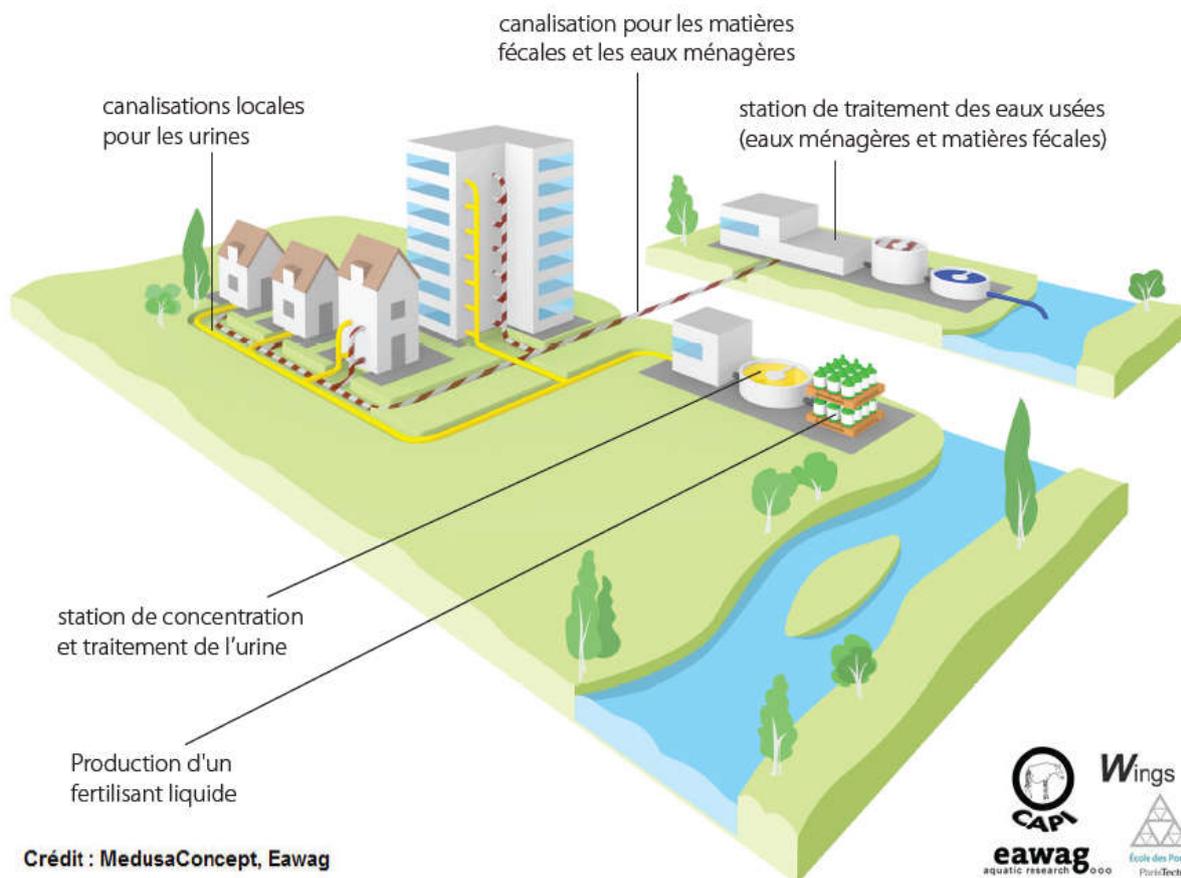


Figure 5.11 : Illustration du scénario Paris 2053.

Cette illustration montre le cas de la collecte sélective d'urine locale vers une unité de concentration.

Avec les hypothèses que nous avons proposées dans la sous-section précédente (sous-section 5.4.2.1), nous détaillons ici les caractéristiques du système alimentation/excrétion théorique résultant pour l'agglomération parisienne en 2053. On pourra se référer pour mémoire au chapitre 3.2 pour une analyse du système alimentation/excrétion de l'agglomération parisienne en 2013.

69 % des bâtiments résidentiels et 86 % des autres bâtiments seraient équipés de systèmes de séparation à la source de l'urine. Les pourcentages totaux de récupération de l'azote, du phosphore et du potassium en fonction des sources (urines ou stations d'épuration) sont résumés dans le tableau suivant (Tableau 5.1).

Tableau 5.1 : Taux de récupération de l'azote, du phosphore et du potassium des excréments humains pour l'agglomération parisienne en 2053, comparé à 2013.

Élément chimique \ Taux de récupération ^a	2013			2053		
	Sur urines	En station d'épuration	Total	Sur urines	En station d'épuration	Total
Azote	0 %	4 %	4 %	48 %	14 %	62 %
Phosphore	0 %	41 %	41 %	38 %	51 %	89 %
Potassium	0 %	2 %	2 %	44 %	3 %	47 %

^a Le taux de récupération est la proportion d'un élément excrété dans les urines et les matières fécales et qui se retrouve dans un produit épandu sur les terres arables.

Avec les hypothèses que nous avons prises, nous avons donc construit un scénario pour 2053 dans lequel le régime socio-écologique du système alimentation/excrétion de l'agglomération parisienne est devenu majoritairement circulaire. Les taux de circularité ont considérablement augmenté sur les trois éléments chimiques principaux.

Pour l'azote, les urines sont la source majoritaire de circularité avec plus des deux tiers des bâtiments de l'agglomération équipés de séparation à la source de l'urine et un taux résultant de récupération de l'azote des excréments humains de 48 %. Sur les 52 % restants, l'amélioration de la circularité des équipements de gestion des matières fécales entraîne une circularité résultante de 14 % en tout, ce qui donne un taux global de recyclage de l'azote des excréments humains de 62 %, à comparer à un taux de 4 % aujourd'hui.

Pour le phosphore, ce sont *a contrario* les stations d'épuration qui sont la source du recyclage le plus important. Cela s'explique d'une part par une proportion de phosphore moins élevée dans les urines par rapport aux matières fécales comparativement à l'azote et par l'hypothèse d'une circularité

beaucoup plus poussée des stations d'épuration sur le phosphore. Les urines participent tout de même de façon importante à ce recyclage, à hauteur de 38 %, amenant le taux de recyclage global du phosphore à 89 %. On notera que ce taux de recyclage ne diffère pas fondamentalement du taux de recyclage permis par une agglomération qui mettrait en œuvre aujourd'hui une précipitation poussée du phosphore en station d'épuration et une valorisation agricole totale de ses boues (cf. les quelques communes françaises mentionnées à la section 5.3.3). En revanche, par rapport à la situation de l'agglomération parisienne aujourd'hui, cela constitue plus qu'un doublement du taux de recyclage du phosphore.

Enfin, pour le potassium, la valorisation proviendrait presque exclusivement de la collecte sélective des urines et permettrait un taux global de valorisation de 47 %. Ce taux constitue un progrès considérable par rapport au taux actuel de 2 %.

Ces résultats peuvent également être combinés à l'analyse temporelle de la circularité de gestion des urines et matières fécales de l'agglomération parisienne que nous avons effectuée à la section 3.1.4. La Figure 3.14 peut être ainsi prolongée comme illustré par la figure suivante (Figure 5.12).

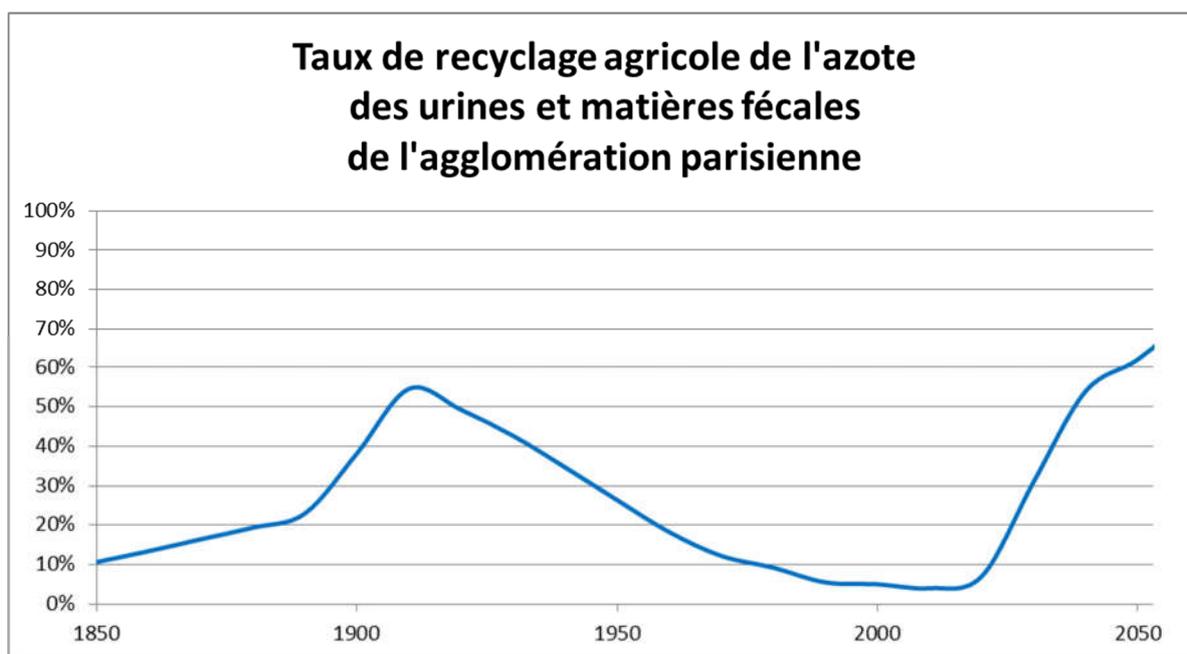


Figure 5.12 : Taux de recyclage agricole de l'azote des urines et matières fécales de l'agglomération parisienne – 1850-2053

Les produits urbains issus des urines, des eaux usées et des biodéchets permettent respectivement un apport agricole de 1,8, 0,6 et 0,5 kgN/pers/an. Dans l'hinterland agricole, la fixation symbiotique d'azote est la voie principale d'entrée d'azote dans les systèmes agricoles. Le recyclage urbain permet de fournir 20 % de la fertilisation azotée des terres arables. La représentation GRAFS correspondante au niveau de l'hinterland agricole est la suivante (Figure 5.13).

Flux d'azote dans l'hinterland parisien 2053 (kgN/pers/an)

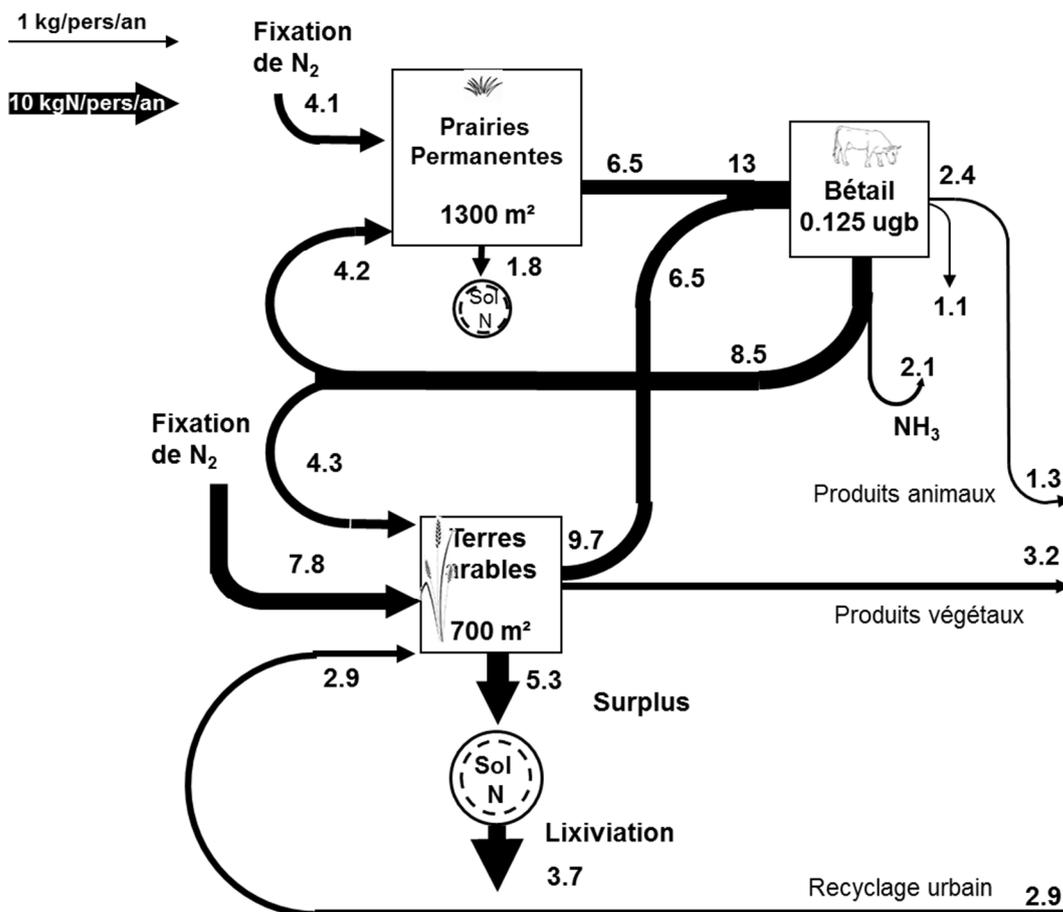


Figure 5.13 : Représentation GRAFS des flux d'azote de l'hinterland agricole parisien en 2053.

Les flux d'azote sont exprimés en kgN/pers/an.

Nous rappelons ci-dessous le résultat de la Figure 3.22 qui représentait le bilan de l'empreinte azote d'un habitant de l'agglomération parisienne en 2013 pour permettre aisément sa comparaison avec le bilan de l'empreinte azote d'un habitant de l'agglomération parisienne que nous obtenons en 2053 avec nos hypothèses (Figure 5.14).

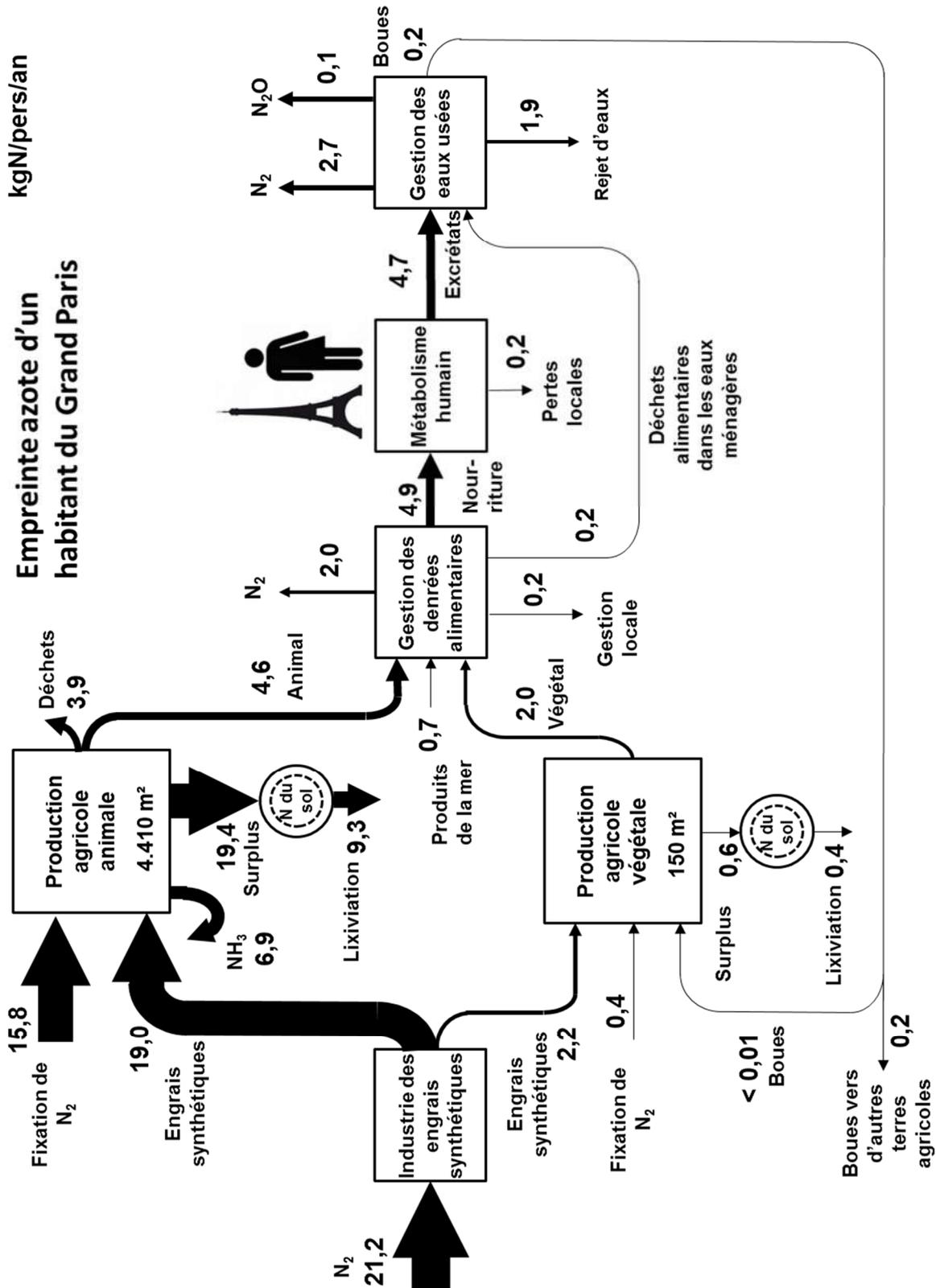


Figure 3.22 (rappel) : Empreinte azote d'un habitant de l'agglomération parisienne en 2013.

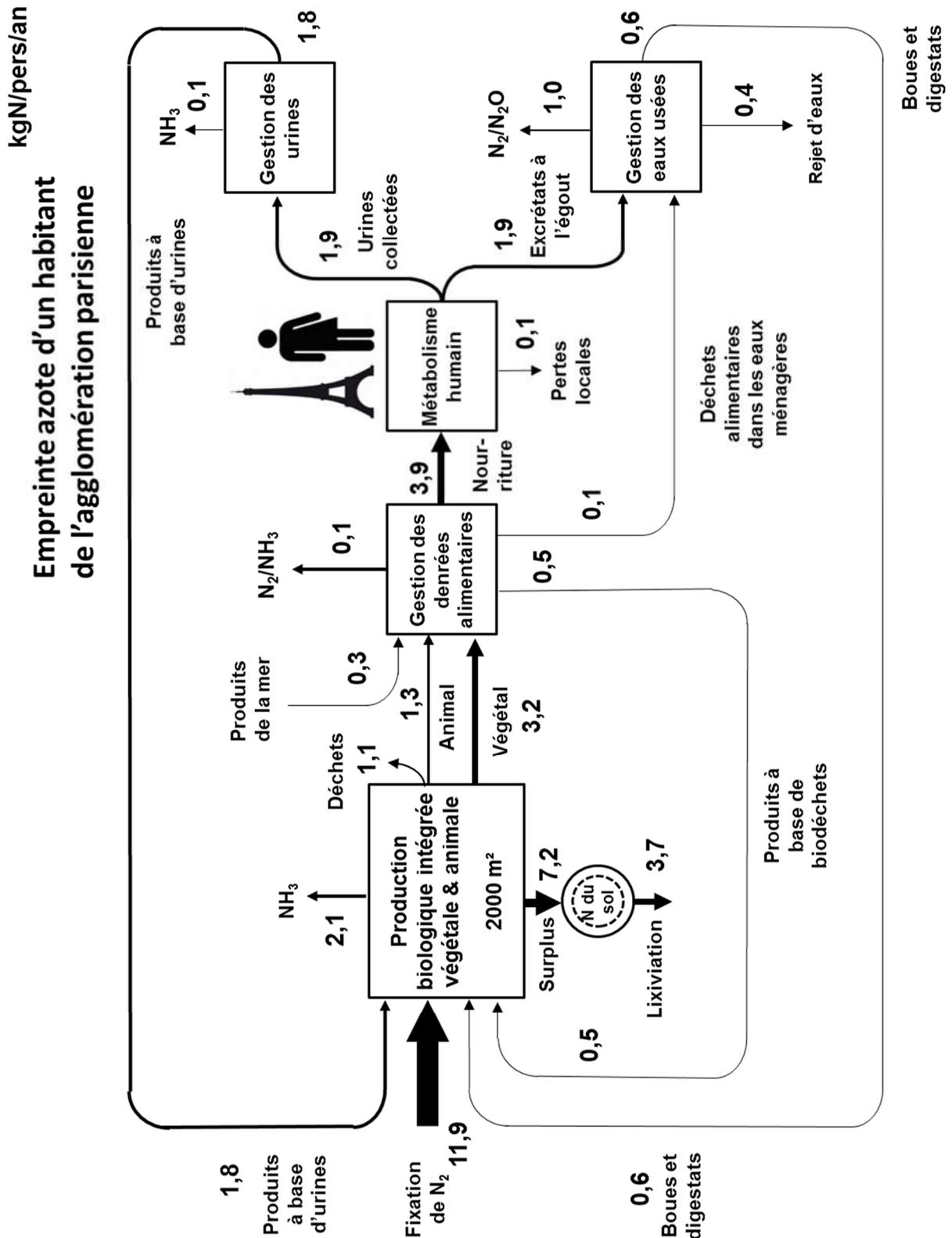


Figure 5.14 : Empreinte azote d'un habitant de l'agglomération parisienne en 2053.

Les mentions « urines collectées », « gestion des urines » et « produits à base d'urines » peuvent désigner des urines séparées à la source ou des systèmes de gestion conjointe des urines et des matières fécales.

Il apparaît ainsi qu'un tel régime socio-écologique est très nettement amélioré par rapport à 2013 sur l'ensemble des critères. Nous avons cherché à montrer visuellement les différences de fonctionnement. Ainsi nous avons intégré la production agricole végétale et animale dans une même fonction pour indiquer le mutualisme renforcé entre ces deux types de production par rapport à la spécialisation des productions qui prévaut en 2013. *A contrario*, il y a désormais deux fonctions principales de gestion des excréments en ville. En 2053, la gestion des urines devient d'importance égale à celle de la gestion des eaux usées en termes de flux d'azote reçus. Elle est de loin le principal pourvoyeur d'azote exogène des exploitations agricoles. Les flux de recyclage sont désormais dominants.

Au niveau de l'hinterland agricole, les surfaces dédiées à l'alimentation d'un parisien sont très nettement réduites et divisées par plus de deux. Elles « libèrent » ainsi 2500 m² par personne. Cette réduction concerne principalement des terres arables : il n'y a plus que 500 m² par personne de terres arables qui servent à l'alimentation des animaux contre 2500 m² aujourd'hui. La proportion de prairies dans l'hinterland parisien passe à 65 % contre 40 % aujourd'hui.

Les pollutions sont très nettement réduites. Au niveau agricole, elles sont divisées par trois pour les émissions d'ammoniac provenant des excréments animales. La lixiviation d'azote est divisée par presque trois. Au total, les pollutions globales d'azote réactif de l'hinterland passent de 16,6 kgN/pers/an à 6,8 kgN/pers/an. Les pertes totales agricoles sont également divisées par un facteur proche de trois.

Les pollutions urbaines sont également divisées par trois, passant de 2,0 kgN/pers/an à 0,7 kgN/pers/an. La pollution en azote réactif des milieux aquatiques est réduite d'un facteur supérieur à quatre. Dans le même temps, deux nouvelles pollutions apparaissent, qui correspondent aux limites de l'efficacité des nouvelles gestions introduites des biodéchets et des urines, principalement sous la forme de pollutions atmosphériques diffuses de NH₃. Cette pollution, inférieure à 0,2 kgN/pers/an, est très largement compensée par la baisse 25 fois plus importante des pollutions atmosphériques au NH₃ de la production agricole biologique intégrée végétale et animale (4,8 kgN/pers/an).

Certains paramètres influent fortement sur l'équilibre global de notre scénario. Les hypothèses de rapidité de diffusion de la séparation à la source de l'urine jouent principalement sur l'année à laquelle un bilan équivalent à celui que nous projetons en 2053 pourrait être atteint. Nous avons noté à la sous-section précédente (sous-section 5.4.2.1) l'importance de l'hypothèse de l'efficacité de la collecte des urines. Si au lieu de prendre une efficacité de 80 % nous prenions une hypothèse beaucoup plus pessimiste de 50 %, le taux de circularité de l'agglomération parisienne reste très élevé en 2053 à hauteur de 50 %. Les urines collectées restent alors majoritaires comme source d'azote recyclé (30 %) et une certaine résilience est permise par la circularité des stations d'épuration (20 %).

Dans notre scénario 2053, la gestion des eaux usées et la gestion des urines sont tributaires de flux équivalents d'azote. Si l'on prolonge les tendances de ce scénario au-delà de 2053, la gestion des eaux usées devient une fonction de moins en moins importante du système alimentation/excrétion mais le couplage entre le système alimentation/excrétion et le système eau reste important du fait de la gestion conjointe avec les eaux ménagères des flux d'urines non collectées séparément (au minimum 20 % dans nos hypothèses) et des flux de matières fécales (15 %). Ainsi, notre scénario ne figure pas de découplage quasi-total du système alimentation/excrétion avec le système eau, même si nous avons vu qu'une telle perspective était envisageable, en particulier avec l'introduction de systèmes de gestion des urines et matières fécales secs et totalement décentralisés.

En prolongeant nos hypothèses au-delà de 2053, le taux d'équipement de l'agglomération en séparation à la source de l'urine atteint 100 % en 2068. La circularité azote de l'agglomération atteint alors 74 % dont les neuf dixièmes (65 %) proviennent de la collecte sélective des urines. La circularité phosphore atteint 92 %, provenant alors majoritairement de la collecte sélective des urines, et la circularité potassium 62 %. Aller au-delà de ces taux de circularité nécessite d'introduire de nouveaux systèmes socio-techniques qui dépassent notre cadre d'analyse et peuvent consister par exemple à augmenter l'efficacité de la collecte sélective des urines et/ou à mettre en place des systèmes de gestion des matières fécales ou des urines non séparées à la source permettant des taux de recyclage élevés de l'azote. Ce scénario montre toutefois que la séparation à la source de l'urine constitue déjà un système socio-technique dont le déploiement est immédiatement envisageable pour l'agglomération parisienne. Il recèle la possibilité d'une réelle transition socio-écologique par le passage d'un régime linéaire à un régime circulaire et sa combinaison avec les hypothèses du scénario bio-autonome-démocratique donne à voir un système alimentation/excrétion envisageable et soutenable pour l'agglomération parisienne.

Conclusion de la cinquième partie

Pour compléter l'analyse des systèmes socio-écologiques réalisée dans les quatre premières parties, nous avons ainsi intégré dans cette cinquième partie des aspects liés au système socio-technique de gestion des urines et matières fécales. Nous avons vu que la prise de conscience relative à l'urine s'était traduite de façon assez différente dans chaque pays. En France, durant tout le vingtième siècle, les modalités de gestion de l'urine se sont progressivement uniformisées dans un verrouillage socio-technique autour du tout-à-l'égout : les urines y ont disparu avec les matières fécales et les champs du débat se sont progressivement réduits jusqu'à éluder presque totalement la possibilité que les urines puissent être gérées différemment. En ce début de XXI^e siècle, l'agglomération parisienne semble toutefois présenter un contexte particulièrement favorable à l'émergence de la séparation à la source de l'urine et la prise de conscience relative à l'urine s'y développe. De nombreux acteurs sont susceptibles d'y trouver un intérêt et les politiques publiques promeuvent la circularité de l'économie, voire soutiennent expressément la séparation à la source de l'urine. La séparation à la source de l'urine constitue finalement une opportunité de réalisation d'une transition socio-écologique du système alimentation/excrétion de l'agglomération parisienne vers la circularité. Nous l'avons illustrée par trois récits fictifs à trois échelles différentes et un scénario prospectif montrant qu'il peut être envisageable que ce système alimentation/excrétion devienne circulaire en quelques décennies.

Nous avons également montré que les implications de la séparation à la source de l'urine pouvaient aller bien au-delà de la stricte mise en œuvre d'une circularité et pouvaient réinterroger les relations ville-campagne, les typologies d'agriculture de l'hinterland parisien, le rôle des usagers dans les services publics urbains ou encore le niveau de décentralisation de leur mise en œuvre. Si l'agglomération parisienne réalise effectivement à l'avenir une transition socio-écologique de son système alimentation/excrétion vers la circularité, celle-ci est susceptible de prendre des formes très variées et ses implications sociales, techniques, politiques ou économiques peuvent être de nature très diverse. Le système alimentation/excrétion de l'agglomération parisienne est donc susceptible de devenir biogéochimiquement soutenable : il conviendra toutefois également d'interroger les autres dimensions de ce système pour garantir sa soutenabilité au sens large.