

Émergence de régimes circulaires dans le monde occidental

Au début du XXI^e siècle, le tout-à-l'égout centralisé est la modalité dominante de gestion des urines et matières fécales dans les villes occidentales. Il induit un système alimentation/excrétion linéaire généralisé à tout l'Occident. Or, depuis quelques années, de nombreuses initiatives sont apparues en Europe qui explorent les possibilités de remise en cause de certaines caractéristiques de ce système, à savoir la linéarité et/ou le tout-à-l'égout et/ou la centralisation.

Parmi ces initiatives, certaines mettent en œuvre une séparation à la source de l'urine. Dans cette thèse, la séparation à la source de l'urine désigne une chaîne de gestion (cf. Figure 3.24) dans laquelle l'interface usager dispose d'un réceptacle spécifiquement dédié à recevoir les urines. La séparation étant rarement absolue dans la pratique, on conservera l'appellation séparation à la source de l'urine pour toute interface usager dont l'effectivité de la séparation des urines permet de maintenir un volume et une composition physico-chimique du produit sortant de l'interface usager encore proche des urines brutes. Les récentes initiatives qui mettent en œuvre une séparation à la source de l'urine sont très souvent associées à des régimes socio-écologiques circulaires. En effet, après avoir isolé les urines, ces initiatives y dédient usuellement une nouvelle chaîne de gestion spécifique, qui permet ou prévoit la possibilité de valorisation agricole des nutriments de ces urines, entraînant alors par définition la mise en place d'un régime circulaire. Nous montrerons dans cette partie comment émerge une prise de conscience de l'importance de l'urine en termes des nutriments qu'elle contient (chapitre 4.1) et nous évaluerons les caractéristiques des régimes socio-écologiques qui peuvent être associés à la mise en place d'une séparation à la source de l'urine (chapitre 4.2).

Les initiatives ne mettant pas en œuvre une séparation à la source de l'urine sont également très nombreuses. Les modifications qu'elles peuvent entraîner en termes de régime socio-écologique sont moins évidentes. Nous analyserons ainsi les enjeux associés à leur émergence et les potentialités qu'elles semblent pouvoir offrir, en particulier par rapport à la circularité (chapitre 4.3).

Le travail présenté dans cette partie s'appuie sur la démarche générale de recherche-action menée dans cette thèse. Pour enquêter sur l'émergence de ces alternatives, nous avons en effet cherché à intégrer nous-mêmes les différentes communautés correspondantes (EcoSanRes, RAE, DWA, etc.) ce qui nous a permis de dépasser la simple enquête du fait de notre engagement simultané dans l'œuvre réalisée par ces communautés. Nous avons interrogé différentes parties prenantes liées à ces initiatives appartenant à des typologies d'acteurs assez variées telles que chercheurs, entrepreneurs, associations, institutions régulatrices, usagers, etc. Cette recherche s'est entre autres appuyée sur de nombreux

voyages d'études spécifiques dont les principaux comptes rendus sont disponibles en annexes 1, 2 et 3 : quatre voyages en Suède, deux voyages en Allemagne, un voyage aux Pays-Bas, un voyage en Suisse, un voyage en Drôme/Ardèche, un voyage dans le Sud-Ouest de la France, la participation au Forum Mondial de l'Eau de 2015 à Daegu en Corée du Sud et à quelques-uns de ses ateliers préparatifs. Cette démarche de recherche-action a été complétée par l'organisation de deux colloques en France sur la séparation à la source et une cinquantaine d'interventions relatives aux enjeux de la séparation à la source à diverses conférences.

4.1. La prise de conscience relative à l'urine

Comme nous l'avons vu précédemment (cf. en particulier la sous-section 1.2.3.1), l'urine présente trois caractéristiques fondamentales qui conditionnent l'importance qu'on peut lui attribuer et les modalités de sa gestion :

- l'urine est liquide. Elle est avant tout constituée d'eau, les autres éléments n'y sont que très minoritaires en proportion. Elle est donc aussi relativement pondéreuse et elle peut se prêter au transport gravitaire en tuyaux ;
- l'urine est salubre. Elle ne présente pas de risque lié à la présence d'éléments pathogènes transmissibles en climat tempéré (cf. section 2.2.2) ;
- l'urine contient la majorité des nutriments excrétés par les êtres humains, et en particulier l'azote, majoritairement sous forme d'urée à l'excrétion et rapidement hydrolysé en ammoniacque dans la plupart des conditions.

Ces trois caractéristiques sont résumées par la maxime suivante (Maxime 6).

Maxime 6 : « L'urine est liquide, salubre et riche en nutriments »

Ces propriétés ont été diversement exploitées selon les contextes et les enjeux auxquels les sociétés ont été confrontées. Nous avons vu au chapitre 3.1 la grande diversité spatio-temporelle des systèmes alimentation/excrétion de l'humanité et les modalités très variables de gestion de l'urine associées. La séparation à la source de l'urine a ainsi pu être pratiquée pour tirer parti de sa composition chimique, tantôt comme source d'ammoniacque pour des usages non agricoles, tantôt comme engrais complet agricole. Dans les contextes où l'urine n'a pas ou peu été valorisée, il a plutôt été tiré parti exclusivement de son caractère liquide, pour permettre son évacuation par des canalisations ou son infiltration dans le sol. Ainsi, les toilettes à séparation d'urine dites Marino, répandues au XIX^e siècle dans de nombreuses villes danoises et suédoises, se développent-elles en particulier dans les immeubles à plusieurs étages, dotés de canalisation d'évacuation des eaux ménagères, pour évacuer les urines avec les eaux ménagères (Drangert, 2017) On recensait ainsi 20 000 toilettes Marino à Stockholm à la fin du XIX^e siècle pour une population totale de 300 000 habitants (Kvarnström *et al.*, 2006).



Figure 4.1 : Toilette Marino.

Source : Drangert (2017)

Cette séparation à la source de l'urine facilite ainsi la gestion des excréments dont il ne reste alors plus qu'une très faible fraction, celle des matières fécales, à sortir des appartements en transportant le réceptacle dédié (6 kg de matières brutes par personne et par mois – cf. sous-section 1.2.3.2). Mais la circularité du système alimentation/excrétion dans lequel s'inscrivent les toilettes scandinaves Marino dépend alors étroitement des modalités de gestion des eaux ménagères et urines collectées par canalisations. Dans le cas fréquent où ces eaux sont rejetées vers l'environnement – comme à Linköping d'après Neset (2005) –, la séparation à la source de l'urine participe alors d'un régime linéaire et polluant.

Dans ce contexte historique où la séparation à la source de l'urine a connu des modalités et des contextes d'application très variés selon les lieux et les époques, une certaine « prise de conscience relative à l'urine » apparaît en Europe dans les années 1990. Nous employons cette expression en

référence implicite à l'expression « urine blindness »¹⁷¹ utilisée par Drangert dans son article éponyme (Drangert, 1998) et dont nous proposons comme antonyme « urine awareness » ou en français « prise de conscience relative à l'urine ». Cette prise de conscience va s'accompagner d'un renouveau de la séparation à la source de l'urine, privilégiant cette fois-ci majoritairement la richesse en nutriments de l'urine pour valoriser ceux-ci et participer au développement de régimes socio-écologiques circulaires.

4.1.1. Un intérêt faible avant les années quatre-vingt-dix

Après la seconde guerre mondiale, en Europe, la séparation à la source de l'urine semble très peu répandue. Le recensement général de la population de 1946 réalisé en France montre un taux de pénétration déjà avancé de la toilette à chasse d'eau et du tout-à-l'égout dans les grandes villes françaises : près des deux tiers des immeubles des villes de plus de 100 000 habitants sont connectés au tout-à-l'égout – 65,7 % d'après ce recensement cité par Goubert (1984). Le tout-à-l'égout représente alors un modèle de développement, de confort et de modernité vers lequel tend la société française et les systèmes alternatifs sont plutôt les vestiges de pratiques surannées et dénigrées, comme le système classique de la toilette au fond du jardin. Une exception (notable) est celle des urinoirs masculins, principalement utilisés en dehors des logements (espace public, lieu de travail, etc.). S'ils permettent de réaliser une séparation à la source de l'urine masculine, la collecte de cette urine est le plus souvent conjointe de celle de l'urine et des matières fécales des toilettes à chasse d'eau et leur chaîne de gestion associée reste celle du tout-à-l'égout. Nous n'avons pas trouvé de références témoignant d'une application répandue de dispositifs circulaires de séparation à la source de l'urine, en France, dans la première moitié du XX^e siècle. Les régimes circulaires français du XIX^e siècle que nous avons décrits à la section 3.1.3, ont pu perdurer au début du XX^e siècle mais ils semblent avoir majoritairement mélangé urines et matières fécales. Après la seconde guerre mondiale, les investigations relatives aux alternatives au tout-à-l'égout semblent très peu nombreuses en France, *a fortiori* pour la séparation à la source de l'urine. Sur une période allant jusqu'aux années quatre-vingt-dix, seul un témoignage de prototype de toilette à séparation d'urine a pu être trouvé (Figure 4.2).

¹⁷¹ « Cécité relative à l'urine » (trad. personnelle).

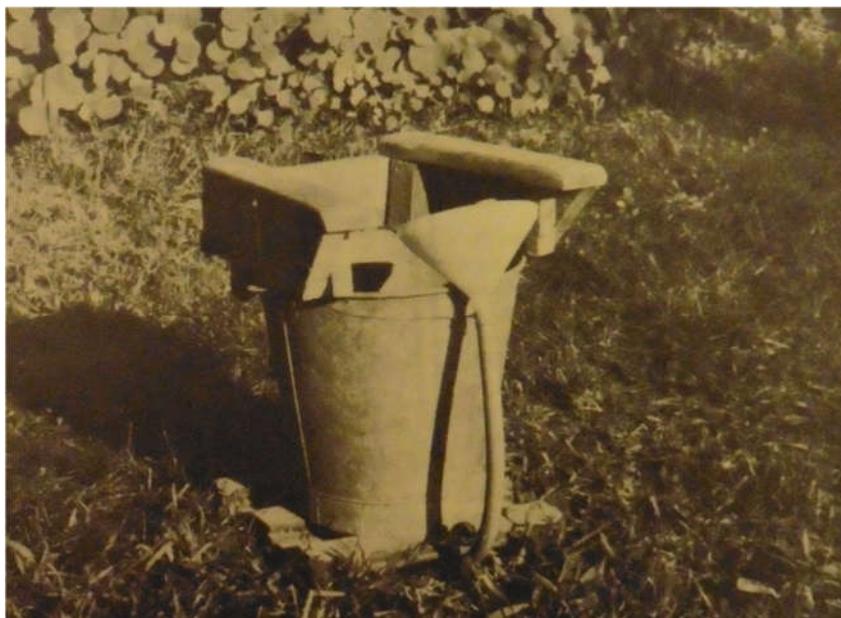


Figure 4.2 : Toilette à séparation d'urine « Séparaterre ».
Développée par le Centre Culturel du Domaine de l'Étoile à Nice (France)
dans les années cinquante (Trelaün, 1983)

Il s'agit d'une toilette développée par le Centre Culturel du Domaine de l'Étoile, à Nice, un centre travaillant sur l'« autonomie d'un habitat sans pollution » (Trelaün, 1983). D'après Trelaün, des industriels avaient alors été approchés pour développer ce modèle de façon moins rustique mais le déploiement de ce modèle a buté sur l'exigence, pour les industriels, d'une demande de 20 000 à 50 000 toilettes pour justifier l'investissement correspondant. Plus généralement, en Europe, la séparation à la source de l'urine semble avoir été très peu pratiquée à cette époque dans une logique circulaire.

4.1.2. L'engouement suédois

Pour des raisons initiales de praticité, la séparation à la source de l'urine semble se diffuser pour les toilettes sèches des maisons de campagne en Suède dans les années soixante-dix (Johansson *et al.*, 2000). Nous formulons l'hypothèse que la combinaison de trois facteurs a créé un contexte favorable pour ce développement de la séparation à la source de l'urine :

- une toilette à séparation d'urine répandue en Suède au XIX^e siècle (toilette Marino) ;
- la popularisation de la maison de campagne dans les Trente Glorieuses ;
- la typologie des maisons de campagne suédoises, isolées, sans eau courante, avec des conditions pédologiques et géologiques peu favorables à l'infiltration.

Si l'utilisation ponctuelle de l'urine en tant qu'engrais a déjà dû exister à cette époque dans certains de ces systèmes à séparation d'urine, il semble que ceux-ci étaient majoritairement linéaires et aucune valorisation d'urine à une échelle supérieure à celle de l'habitant n'est mentionnée pour cette période (Vinnerås & Jönsson, 2013).

Or ce contexte particulier se double d'une sensibilité accrue aux problèmes environnementaux depuis les années soixante-dix (cf. section 1.1.3)¹⁷², en particulier en ce qui concerne la circulation des nutriments du système alimentation/excrétion. Ainsi, la DERU est arrêtée par le conseil européen en 1991 et la convention Oslo-Paris (OSPAR), dont la réduction de l'eutrophisation de la Mer Baltique est un des objectifs, est signée en 1992. Nous formulons également l'hypothèse que la géographie de la Suède caractérisée par une constellation de lacs intérieurs et de baies, une façade maritime donnant sur une petite mer presque fermée, la Baltique, induit une sensibilité locale accrue de ce territoire aux perturbations des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore et en particulier à l'eutrophisation.

Il nous semble donc que cette combinaison de facteurs explique en grande partie le fait que la Suède connaisse, à partir de 1990, un engouement spécifique pour la séparation à la source de l'urine¹⁷³. À partir de la fin des années quatre-vingts, de nombreux éco-villages sont construits en Suède (Norbeck, 1998). Beaucoup réalisent un effort particulier sur la gestion de leur assainissement, en particulier par l'installation de toilettes sèches où urines et matières fécales sont compostées conjointement pour produire un amendement (Vinnerås & Jönsson, 2013). Deux pionniers semblent ensuite avoir particulièrement œuvré à l'introduction de la séparation à la source de l'urine dans une logique de circularité (Johansson *et al.*, 2000) :

¹⁷² La Scandinavie y joue un rôle de premier plan : le premier sommet de la Terre s'est tenu à Stockholm en 1972 et le rapport « Notre avenir à tous » (WCED, 1987) est dirigé par une norvégienne, Gro Harlem Brundtland.

¹⁷³ On notera également qu'en 1754, Carl Gustav Ekeberg, capitaine de la Compagnie Suédoise des Indes Orientales et ami de Carl von Linné, présente à l'Académie des Sciences suédoise un précis historique de l'économie rurale des Chinois dans lequel il relate la pratique de séparation à la source de l'urine dans « des vases particuliers, qu'ils tiennent dans les maisons » aux fins de fertilisation des terres. S'il nous est ici impossible d'établir un lien entre cette mention isolée du XVIII^e siècle et l'histoire de la gestion des urines et matières fécales en Suède, il nous semble en revanche à peu près certain que Victor Hugo s'est appuyé sur la traduction française de ce précis, directement ou indirectement, pour écrire les premiers paragraphes de l'Intestin de Léviathan (Hugo, 1999) où il cite Ekeberg (*sic*) (Ekeberg, 1771).

- Mats Wolgast, professeur en urologie de l'université d'Uppsala, qui présente l'idée de séparer l'urine pour l'utiliser comme engrais en 1991¹⁷⁴ et qui construit dans son garage un prototype de ce qui deviendra la toilette à séparation WostMan. La première mise en œuvre à l'échelle d'un éco-village semble avoir lieu dès l'année suivante, en 1992, à Åkesta ;
- Bibbi Söderberg, une entrepreneure, qui développe la première toilette à séparation d'urine et à chasse d'eau mécanique en porcelaine en 1993, le modèle Dubbletten produit par la société BB Innovation & Co AB (Figure 4.3).

Il s'agit à notre connaissance des premiers exemplaires au monde de toilette qui permette de séparer les urines à la source tout en conservant les caractéristiques principales du standard occidental de la toilette usuelle, à savoir l'évacuation des matières fécales par une chasse d'eau mécanique et la facture en porcelaine.



Figure 4.3 : Bibbi Söderberg et la toilette à séparation d'urine Dubbletten.

Source : www.dubbletten.nu.

La Suède va ensuite connaître un certain engouement pour la séparation à la source de l'urine et le principal élément facilitateur identifié tient au fait que la séparation à la source de l'urine reçoit l'adhésion du parti social-démocrate alors au pouvoir. Les initiatives se multiplient à différentes

¹⁷⁴ Le fait que Mats Wolgast soit professeur en urologie n'est probablement pas anodin et le croisement disciplinaire entre la physiologie humaine et l'écologie aura certainement favorisé la prise de conscience relative à l'urine. Mats Wolgast publie en 1992 l'ouvrage en suédois *Rena vatten – Om tankar i kretslopp* Uppsala: Creanom (Eaux propres – pensées sur les cycles [trad. personnelle]) que nous ne nous sommes pas procuré.

échelles allant de un à environ 500 individus (maisons, immeubles, écoles, éco-villages, etc.) avec une initiative majoritairement citoyenne et, malgré un soutien politique, un investissement encore limité des administrations. Sur la dizaine d'années qui suit la première production de la Dubbletten, plus de 15 000 toilettes à séparation d'urine en porcelaine sont installées en Suède et plus de 120 000 toilettes sèches à séparation d'urine (ou adaptateurs à séparation d'urine) en plastique (Kvarnström *et al.*, 2006)¹⁷⁵.

Pour une population actuelle avoisinant les dix millions d'habitants, cela signifie donc que la séparation d'urine a impliqué une part relativement faible de la population. Beaucoup de réalisations concernent des éco-villages où la séparation à la source de l'urine se fait dans des contextes particuliers : zones périurbaines, faible densité, implication des habitants. Mais d'autres contextes d'application ont existé et certaines réalisations ont pu toucher un large public, tel l'équipement en toilettes à séparation d'urine du musée Universeum (Göteborg), qui accueille annuellement 500 000 visiteurs. Nous représentons Figure 4.4 la répartition géographique de ces initiatives qui montre le caractère national du mouvement d'intérêt pour la séparation à la source de l'urine.

¹⁷⁵ Cf. section 4.2.1 pour les différents modèles de toilettes développés et leur interaction avec la gestion des autres flux domestiques.

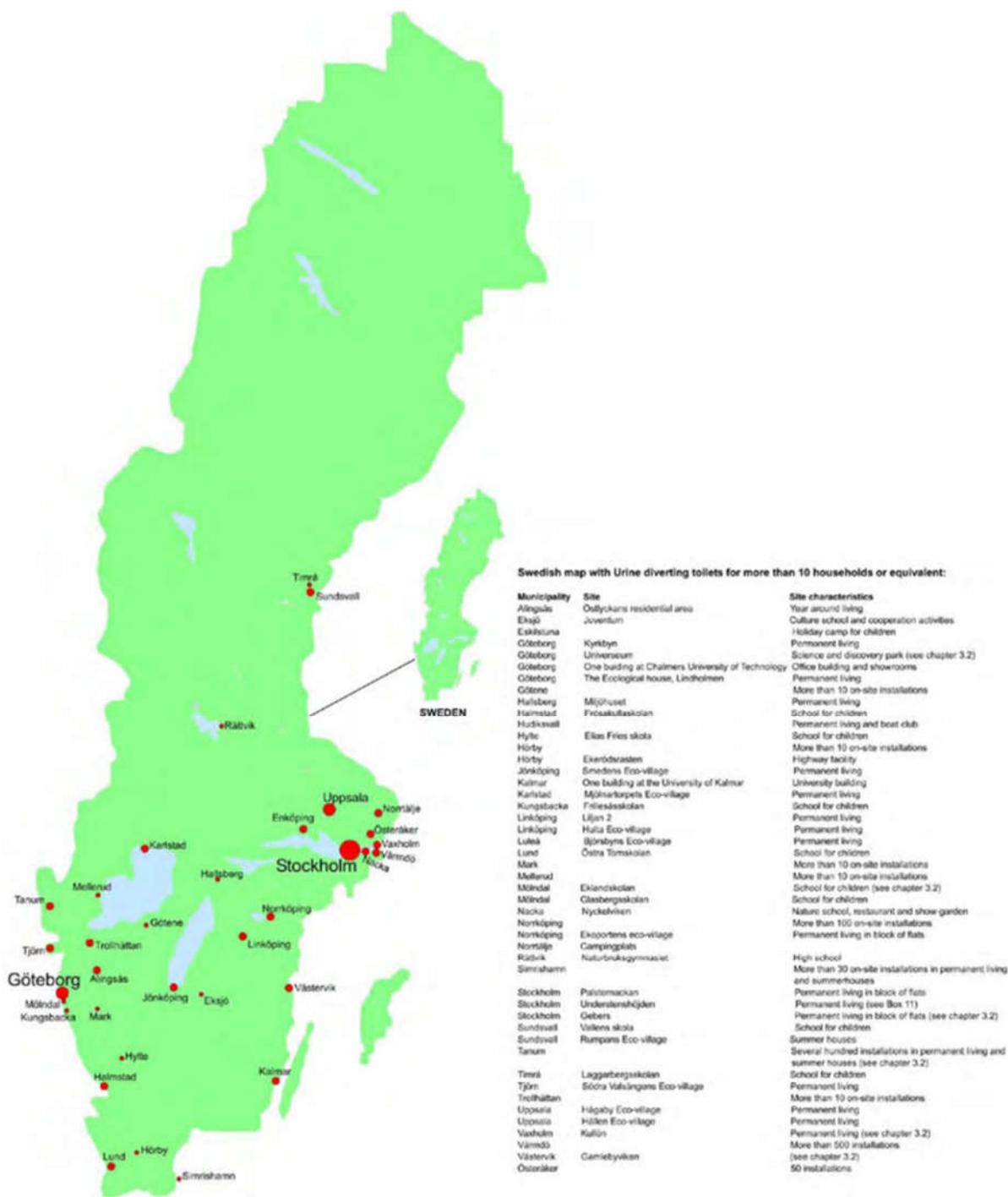


Figure 4.4 : Sélection de localités suédoises où la séparation à la source de l’urine est installée pour dix ménages ou plus entre 1995 et 2006.

Source : Kvarnström *et al.* (2006)

Si toutes ces initiatives n’aboutissent pas à l’établissement d’un régime circulaire par la valorisation des urines collectées en agriculture, l’éco-village Understanshöjden, construit vers 1995 dans la banlieue de Stockholm, est un bon exemple de système pérenne depuis plus de vingt ans. Les modalités de gestion de l’urine y sont assez simples : les maisons sont équipées de toilettes à

séparation d'urine et les urines sont dirigées vers des cuves de stockage mutualisées dans l'éco-village. La cuve est vidangée par un agriculteur qui les épand directement sur ses parcelles comme du lisier animal (Annexe 1).

4.1.3. Mobilisation de la communauté scientifique suédoise

Dans le même temps, l'idée de séparer à la source les urines pour disposer d'un engrais et de proposer ainsi un paradigme circulaire alternatif au tout-à-l'égout linéaire émerge dans la communauté scientifique. Si de nombreuses initiatives scientifiques isolées ont certainement existé avant 1990 pour proposer des modèles alternatifs de gestion des urines et matières fécales, il semble que la reconnaissance de l'urine comme une source possible de nutriments agricoles n'émerge réellement dans la communauté scientifique qu'à partir du milieu des années quatre-vingt-dix¹⁷⁶.

En Suède, des scientifiques se sont clairement inscrits dans ce mouvement national avec le montage, à partir de 1995, des premiers projets de recherche visant à évaluer et accompagner le développement de cette nouvelle pratique. Håkan Jönsson en est une des figures importantes par son implication continue sur le sujet pendant plus de vingt ans. Il intègre SLU, l'université suédoise des sciences agricoles à Uppsala au début des années quatre-vingt-dix et publie par exemple un article en 1997 sur la séparation à la source de l'urine (Jönsson *et al.*, 1997).

Deux ans plus tôt, dans cette même université, un article de Kirchmann & Pettersson (1995) intitulé *Human urine – Chemical composition and fertilizer use efficiency*¹⁷⁷ avait relaté une des premières expériences suédoises d'analyse de l'efficacité agronomique de l'urine utilisée comme engrais. Notons enfin l'article de Drangert (1998), *Urine blindness and the use of nutrients from human excreta in urban agriculture*¹⁷⁸ qui met en exergue le fait que peu de gens sont conscients que l'urine contient la majorité des nutriments excrétés par le corps humain (cf. Maxime 3) et que la fin de cette cécité peut

¹⁷⁶ Le terme « reconnaissance » est ici à prendre avec l'acception de répétition du préfixe « re- » (« connaître à nouveau ») puisque nous avons montré à la section 3.1.3 que la connaissance de l'urine comme source d'engrais est bien établie et partagée en France, et probablement en Europe, dans la seconde moitié du XIX^e siècle.

¹⁷⁷ *L'urine humaine – composition chimique et efficacité de son utilisation en tant qu'engrais* (trad. personnelle). Cet article fait d'ailleurs référence à une communication en suédois, lors d'une conférence, de Kirchmann & Witter de 1991 qui semble analyser le potentiel de recyclage agricole des excréments humains. Nous ne nous sommes pas procuré les actes de cette conférence.

¹⁷⁸ *La cécité relative à l'urine et l'utilisation des nutriments des excréments humains en agriculture urbaine* (trad. personnelle).

permettre d'ouvrir la voie à une gestion des excréments humains qui ne soit pas exclusivement orientée vers la prémunition du risque infectieux, du fait de la salubrité de l'urine.

Dans cet article, Drangert propose une représentation conceptuelle des typologies d'assainissement de l'humanité illustrée par la figure suivante (Figure 4.5).

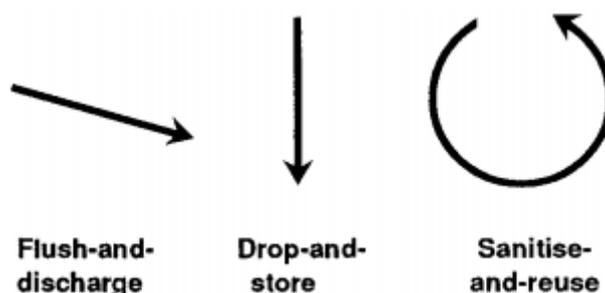


Figure 4.5 : Les trois typologies de gestion des urines et matières fécales de l'humanité.

Source : « tirer la chasse et oublier », « laisser tomber et stocker », « hygiéniser et recycler ». Winblad (1997)¹⁷⁹.

« Laisser tomber et stocker », représenté par la fosse d'aisance, est la solution la plus simple et la plus utilisée par l'humanité, qui amène fréquemment à contaminer les eaux souterraines. Son parent prestigieux, représenté par le tout-à-l'égout, est dénommé « tirer la chasse et rejeter » et entraîne la contamination des eaux superficielles. La fin de la cécité relative à l'urine peut amener, selon Drangert, à proposer une troisième voie soutenable qui, par la séparation à la source de l'urine, permet de réutiliser les nutriments des urines de façon salubre et de faciliter l'hygiénisation des matières fécales. Ce concept avait finalement assez rarement été mis en œuvre par l'humanité jusqu'à présent avec une bonne efficacité combinée de salubrité et de circularité (cf. troisième partie). Il est alors nommé *assainissement écologique* ou encore « ecological sanitation » en anglais ou « ecosan » en abrégé.

4.1.4. L'assainissement écologique dans les pays du Sud

Cette notion aura un fort rayonnement dans les pays du Sud où le système riche et prestigieux « tirer la chasse et rejeter » est hors de portée économique pour beaucoup et où l'amélioration conjointe de la salubrité et de la circularité par l'assainissement écologique peut représenter une opportunité

¹⁷⁹ Nous ne nous sommes pas procuré cette référence : Winblad U., 1997: Ecological Sanitation – A Global Overview. In: Drangert J.O., Bew J. and Winblad U. (eds.) Ecological Alternatives in Sanitation. Proceedings from Sida Sanitation Workshop, Balingsholm, Sweden 6–9 August 1997. Publications on Water Resources: No. 9, Stockholm. Le schéma est repris par Drangert (1998).

d'amélioration conséquente des conditions de vie. La communauté « ecosan » mondiale, enrichie des savoir-faire locaux, s'est ainsi fortement structurée autour de la séparation à la source de l'urine « à la suédoise », avec le soutien de l'organisme SIDA (Swedish International Development Cooperation Agency¹⁸⁰). On trouve une des premières mentions de cet assainissement écologique dans les actes du colloque organisé en 1997 par SIDA et intitulé « Alternatives écologiques en assainissement » – cf. références note 179 p. 260. Le programme de recherche et de développement international EcoSanRes se structure dans les années deux mille autour du Stockholm Environment Institute et de SIDA et tient la première « conférence internationale sur l'assainissement écologique » en 2001 à Nanning (Chine)¹⁸¹. La séparation à la source de l'urine et la circularité dans la gestion des urines et matières fécales aura dès lors un fort ancrage dans l'aide au développement des pays du Sud.

Les problèmes posés par la gestion des urines et matières fécales dans le contexte des pays du Sud sont d'une acuité extrême et témoignent souvent d'une triple peine pour les populations concernées : (i) insalubrité par la transmission des maladies féco-orales, (ii) pollution des milieux naturels et (iii) linéarité des nutriments, c'est-à-dire perte d'opportunité d'augmentation des rendements agricoles fréquemment très bas (Lassaletta *et al.*, 2014). Malgré son importance fondamentale pour permettre de garantir des conditions de vie décentes, la gestion des urines et matières fécales paraît sous-investie par l'humanité aujourd'hui. En 2010, 4,1 milliards de personnes – soit 60 % de l'humanité – vivent avec une gestion des urines et matières fécales insatisfaisante (Baum *et al.*, 2013)¹⁸². L'importance d'une bonne gestion des urines et matières fécales n'a été que très récemment prise en compte par l'Organisation des Nations Unies, en partie du fait du tabou entourant les excréments humains dans de nombreuses cultures et de la domination de sujets plus « nobles » (accès à l'eau potable, accès aux soins, etc.) qui sont pourtant très fortement corrélés. C'est d'ailleurs principalement la gestion des matières fécales, et les questions de salubrité qui y sont liées, qui est prise en compte, au détriment de la gestion des urines. Le cas des pays du Sud étant extérieur à notre cadre, nous ne développerons pas

¹⁸⁰ Agence suédoise internationale de coopération pour le développement (trad. personnelle).

¹⁸¹ http://www.ecosanres.org/pdf_files/Nanning_Conf_report_final.pdf.

¹⁸² Cette évaluation, plus sévère que celle de l'ONU, nous paraît mieux refléter l'état de l'assainissement mondial. La prise en compte de la circularité comme un critère de caractérisation d'un assainissement convenable et soutenable, proposé à l'ONU par l'auteur dans le cadre de la construction des objectifs de développement de 2015, a été jugée pertinente mais irréalisable aujourd'hui, dans un contexte où la simple mention de l'assainissement parmi les objectifs prioritaires de l'ONU n'est déjà pas évidente.

d'avantage l'analyse relative à la gestion des urines et matières fécales dans ces contextes mais son importance est fondamentale dans une perspective plus globale¹⁸³.

4.1.5. Foyers internationaux et rayonnement

Les années quatre-vingt-dix voient aussi le développement d'une prise de conscience relative à l'urine dans d'autres pays européens et son caractère postérieur à l'émergence du sujet en Suède laisse supposer une contribution suédoise non négligeable à la diffusion de ce mouvement, même si le concept de circularité dans l'assainissement, usuellement sans séparation à la source de l'urine, et plus généralement la recherche d'alternatives au tout-à-l'égout, ont existé antérieurement dans la plupart des pays. La notion de rayonnement utilisée dans cette partie n'est ainsi pas nécessairement à comprendre comme un rayonnement centrifuge émanant exclusivement de la Suède mais plus généralement la diffusion d'un concept dont la Suède aura été le premier pôle d'importance en termes d'antériorité et du nombre de réalisations en Europe.

La majorité des pays scandinaves constituent des lieux de rayonnement privilégié :

- le Danemark avec le développement de quelques éco-villages mettant en œuvre la séparation à la source de l'urine (cf. par exemple les éco-villages danois Hyldespjældet et Munksøgård construits autour des années deux mille dont le fonctionnement perdure) et les essais aux champs d'épandage d'urine humaine commencés en 2003 par Jakob Magid et l'université de Copenhague (Annexe 1) ;
- la Finlande, très active en particulier sur les toilettes sèches avec la tenue, tous les trois ans, de la conférence internationale des toilettes sèches à Tampere depuis 2003 ;
- la Norvège avec les travaux de Petter Jenssen (Jenssen & Vatn, 1991).

Il semble que la proximité géographique et culturelle ait joué un rôle non négligeable dans la diffusion de cette prise de conscience relative à l'urine puisque les trois autres pays européens concernés sont tous germaniques, à savoir la Suisse, l'Allemagne et les Pays-Bas.

En Suisse, Tove Larsen (d'origine danoise) et Willi Gujer publient en 1996 un article fondateur intitulé *Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine)*¹⁸⁴ dans lequel ils

¹⁸³ On notera également l'implication de la fondation Bill & Melinda Gates sur les solutions d'assainissement adaptées aux Pays du Sud, suscitant le développement de nouvelles techniques de traitement des urines et matières fécales.

¹⁸⁴ *Gestion séparée de solutions de nutriments anthropogéniques (urine humaine)*.

présentent les caractéristiques principales de l'urine (cf. Maxime 3 et Maxime 6) et esquissent des premières pistes d'application du principe de séparation à la source de l'urine dans le contexte des pays équipés en tout-à-l'égout (Larsen & Gujer, 1996). La périphrase acronymique (ANS pour Anthropogenic Nutrient Solution) qui sert à nommer l'urine humaine dans cet article en dit long sur l'extrême originalité de la présentation de ce concept pour la communauté scientifique d'une revue comme *Water Science & Technology* en 1996. Tove Larsen fait d'ailleurs part de nombreux dénigrement lors des premières années de présentation de ce nouveau concept (Larsen & Gujer, 2013 ; Larsen, 2017). La postérité de cet article aura été féconde puisque la séparation à la source de l'urine constitue depuis maintenant vingt ans un axe important de recherche développé par l'EAWAG avec les programmes successifs Novaquatis (2000-2007), Vuna (2010-2015), Blue Diversion Toilet (depuis 2011 – www.bluediversiontoilet.com), Wings (depuis 2016), etc. En termes de réalisations, la Suisse n'a pas connu d'engouement citoyen similaire à ce qu'a pu connaître la Suède dans les années quatre-vingt-dix mais la pérennité de son engagement sur le sujet depuis vingt ans, en contexte occidental comme dans l'aide au développement, en fait un pilier important de la prise de conscience relative à l'urine.

En Allemagne, les réflexions relatives aux alternatives au tout-à-l'égout n'ont pas été centrées sur la séparation à la source de l'urine. Ainsi, Ralph Otterpohl, un des précurseurs des techniques alternatives d'assainissement en Allemagne, indique qu'ils furent une poignée de personnes à avoir des idées similaires sur la possibilité de reconsidérer les eaux usées comme une ressource à valoriser et non comme un déchet à éliminer, au début des années quatre-vingt-dix, « avant les Suédois » (Annexe 3). Tel Petter Jenssen, en Norvège, qui dans une communication conjointe avec Arild Vatn de 1991, met en exergue les potentialités des systèmes d'assainissement décentralisés pour mettre en œuvre des régimes circulaires par une gestion conjointe des urines et des matières fécales, séparée des eaux ménagères, et des toilettes « biologiques » à traitement décentralisé (compostage, méthanisation, séchage, etc.) (Jenssen & Vatn, 1991). Otterpohl *et al.* publieront un article explicitant ces nouveaux concepts en 1997 (Otterpohl *et al.*, 1997).

Les premières réalisations allemandes sont donc assez variées dans les typologies de chaînes de gestion mises en œuvre : toilettes sèches à compost dans des éco-villages dès les années quatre-vingts, séparation à la source de l'urine par endroits et séparation à la source des eaux-vannes sous-vide dans d'autres à partir de la fin des années quatre-vingt-dix (Londong, 2013). Le groupe de travail créé en 1999 au sein de l'association DWA (association allemande pour l'eau, l'assainissement et les déchets¹⁸⁵) adopte NASS comme dénomination de ce nouveau centre d'intérêt des alternatives au tout-

¹⁸⁵ Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Cette association correspond relativement bien à l'association française ASTEE.

à-l'égout linéaire et centralisé : NASS est l'acronyme de Neuartige Sanitärsysteme, traduit en anglais par New Alternative Sanitation Systems ou encore en français « nouveaux systèmes alternatifs d'assainissement »¹⁸⁶. La dénomination de cette commission et son portage montrent déjà une différence assez nette avec le mouvement suédois. Ce dernier est centré sur l'écologie et la fermeture des cycles biogéochimiques et il est porté par des citoyens, la recherche et l'agence nationale d'aide au développement. La commission allemande qui se structure dans les années deux mille est elle portée par une fédération de professionnels et de scientifiques et se donne comme objet d'étude très large l'alternative à l'existant, sans qualification supplémentaire de cette alternative. Nous verrons dans le chapitre 4.3 comment cette différence se traduit en termes de caractéristiques des nouveaux régimes socio-écologiques associés. Le lien avec l'aide au développement est également fort en Allemagne puisque l'agence allemande de coopération internationale (GIZ) porte depuis 2007 le réseau international SuSanA (*Sustainable Sanitation Alliance* – alliance pour l'assainissement durable) et avait testé l'application à son propre bâtiment, à Eschborn, des principes de l'assainissement soutenable prôné par SuSanA.

Enfin, aux Pays-Bas, la situation s'avère assez similaire à celle de l'Allemagne puisque l'alternative au tout-à-l'égout centralisé et linéaire bénéficie dès 2000 d'un portage institutionnel de STOWA (Fondation pour la recherche appliquée dans le domaine de l'eau¹⁸⁷). STOWA a permis d'impulser, de financer et de fédérer les efforts de recherche, les développements et les réalisations d'alternatives (Swart & Palsma, 2013). Comme en Allemagne, le terme choisi pour fédérer ces alternatives est assez large, « Nieuwe Sanitatie », c'est-à-dire « nouvel assainissement »¹⁸⁸ et comprend une variété d'initiatives qui seront détaillées au chapitre 4.3.

Notons enfin, toujours dans l'espace germanique, le projet autrichien Solar City, lancé à Linz en 1998 (lotissement de 250 personnes avec toilettes à séparation d'urine – Oldenburg, 2009). C'est également en Autriche que se situe l'école de Vienne de l'écologie sociale.

Dans les autres pays européens, il ne nous semble pas y avoir de structuration autour de cette thématique ni de prise de conscience relative à l'urine partagée par un grand nombre d'acteurs avant les années deux mille dix, contrairement aux différents pays que nous venons de citer.

Nous voyons aussi que la prise de conscience ne concerne pas seulement l'urine mais plus généralement l'eau usée désormais vue comme ressource, au sein de laquelle l'urine concentre la

¹⁸⁶ Trad. personnelle.

¹⁸⁷ Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (trad. personnelle).

¹⁸⁸ Trad. personnelle.

majorité des ressources en termes de nutriments. On peut illustrer cette prise de conscience par le graphique ou le tableau, souvent présentés à partir des années quatre-vingt-dix, de la répartition de l'origine des différents composants des eaux usées. On y croise la décomposition des eaux usées en sources (urines, matières fécales, eaux de chasse et eaux ménagères) avec la décomposition en caractéristiques physico-chimiques (volumes, masses, thermies, quantités de carbone, azote, phosphore, potassium, etc.). Nous l'illustrerons ici par la version française d'un graphique réalisé par Otterpohl (2003) (Figure 4.6).

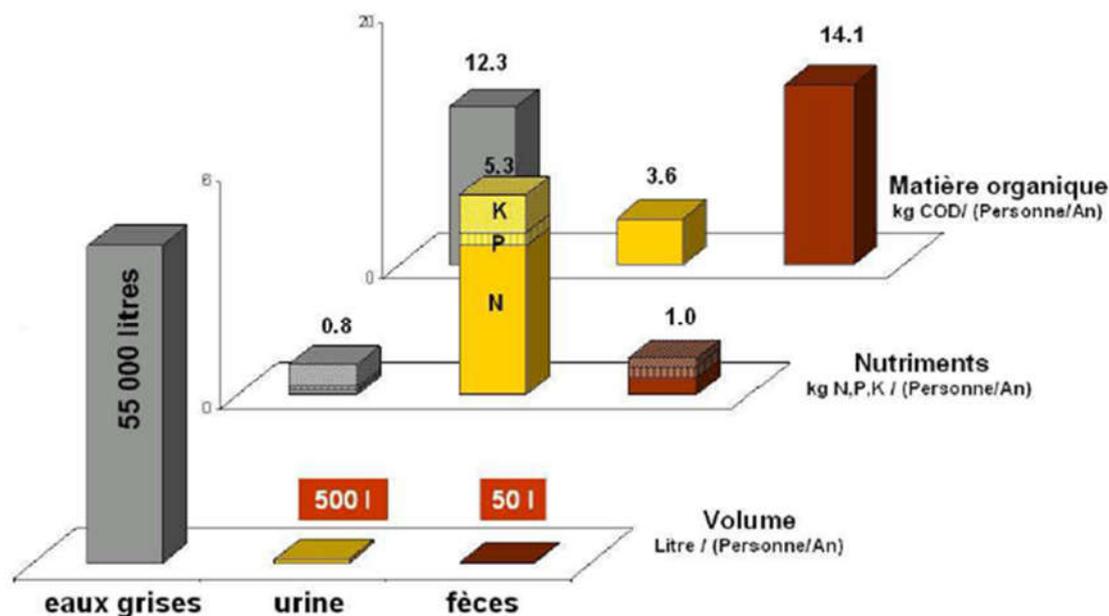


Figure 4.6 : Composition croisée des eaux usées domestiques en termes de composition chimique et de sources principales de ces éléments.

Source : Otterpohl (2003).

On trouvera de nombreuses déclinaisons de ce graphique dans la littérature (Johansson *et al.*, 2000 ; Larsen & Lienert, 2007 ; Etter *et al.*, 2015 ; Eme & Boutin, 2015 ; etc.). On le complètera utilement par une analyse en termes énergétiques, tels que présenté par exemple par Larsen (2015) dans la tableau suivant (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Contenu énergétique des eaux usées domestiques typiques européennes (kWh/pers/an)

Source : Larsen (2015)

		Comments
Heat ^a contained in warm water	800	65 L/p/day, heated from 10 to 38 °C
Chemical energy contained in organic matter	150	120 g _{COD} /p/day; based on lower heating value of methane: 12.5 kJ/g _{COD}
Chemical energy 'embedded' in N and P	50	Maurer et al. (2003), Invested in the fertilizer industry, primarily for producing bioavailable N from N ₂ .

^a Please note that heat has a lower quality than chemical energy.

Dans le même esprit, et dans une perspective de mise en exergue d'un système alimentation/excrétion, le tableau suivant indique le croisement entre la composition des excréments humains et les besoins en nutriments des plantes comme proposé par Drangert (1998) (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 : Besoin en azote, phosphore et potassium pour produire 250 kg de céréales et nutriments contenus dans les urines et matières fécales (suédoises).

Source : Drangert (1998)

Important nutrients	Urine 500 l/year	Faeces 50 l/year	Total	Nutrient needed for 250 kg cereals
Nitrogen (N)	4.0 kg, 88%	0.5 kg, 12%	4.5 kg, 100%	5.6 kg
Phosphorus (P)	0.4 kg, 67%	0.2 kg, 33%	0.6 kg, 100%	0.7 kg
Potassium (K)	0.9 kg, 71%	0.3 kg, 29%	1.2 kg, 100%	1.2 kg
Total amount of N+P+K	5.3 kg	1.0 kg	6.3 kg	7.5 kg

Cette prise de conscience relative à l'urine et aux eaux usées, trouvée dans l'Europe scandinave et germanique¹⁸⁹ à la fin du XX^e siècle, rappelle celle que Paulet mentionne en France trois siècles plus tôt (cf. section 3.1.3). L'esprit du graphique de la Figure 4.6 se retrouve d'ailleurs très souvent dans les écrits français du XIX^e siècle cités par Barles (2005).

Si le contexte d'émergence de cette prise de conscience en Europe à la fin du XX^e siècle est clairement lié à la double conjonction d'une sensibilité aux perturbations planétaires majeures de l'Anthropocène et d'une recherche de nouvelles ressources dans une Europe ayant déjà majoritairement exploité ses

¹⁸⁹ Nous employons le terme germanique au sens large des peuples dont la langue appartient au groupe germanique. Il faudrait en exclure le Royaume-Uni, l'Irlande voire l'Islande où nous n'avons pas identifié l'émergence de cette prise de conscience. On pourrait intégrer la Scandinavie dans l'espace germanique – au sens linguistique – mais pour éviter les confusions nous choisissons ici le terme d'Europe scandinave et germanique.

ressources fossiles les plus facilement disponibles, il serait intéressant d'analyser en quoi ce contexte pourrait être rapproché de la prise de conscience indiquée par Paulet et du mouvement général, lié à la révolution industrielle, de recherche de ressources mis en exergue par Barles (Barles, 2005) (cf. section 3.1.3). On notera également le rappel culturel au monde germanique dans l'emploi des urines et matières fécales au XIX^e siècle justement dénommé « à la flamande » et dont nous avons vu qu'il se pratiquait en Flandres, en Alsace, en Belgique, aux Pays-Bas et dans le Palatinat. Cela témoigne peut-être d'une disposition culturelle encore plus profonde, distinguant alors le monde germanique des autres cultures, par rapport à l'utilisation des excréments humains en agriculture, peut-être également corrélée aux différences religieuses entre le catholicisme et le protestantisme. Il serait alors intéressant d'étudier l'importance de ces différences culturelles de relation aux excréments et en quoi elles sont toujours d'actualité aujourd'hui ou susceptibles d'évoluer.

Pour la fin du XX^e siècle et le début du XXI^e siècle, nous proposons d'illustrer la diffusion de cette prise de conscience relative à l'urine, croisée avec une prise de conscience relative aux eaux usées, sur la carte suivante (Figure 4.7). Les dates ont été choisies pour illustrer les périodes où il nous paraît y avoir suffisamment de travaux universitaires ou de réalisations, indiqués préalablement, pour caractériser une prise de conscience. Elles sont arrondies à 5 ans. Pour les eaux usées, nous avons choisi un critère relativement restrictif qui est celui de la diffusion de la collecte sous-vide des urines et matières fécales : il ne correspond qu'à une certaine forme de réalisation de la prise de conscience relative aux eaux usées mais nous paraît assez caractéristique d'un mouvement général européen de cette période que nous avons ainsi voulu illustrer ici et dont nous détaillerons les tenants et aboutissants à la section 4.3.2.

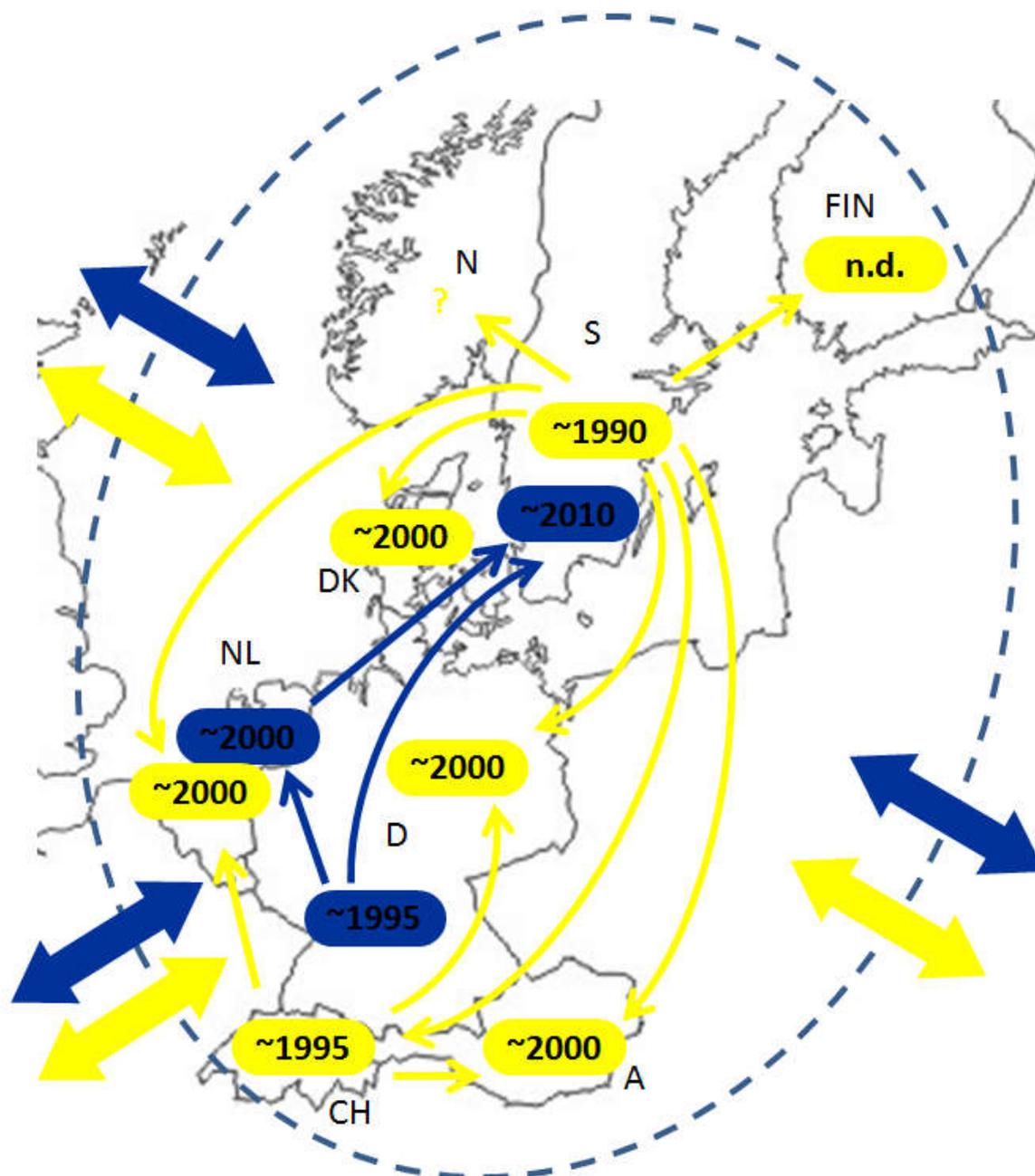


Figure 4.7 : Diffusion de la prise de conscience relative à l'urine et aux eaux usées en Europe scandinave et germanique entre 1990 et 2010.

En jaune : prise de conscience relative à l'urine. En bleu : prise de conscience relative aux eaux usées illustrée par la collecte sous-vide des urines et matières fécales. A : Autriche, CH : Suisse, D : Allemagne, DK : Danemark, FIN : Finlande, N : Norvège, NL : Pays-Bas, S : Suède.

En conclusion, nous avons ainsi montré que la Suède et l'Europe germanique voient se diffuser, à partir des années quatre-vingt-dix, une prise de conscience relative à l'urine humaine. Nous avons majoritairement cantonné notre analyse à des secteurs restreints de la société des différents pays européens, telles que les différentes associations mentionnées précédemment. Le caractère parcellaire, au sein de la société et des citoyens européens dans leur ensemble, de cette prise de conscience est

évident, en particulier du fait de l'imprégnation quasiment totale de la société dans le paradigme du tout-à-l'égout et du tabou culturel entourant les excréments et il serait intéressant d'analyser plus finement quelles relations et quel écho cette diffusion sectorielle a pu avoir avec les populations des différents pays dans leur ensemble. Pour autant qu'elle ne concerne donc qu'une fraction de la population des pays européens scandinaves et germaniques, cette prise de conscience relative à l'urine humaine met donc au jour que l'urine humaine (cf. Maxime 6) :

- ne pose pas de problème de salubrité ;
- contient la majorité des nutriments assimilés puis excrétés par les êtres humains ;
- pourrait offrir conséquemment la possibilité, par sa séparation à la source, sa collecte et sa valorisation agricole, de faire muter le régime socio-écologique linéaire des systèmes alimentation/excrétion du monde occidental basés sur le tout-à-l'égout vers des régimes socio-écologiques circulaires.

À partir des années deux mille et surtout deux mille dix, on voit essaimer de nombreuses recherches et également des développements et des réalisations autour des possibilités de gestion de l'urine humaine de manière alternative au tout-à-l'égout. Ces récentes contributions ont considérablement enrichi les connaissances autour des possibilités de mise en œuvre de la séparation à la source de l'urine et de ses chaînes de gestion associées. Dans le chapitre suivant (chapitre 4.2), nous allons ainsi passer en revue les modalités techniques envisageables aujourd'hui qui permettent de réaliser concrètement une séparation à la source de l'urine et les différents maillons de la chaîne de gestion subséquente. Nous évaluerons également leurs performances, principalement sur le plan de la circularité et plus largement environnemental.

4.2. Possibilités techniques de séparation à la source et de valorisation de l'urine

Nous nous intéressons dans ce chapitre exclusivement à la séparation à la source de l'urine et allons chercher à analyser en quoi les différentes chaînes de gestion associées, théoriques ou réalisées, peuvent correspondre à l'opportunité d'une émergence de régime circulaire dans le contexte du monde occidental. Nous effectuons donc ici une revue méthodique de l'ensemble des maillons d'une chaîne de gestion de l'urine, depuis l'interface usager jusqu'à l'usage final, et chercherons à mettre en évidence les avantages ou les inconvénients des différents moyens techniques envisageables au regard de la possibilité de réalisation d'une chaîne de gestion circulaire. Nous essaierons de mettre en lumière les points les plus critiques qui seraient à même de conduire au dysfonctionner d'une chaîne de gestion des urines.

Nous nous placerons plus spécifiquement dans le contexte des villes françaises mais chercherons autant que possible à maintenir une analyse généralisable au monde occidental en général. On pourra bien sûr toujours se référer à Tilley *et al.* (2014) pour obtenir certains compléments sur cette partie, ainsi qu'à Larsen *et al.* (2013) et quelques sites internet spécifiquement dédiés aux systèmes d'assainissement alternatifs au tout-à-l'égout¹⁹⁰. En fin de chapitre, nous ferons un bilan de cette revue afin de préciser les chaînes de gestion qui nous paraissent les plus pertinentes et d'évaluer leur efficacité dans les différentes conditions de mise en œuvre envisageables.

4.2.1. Interface usager

L'équipement actuel du monde occidental en interfaces usagers est aujourd'hui relativement peu propice à la séparation à la source universelle de l'urine. Ainsi, en France, plus de 99 % des foyers sont équipés en toilettes à chasse d'eau mécanique ne permettant pas la séparation à la source de l'urine. Cet équipement, construit progressivement depuis environ un siècle (cf. section 3.1.4), impose déjà à lui seul qu'une transition socio-écologique par la seule séparation à la source de l'urine s'inscrit nécessairement dans une échelle de temps de plusieurs décennies. Nous aurons l'occasion de préciser cet aspect dans la partie suivante (cinquième partie).

¹⁹⁰ Cf. en particulier www.sswm.info, www.susana.org, et en France www.rae-intestinale.fr.

4.2.1.1. Urinoirs masculins

Urinoirs masculins à chasse d'eau

L'urinoir masculin réalise déjà aujourd'hui une séparation à la source de l'urine dans de nombreux contextes. En France, on le trouve majoritairement dans les zones où les toilettes constituent un équipement mutualisé tels que :

- les lieux de travail ou d'études (immeubles de bureaux, écoles – cf. Figure 4.8) ;
- les lieux de passage (gares, aéroports, etc.) ;
- la voie publique (vespasiennes) ;
- les lieux d'événementiel, temporaires ou permanents (festivals, concerts, congrès, etc.).

Dans la majorité des cas, les urinoirs masculins sont reliés au tout-à-l'égout et la séparation à la source de l'urine permise par l'urinoir masculin rejoint la chaîne de gestion des matières fécales et des eaux usées dès le stade de la collecte. Dans l'optique d'une chaîne complète de gestion séparée des urines, les urinoirs masculins constituent toutefois une interface usager déjà largement répandue et appropriée. L'urinoir masculin constitue donc à ce jour l'interface usager la plus à même de permettre la réalisation d'une séparation à la source de l'urine. Nous marquons ce fait par la maxime suivante (Maxime 7).

Maxime 7 : « La population masculine française pratique déjà largement la séparation à la source de l'urine »



Figure 4.8 : Urinoir à chasse d'eau masculin

Source personnelle.

Urinoirs masculins secs

En outre, depuis quelques années sont apparus des urinoirs masculins secs, c'est-à-dire sans chasse d'eau. Les urines de ces urinoirs sont toujours collectées conjointement avec les eaux usées et leur émergence semble principalement liée à la volonté de limiter les consommations d'eau potable, s'inscrivant en cela dans un mouvement plus général de baisse des consommations d'eau potable de la société française.

L'urinoir sec masculin offre une opportunité supplémentaire de mise en œuvre de séparation à la source de l'urine, qui plus est avec une séparation quasiment parfaite puisque les urines ainsi collectées ne sont pas diluées par une chasse d'eau (contrairement aux urinoirs classiques) et sont très peu contaminées par d'autres éléments, si ce ne sont les produits d'entretien utilisés dans la cuvette de ces urinoirs.

L'élément critique de fonctionnement de l'urinoir sec masculin réside dans son siphon. En effet, tous les équipements d'évacuation d'eaux usées, y compris les urinoirs à chasse d'eau masculins, sont dotés d'un siphon hydraulique. Cette invention est décisive et liée au développement du tout-à-l'égout

puisque c'est le siphon hydraulique qui permet de bloquer les remontées de gaz et de molécules volatiles, et donc d'odeurs, voire d'animaux (insectes principalement) venant des égouts vers les lieux de vie.

S'il est relié à un équipement susceptible d'émettre des odeurs¹⁹¹, l'urinoir sec masculin doit donc permettre de maintenir cette fonction de siphon sans pouvoir maintenir l'usage d'eau de chasse pour remplir un siphon hydraulique. Le remplissage d'un siphon hydraulique par l'urine exclusivement n'est pas envisageable du fait des odeurs dégagées par l'urine stockée dans ce siphon (ammoniac d'hydrolyse de l'urée et autres composés volatils azotés et soufrés – cf. Hashemi & Han, 2017). L'urinoir sec masculin est donc usuellement doté d'un siphon sec c'est-à-dire d'une pièce qui doit permettre l'écoulement des urines dans un sens mais empêcher la remontée des odeurs de l'autre.

Plusieurs modèles de siphons secs ont été développés. Celui que nous avons le plus fréquemment rencontré est constitué d'une membrane souple, en forme de **V**, qui permet l'écoulement de l'urine dans un sens par l'ouverture du « bas du **V** » mais fermé au repos pour empêcher la remontée des odeurs. De nombreuses autres possibilités existent pour réaliser un siphon sec, tels que les siphons à film lipidique, l'utilisation d'une vanne de fermeture complète, ouverte uniquement lors de la miction urinaire ou encore de manière plus artisanale la balle de ping-pong (De Gouvello, 2009).

L'introduction du siphon sec dans un contexte dominé par le siphon hydraulique n'est pas anodine. Les modalités de son entretien diffèrent de celles du siphon hydraulique et les gestionnaires d'un urinoir sec doivent s'en approprier les modalités spécifiques d'entretien. Une enquête réalisée auprès du personnel en charge de l'entretien des urinoirs secs masculins du bâtiment Coriolis de l'École des Ponts ParisTech a ainsi montré qu'aucune des personnes impliquées dans la gestion de ces urinoirs secs n'est informée ni formée à l'importance d'un entretien spécifique de ces siphons (Smail, 2016).

4.2.1.2. Urinoirs féminins

Différences hommes/femmes par rapport à la séparation à la source de l'urine

L'urinoir masculin distingue hommes et femmes par rapport à la séparation à la source de l'urine puisqu'il n'est adapté qu'aux personnes de sexe masculin et, du fait de la séparation usuelle des cabinets de toilettes entre hommes et femmes, il est présent uniquement dans les cabinets réservés aux hommes. La séparation à la source de l'urine est donc, *de facto*, réalisée aujourd'hui presque

¹⁹¹ Ce sera très usuellement le cas puisque l'écoulement de l'urine dans un tuyau, indépendamment de la nature du débouché de ce tuyau, entraîne presque toujours un dépôt odorifère sur les parois.

exclusivement par les personnes de sexe masculin. Le développement éventuel de la collecte sélective d'urine sera donc confronté à cette différence entre hommes et femmes (cf. cinquième partie).

Les différences anatomiques y contribuent en grande partie. Les femmes disposent d'une capacité d'orientation de leur miction urinaire plus dépendante de la position de leur corps que les hommes. La réalisation d'une interface usager permettant la collecte spécifique des urines, à l'exclusion des matières fécales, en est rendue plus difficile. La différence anatomique n'est cependant pas la seule cause explicative de la quasi absence d'urinoir féminin dans la société et les postures de miction urinaire relèvent également d'un fait culturel.

En France, nous avons interrogé la personne responsable de l'entretien de l'urinoir public qui a temporairement été installé dans le square Saint-Laurent dans le IX^e arrondissement de Paris (Figure 4.9). Ses statistiques de fréquentation de l'urinoir indiquent qu'environ 2 % des utilisateurs de cet urinoir étaient des femmes, alors même que cet urinoir ne disposait pas de porte mais uniquement de cloisons latérales.



Figure 4.9 : Urinoir temporairement installé dans le square du jardin Saint-Laurent à Paris IX^e.

Source : www.greenpee.fr – dernière consultation le 27 novembre 2017.

L'urinoir féminin est une interface usager qui existe tout de même, bien qu'il soit quasiment absent dans la société française aujourd'hui. La thèse de Bettina Möllring comporte une longue section relative à l'urinoir féminin à laquelle on pourra utilement se référer pour analyser plus en détail l'histoire et les potentialités de cette interface usager – et des toilettes en général (Möllring, 2003).

Nous avons trouvé des témoignages de son utilisation contemporaine dans quelques cas plutôt isolés et en particulier :

- les lieux d'événementiel ;
- les lieux de passage (Figure 4.10).



Figure 4.10 : Urinoir féminin.

Installé dans des toilettes publiques à Francfort. Source : SuSanA.

Accessoires de miction urinaire

De nombreux accessoires existent par ailleurs qui peuvent faciliter la collecte d'urine. Ainsi, pour les femmes, différents types d'entonnoirs adaptés à la morphologie du pubis sont ou ont été commercialisés : Urinella, Pippi Lissi, Petit Pissoir, Sanifem-Freshette (Möllring, 2003), Pisse-Debout (www.pissedebout.fr). Ils peuvent être à usage unique (en carton) ou réutilisables (en plastique souple ou rigide). Les domaines d'application pour lesquels ils ont été conçus sont assez variés (festivals, escalade, maladie, etc.). Ils servent principalement à permettre aux femmes d'avoir une liberté à peu près similaire à celle des hommes pour uriner.

4.2.1.3. Toilette à séparation d'urine¹⁹²

Toilette à séparation d'urine à chasse d'eau

Comme nous l'avons vu à la section 4.1.2, la Suède est à l'origine de la toilette à séparation d'urine à chasse d'eau mécanique. Après les premiers modèles Dubbletten (cf. Figure 4.3) et Wost Man, la grande entreprise de sanitaires suédoise Gustavsberg AB en développe aussi. Les différents modèles correspondants sont présentés sur les illustrations ci-après (Figure 4.11).



Figure 4.11 : Toilettes à séparation d'urine à chasse d'eau.

Modèles Wost Man Ecology – deux modèles successifs (a, b) – et Gustavsberg (c).

Source personnelle.

¹⁹² Nous choisissons le terme « toilette à séparation d'urine » qui nous paraît être relativement répandu chez les francophones et le mieux adapté. Tilley *et al.* (2014) utilisent la formulation un peu lourde « toilettes à chasse avec séparation des urines » et le terme consacré en anglais est « urine diversion toilet », terme préféré à « urine separation toilet » par la communauté de la séparation à la source car il permet de mieux mettre en exergue que les urines sont naturellement séparées des matières fécales par le corps humain et que la toilette ne sert qu'à recueillir séparément les deux flux en effectuant une « diversion » des urines par rapport aux matières fécales. La traduction de « diversion » en français pourrait être « dérivation », « déviation » ou « détournement » mais nous préférons conserver le terme consacré par l'usage « séparation » qui ne nous paraît pas incorrect dans son acception française. Outre la notion de dissociation de deux choses liées, le Trésor de la Langue Française informatisé (TLFi) donne ainsi comme définitions possibles à « séparer » : « ne pas accoler » et « traiter à part » ce qui correspond bien à notre sens au cas des toilettes en question.

Sur ces toilettes, le siphon de l'évacuation des urines est un simple siphon hydraulique. Son utilisation est possible car les urines sont évacuées avec une chasse d'eau. En dehors des éco-villages scandinaves où l'urine est valorisée, ces modèles sont fréquemment vendus dans l'unique optique de consommer moins d'eau de chasse pour l'évacuer puisque ces modèles peuvent utiliser seulement 0,2 L pour la petite chasse d'eau des urines (Figure 4.12). Le modèle économique qui permet de vendre ces toilettes n'est donc pas nécessairement attaché à une circularité sur les nutriments mais parfois uniquement à la possibilité d'économiser de l'eau.



Figure 4.12 : Détail du bouton de chasse d'eau de toilettes à séparation d'urine.

Le petit bouton sert à la chasse des urines (modèle Wost Man Ecology – source personnelle).

Ces modèles présentent l'inconvénient que les urines collectées sont diluées dans de l'eau de chasse, ce qui obère généralement l'efficacité de la suite de la chaîne de gestion par les volumes plus importants à gérer. L'entreprise allemande Roediger Vakuum und Haustechnik GmbH a ainsi développé au début des années deux mille un modèle de toilette à séparation d'urine nommé No Mix dont l'orifice de collecte des urines peut se fermer par un clapet. L'ouverture de ce clapet est commandée par un bouton situé sous la lunette de la toilette. Ainsi, quand l'utilisateur s'assied sur la lunette, la vanne est ouverte et les urines vont être collectées seules. Quand l'utilisateur se lève, la vanne se referme et la chasse d'eau s'évacue dans l'orifice des matières fécales. Le retour d'expérience donné par l'EAWAG indique que l'absence totale de dilution ne se vérifie pas dans la pratique.



Figure 4.13 : Toilette à séparation d'urine No Mix.

À gauche, vue générale de la toilette (source personnelle) ; à droite, diagramme fonctionnel de la toilette avec : en haut, la toilette au repos (vanne fermée) ; au milieu, la toilette pendant l'usage (vanne ouverte) ; en bas, la toilette après usage et chasse d'eau tirée (vanne fermée). Source : Roediger.

Même si les urines sont ici collectées sans eau, du moins théoriquement, il est toujours prévu que l'utilisateur actionne une chasse d'eau après une miction urinaire pour rincer la cuvette de réception des urines et la présence de la chasse d'eau est utile pour les matières fécales comme pour les urines. On peut imaginer des usages d'une telle toilette sans actionner de chasse d'eau après la miction urinaire mais cela pourrait potentiellement induire des odeurs dues au reliquat d'urine non collectée. Nous n'avons ainsi pas connaissance de l'existence d'une toilette qui serait à chasse d'eau mécanique pour les matières fécales mais totalement sèche pour les urines, comme l'est l'urinoir sec. Comme pour les urinoirs secs, un travail sur les matériaux et la forme de la cuvette de réception des urines peut probablement permettre de développer des systèmes dans lesquels le rinçage de la cuvette des urines pourrait être évité. La question de l'entretien de cette cuvette en cas de mésusage (évacuation de papier toilette, de matières fécales, etc.) devrait tout de même être résolue. Pour une présentation plus en détail des différentes toilettes à séparation d'urine, on se reportera utilement à l'étude de marché réalisée par WRS (2001).

L'appropriation des toilettes à séparation d'urine et leur modalités d'usage, comparativement aux toilettes unitaires, ne sont pas évidentes. Ces points ont été mis en exergue dans les travaux de recherche suédois et suisses relatifs à la séparation à la source de l'urine (cf. par exemple Johansson *et al.*, 2000 et Larsen & Lienert, 2007). Les principales difficultés liées à l'usage de ces toilettes sont :

- le positionnement adapté sur la toilette pour faire correspondre la séparation entre le réceptacle des urines et celui des matières fécales avec sa physiologie. Deux problèmes peuvent se présenter :
 - l'évacuation d'urines dans le réceptacle des matières fécales pose problème dans la mesure où elle diminue l'efficacité de la collecte des urines et où elle peut induire une modification de la composition attendue des eaux de chasse. Tant que le taux d'urines évacuées avec les matières fécales reste faible, ce point reste peu problématique. Le retour d'expérience des différents projets montre d'une part une difficulté méthodologique à évaluer précisément ce taux, d'autre part un taux usuellement estimé autour de 25 % (Besson, 2015). Ce taux présente toutefois d'importantes variations et, s'il diminue parfois à près de 5 %, il a pu monter aussi, dans les contextes où l'appropriation des toilettes à séparation est faible, jusqu'à 60 %. L'intérêt de mettre en place une collecte sélective des urines par de telles toilettes peut alors devenir très limité ;
 - l'évacuation de matières fécales dans le réceptacle des urines est également problématique dans la mesure où elle peut facilement induire une contamination des urines en bactéries et en matières solides. L'entretien du réceptacle des urines pour en enlever les matières fécales peut s'avérer malaisé et peut représenter un point rédhibitoire pour une bonne appropriation des toilettes par les usagers. Il pose également un problème de bouchage de l'orifice ou du siphon qui constitue la deuxième difficulté liée à l'usage de ces toilettes ;
 - l'entretien spécifique des orifices et siphons du réceptacle à urine. Comme pour les urinoirs secs, la précipitation des sels urinaires dans les siphons, hydrauliques ou secs, nécessite un entretien spécifique usuellement réalisé mécaniquement avec un furet et/ou par un nettoyage régulier avec un acide ou une base qui dissolvent ces sels. Outre l'évacuation des sels urinaires, un entretien spécifique est également nécessaire pour les poils, matières fécales, papier toilette et autres matières solides susceptibles d'être introduites dans les orifices destinés à l'urine. De nombreux projets suédois des années quatre-

vingt-dix se sont arrêtés suite au blocage des tuyaux d'urine (Vinneras & Jönsson, 2013) tel qu'illustré par la photographie suivante (Figure 4.14).



Figure 4.14 : Toilette à séparation d'urine bouchée au niveau du tuyau d'évacuation des urines.

Source personnelle.

L'utilisation des toilettes à séparation d'urine par les enfants s'avère également problématique du fait de leur petite taille et du positionnement spontané de l'anus à l'avant des toilettes, soit à la verticale du réceptacle des urines. Divers systèmes d'adaptation des toilettes aux enfants ont ainsi été développés, tels le siège amovible pour enfant ou encore la double lunette du modèle Dubbletten (Figure 4.15).



Figure 4.15 : Dispositifs d'adaptation des toilettes à séparation d'urine pour les enfants. À gauche, siège amovible de marque Separett (source personnelle) ; à droite, double lunette adulte et enfant du modèle Dubbletten (source : Johansson *et al.*, 2000).

Quasiment inexistantes aujourd'hui en France, les toilettes à séparation d'urine à chasse d'eau sont toutefois présentes dans un grand nombre d'hôpitaux dont les patients reçoivent des traitements radioactifs. Le principe est de permettre le stockage des urines des patients le temps de la baisse suffisante de radioactivité de celles-ci (quelques mois) avant de les rejeter à l'égout (cf. Figure 4.16).

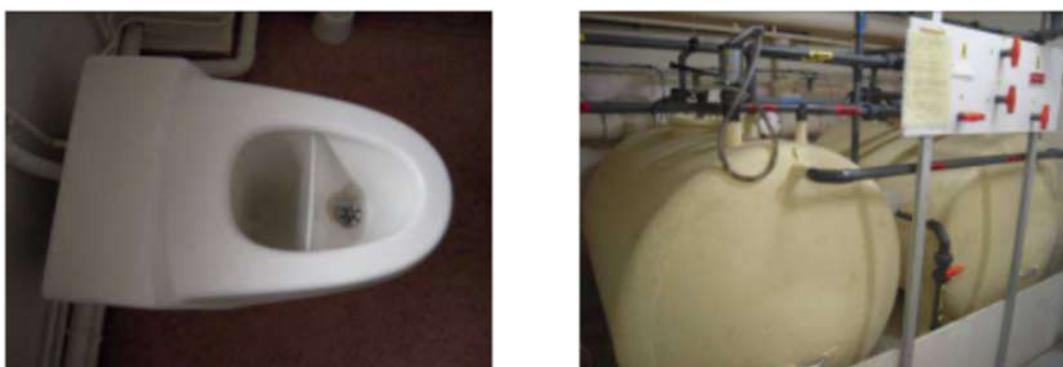


Figure 4.16 : Toilette à séparation d'urine et cuve de stockage d'urine de l'unité de médecine nucléaire de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (Paris).

Source : Caby (2013)

On notera enfin que quelques modèles de toilettes à séparation d'urine existants ou en développement prévoient une évacuation sous-vide des urines.

Toilette à séparation d'urine sèche

La toilette à séparation d'urine la plus répandue dans le monde est bien entendu sèche. Elle est très rarement utilisée en contexte urbain en Europe mais son déploiement futur n'est pas à exclure pour autant (cf. plus loin la sous-section 4.2.5.2). Outre les très nombreux modèles assez similaires aux toilettes à séparation d'urine à chasse d'eau dans leur principe de séparation des flux par deux réceptacles distincts, on notera deux caractéristiques potentielles intéressantes :

- la présence d'un troisième orifice servant à l'évacuation des eaux de nettoyage anal pour les populations effectuant ce nettoyage avec de l'eau ;
- l'innovation apportée par l'introduction d'un tapis roulant incliné comme réceptacle des urines et des matières fécales et permettant leur séparation gravitaire. À notre connaissance, cette innovation a été apportée par l'entreprise française Sanisphère en 1996 et plusieurs modèles ont été développés depuis (Figure 4.17).



Figure 4.17 : Toilette à séparation d'urine à tapis roulant.

À gauche, modèle Sanisphère (source : Sanisphère) ; à droite, vue de l'arrivée du tapis roulant dans la fosse de stockage des matières fécales et du papier toilette (modèle Écodoméo – source personnelle).

Sur ces modèles, les urines s'écoulent gravitairement vers l'avant et les matières fécales et le papier toilettes sont évacués vers l'arrière par l'action d'une pédale reliée au tapis roulant. La séparation d'urine permise par ces toilettes est qualitativement moins bonne que celle des autres modèles du fait d'une contamination élevée des urines par les matières fécales sur le tapis roulant, voire de l'écoulement gravitaire de selles liquides, glissantes ou roulantes vers le réceptacle des urines. À défaut d'avoir pu analyser précisément la composition des urines recueillies par ce type de dispositif,

nous proposons de considérer tout de même ces modèles comme entrant dans la catégorie des toilettes à séparation d'urine.

Transformation de modèles unitaires en séparation à la source

Les interfaces usagers ne prévoyant pas une séparation à la source de l'urine peuvent également être converties à cet effet. Cette conversion est souvent relativement simple dans le cas de toilettes sèches, par l'adjonction d'un kit de séparation des urines tel qu'illustré ci-après (Figure 4.18).



Figure 4.18 : Kit de séparation des urines pour toilette sèche unitaire.

La conversion est également facilement envisageable pour les urinoirs à chasse d'eau en remplaçant le siphon hydraulique par un siphon sec. Dans le cas de toilettes à chasse d'eau, cette conversion paraît beaucoup moins évidente mais pourrait constituer un axe de travail important dans le cadre d'une mise en œuvre sur des locaux déjà équipés de toilettes unitaires.

4.2.2. Collecte

Une fois l'urine séparée à la source par l'un des moyens décrits à la section précédente (section 4.2.1), une chaîne de gestion de l'urine peut être mise en place. Dans de nombreux cas, cette chaîne est réduite à un regroupement des urines préalablement séparées avec les matières fécales et/ou le reste des eaux ménagères. Nous ne nous intéresserons pas davantage à ces cas que nous assimilons au modèle dominant du tout-à-l'égout et analyserons dans ce qui suit les chaînes permettant de gérer sélectivement les urines.

Après séparation dans l'interface usager, les urines doivent être collectées. Dans la très grande majorité des cas, cette collecte est effectuée par tuyau. Ce mode de collecte est avantage par le caractère liquide de l'urine qui permet son recueil gravitaire par tuyau. Sa collecte autrement que par tuyau nécessite de déplacer une masse importante dans laquelle les concentrations en éléments chimiques intéressants sont relativement faibles. Nous noterons toutefois que cette masse correspond approximativement à la masse de déchets solides collectés par sac poubelle de l'habitat jusqu'au local poubelle puis usuellement transportés par camion jusqu'à l'incinérateur (0,9 kg/pers/jour de déchets incinérés – cf. chapitre 3.2) ou jusqu'à la moitié seulement de la masse de nourriture apportée dans les habitations (1,4 kg à 2,6 kg/pers/jour hors eau du robinet – cf. section 2.1.1). Dans un contexte où les boissons fraîches, les boissons alcoolisées, le lait, les soupes voire les eaux de boisson, sont apportées au domicile dans un emballage *ad hoc*, la collecte puis le transport de l'urine autrement que par tuyau peut paraître cohérente avec le mode de transport actuellement en vigueur pour l'alimentation.

Dans la plupart des contextes, la collecte par tuyau s'avère toutefois la plus judicieuse en termes de praticité pour l'utilisateur et d'efficacité énergétique. Son insertion dans un immeuble existant peut s'avérer difficile mais elle ne pose pas de problème particulier dans une nouvelle construction. De plus en plus fréquemment, les immeubles sont dotés de gaines techniques dans lesquelles sont regroupés les différents vecteurs de transport des fluides de l'immeuble. L'ajout d'une canalisation dédiée au transport de l'urine, d'un diamètre relativement faible (100 mm maximum), représenterait un encombrement complémentaire qui paraît peu problématique. Comme pour les tuyaux d'eaux usées, la criticité de ses fuites serait toutefois élevée.

L'obstruction des tuyaux par la précipitation des sels urinaires et/ou diverses matières apportées, déjà mentionnées à la section précédente (section 4.2.1), est le principal problème mentionné relatif au transport des urines en tuyau (Larsen & Lienert, 2007). Un entretien régulier mécanique et/ou chimique paraît indispensable et induit une nécessité de gestion spécifique de cet entretien à prendre en compte, en particulier par la définition de l'acteur responsable de cet entretien, de l'acteur qui la mettra en œuvre et en s'assurant de l'effectivité de la réalisation de cet entretien par le contrôle.

Au-delà du bon entretien des tuyaux, les différentes recherches menées sur la collecte de l'urine ont abouti à des préconisations relatives à la conception des réseaux de collecte d'urine – cf. par exemple la compilation réalisée par Lanoé (2009). Ainsi, le métal devra être proscrit comme matériau des tuyaux de collecte. Des pentes relativement fortes seront privilégiées pour limiter la stagnation de l'urine (> 1 % idéalement) et des regards pour le contrôle et le nettoyage seront à installer à chaque coude. L'installation de portions de tuyaux en plastique transparent peut également s'avérer judicieuse. On évitera autant que possible l'installation d'un système de collecte trop long qui augmenterait l'importance de la problématique d'entretien. On notera le système ingénieux installé dans les toilettes de la gare de Hamburg où une vanne est installée à l'extrémité aval du tuyau de

collecte des urines. Outre l'entretien régulier des tuyaux à l'acide citrique une fois par semaine, cette vanne est fermée une fois par an et permet un trempage complet des canalisations dans un bain chaud d'acide citrique.



Figure 4.19 : Précipitations dans des tuyaux de collecte d'urine (source personnelle).

À gauche, tuyau vertical jamais entretenu depuis trois ans (environ 5 L d'urine par jour) – les précipités partent mécaniquement sans trop de difficultés ; à droite, dépôt dans un tuyau quasiment horizontal jamais entretenu depuis trois ans.

Dans un grand nombre de cas, la collecte d'urine aboutit à une unité de stockage et les trois premiers maillons de la chaîne « interface usager / collecte / stockage » constituent ainsi une unité fonctionnelle relativement autonome.

4.2.3. Stockage

4.2.3.1. Urinoir sec portable

Un urinoir sec portable désigne un ensemble « interface usager / collecte / stockage » transportable. Cette unité peut être de dimension très réduite. Les routiers, les marins, les personnes alitées, etc. utilisent usuellement de tels systèmes plus ou moins élaborés avec des volumes de stockage de l'ordre du litre. Nous n'avons pas trouvé sur le marché d'urinoir sec portable permettant de stocker de plus grands volumes mais dont divers modèles ont été construits en exemplaire unique (Figure 4.20).



Figure 4.20 : Urinoirs secs portables.

À gauche, celui de Toilettes du Monde (source personnelle) ; à droite, celui d'Elisabeth von Münch (source : forum SuSanA).

Projet Azuradom

Dans le cadre de cette thèse, un projet de mise en œuvre de collecte sélective d'urine à domicile a été réalisé et nommé Azuradom pour AZote de l'URine À DOMicile. Un urinoir sec portable a ainsi été construit (Figure 4.21). Au vu de la contrainte de poids présentée par l'utilisation des urinoirs en plastiques disponibles dans le commerce, il a été choisi une interface usager rudimentaire constituée par un réducteur Ø100/ Ø40 de tuyau PVC. Un couvercle en bois, imbibé de temps à autre d'huile essentielle, sert à limiter la propagation d'odeurs provenant des gouttes et précipités pouvant se former au niveau de ce réducteur. Les difficultés de réalisation d'une jonction étanche entre le tuyau de collecte et le bidon n'ont pas permis d'installer un siphon sec plat à membrane tel qu'idéalement souhaité (modèle Wirquin disponible en magasins de bricolage pour une dizaine d'euros) et le siphon a finalement été réalisé par une vanne à fermeture manuelle qui oblige à ouvrir et fermer cette vanne à chaque miction urinaire.



Figure 4.21 : Urinoir sec portable du projet Azuradom.

Source personnelle.

Le prochain développement prévu consiste en l'utilisation d'un réservoir de stockage constitué d'une membrane souple dont le volume augmenterait à chaque miction et qui éviterait de devoir gérer le problème de l'évacuation d'un volume d'air correspondant au volume de liquide entrant lors d'une miction.

En outre, il convient de préciser que, dans le cadre du projet Azuradom, l'urinoir sec portable ne constitue qu'un premier maillon de collecte et stockage. En effet, le volume du bidon de cet urinoir sec portable n'est que de 10 L et permet de collecter approximativement l'urine d'une personne sur deux semaines. Mettre en place une logistique de transport toutes les deux semaines peut être envisageable dans certains contextes mais s'avère trop contraignant dans le cas d'un logement en milieu urbain dense et à grande distance à des lieux de valorisation potentiels. Une première amélioration évidente serait de porter le volume de ce bidon à 20 L ce qui pourra aisément être réalisé. Quoiqu'il en soit, le principe d'espacer d'une période de retour plus que mensuelle le transport de l'urine impose de mettre en œuvre un deuxième maillon de collecte et stockage de cette urine quand le bidon de l'urinoir sec est rempli. En l'occurrence, nous avons mis en place un transfert du bidon plein dans la cave puis un transvasement vers un fût de stockage de plus grande taille (60 L – cf. section suivante 4.2.4) qui constitue un deuxième maillon de stockage de cette chaîne.

Sur la voie publique, en milieu urbain, l'entreprise Faltazi a récemment commercialisé l'Uritrottoir qui consiste en un urinoir sec avec volume de stockage associé. La même entreprise commercialise également l'Uritonnoir qui est prévu pour être inséré directement dans une botte de paille (Figure 4.22). Nous analyserons ultérieurement l'efficacité d'un tel système.



Figure 4.22 : Urinoirs en bottes de paille.

Enfin nous terminerons cet inventaire des urinoirs secs portables par l'arrosoir Guld Kannan (Figure 4.23) qui synthétise l'intégralité des maillons d'une chaîne de gestion de l'urine dans un seul objet (cf. section 4.2.6).



Figure 4.23 : Urinoir sec portable combiné à un arrosoir.

Source : www.guldkannan.se.

Dès qu'il s'agit de collecter des grands volumes d'urine, l'urinoir sec portable s'avère inadapté. La collecte s'effectue alors, depuis les interfaces usagers, par tuyaux jusqu'à une cuve de stockage. De nombreux retours d'expérience sur le stockage d'urine sont fournis dans la littérature, en particulier

suédoise et suisse. Nous avons plus particulièrement affiné notre évaluation des problèmes liés au stockage de l'urine dans le cadre du projet Azuris monté dans le cadre du programme OCAPI en 2016.

Sur le long terme, le principal problème posé par le stockage d'urine réside dans les possibilités de fuites issues de ce stockage par malfaçon d'origine ou usure, en particulier dans le cas d'un système enterré où la fuite sera usuellement difficile à détecter. Il convient alors de prévoir une inspection régulière des cuves pour pallier cette éventualité.

4.2.3.2. Projet Azuris

Le projet Azuris est ainsi nommé comme acronyme d'AZote de l'URine de Coriolis. En effet, le bâtiment Coriolis de l'École des Ponts ParisTech est équipé, depuis sa livraison en 2013, d'urinoirs secs masculins. Dans un contexte où ce bâtiment visait une excellence environnementale, ces urinoirs résultent d'une proposition de l'architecte de réduire ainsi les consommations d'eau du bâtiment. Le principe du projet Azuris est de tester la possibilité de mise en œuvre d'une chaîne complète de valorisation d'urine sur un bâtiment déjà existant. La mise en œuvre de ce projet a été facilitée par le fait que les tuyaux de collecte de l'urine issue des urinoirs secs masculins du rez-de-chaussée du bâtiment Coriolis sont facilement accessibles dans le parking situé au sous-sol de ce bâtiment. Il s'est donc agi, dans un premier temps, de détourner l'urine issue de l'urinoir sec masculin des toilettes principales du rez-de-chaussée afin de la stocker dans une cuve située dans ce même parking (Smail, 2016). À cet effet, une vanne, baptisée « vanne de transition socio-écologique », permet de choisir d'orienter les urines de cet urinoir sec masculin vers le tout-à-l'égout ou vers la cuve de stockage d'urine (Figure 4.24 et Figure 4.25).



Figure 4.24 : « Vanne de transition socio-écologique » du projet Azuris.

L'urinoir est situé de l'autre côté du plafond, au droit de cette vanne ; le tuyau de droite, préexistant, conduit au tout-à-l'égout ; le tuyau de gauche a été ajouté pour orienter les urines vers la cuve de stockage. Source personnelle.



Figure 4.25 : Cuve de stockage du projet Azuris lors de son installation.

Source personnelle.

4.2.3.3. Pertes gazeuses dans la collecte et le stockage d'urine

La gestion du ciel gazeux, à la fois dans les tuyaux et dans la cuve, constitue un point de vigilance d'une collecte sélective d'urine par rapport à la présence de gaz ammoniacal. En effet, dès que l'urine est excrétée, elle entre en contact avec les microorganismes présents dans l'interface usager et dans les tuyaux. Or un grand nombre de microorganismes, et *a priori* tout particulièrement ceux qui se développent dans les interfaces usagers et les tuyaux de collecte sélective d'urine, peuvent sécréter une enzyme, l'uréase, qui accélère l'hydrolyse de l'urée et permet de disposer d'azote minéral sous forme ammoniacale.

La formule de l'hydrolyse de l'urée est la suivante :



L'uréase est sécrétée par les microorganismes dans l'environnement donc elle peut être présente et active dans un milieu, même en l'absence de microorganismes. D'après leur étude bibliographique réalisée par Senecal & Vinnerås (2017), cette hydrolyse est très longue en l'absence d'uréase puisque la demi-vie de l'urée, à pH neutre et à 25 °C, est de quarante ans. *A contrario*, en cas de présence d'uréase dans le milieu (toujours à pH neutre et 25 °C), la demi-vie de l'urée passe à 0,02 s. La cinétique d'hydrolyse de l'urée dans les conditions réelles d'exploitation d'un système de collecte sélective d'urine est peu documentée mais d'après Simha que nous avons interrogé à ce sujet, dans les conditions usuelles de collecte d'urine, l'hydrolyse de l'urée pourrait être complète après une longueur de tuyau de l'ordre de 1 m. À l'EAWAG, l'urine est totalement hydrolysée à l'arrivée à la cuve (Siegrist *et al.*, 2013).

L'hydrolyse de l'urée augmente le pH de cette solution du fait de la libération de la base ammoniac et conduit à un pH final théorique de l'urine stockée de 9,1 (Udert *et al.*, 2006). Le suivi du pH de l'urine stockée dans la cuve du projet Azuris confirme cette valeur puisque, sur deux mois de suivi de l'urine stockée dans cette cuve, après une phase transitoire initiale de quelques jours d'hydrolyse de l'urée, nous avons trouvé des valeurs de pH comprises entre 8,83 et 9,29 (11 mesures réparties sur 58 jours) (Smail, 2016).

Or le pKa de l'équilibre entre l'ammonium en solution dans l'eau (NH_4^+) et l'ammoniac gazeux (NH_3) est de 9,25. Aux pH de stockage de l'urine hydrolysée, l'azote ammoniacal sera donc pour près de la moitié sous la forme ammoniac. Suivant la loi de Henry, une partie de l'ammoniac ne restera pas dissous dans la phase liquide et se retrouvera dans la phase gazeuse. Ce point peut être particulièrement problématique en termes de conservation de l'azote réactif de l'urine stockée. Les stockages d'urine à l'air libre sont ainsi à proscrire absolument. Wohlsager *et al.* (2010) rapportent des pertes de 90% d'azote pour des stockages d'urine à l'air libre. Dans une collecte en bâtiment, c'est

l'aération du système de collecte qui sera un point critique. Ainsi, lors de l'installation initiale de la collecte sélective d'urine à l'EAWAG, la cuve et les tuyaux de collecte d'urine étaient ventilés de façon passive (Figure 4.26). Cette ventilation est usuelle sur les réseaux de collecte d'eaux usées pour éviter les dépressions lors de l'évacuation d'eau et pour limiter les risques d'odeurs. Mais dans le cas d'une collecte sélective d'urine, Siegrist *et al.* (2013) rapportent qu'une telle ventilation facilite le dégazage de l'ammoniac et une perte allant jusqu'à 47% de l'ammoniac total a pu être mesurée.

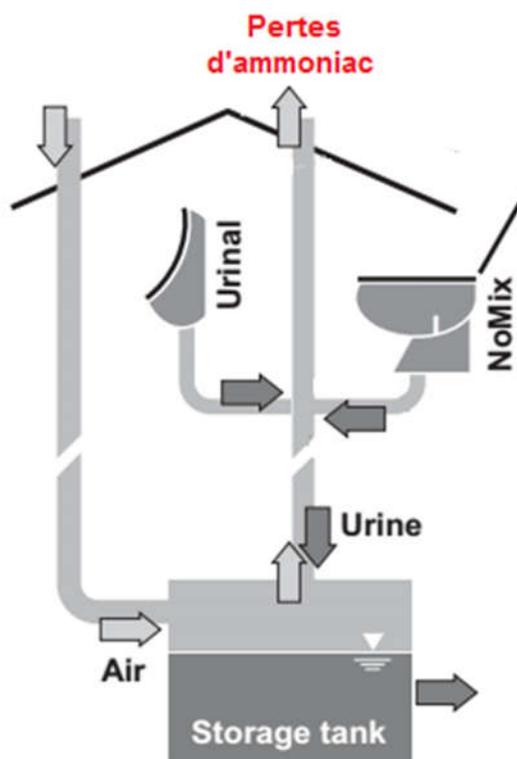


Figure 4.26 : Système de ventilation initial de la collecte d'urine du bâtiment Forum Chriesbach de l'EAWAG.

Les fortes pertes d'ammoniac gazeux invitent à éviter absolument une telle ventilation de collecte sélective d'urine. Adapté d'après Siegrist *et al.* (2013).

Pour éviter de telles pertes d'ammoniac gazeux, préjudiciables à la fois en termes de pollution environnementale, de limitation des quantités d'azote récupéré, d'odeurs voire de danger pour la santé, il convient de limiter le flux d'air dans les tuyaux, en installant par exemple une valve à sens unique permettant uniquement la mise à l'équilibre des pressions lors de l'écoulement d'urine dans les tuyaux. La situation décrite à la Figure 4.26 peut constituer un point particulièrement critique pour la mise en place d'une collecte sélective d'urine. On notera toutefois que, dans les nouveaux bâtiments, les flux d'air sont usuellement mieux maîtrisés pour limiter les pertes énergétiques et ce problème est donc de moins en moins susceptible de se produire à l'avenir. Dans le cas du projet Azuris, nous

n'avons pas réussi à trouver sur le marché une valve à sens unique qui conviendrait pour réaliser l'équilibrage des pressions¹⁹³ et avons élaboré un dispositif *ad hoc*.

Les pertes gazeuses en ammoniac sont alors du même ordre de grandeur que les volumes d'urine collectés. Or la constante de Henry du gaz ammoniac est très faible, aux environs de 0,0007 à 25 °C¹⁹⁴. En considérant que l'équilibre entre la phase gazeuse et la phase aqueuse est atteint, les pertes d'ammoniac par la phase gazeuse seront donc de l'ordre de 0,7 %. Cette hypothèse est assez pessimiste du fait que la cinétique des échanges gazeux est assez lente d'après Udert *et al.* (2006). Johansson *et al.* (2000) conseillent en outre de faire arriver les tuyaux de collecte d'urine dans le fond des cuves de stockage pour limiter les échanges gaz/liquide.

Ces faibles quantités d'azote ammoniacal passant en phase gazeuse amènent Jönsson (2001) à considérer que les pertes d'azote liées aux parties collecte et stockage peuvent être évaluées comme insignifiantes (< 1 %) (Jönsson, 2001). Cette estimation nous paraît raisonnable au sens où, en l'absence de ventilation des tuyaux et de la cuve, les éventuelles pertes gazeuses liées aux points critiques d'inétanchéités du système (siphon sec des interfaces usagers, valve d'équilibre des pressions) sont probablement très minimes. En outre, des pertes gazeuses importantes au niveau des interfaces usagers sont perçues par l'odeur dégagée. Le seuil de perception olfactif de l'ammoniac est toutefois très bas, entre 5 ppm et 50 ppm (INERIS, 2003) et, même dans le cas où une odeur est perceptible, elle ne correspond pas nécessairement à des pertes importantes d'azote ammoniacal. Il nous paraît donc raisonnable de considérer que, après vérification de l'absence de ventilation d'un système de collecte d'urine, les pertes gazeuses totales d'azote ammoniacal seront, dans la plupart des conditions d'exploitation, toujours inférieures à 1 %.

Ces considérations montrent également qu'il conviendrait de réaliser un travail spécifique relatif aux mesures de sécurité à mettre en place, en particulier lors des opérations d'entretien ou de vidange. À notre grand étonnement, nous n'avons constaté aucune odeur lors de l'ouverture de la cuve de stockage de l'éco-village Understenshöjden en Suède (Annexe 1).

¹⁹³ Les clapets Durgo que l'on peut facilement se procurer dans le commerce permettent de réaliser une entrée d'air ponctuelle vers les canalisations alors que nous cherchions un clapet inverse permettant de réaliser une sortie d'air ponctuelle depuis les canalisations.

¹⁹⁴ www.henrys-law.org, consulté le 23 mai 2017.



Figure 4.27 : Habitant d'Understenshöjden devant le regard d'une des cuves de stockage d'urine.

Source personnelle.

Il serait pertinent d'investiguer les raisons de cette absence d'odeur. Nous n'avons à ce moment pas fait d'analyse de la composition du liquide stocké dans les cuves pour mieux en analyser les raisons. Les mesures réalisées sur la cuve de stockage Azuris montrent clairement la présence d'un ciel gazeux irrespirable¹⁹⁵. Johansson *et al.* (2000) rapportent un processus de stratification de l'urine entraînant des différences de composition chimique selon les couches considérées.

4.2.3.4. Devenir des précipités dans la collecte et le stockage d'urine

En cas de collecte par tuyau, la phase liquide de l'urine n'est *a priori* pas problématique puisque c'est presque toujours elle qui sera au centre d'une chaîne de gestion de l'urine. Les pertes autres que gazeuses pouvant intervenir dans la collecte et le stockage sont liées aux phénomènes de précipitation et de développements de films bactériens. Nous avons vu préalablement que l'urine précipitait dans les tuyaux. En cas d'entretien mécanique, acide ou basique, ces précipités sont censés être majoritairement évacués et rejoindre *in fine* la cuve de stockage d'urine. Dans la cuve, il se forme

¹⁹⁵ Quelques mesures exploratoires de la concentration en ammoniac dans le ciel gazeux de la cuve semblent toutefois montrer que les concentrations dans la cuve sont inférieures au seuil d'effets irréversibles pour une exposition d'une minute (INERIS, 2003).

également une boue de fond de cuve, relativement visqueuse, dans laquelle sont concentrés une partie des éléments initialement dissous dans l'urine. Il convient de mettre en place une gestion spécifique de cette boue de fond de cuve, en prévoyant des opérations de vidange, soit par brassage préalable de la cuve, soit par pompage du fond.

4.2.4. Transport

Les premiers maillons d'une chaîne de gestion des urines aboutissent usuellement à un stockage. Le maillon transport comportera donc la vidange de ce stockage et son transport et déchargement vers un lieu de traitement. Dans le cas des traitements décentralisés autres que le stockage (cf. section 4.2.5), les deux maillons transport & traitement sont inversés et le transport concernera le produit issu du traitement de l'urine. Nous n'analyserons ici que le transport de l'urine stockée.

Le recours à un stockage au terme d'une collecte de longueur relativement réduite (ordre de grandeur maximal usuel de 100 m) est guidé par :

- les problèmes de précipitation en tuyaux du transport de l'urine. Ceux-ci obèrent la possibilité d'effectuer des transports de longue distance de l'urine en tuyaux car ils ne permettraient pas d'avoir des pentes suffisantes pour garantir un bon écoulement sans trop de précipitation. Ils nécessiteraient également des efforts de maintenance relativement soutenus ;
- les inconvénients généraux inhérents à la présence d'une canalisation supplémentaire de transport (coût, besoin de maintenance, difficulté de gestion supplémentaire en relation avec les autres canalisations urbaines déjà présentes). L'égout typique parisien visitable dans lequel passent déjà de nombreuses canalisations pourrait offrir l'opportunité d'y adjoindre une canalisation supplémentaire d'urine mais la précipitation de l'urine risque de nécessiter une lourde maintenance.

Diverses hypothèses de transport de l'urine dans les réseaux existants d'égout ont été évaluées mais aucune ne semble avoir finalement été retenue (Novaquatis, 2007). Le transport en canalisations sous-vide de l'urine est pour l'instant assez peu étudié et fait l'objet de recherches à l'INSA-Toulouse.

Deux possibilités alternatives au transport en tuyau s'avèrent envisageables :

- le transport de l'urine avec son contenant (cuve mobile) ;
- le transport de l'urine sans son contenant (cuve fixe).

4.2.4.1. Transport de l'urine avec son contenant

La première solution pourra aisément être mise en œuvre sur les projets de petite échelle où les volumes à transporter sont relativement faibles. C'est par exemple ce que nous avons testé pour le projet Azuradom (cf. section 4.2.3). Nous avons profité de l'existence d'une entreprise, les Gandousiers, qui propose aujourd'hui sur l'agglomération parisienne une prestation de location et gestion de toilettes sèches, en particulier pour les chantiers de construction. Les Gandousiers réalisent ainsi déjà le transport d'urines et de matières fécales depuis ces installations diversement réparties sur l'agglomération parisienne jusqu'à un local de centralisation. Dans le fonctionnement mis en place par les Gandousiers, les urines et matières fécales de ces toilettes sèches sont collectées dans des fûts de 60 L qui, une fois pleins, vont être remplacés par des fûts vides et transportés jusqu'au local des Gandousiers (Figure 4.28).



Figure 4.28 : Exemple de contenants pouvant servir au transport d'urines et de matières fécales.

Au centre, fûts étanches de 60 L ; dans le camion, IBC de 1 m³ (source personnelle)

Nous avons donc fait en sorte de nous insérer dans ce circuit de transport d'urines et matières fécales déjà existant et avons installé, dans la cave au sous-sol, quelques fûts vides remplis au fur et à mesure que le bidon de l'urinoir sec portable est plein. Cette opération ayant commencé en janvier 2017, nous n'avons pas encore réalisé l'opération de transport à proprement parler mais cela consistera simplement en un transfert des fûts, transportés sur un diable, du sous-sol jusqu'à la camionnette des Gandousiers et à leur remplacement par des fûts vides. La première ébauche de devis que nous a donnée l'entreprise pour cette opération laisse présager que cette prestation revienne à un coût annuel

d'environ 100 €. Cet ordre de grandeur de prix est un critère fondamental du projet Azuradom car il paraît important de permettre la valorisation des urines en agriculture à un prix restant encore raisonnable.

Les précautions à prendre pour la réalisation de ce type de transport ont été étudiées en détail dans la récente étude, pilotée par l'association Toilettes du Monde et à laquelle nous avons participé, qui analyse en détail les pratiques et les impacts de la gestion des matières issues des toilettes sèches mobiles (Brun *et al.*, 2017).

4.2.4.2. Transport de l'urine sans son contenant

Quand les volumes à transporter deviennent plus importants, le système utilisé dans les réalisations scandinaves et mentionné dans la plupart des articles étudiant la possibilité de mettre en place une séparation à la source de l'urine est le camion-citerne.



Figure 4.29 : Camion-citerne de transport d'urine.

Source : Johansson *et al.* (2000).

Plusieurs précautions paraissent nécessaires vis-à-vis de ce mode de transport. D'une part, il convient d'être vigilant vis-à-vis des pertes gazeuses possibles au moment du pompage dans la cuve de stockage. Si ces pertes sont peu susceptibles d'être impactantes en termes de circularité globale des nutriments ou de pollution par les éléments perdus à l'atmosphère, elles peuvent constituer une nuisance olfactive importante pour le voisinage et constituer ainsi un point critique d'une chaîne de valorisation des urines. D'après une entreprise de vidange de fosses d'assainissement non collectif consultée, il est possible d'adjoindre aux camions-citernes un module de traitement des gaz. Cette option serait toutefois rarement utilisée dans la pratique. La mise en œuvre d'un traitement des odeurs, qui s'avérerait *a priori* judicieuse surtout en contexte urbain dense, devra se faire avec la plus grande vigilance du fait de son caractère inhabituel pour la profession.

D'autre part, il est possible que les urines soient contaminées par les résidus restant dans la cuve du camion-citerne, en fonction des matières qu'il aura précédemment transportées. Ce point renforce encore la vigilance à avoir vis-à-vis du sérieux de l'entité qui a en charge la vidange et le transport par camion-citerne des cuves d'urine.

La destination des urines transportées par camion est usuellement un deuxième stockage réalisé au niveau des parcelles de valorisation agricole (cf. Figure 4.30). Les mêmes précautions sont alors à avoir pour réaliser ce stockage au champ et la vidange du camion. Nous avons noté la présence systématique de telles cuves en bout de champ dans les zones circulaires françaises au milieu du XIX^e siècle (cf. section 3.1.3). Les volumes mentionnés par Liger (1875) sont du même ordre de grandeur que ceux des réalisations suédoises actuelles.



Figure 4.30 : Stockage d'urine au champ avant valorisation agricole.

À gauche, stockage en bache souple de 150 m³ à Bornsjön (banlieue de Stockholm) – source : Kvarnström *et al.* (2006) ; à droite, stockage en IBC de 1 m³ en Finlande – source projet Biourea (<http://www.huussi.net/en/activities/on-going-projects/biourea>).

4.2.4.3. Transport des urines par camion et couplage des systèmes alimentation/excrétion et transport

Le transport par camion constitue souvent un point négatif des évaluations de chaîne de valorisation des urines du fait des consommations d'énergie engendrées, des émissions de gaz à effet de serre induites et des diverses nuisances sonores ou d'encombrement routier occasionnées. Ce type de transport est souvent considéré comme un facteur limitant de l'intérêt de la séparation à la source de l'urine. Dans de nombreuses études, l'intérêt de la séparation à la source de l'urine et de sa valorisation après simple stockage est ainsi souvent analysé en calculant le nombre de kilomètres que peut réaliser ce camion avant que ses consommations d'énergie ou ses émissions de gaz à effet équivalent à celles d'une gestion conventionnelle des urines, à savoir les consommations et émissions induites par le traitement des urines en dénitrification en station d'épuration et par la synthèse

d'engrais azotés par le procédé Haber-Bosch. Si toutes les études que nous avons consultées montrent un bilan positif *a minima* pour les courtes distances, on trouve dans la littérature des valeurs de cette distance maximale variant sur une très large fourchette, en fonction des hypothèses de calcul prises, qui vont au moins de 40 km (Tidåker, 2007) à plus de 1 000 km (Caby, 2013).

Si nous ne contestons pas l'intérêt de ces calculs, cette vision ne nous paraît pas cohérente avec le cadre d'analyse que nous avons défini pour évaluer la soutenabilité des systèmes alimentation/excrétion dans la deuxième partie de cette thèse. En effet, dans un système socio-écologique, nous avons défini les caractéristiques fondamentales du sous-système alimentation/excrétion comme étant celles du devenir des nutriments, principalement azotés, contenus dans les différentes matières mises en jeu dans ce sous-système. En revanche, les modalités de transport des biens mises en jeu ne reflètent pas une caractéristique de ce sous-système alimentation/excrétion mais plutôt une caractéristique du sous-système transport de ce système socio-écologique (cf. Figure 2.5). Ainsi, le transport des urines devrait à notre sens plutôt être mis en regard du transport des denrées alimentaires. Une des caractéristiques d'un système alimentation/excrétion circulaire est que les urines sont gérées avec soin afin de permettre leur valorisation. Dans ce cas, il paraît cohérent que les mêmes modalités de gestion soient utilisées pour le transport des urines et pour le transport des denrées alimentaires, en particulier liquides telles que eaux en bouteille, boissons rafraîchissantes, lait, etc. dont nous avons déjà vu à la section 2.1.1 qu'elles étaient plutôt supérieures, en masse et par personne, à celles de l'urine. Or, dans la plupart des cas dans le monde occidental, c'est aujourd'hui le transport par camion qui est utilisé pour réaliser le transport des denrées alimentaires depuis leur lieu de production (l'exploitation agricole) ou de transformation (l'industrie agro-alimentaire) jusqu'à leur lieu de valorisation (l'assiette des urbains). Avec ce prisme d'analyse, les différents inconvénients que peut présenter le transport par camion des urines ne relèvent pas d'une limite du système alimentation/excrétion mais plutôt d'une limite du système de transport des biens (liquides) en question.

Prenons le cas d'un transport d'urines par camion qui serait réalisé aujourd'hui dans l'agglomération parisienne. Pour évaluer la pertinence du transport par camion de ces urines depuis leur lieu de production (l'interface usager) jusqu'à leur lieu de valorisation (une parcelle agricole), nous proposons comme élément de comparaison la distance parcourue par les denrées alimentaires alimentant Paris, ainsi que par les fourrages alimentant les animaux d'élevage alimentant Paris. Billen *et al.* (2012c) ont justement évalué les distances moyennes parcourues par les denrées alimentant l'agglomération parisienne. Sans prendre en compte les distances parcourues par les fourrages alimentant les animaux, cette distance moyenne est passée de 170 km en 1786 à 662 km en 2006. C'est donc plutôt ce dernier ordre de grandeur de distances parcourues par les diverses denrées alimentaires qui serait à prendre en compte pour évaluer les distances pouvant être parcourues par les urines valorisées dans une logique

de cohérence avec le fonctionnement de la partie agricole actuelle de son système alimentation/excrétion.

On constate d'ailleurs aujourd'hui à Paris que la part de circularité existante de son système alimentation/excrétion, à savoir la valorisation agronomique des boues de station d'épuration, s'effectue sur des distances qui ne sont pas notoirement inférieures : 126 km en moyenne pour les boues épandues directement et jusqu'à 294 km en moyenne pour les boues thermiques compostées (Labedan, 2013). Cette distance parcourue est usuellement perçue comme très importante et a amené le SIAAP, lors du débat public autour de la station d'épuration d'Achères de 2007, à s'engager à réduire autant que possible cette distance, principalement dans une logique de limitation de l'exportation des « nuisances » de l'agglomération parisienne. Au regard d'une analyse en symétrie du système alimentation/excrétion, cette distance ne paraît toutefois pas si importante, même s'il paraît évidemment souhaitable de la limiter autant que possible.

Les limites de la soutenabilité du transport des urines par camion sont donc à mettre au crédit des limites de la soutenabilité des modalités de transport de biens d'un système socio-écologique. Les multiples possibilités et perspectives futures applicables en général au transport de biens pourraient ainsi tout aussi bien s'appliquer au transport futur éventuel d'urines valorisées. En fonction des situations, on peut donc imaginer le transport par péniche, par train, par véhicule électrique, etc. Ainsi, au XIX^e siècle à Paris, le transport par cheval est une caractéristique du sous-système de transport des biens et c'est donc celui-ci qui est utilisé pour le transport des urines (cf. Figure 4.31).



Figure 4.31 : Transport d'urine par traction animale à Paris à la fin du XIX^e siècle.

Source : communication d'E. Adler.

Finalement, le couplage des systèmes alimentation/excrétion, transport et énergie invite à distinguer également les systèmes alimentation/excrétion selon le caractère local des flux mis en œuvre. Ce

caractère local est exploité par exemple par Le Noë *et al.* (2017a) pour distinguer les systèmes alimentation/excrétion dans leur composante agricole. Or il existe *a priori* un lien fort entre le caractère local et le caractère autonome d'un système alimentation/excrétion. La recherche de solutions soutenables dans la gestion de la partie agricole des systèmes alimentation/excrétion conduit ainsi Billen *et al.* (2017) à choisir l'autonomie et la gestion locale des nutriments comme une caractéristique fondamentale de systèmes soutenables. Les scénarios agricoles proposés sont ainsi nommés « bio, local, demitarien » ou « bio, autonome, demitarien ». L'évaluation du caractère local des flux mis en œuvre dans un système alimentation/excrétion constituerait ainsi un développement méthodologique pertinent de sa caractérisation.

4.2.5. Traitement

4.2.5.1. Traitement de l'urine par stockage

Comme nous l'avons précédemment évoqué, l'urine possède la remarquable propriété que son simple stockage en constitue une méthode de traitement. Un traitement de l'urine s'avère *a minima* nécessaire pour garantir une utilisation sûre de l'urine en valorisation agricole et s'assurer que celle-ci est exempte d'agents pathogènes susceptibles de transmettre des maladies. D'après les recommandations de l'OMS (2012a), en climat tempéré, les seuls agents pathogènes pouvant poser un problème de santé publique et susceptibles d'être retrouvés dans l'urine sont ceux issus de la contamination croisée fécale. Or, dans le stockage de l'urine, l'hydrolyse de l'urée qui intervient spontanément induit une libération d'ammoniac qui permet l'hygiénisation des urines stockées. Afin de garantir des risques limités à un niveau considéré comme acceptable par l'OMS, celle-ci préconise ainsi des temps de stockage différents en fonction des conditions de réalisation de ce stockage, des cultures concernées et de leur destination. Ces recommandations officielles sont reprises dans le tableau ci-après (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Durées de stockage recommandées pour les mélanges d'urine^a, d'après la teneur estimée en agents pathogènes^b, et types de cultures recommandés pour les grands systèmes^c

Source : OMS (2012a).

Température de stockage	Durée de stockage	Pathogènes potentiellement présents dans le mélange d'urine après stockage	Cultures recommandées
4	≥1 mois	Virus, protozoaires	Aliments et fourrages destinés à être transformés
4	≥6 mois	Virus	Aliments destinés à être transformés, fourrage ^d
20	≥1 mois	Virus	Aliments destinés à être transformés, fourrage ^d
20	≥6 mois	Probablement aucun	Tous types de cultures ^e

^a Urine, ou urine et eau. En cas de dilution, on suppose que le mélange d'urine a un pH d'au moins 8,8 et une concentration d'azote d'au moins 1 g/l.

^b Les bactéries Gram-positif et les bactéries sporulées ne sont pas prises en compte dans les évaluations de risques sous-tendant la démarche, mais ne sont pas normalement considérées comme induisant des infections à caractère préoccupant.

^c Un grand système, dans ce contexte, est un système où le mélange d'urine est utilisé pour fertiliser des cultures destinées à être consommées par des personnes autres que les membres du foyer dont les urines ont été collectées.

^d Sauf herbage destiné à la production de fourrage.

^e Pour les plantes destinées à être consommées crues, il est recommandé d'appliquer l'urine au moins un mois avant la récolte et de l'incorporer dans le sol si les parties comestibles poussent au-dessus de la surface du sol.

Cette possibilité d'utilisation sûre de l'urine par simple stockage est même encore allégée pour une utilisation à l'échelle familiale. Ainsi, l'OMS indique que « si l'urine n'est utilisée comme fertilisant que pour la culture de produits destinés à la consommation du foyer, elle peut être utilisée directement, sans stockage. [En effet, la] probabilité de transmission de maladie attribuable au manque d'hygiène au sein du foyer est beaucoup plus élevée que la probabilité de transmission par l'urine utilisée comme fertilisant. » Kvarnström *et al.* (2006) ajoutent également que, dans le cas de l'utilisation d'urine provenant exclusivement d'urinoirs secs masculins, ces délais de stockage peuvent également être raccourcis du fait du risque quasiment inexistant de contamination fécale dans un urinoir.

L'extrême simplicité de mise en œuvre d'un traitement des urines par simple stockage ouvre ainsi la possibilité de mettre en œuvre des systèmes alimentation/excrétion circulaires et salubres avec très peu de moyens. Comme nous l'avons déjà mentionné, les pays du Sud constituent ainsi autant de lieux où le déploiement de la séparation à la source de l'urine est aisément envisageable. Le programme EcoSanRes a ainsi publié un ouvrage de recommandations donnant des « conseils pratiques pour une utilisation de l'urine en production agricole » plutôt adapté aux pays du Sud (Richert *et al.*, 2011). Ils

y donnent en exemple le cas d'une initiative de séparation à la source d'urine à Ouagadougou (Burkina Faso). Dans cette initiative, les urines brutes sont collectées dans des bidons jaunes puis transférées vers une unité de stockage. Une fois les urines stockées, le produit obtenu porte alors le nom de birg-koom qui signifie « engrais liquide » dans la langue locale¹⁹⁶ et il est ensuite vendu aux agriculteurs comme produit fertilisant dans des bidons verts (Figure 4.32).



Figure 4.32 : Urines brutes et birg-koom (urines stockées).

Source : Richert *et al.* (2011).

Cet exemple montre comment la mise en œuvre d'un procédé très simple comme le stockage permet d'enclencher une démarche de valorisation de l'urine par une chaîne de gestion dont le produit d'entrée, les urines brutes, est clairement distingué du produit de sortie ici nommé birg-koom¹⁹⁷. Aucune autre forme de traitement n'est recommandée par l'OMS et, en particulier, la présence de

¹⁹⁶ Soit *a priori* en mooré.

¹⁹⁷ L'épisode relaté par Suétone dans la vie des douze Césars (cf. sous-section 3.1.1.1) se révèle également intéressant par l'analyse des mots employés pour désigner l'urine. En effet, dans le nom de l'impôt, *urinae vectigal*, l'urine est désignée par le terme *urina*, terme semblant plutôt neutre et désignant l'urine en façon assez générale. Mais quand Vespasien répond à son fils en lui parlant de l'urine collectée qui sert aux tanneurs, il utilise le terme *lotium* (« *atqui [...] e lotio est* » : « et pourtant cet argent provient de l'urine »). Or *lotium* se rattache à *lavare* en latin et se réfère ainsi à un agent nettoyant. Il apparaît donc que le vocabulaire latin de cette époque relatif à l'urine humaine était plus riche que le nôtre puisqu'un terme servait à désigner l'urine de façon générale (*urina*), tandis qu'un autre servait à désigner spécifiquement l'urine stockée, à forte teneur en ammoniac, qui sert à nettoyer (*lotium*). On retrouve la racine de *lotium* dans le terme « lisier » qui désigne également de l'urine (animale) transformée et utilisée. Sur cette base, et par symétrie avec le terme anglais *humanure* proposé par Jenkins pour désigner le fumier humain, traduit en français par *fumain* (Jenkins, J., 2017. *Le petit livre du fumain*. Écosociété. Montréal. Trad. M. Durand. 248 p. ISBN : 978-2-89719-281-5), nous proposons en français le terme « lisain » pour désigner le produit issu du stockage de l'urine humaine (traduction donc du latin *lotium* et du mooré *birg-koom*).

micropolluants, y compris les résidus de médicaments, n'est pas considérée par l'OMS comme susceptible de devoir empêcher l'usage de l'urine en tant que fertilisant après un simple stockage (OMS, 2012 ; cf. section 2.2.3). L'OMS indique d'ailleurs que l'activité biologique plus importante du sol par rapport à celle des rivières invite à privilégier que le compartiment environnemental de l'usage final des urines soit le sol, et non un hydrosystème comme dans le cas du tout-à-l'égout.

4.2.5.2. Traitement de l'urine par concentration

Pour différentes raisons, il peut être intéressant de mettre en œuvre un traitement de l'urine. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux traitements qui permettent de mettre en œuvre une circularité et qui sont donc conservatifs sur l'azote. Nous regarderons plus attentivement les traitements qui permettent une circularité intégrale car la circularité extractive s'avérera presque toujours, par construction, moins intéressante que la circularité intégrale. En effet, étant donné que l'urine contient tous les nutriments et micronutriments nécessaires à la croissance des plantes, qui plus est dans des proportions équilibrées (cf. plus loin la section 4.2.6), une circularité extractive nécessitera toujours de mettre en œuvre d'importants moyens de traitement pour extraire un ou deux nutriments de l'urine (typiquement azote et/ou phosphore) et aura comme sous-produit tout le reste des nutriments non extraits. Leur valorisation, à nouveau extractive, entraînerait alors une démultiplication handicapante des étapes de traitement à mettre en œuvre.

Dans la majorité des cas, la raison d'être d'un traitement circulaire intégral de l'urine sera d'en diminuer le volume. Cette diminution de volume peut présenter des intérêts à presque tous les maillons de la chaîne : au niveau de la collecte, du stockage, du transport ou encore de l'usage final. À chaque fois, le fait de disposer d'un produit plus concentré limitera les quantités de matière à gérer et donc l'intensité des ressources matérielles et énergétiques à mobiliser dans le fonctionnement de la chaîne.

Deux approches génériques sont possibles pour mettre en œuvre un tel traitement, distinguées par leur gestion de l'azote. L'azote nécessite en effet un soin particulier préalable à l'étape de concentration car il aura sinon tendance, dans l'urine stockée, à se volatiliser sous forme d'ammoniac :

- la première approche consiste à conserver l'azote sous sa forme majoritaire à l'excrétion, à savoir l'urée. Vu la mise en place très rapide de l'hydrolyse de l'urée dans une interface usager et une collecte standard, cette approche impose un positionnement du traitement très à l'amont de la chaîne de gestion, presque intégré dans l'interface usager. Cette approche entraîne donc une décentralisation extrême du traitement. Dans les développements actuels de ce type de traitement, les stabilisations de l'urée sont usuellement faites par alcalinisation des urines car l'uréase est inactivée au-delà d'un pH de 10. Senecal & Vinnerås (2017) ont mis en œuvre cette alcalinisation par mélange avec des cendres ou par échange d'ions ; Randall *et al.*

(2016) l'ont mise en œuvre par adjonction de chaux¹⁹⁸. La stabilisation de l'urine par alcalinisation est guidée par la facilité de disposer de médias alcalins (cendres, chaux) et par l'intérêt fréquent des exploitations agricoles de disposer de produits plutôt alcalins. Elle présente toutefois l'inconvénient de libérer immédiatement sous forme de gaz ammoniacal la fraction de l'azote de l'urine présente sous cette forme à l'excrétion (environ 5 %) et d'être peu résiliente en cas d'hydrolyse de l'urée avant ou pendant la mise en œuvre du traitement. Senecal & Vinnerås (2017) obtiennent ainsi aujourd'hui un taux de récupération de l'azote d'environ 80 % qui implique de mettre en œuvre une gestion des gaz ammoniacés libérés lors du traitement. La stabilisation de l'urée par acidification paraît actuellement moins investiguée alors qu'elle nous semble permettre une meilleure résilience.

- la seconde approche consiste à laisser se faire l'hydrolyse de l'urée et obtenir alors l'azote majoritairement sous forme ammoniacée. L'avantage d'un tel traitement est qu'il peut être inséré plus en aval de la chaîne de gestion, sous réserve d'une bonne gestion des flux gazeux aux différents maillons préalables. Un traitement se distingue actuellement nettement des autres du fait de son stade de développement avancé. Ce procédé met en œuvre une nitrification partielle de l'urine afin de permettre l'évaporation consécutive de l'eau sans perte d'ammoniaque du fait de la baisse de pH et de la présence de l'azote sous forme oxydée. Il est développé par l'EAWAG depuis quelques années et installé en routine pour le traitement des urines du bâtiment Forum Chriesbach (Etter *et al.*, 2015). À notre connaissance, il s'agit de l'unique traitement circulaire intégral de l'urine qui permette d'obtenir une substance reconnue comme produit fertilisant par un pays européen, à savoir l'Aurin (cf. Figure 4.33).

¹⁹⁸ Randall *et al.* aboutissent à la conclusion qu'il convient d'utiliser préférentiellement la chaux éteinte – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à raison de dix grammes par litre d'urine. La chaux éteinte correspond à la chaux dénommée aérienne dans le secteur du bâtiment.



Figure 4.33 : Engrais liquide Aurin obtenu par traitement des urines.

Source : www.vuna.ch

Cette reconnaissance du statut de produit a été délivrée par les autorités suisses en 2016 et permet, en Suisse, la mise sur le marché de ce produit (www.vuna.ch). D'après Etter que nous avons interrogé, son utilisation est aujourd'hui limitée aux usages non alimentaires car la procédure de reconnaissance du statut d'engrais suisse prévoit systématiquement, pour un nouvel engrais, la limitation de possibilité d'usage à des fins non alimentaires pour les trois premières années au minimum. Il conviendra donc d'attendre 2019 afin de savoir comment les autorités suisses se prononceront sur la possibilité d'utiliser Aurin dans le cadre de cultures alimentaires.

Une fois l'azote stabilisé, les traitements de l'urine mettent en place une concentration qui peut s'effectuer de diverses manières (distillation sous vide, évaporation solaire, etc.). Le sous-produit de cette concentration est alors de l'eau, de qualité usuellement très élevée et dont l'intégration dans le système eau peut donc facilement se faire. Pour plus de précisions, une revue des méthodes de traitement de l'urine est présentée par Larsen *et al.* (2013).

4.2.5.3. Cas particulier de la struvite

Une technique extractive nous semble mériter d'être mentionnée ici, à savoir l'extraction de phosphore par la précipitation sous forme de struvite. Cette technique est éprouvée de longue date et elle est relativement simple à mettre en œuvre car, en ajoutant du magnésium dans l'urine, il se forme aisément un précipité de struvite : $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 - 6 \text{H}_2\text{O}$ (Ronteltap *et al.*, 2007 ; Triger, 2012 ; Etter *et al.*, 2015 ; Dechesne, 2016). Cette technique extractive, employée seule, sera d'une utilité relativement limitée car le ratio molaire N:P de la struvite est 1:1 alors qu'il est d'environ 20:1 dans l'urine (cf.

1.2.3.1). Après précipitation de la struvite, il reste donc toujours environ 95 % de l'azote dans la phase liquide et il est donc toujours nécessaire de mettre en œuvre des procédés supplémentaires de gestion de cette phase.

Deux contextes s'avèrent toutefois potentiellement pertinents pour la mise en œuvre de ce procédé :

- premièrement, la précipitation de struvite peut présenter un potentiel intéressant pour la sensibilisation à la présence de matières fertilisantes contenues dans l'urine. C'est ainsi que l'entreprise Ecosec a développé, en partenariat avec WC Loc, un module de sensibilisation nommé UriBoost, auquel nous avons également contribué dans le cadre de cette thèse par la production de supports de communication et par le partage de nos connaissances du procédé. Ce module est constitué d'une unité mobile de traitement de l'urine par précipitation de struvite, reliée à une unité mobile de cabines de toilettes à séparation d'urine. Inauguré à la fête de l'Huma en septembre 2016, le module UriBoost permet aux personnes venant aux toilettes d'observer la mise en œuvre de cette précipitation et de repartir avec un sachet contenant de la struvite issue de ce traitement (cf. Figure 4.34). La simplicité de mise en œuvre de ce procédé le rend particulièrement propice à la réalisation de telles actions de sensibilisation du public et favorise la diffusion de la « prise de conscience relative de l'urine ».



Figure 4.34 : Précipitation de struvite des urines dans un objectif de sensibilisation.

En haut à gauche, la cabine UriBoost (source personnelle) ; en haut à droite, la struvite obtenue (*id.*) ; en bas à gauche, les sachets de distribution de struvite (source Ecosec) ; en bas à droite, struvite obtenue dans le cadre d'OCAPI (source personnelle)

- deuxièmement, la précipitation de struvite peut s'avérer adaptée au contexte de l'agglomération parisienne. En effet, les sols des exploitations agricoles du bassin parisien sont particulièrement riches en phosphore du fait des épandages massifs d'engrais phosphorés réalisés ces dernières décennies (Le Noë *et al.*, 2017b). Il pourrait alors s'avérer pertinent, dans ce cas particulier, qu'une chaîne de valorisation de l'urine produise un engrais liquide appauvri en phosphore par précipitation préalable de struvite. Le sous-produit de ce traitement, la struvite, serait lui-même exporté, temporairement ou partiellement, vers les sols agricoles carencés en phosphore. Cette exploitation du procédé de précipitation de struvite est alors inversée

par rapport à son utilisation habituelle qui consiste à considérer la struvite comme le produit de la chaîne de gestion et la phase liquide restante comme un sous-produit.

Le caractère mobile de ce module de précipitation de struvite peut d'ailleurs être étendu à d'autres types de traitement de l'urine. Une unité de traitement de l'urine mobile pourrait présenter de grands avantages en termes de limitation de l'encombrement et de mutualisation des équipements. Elle nécessiterait toutefois une disponibilité suffisante en espace pour son installation et une durée de traitement compatible avec les impératifs locaux d'occupation de cet espace. La construction d'une unité mobile de production d'Aurin est actuellement à l'étude par l'entreprise VUNA.

4.2.5.4. Mise en regard des procédés de traitement de l'urine du XIX^e et du XXI^e siècle

Pour conclure ce chapitre sur les traitements de l'urine, il nous paraît intéressant de rappeler l'effervescence qui régnait au XIX^e siècle, en France et en Europe, vis-à-vis de la possibilité de valoriser les ressources contenues dans nos excréments. Dans le tableau suivant (Tableau 4.4), nous avons ainsi mis en regard une liste de procédés dont nous avons trouvé la mention lors de nos recherches sur le traitement des excréments au XIX^e siècle en France et les références correspondant au développement de procédés basés sur le même principe en Europe au XXI^e siècle.

Les références du XIX^e siècle sont presque exclusivement françaises mais cela témoigne surtout d'un biais de nos recherches, orientées sur la situation française, car les ouvrages consultés mentionnent fréquemment le développement de procédés similaires dans d'autres pays européens (Autriche, Prusse, Royaume-Uni, etc.). Les deux ouvrages majeurs du XIX^e siècle et du XXI^e siècle qui permettent le plus aisément cette mise en regard sont l'ouvrage de Paulet (1853) et celui de Larsen *et al.* (2013).

Nous employons à dessein le terme « mise en regard » car il paraît difficile de comparer directement la qualité et l'efficacité réelle de la mise en œuvre de ces différents procédés dans des contextes d'application aussi différents. Les références mentionnées dans le Tableau 4.4 sont toutefois systématiquement basées sur l'exploitation d'une propriété physico-chimique de l'urine similaire qui induit son exploitation au XIX^e siècle et son apparente « redécouverte » au XXI^e siècle. Le Tableau 4.4 ne contient bien sûr aucun des procédés qui ont été développés postérieurement au XIX^e siècle tels que la boue activée, la nanofiltration, la pile microbienne, etc.

Tableau 4.4 : Mise en regard de procédés de traitement de l'urine^a développés en Europe au XIX^e et au XXI^e siècle.

Procédé de traitement	Références du XIX ^e siècle	Références du XXI ^e siècle
Concentration après stabilisation à l'acide	Payen vers 1835 ^{b,c,d} ; de Gasparin, non daté ^b	Ek <i>et al.</i> , 2006
Volatilisation de l'ammoniac	de Serres, 1815 ^b ; Dumas, 1836 ^{b,c,d} ; Jacquemart/s, 1836 ^d ; Krafft et Suquet, 1842 ^b	Başakçılardan-Kabakçı <i>et al.</i> , 2007 ^e ; Paris <i>et al.</i> , 2007 ^e ; Antonini <i>et al.</i> , 2011 ^e ¹⁹⁹
Précipitation de struvite	Boussingault, 1847 ^{c,d} ; Blanchard et Château, 1867 ^d ;	Ronteltap <i>et al.</i> , 2007 ; Triger, 2012 ; Etter <i>et al.</i> , 2015
Imprégnation sur média alcalin ^f	Donat, 1819 ^{b,c,d}	Randall <i>et al.</i> , 2016 ; Senecal <i>et al.</i> , 2017
Imprégnation sur charbon	Salmon, 1826, 1831 ^{b,c,d}	Otterpohl & Buzie, 2013 ; Senecal <i>et al.</i> , 2017

^a Dans les références du XIX^e siècle, il pourra parfois s'agir de traitement appliqués à l'urine et/ou aux matières fécales et/ou à divers produits issus des excréments créés dans les diverses chaînes de gestion de l'époque.

^b Paulet, 1853

^c Barles, 2005

^d Liger, 1875

^e Larsen *et al.*, 2013

^f La comparaison du procédé de Donat avec celui développé par Senecal *et al.* ou Randall *et al.* ne peut qu'être relativement limitée car Donat réalisait visiblement le mélange de l'urine et du média alcalin après l'hydrolyse de l'urée. La faible postérité des « urates calcaires » de Donat s'explique peut-être en partie ainsi.

¹⁹⁹ Ces trois références n'ont pas été consultées directement. Il s'agit de : Başakçılardan-Kabakçı S., Ipekoglu A. N., Talınlı I., 2007. *Recovery of ammonia from human urine by stripping and absorption*. Environmental. Engineering and Science, 24(5), 615–624.

Paris S., Schlapp C. and Netter T., 2007. *A contribution to sustainable growth by research and development*. Proceedings of the International Symposium on 'Water Supply and Sanitation for All', Berching (Germany), 27–28 Sep 2007.

Antonini S., Paris S., Eichert T. and Clemens J., 2011. *Nitrogen and phosphorus recovery from human urine by struvite precipitation and air stripping in Vietnam*. CLEAN – Soil, Air, Water, 39(12), 1099–1104.

Cette mise en regard témoigne ainsi de l'effectivité d'un engouement au XIX^e siècle pour l'obtention de matières fertilisantes à partir d'urines et l'absence de références durant le XX^e siècle traduit la linéarisation des systèmes alimentation/excrétion durant ce siècle (cf. troisième partie) liée à l'« invention du déchet urbain » (Barles, 2005). Les multiples références trouvées en ce XXI^e siècle témoignent quant à elles d'une effervescence retrouvée vis-à-vis de la possibilité de produire des ressources à partir des urines et concourent à argumenter en faveur de l'existence d'une « prise de conscience relative à l'urine » depuis la fin du XX^e siècle dont nous avons étudié la diffusion au chapitre 4.1 (cf. en particulier Figure 4.7).

4.2.6. Usage final

Comme nous l'avons indiqué en introduction de ce chapitre 4.2, nous ne nous sommes concentrés ici que sur les chaînes de gestion qui permettent la mise en œuvre d'un système alimentation/excrétion circulaire, dans lequel l'usage final de l'urine est, par définition, une valorisation agronomique. Avant de détailler ce type de valorisation, il nous paraît opportun de présenter brièvement quelques exemples où l'usage final de l'urine n'est pas agronomique.

4.2.6.1. Usage final non agricole

Nous avons vu à la section 4.2.1 que la séparation à la source de l'urine était déjà largement répandue en Europe par l'utilisation de l'urinoir et sa praticité d'usage pour la miction urinaire masculine mais que les urines rejoignent ensuite majoritairement le tout-à-l'égout ou sont rejetées dans l'environnement (sol, milieu hydraulique superficiel, etc.). La séparation à la source de l'urine a également été mentionnée à la sous-section 4.2.1.3 dans le cadre de la médecine nucléaire dans les hôpitaux pour permettre la décroissance de la radioactivité des urines. Là encore la destination finale des urines reste le tout-à-l'égout.

Aux Pays-Bas, et probablement dans d'autres pays également, les urines de femmes enceintes sont collectées dans le but d'en extraire des hormones qui puissent être utiles aux femmes présentant des problèmes de fertilité. Cette collecte a même été à l'origine d'une valorisation des nutriments de ces urines par synthèse de sulfate d'ammonium et de struvite par l'entreprise Saniphos à Zutphen (Swart & Palsma, 2013). À notre connaissance, cette initiative de valorisation des nutriments n'a plus cours aujourd'hui du fait de l'absence de rentabilité économique pour l'entreprise qui la portait.

De nombreuses études portent sur les potentialités d'exploitation énergétique des ressources de l'urine. Trois mécanismes possibles semblent mis à profit :

- l'électrolyse de l'urée pour produire du dihydrogène (Udert *et al.*, 2013)²⁰⁰ ;
- l'oxydation de l'ammoniac dans une pile à combustible (*ibid.*) ;
- l'oxydation des composés carbonés de l'urine (Kuntke, 2013).

Ces procédés introduiraient un nouveau couplage du système alimentation/excrétion avec le système énergie. Ils correspondent à une assez haute technologie et peuvent être également très décentralisés, ce qui questionne la soutenabilité de leur déploiement et leur intérêt énergétique au regard des enjeux globaux énergétiques des systèmes socio-écologiques actuels (cf. section 2.1.3). Leur couplage avec une circularité, plutôt extractive, des nutriments n'est toutefois pas nécessairement exclue.

L'usage de l'urée se retrouve également dans de nombreux pans de l'économie (réducteur des oxydes d'azote issus de la combustion d'hydrocarbures dans les moteurs, composant de colle, etc.) et on pourrait également imaginer un tel usage de l'urée de l'urine ou de certains autres de ses composés.

Enfin, l'urine a connu antérieurement de nombreux usages (cf. section 3.1.1) dont on peut supposer que certains se prolongent encore aujourd'hui. Il nous a plusieurs fois été rapporté l'usage populaire de l'urine en tant qu'antiseptique. Il nous semble que l'effet antiseptique de l'urine provient essentiellement de la libération de l'ammoniac dans l'urine stockée après l'hydrolyse de l'urée et il faudrait donc préférentiellement appliquer comme antiseptique le *lotium*, et non l'*urina* (cf. note de bas de page n° 197 p. 303). Nous n'avons pas connaissance de la pratique contemporaine de stockage d'urine à domicile pour l'utiliser comme solution ammoniacuée mais il paraît plausible que celle-ci existe²⁰¹.

Ces différents usages populaires restent relativement ponctuels et ne remettent pas en cause l'existence d'une chaîne gestion de l'urine en dehors de ces usages. Ils peuvent même favoriser l'appropriation de chaînes de gestion circulaires en donnant à l'urine, par ces usages, un statut différent de celui du déchet évacué au tout-à-l'égout.

²⁰⁰ Ce procédé nécessite bien sûr un traitement décentralisé au niveau de l'interface usager afin de bloquer l'hydrolyse de l'urée.

²⁰¹ D'autres usages possibles sont indiqués dans le documentaire *Les superpouvoirs de l'urine* (Berrod & Russel, 2013) dont les fréquentes programmations télévisuelles en France témoignent d'un intérêt actuel certain pour l'urine (cf. section 5.3.1). L'urine entre aussi dans des pratiques thérapeutiques comme celle de l'urinothérapie, aussi appelée amaroli, qui consiste à obtenir des effets positifs liés à la boisson d'urine. Nous ne sommes pas capables de nous prononcer sur l'intérêt de cette pratique

4.2.6.2. Typologies d'usage final agricole

L'usage final agricole d'une chaîne de gestion de l'urine caractérise un système alimentation/excrétion circulaire. Deux cas de figure sont alors à distinguer :

- les systèmes alimentation/excrétion autonomes, dans lesquels les nutriments urbains sont effectivement retournés au territoire agricole même qui nourrit la ville, c'est-à-dire son hinterland agricole nourricier ;
- les systèmes alimentation/excrétion circulaires mais non autonomes, dans lesquels les nutriments urbains sont utilisés par des territoires agricoles autres que ceux qui alimentent cette ville.

La proximité géographique entre la ville et son hinterland agricole nourricier est rarement de mise aujourd'hui, du fait entre autres de la spécialisation des territoires agricoles et de l'internationalisation du commerce de denrées alimentaires. Nous l'illustrerons ici par le cas de l'approvisionnement de l'agglomération parisienne et la comparaison des régions d'origine des produits animaux en 1786 (Billen *et al.*, 2012c) et en 2006 (cf. chapitre 3.2) (Figure 4.35).

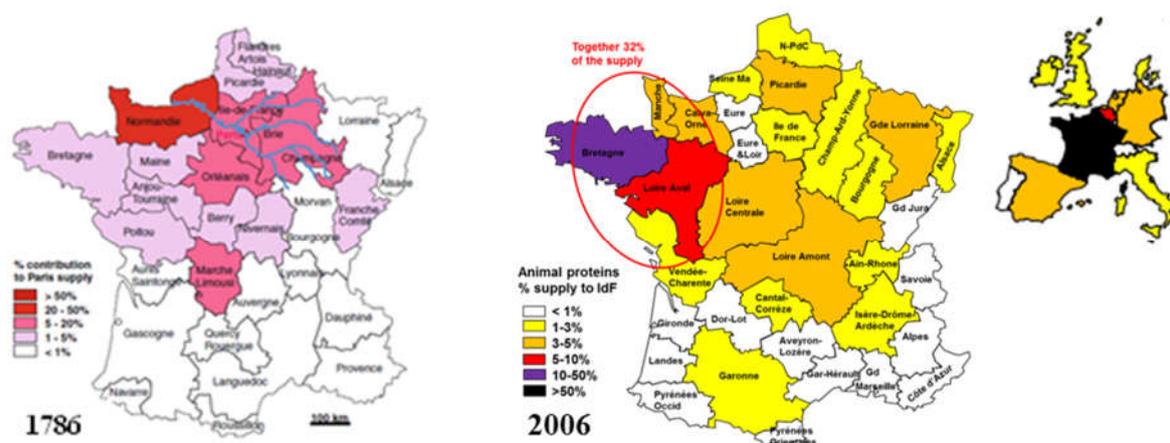


Figure 4.35 : Aires d'approvisionnement de l'agglomération parisienne en produits animaux.

À gauche en 1786 (Billen *et al.*, 2012c) ; à droite en 2006 (cf. chapitre 3.2).

On voit ainsi nettement que l'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne en 1786 était relativement local : la ville était entourée de son hinterland agricole nourricier. En 2006, l'hinterland agricole nourricier de l'agglomération parisienne est de dimension internationale, avec des régions spécialisées géographiquement distantes comme la Bretagne ou les Pays-Bas. Ne sont pas non plus représentées sur la Figure 4.35 les aires de provenance du fourrage alimentant les animaux d'élevage mais nous avons vu au chapitre 3.2 que leur importation d'Amérique du Sud constituait une source d'approvisionnement importante aujourd'hui pour l'hinterland agricole nourricier de l'agglomération parisienne, qui étend ainsi encore davantage son périmètre à un niveau mondial.

Dès lors, les deux cas de figure que nous avons mentionnés précédemment, à savoir les systèmes alimentation/excrétion urbains autonomes et les systèmes circulaires mais non autonomes pourront s'avérer très différents dans leur réalisation. En effet, dans un système circulaire non autonome, le produit final de la chaîne de gestion de l'urine ne créera pas nécessairement de lien entre la ville et le territoire agricole qui en fera usage, si ce n'est un lien économique par le flux financier potentiellement induit dans cette transaction. La ville pourra alors élaborer sa chaîne de gestion de l'urine en fonction de son appréhension du marché potentiel des matières fertilisantes sur lequel peut entrer son produit. Les usages et les usagers de ce produit pourront être d'une extrême diversité et situés à peu près n'importe où sur la planète, reflétant ainsi la même mondialisation que les marchés actuels des engrais et des denrées alimentaires. Les usages ne seront alors pas nécessairement alimentaires mais ils pourront par exemple être une production horticole, textile, énergétique, etc. Dans ce dernier cas, il se créerait alors un couplage entre le système alimentation/excrétion et l'autre sous-système concerné par la production agricole non alimentaire en question (par exemple le sous-système énergie dans le cas de fertilisation de cultures énergétiques)²⁰². La circularité du système alimentation/excrétion pourra alors s'analyser en second niveau par l'analyse du devenir des nutriments dans ce second usage.

A contrario, un système alimentation/excrétion autonome renforcera la synergie entre la ville et son hinterland agricole nourricier puisque celui-ci ne sera pas seulement pourvoyeur de denrées alimentaires pour la ville mais également bénéficiaire de matières fertilisantes issues de celle-ci. Un système autonome sera *a priori* plutôt local car le double mouvement d'importation de denrées alimentaires et d'exportation de matières fertilisantes s'inscrira plus spontanément dans une logique territoriale d'économie locale, *a minima* du fait de sa meilleure efficacité énergétique liée à un transport réduit de ces deux produits. Un système autonome orientera aussi beaucoup plus précisément les caractéristiques des matières fertilisantes urbaines souhaitées, et donc *in fine* la chaîne de gestion des urines correspondante, car celle-ci s'inscrirait dans un double mouvement d'offre et demande : l'hinterland offrirait des denrées alimentaires correspondant à la demande urbaine et la ville offrirait des matières fertilisantes correspondant à la demande agricole. Les parties agricoles et urbaines d'un système alimentation/excrétion autonome s'influenceraient donc mutuellement quant aux modalités de leur production respective alimentaire et fertilisante. Nous nous plaçons ici dans un cadre un peu théorique d'un système alimentation/excrétion totalement autonome mais il nous semble nécessaire de nous placer dans cette logique afin de bien faire ressortir les caractéristiques fondamentales sous-jacentes à l'autonomie d'un système.

²⁰² À l'exception du cas mentionné à la sous-section 3.3.3.3 où la production de méthanol pourrait être destinée au fonctionnement du système alimentation/excrétion lui-même.

Ces deux schémas de circularité auront bien sûr des contextes d'application différents. Si nous prenons le cas, majoritaire aujourd'hui comme nous l'avons précédemment montré (cf. troisième partie), de systèmes alimentation/excrétion urbains linéaires, l'autonomie n'est bien sûr pas envisageable sans une transformation profonde du système alimentation/excrétion. Les premières mises en œuvre de circularité s'inscriront donc dans des échelles relativement petites par rapport au système alimentation/excrétion dans son ensemble, comme nous l'avons vu pour les réalisations suédoises, et il n'est pas évident que le mécanisme de synergie que nous avons précédemment décrit pour un système autonome puisse se mettre en place, au vu du positionnement de niche de cette circularité.

En revanche, si la circularité devient importante au sein du système alimentation/excrétion dans son ensemble, traduisant alors une réelle transition socio-écologique vers la circularité, les couplages avec des productions agricoles non alimentaires pourraient être limités par le fait que la quantité de matières fertilisantes produites par la ville dépasse les besoins des cultures non alimentaires. Ainsi, aujourd'hui dans le bassin de la Seine, les surfaces occupées par les cultures énergétiques ne représentent que 1 % des terres arables. Les cultures destinées à l'alimentation humaine, directement ou indirectement via les animaux d'élevage, seront donc vraisemblablement toujours les bénéficiaires principaux d'une circularité dès que celle-ci est mise en œuvre à une échelle suffisamment importante. Elles sont d'autant plus légitimes à l'être que les produits pour l'alimentation humaine (céréales par exemple) constituent nécessairement une exportation nette des systèmes agricoles qui devra être compensée par des apports exogènes, comme nous l'avons par exemple illustré Figure 2.4. Ce n'est pas le cas des cultures énergétiques par exemple, pour lesquelles seul le carbone doit constituer un export agricole net alors que les nutriments peuvent être réutilisés au niveau agricole²⁰³.

Si tous les types de productions agricoles peuvent correspondre à l'émergence d'une circularité, nous nous intéresserons ici plus particulièrement aux cultures destinées directement ou indirectement à l'alimentation humaine dans la logique du déploiement de cette circularité en tant que réelle transition socio-écologique.

Nous chercherons également à nous inscrire dans des systèmes de production agricole soutenables, la recherche de soutenabilité des systèmes alimentation/excrétion dans leur ensemble étant bien sûr le cadre dans lequel nous plaçons ce travail. Nous avons déjà mentionné en conclusion de la première partie que nous cantonnons principalement nos travaux à la partie urbaine du système alimentation/excrétion. Pour ce qui est de la soutenabilité des systèmes de production agricole, nous nous référons donc aux travaux déjà mentionnés Le Noë, Billen, Garnier, *et al.* et au scénario agricole « bio, autonome, demitarien » (Billen *et al.*, 2017) qui entre en forte résonance avec

²⁰³ Cette réutilisation sera bien sûr limitée par l'efficacité d'utilisation de ces nutriments.

l'approche urbaine que nous développons ici par la sobriété et le niveau trophique soutenable du régime demitarien, le potentiel important de l'agriculture biologique en termes de soutenabilité et la recherche d'autonomie dans ce scénario, présentée principalement comme une autonomie des exploitations agricoles par le couplage polyculture-élevage mais qui, à l'échelle d'un système alimentation/excrétion dans son ensemble, étendu à la partie urbaine de ce système, ne peut être réalisée sans le recours à une circularité des nutriments urbains vers les sols agricoles.

Ce dernier point semble d'ailleurs constituer un des apports fondamentaux de notre recherche à la question de la soutenabilité des systèmes agricoles, en particulier en agriculture biologique. Le principe d'écologie de l'agriculture biologique, qui proscrit entre autres le recours à des engrais de synthèse, ne nous semble pas pouvoir être déployé à grande échelle sans recyclage des excréments humains car la production alimentaire est par définition nécessairement une exportation nette de nutriments vers les villes. Nesme *et al.* (2016) ont ainsi montré qu'en France environ 70 % du phosphore des produits issus de cultures biologiques était d'origine anthropique, c'est-à-dire provenant originellement de l'exploitation de mines de phosphore fossile principalement. En France cet apport provient largement du stock de phosphore hérité de l'utilisation massive d'engrais phosphorés des décennies précédentes et utilisé par les exploitations nouvellement converties à l'agriculture biologique. La soutenabilité à long terme de ce mode de production n'est donc pas assurée non plus bien sûr, *a fortiori*, que celle de l'agriculture conventionnelle.

Or le recyclage des nutriments humains semble justement correspondre parfaitement à la définition de l'agriculture biologique, dont le principe d'écologie précise que l'agriculture biologique devrait être basée « sur les cycles et les systèmes écologiques vivants [... et] sur des processus écologiques et de recyclage »²⁰⁴. En régime stationnaire, le déploiement de l'agriculture biologique à grande échelle ne semble pas possible sans le recours à l'introduction de phosphore qui compense *a minima* l'export de phosphore dû à la production alimentaire consommée et qui se retrouve presque intégralement dans les excréments humains (cf. chapitre 1.2)²⁰⁵. Si ce résultat est moins saillant pour l'azote du fait de la possibilité de recourir à la fixation symbiotique d'azote, l'apport d'azote aux cultures biologiques provenant de fermes conventionnelles est malgré tout une réalité aujourd'hui (*ibid.*) qui traduit également la difficulté de réaliser une agriculture biologique dont les intrants azotés sont exclusivement le fait de la fixation symbiotique. Enfin, pour le potassium, le bilan de masse de

²⁰⁴ <http://infohub.ifoam.bio/en/what-organic/principles-organic-agriculture> cité par Nesme *et al.* (2016).

²⁰⁵ Les seuls flux exogènes de phosphore d'un système agricole sont les dépositions atmosphériques et la captation du phosphore des roches du sous-sol. Le premier flux correspond à environ 2 % de la production des sols agricoles européens aujourd'hui et le second à 0,2 % (Garnier *et al.*, 2015). Il ne semble donc pas envisageable que ces flux puissent compenser l'exportation de phosphore des cultures.

l'exportation agricole pour l'alimentation humaine posera *a priori* le même problème que pour le phosphore.

Le cahier des charges de l'agriculture biologique interdit l'utilisation de boues de station d'épuration du fait des contaminations de ces boues par divers polluants. Nous venons de montrer en quoi l'utilisation des nutriments des excréments humains serait compatible avec l'esprit du principe d'écologie de l'agriculture biologique, voire constituer une condition *sine qua non* de soutenabilité de l'agriculture biologique. Or cette éventualité paraît difficilement envisageable aujourd'hui. En effet, la réglementation qui encadre l'agriculture biologique prévoit une liste fermée de produits utilisables en tant qu'engrais²⁰⁶ et l'urine humaine ne figure pas parmi ces produits. La seule mention qui s'en rapproche concerne les excréments d'animaux liquides en provenance d'élevages non industriels. Ce point semble faire l'objet de débats au sein des instances de régulation de l'agriculture biologique, avec une criticité particulière liée à la présence de résidus médicamenteux dans les urines.

4.2.6.3. Modalités d'utilisation de produits issus de l'urine en agriculture

Nous avons déjà illustré par le Tableau 4.2 la composition équilibrée des excréments humains en termes de nutriments apportés aux plantes. À la figure suivante (Figure 4.36), nous reprenons le positionnement comparé de l'urine humaine, de diverses substances et des besoins des plantes de grandes cultures, en termes de proportions NPK, tel qu'il a été réalisé par Jönsson & Vinnerås (2013).

²⁰⁶ Annexe I du règlement (CE) N° 889/2008 de la commission européenne du 5 septembre 2008 portant modalités d'application du règlement (CE) N° 834/2007 du Conseil relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques en ce qui concerne la production biologique, l'étiquetage et les contrôles.

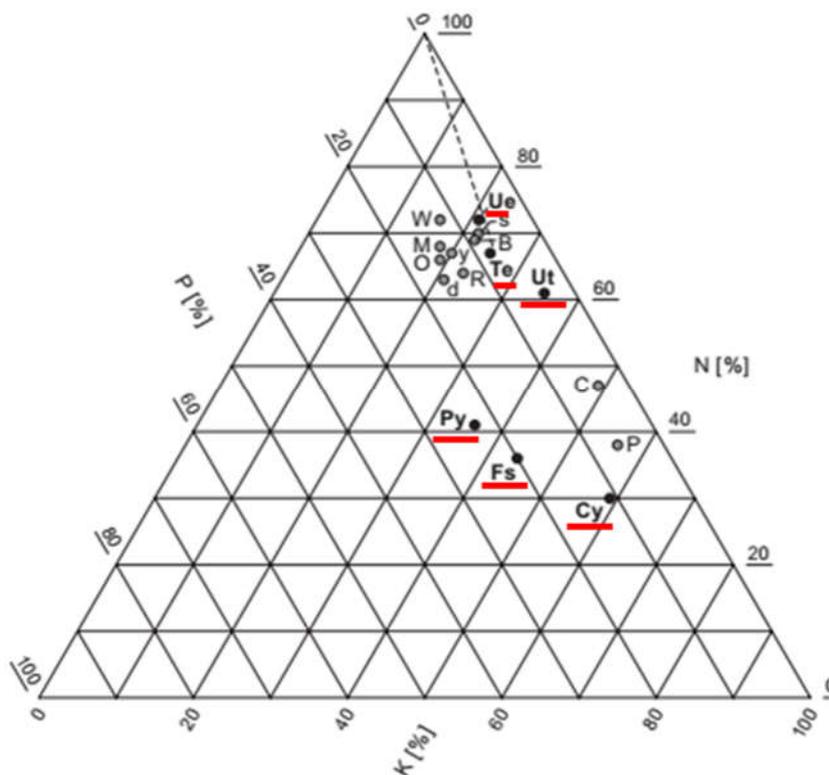


Figure 4.36 : Composition comparée en nutriments azotés, phosphorés et potassiques de diverses substances en relation avec les prélèvements de ces nutriments par différentes cultures.

Substances (ronds noirs soulignées en rouge) : Ue : urine ; Fs : matières fécales ; Te : mélange de Ue et Fs ; Ut : Urevit (urine traitée par électrodialyse et ozonation) ; Py : lisier porcin ; Cy : lisier bovin.

Prélèvements des cultures (ronds gris) : orge (y) ; fèves (B) ; trèfle (C) ; maïs (M) ; avoine (O) ; pois (s) ; pommes de terre (P) ; seigle (R) ; colza (d) ; sorgho et blé (W). Le besoin en azote des légumineuses peut être inférieur à celui indiqué grâce à la fixation symbiotique.

Les traits pointillés qui relient le sommet du triangle (azote pur) à Te représentent les produits potentiellement obtenus par hygiénisation des urines et matières fécales à l'ammoniaque.

Source : Jönsson & Vinnerås (2013)

On constate que l'équilibre des proportions d'azote, de phosphore et de potassium dans l'urine humaine est effectivement très proche des besoins de la plupart des cultures, hormis le trèfle et la pomme de terre pour lesquels l'urine humaine apporte relativement trop d'azote et pas assez de potassium. Elle est ainsi beaucoup plus proche des besoins des céréales ou du colza que ne le sont les lisiers porcins et bovins et ne présente qu'une légère carence relative en phosphore. L'urine constitue donc un engrais complet bien adapté aux principales grandes cultures alimentaires et fourragères, qui apporte également tous les autres micronutriments (Karak & Bhattacharyya, 2010). Les éléments traces métalliques sont présents en très faibles quantités dans l'urine, en particulier par rapport aux engrais chimiques : la teneur en cadmium de l'urine rapportée à celle du phosphore peut ainsi être trois ordres de grandeur en-dessous de celle des engrais phosphorés (Ronteltap *et al.*, 2007).

Seul le sel (chlorure de sodium) apporte des nutriments potentiellement indésirables en agriculture. D'après Richert *et al.* (2011), la concentration en sel de l'urine ne pose potentiellement de problème qu'en zone aride, auquel cas il convient d'alterner épandage d'urine diluée et irrigation à l'eau douce. En zone tempérée, le sel contenu dans l'urine ne serait donc pas susceptible de causer de problème particulier. La consommation élevée de sel de la population française, d'environ 9 à 10 g/pers/j (AFSSA, 2002), près de deux fois supérieure aux recommandations de l'OMS et de la FAO de 5 g/pers/j (OMS & FAO, 2003) et dix fois supérieure au besoin physiologique minimal de 1 g/pers/j (AFSSA, 2002) pose plus de problèmes de santé publique que d'utilisation de l'urine en tant que matière fertilisante.

On notera que cette utilisation est justement susceptible d'introduire des boucles de rétroaction positives sur les habitudes de consommation de sel (cf. par exemple les témoignages recueillis par Steinfeld, 2004). Plus généralement, ce point traduit un des avantages de la fermeture des cycles biogéochimiques dans un système alimentation/excrétion autonome par un renforcement conjoint des améliorations de la santé humaine et du recyclage de l'urine, au contraire des systèmes ouverts et linéaires. Ce sera ainsi également le cas pour les micropolluants médicamenteux. Les inconvénients de leur présence dans l'urine pour la production agricole ne sont aujourd'hui pas considérés par l'OMS comme susceptibles de remettre en cause l'usage agricole de l'urine humaine et la mise en place d'un système fermé et circulaire sera ainsi probablement mieux à même d'inciter à une vigilance accrue sur l'emploi de médicaments par rapport à un système ouvert et linéaire. La logique de prévention à la source des micropolluants, prônée en France (MEEM, 2016), paraît ainsi compatible, voire renforcée, avec un usage agricole d'urine.

Comme le lisier, l'urine est principalement pénalisée par la faible concentration des différents nutriments : la composition NPK de l'urine brute est en effet 0,9-0,2-0,2 (cf. sous-section 1.2.3.1)²⁰⁷. Cette concentration sera encore moindre dans le cas d'urine diluée par des chasses d'eau. Le traitement des urines par concentration présente donc un avantage supplémentaire au niveau de l'exploitation agricole, en limitant le volume de produit à épandre. Un produit comme l'Aurin présente une composition NPK affichée qui le rend ainsi plus attractif : 4,2-0,4-1,8²⁰⁸. Senecal & Vinnerås (2017) indiquent une composition de 7,8-5,7-13,1 sur leur produit encore en cours de développement. On reste bien sûr encore loin des concentrations des engrais purs comme l'urée qui titrent 47-0-0.

²⁰⁷ Conformément aux usages, les chiffres NPK donnés correspondent aux titres massiques exprimés en pourcentages et les teneurs en P et K sont exprimées en teneurs en P₂O₅ et en K₂O.

²⁰⁸ L'analyse d'un flacon Aurin que nous nous sommes procuré montre des valeurs supérieures à celles-ci : 6,6-1,1-5,1 (Martin, 2017).

La composition NPK de l'Aurin est d'ailleurs très proche de celle des engrais liquides que l'on peut trouver en grande surface pour les usages privés de jardinage et c'est principalement pour cet usage qu'elle est aujourd'hui commercialisée. Nous avons ainsi relevé, dans une grande surface spécialisée, la composition NPK de treize engrais liquides indiqués, par les entreprises qui les commercialisent, comme universels ou spécifiquement adaptés à la culture de fruits, légumes, fleurs ou plantes d'intérieur et d'extérieur. Nous n'avons pas identifié de convergence dans la composition NPK des produits de différentes marques en fonction des usages mentionnés et nous avons donc choisi de ne présenter ici que la moyenne des treize valeurs relevées (Tableau 4.5)²⁰⁹.

Tableau 4.5 : Teneurs NPK comparées d'engrais liquide du commerce, Aurin et urine brute.

Titres massiques exprimés en pourcentage. Les teneurs NPK sont également indiquées après application des coefficients de dilution préconisés.

Produit	N	P (exprimé en P ₂ O ₅)	K (exprimé en K ₂ O)
Engrais liquides du commerce ^a	4,2 (± 1,5)	3,6 (± 2,0)	5,8 (± 1,0)
Aurin ^b	4,2	0,4	1,8
Urine brute ^c	0,87	0,17	0,25
Aurin après dilution	0,042	0,0040	0,018
Engrais liquides du commerce après dilution ^a	0,023 (± 0,016)	0,018 (± 0,014)	0,038 (± 0,022)

^a Valeur moyenne sur treize produits. L'écart-type est indiqué entre parenthèses.

^b Valeur affichée.

^c Nous n'indiquons pas ici d'écart-type, qui variera beaucoup selon les populations considérées, mais on pourra se référer à la sous-section 1.2.3.1 pour plus de détails.

On constate ainsi une richesse relative de l'Aurin et de l'urine brute en azote par rapport aux autres nutriments, en comparaison des engrais liquides du commerce. Après application des coefficients de dilution préconisés, on constate également que l'urine brute est de 7 à 42 fois plus concentrée en

²⁰⁹ On pourrait affiner les valeurs de NPK de référence à choisir. La présentation de ces valeurs nous paraît déjà permettre de donner une première échelle comparative

nutriments que les engrais ou l'Aurin dilués. L'urine apparaît donc trop diluée par rapport aux engrais industriels utilisés en grandes cultures et trop concentrée par rapport aux préconisations d'usage des engrais pour particuliers.

L'usage domestique de l'urine en ville pour la fertilisation de plantes en pots ou de parcelles cultivées ne pourra usuellement représenter qu'un usage final relativement mineur dans une perspective de système circulaire non polluant. Comme nous l'indiquons à la sous-section précédente (sous-section 4.2.6.2), cet usage constitue néanmoins un des débouchés possibles dans le cadre d'une mise en œuvre de circularité à échelle encore très réduite. En effet, même en supposant qu'une fertilisation intense avec des pertes minimales soit mise en œuvre dans un contexte urbain, il semble raisonnable de se baser sur une fertilisation d'environ 170 kgN/ha. Avec une excrétion annuelle d'azote urinaire de 4,0 kgN/pers/an (cf. Figure 1.10), cela correspond à une surface cultivée d'environ 230 m²/pers. Or nous avons vu que la surface disponible par habitant est de 47 m²/habitant dans la Ville de Paris et de 270 m²/habitant à l'échelle de l'agglomération parisienne. Les engrais à usage domestique ne pourront donc constituer qu'une niche, permettant éventuellement l'émergence de cette circularité comme dans le cas de l'Aurin, mais ne répondent pas à l'enjeu d'une transition socio-écologique vers une circularité à grande échelle.

D'autres types d'usages agricoles de l'urine, alternatifs aux systèmes de grandes cultures, sont envisageables ou déjà réalisés dans le monde : mentionnons par exemple la production maraîchère (cf. par exemple Richert *et al.*, 2011 pour des recommandations pratiques et Karak & Bhattacharyya, 2010, pour une revue bibliographique de tests de fertilisation de l'urine en maraîchage et en céréaliculture), l'aquaculture (OMS, 2012b), la culture d'algues, l'aquaponie, etc. En France, Benjamin Clouet, fondateur d'Ecosec, nous a rapporté l'existence d'une entreprise réalisant une culture de spiruline sur urine²¹⁰. La valorisation agronomique de l'urine en tant qu'engrais semble également déjà pratiquée par les membres du Réseau de l'Assainissement Écologique. On en trouvera une analyse détaillée dans le rapport *ad hoc* déjà mentionné (Brun *et al.*, 2017). Toujours en France, on notera également la parution récente d'un ouvrage relatif à l'utilisation de l'urine en maraîchage (De Looze, 2016) qui témoigne de la possible facilité d'appropriation de l'urine comme engrais dans les pratiques de cultures domestiques et de l'intérêt d'acteurs français de plus en plus nombreux pour l'utilisation agronomique de l'urine.

²¹⁰ Déjà proposée de longue date par Jourdan (2016 et références antérieures), la culture de spiruline sur urine serait ainsi réalisée aujourd'hui en France par cette entreprise à partir d'une collecte d'urine provenant exclusivement de personnes crudivores, végétaliennes et non médicamenteuses.

La fertilisation d'une terre à l'urine pourrait par ailleurs être pénalisante par le poids de l'engin agricole qui compacterait la terre lors de son passage. Johansson *et al.* (2000) proposent ainsi que l'épandage d'urine puisse le cas échéant être réalisé par un engin raccordé par tuyau à un stockage d'urine.

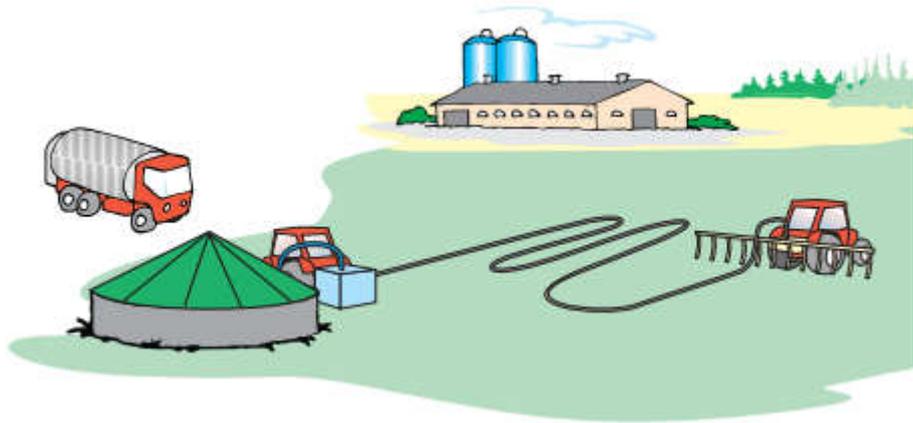


Figure 4.37 : Schéma de principe d'une fertilisation d'un champ avec épandeur relié par tuyau à une cuve de stockage.

Source : Johansson *et al.*, 2000

L'application de l'urine devra aussi respecter certaines modalités d'épandage minimisant toute pollution azotée, en particulier par volatilisation de l'ammoniac. Johansson *et al.* (2000) recommandent ainsi l'utilisation de pendillard pour éviter les pertes atmosphériques d'ammoniac et un enfouissement concomittant à l'épandage.



Figure 4.38 : Épandage d'urine avec pendillard et tuyau relié au stockage

Source : Johansson *et al.* (2000)

La répartition égale de l'azote sous forme d'ammoniac et de nitrate dans l'Aurin constitue à ce titre un avantage certain de l'Aurin par rapport à l'urine stockée du fait des plus faibles pertes par volatilisation attendue au niveau de l'épandage.

L'analyse de l'efficacité comparée de ces différents produits fait justement l'objet de la thèse de Tristan Martin récemment commencée. On pourra déjà se référer à son rapport de Master 2 (Martin, 2017) pour plus de précisions à ce sujet et nous retiendrons ici simplement que l'efficacité de l'urine est assez similaire à celle d'un engrais minéral complet au vu de la présence des différents éléments sous une forme majoritairement minérale dans l'urine stockée ainsi que dans la plupart des produits issus des traitements de l'urine mentionnés préalablement.

L'épandage d'urine stockée pourra aussi présenter des nuisances olfactives au moment de l'épandage. D'après Kvarnström *et al.* (2006), cette nuisance est comparable à celle causée par l'épandage de lisier et aucun problème n'a été rapporté en Suède suite à l'épandage d'urine, même en banlieue de Stockholm. Les odeurs à l'épandage devront tout de même constituer un point de vigilance, en particulier dans les régions avec très peu d'élevage.

L'usage final de l'urine stockée est donc réalisable en grande culture sans contrainte majeure et présente un intérêt certain en termes des engrais apportés. La faible concentration des nutriments et la forme ammoniacuée, donc aisément volatilisée, de l'azote de l'urine stockée représentent ses deux

inconvenients principaux en termes des modalités pratiques de son utilisation agronomique. Les différents traitements envisageables de l'urine peuvent éventuellement la rendre plus adaptée aux différentes pratiques culturales.

4.2.7. Caractérisation des régimes socio-écologiques envisageables

L'analyse des différentes possibilités offertes à chaque maillon d'une chaîne de gestion des urines, que nous avons conduite dans les sections précédentes (sections 4.2.1 à 4.2.6), nous a permis de dégager quelques scénarios envisageables de séparation à la source. Il paraît désormais pertinent d'évaluer les performances de ces scénarios au regard des critères de caractérisation de systèmes socio-écologiques que nous avons définis dans la deuxième partie.

Nous excluons dans cette analyse les critères de sobriété et d'efficacité qui, bien que fortement liés à la mise en place d'une chaîne de gestion des urines, ne sont pas strictement inclus dans la caractérisation de celle-ci. L'importance des couplages avec les autres sous-systèmes sera dépendante :

- pour le sous-système eau, de l'utilisation ou non d'eau pour l'évacuation des urines. Les modalités de gestion des matières fécales (avec ou sans eau) conditionneront fortement ce couplage également ;
- pour le sous-système énergie, le couplage sera nécessairement important du fait du besoin d'énergie du système alimentation/excrétion, comme de n'importe quel autre système, pour fonctionner. En revanche, nous n'étudierons pas davantage les possibilités de couplage énergétique que nous avons très brièvement évoquées à la sous-section 4.2.6.1 pour nous concentrer sur la question de la valorisation des nutriments des urines ;
- pour le sous-système transport de biens, nous avons vu qu'il était nécessairement important pour la partie amont du système alimentation/excrétion et nous considérons que l'importance de ce couplage est consubstantiel à l'organisation d'un territoire urbain.

Enfin, pour la salubrité, nous considérerons que la séparation à la source de l'urine est salubre vis-à-vis des pathogènes (cf. sections précédentes pour une discussion sur les limites de cette hypothèse), et nous considérerons, en suivant l'OMS (2012a), que les résidus médicamenteux et hormonaux d'une population standard n'empêchent pas l'utilisation agricole des urines humaines.

Finalement, les deux critères principaux d'évaluation des chaînes de gestion de l'urine que nous analyserons en détail sont la circularité (ou l'autonomie) et la pollution. Ces deux critères sont bien sûr fortement liés puisque le taux de pollution d'un système est plafonné par son taux de linéarité. Le caractère polluant des éléments non valorisés et la typologie de leur pollution (locale et/ou globale) dépendra bien sûr des modalités de leur gestion.

Nous introduirons également la relation existant entre les types de chaînes de gestion mises en œuvre et les typologies urbaines.

4.2.7.1. Évaluation de la circularité et de la pollution

Nous avons récapitulé dans le tableau suivant le taux de circularité potentiel de quelques maillons possibles d'une chaîne de gestion de l'urine (Tableau 4.6). Nous nous sommes cantonnés aux techniques qui sont aujourd'hui à un stade de développement suffisamment avancé pour que l'évaluation soit considérée comme fiable et que leur mise en œuvre soit aisément envisageable aujourd'hui dans le contexte des villes occidentales (cf. sections précédentes 4.2.1 à 4.2.6). Nous avons choisi de représenter ces taux de circularité pour les trois éléments principaux N, P et K. L'évaluation de la circularité sur les autres nutriments sera faite en première approximation en fonction de leur typologie chimique se rapprochant de N, P ou K (cf. conclusion de la deuxième partie). Le détail de toutes les sources et discussions est précisé dans les sections précédentes, seules les références et conclusions principales sont synthétisées ici.

Tableau 4.6 : Circularité potentielle de différents maillons de chaînes de séparation à la source de l'urine.

Circularité potentielle	Interface usager		Collecte et stockage local		Traitement		Transport		Stockage au champ		Épandage sur grandes cultures	
	Urinoir ^a	Toilette à séparation d'urine	Tuyau et cuve	Stockage	Procédé Aurin		Urines stockées	Aurin	Urines stockées	Aurin		
N	> 99 %	40 % à 95 % ^b	50 % à > 99 % ^c	sans objet	> 98 % ^f	> 99 % ^g	50 % à > 99 % ^h		variable ⁱ		> 99 %	a priori faible ⁱ
P			70 % à > 99 % ^d		> 99 % ^f		> 99 %					
K			99 % ^e									

^a Urinoirs secs ou à chasse d'eau. Les urinoirs à chasse d'eau sont usuellement convertibles en urinoirs secs. Aujourd'hui, utilisés presque exclusivement par les hommes mais l'urinoir féminin est envisageable. Concerne principalement les lieux à équipement mutualisé mais extension envisageable dans l'habitat privé.

^b Valeurs extrêmes relevées par Besson (2015). Dépendance très forte au comportement de l'utilisateur. La circularité et la pollution résiduelle dépendront des modalités de gestion des matières.

^c Valeurs extrêmes indiquées dans Larsen *et al.*, 2013. > 99 % est normalement obtenu sans ventilation. La non-circularité est une pollution atmosphérique à l'ammoniac.

^d Dépendra des modalités de gestion des précipités. La valeur minimale est donnée par Udert *et al.*, 2006 et correspond au cas où les précipités sont gérés de manière linéaire (par exemple envoi des résidus de nettoyage des tuyaux et des bouches de fond de cuve vers un tout-à-l'égout linéaire).

^e Évaluation *a priori* raisonnable d'après Udert *et al.*, 2006.

^f Etter *et al.*, 2015. L'azote non récupéré peut partir en volatilisation (pollution atmosphérique) et/ou être dans le distillat (pollution et circularité dépendantes de ses modalités de gestion). On peut imaginer que ces performances soient dégradées en conditions réelles d'opération, en particulier en cas de dysfonctionnement de la nitrification et d'une distillation opérée sur un effluent insuffisamment nitrifié.

^g Les conditions dégradées de fonctionnement des opérations de vidange et de transport n'ont pas été analysées plus en détail mais on peut supposer que leur effet serait relativement limité.

^h Nous avons repris les valeurs de pertes au stockage. Spangberg *et al.* (2014) estiment que des pertes de 4 % sont raisonnables en conditions usuelles de stockage en se référant à une publication en suédois que nous n'avons pas consultée (Karlsson S, Rodhe L. Översyn av Statistiska Centralbyråns beräkning av ammoniakavgången i jordbruket – emissionsfaktorer för ammoniak vid lagring och spridning av stallgödsel. JTI Uppdragsrapport, 2002).

ⁱ En cours d'investigation dans le cadre de la thèse de Martin. Seule la volatilisation serait éventuellement à compter ici, les processus de captation de l'azote par les plantes relevant ensuite de l'efficacité du système agricole et non plus de l'urine. Les valeurs peuvent beaucoup varier pour l'urine selon les modalités d'épandage. Spangberg *et al.* (2014) estiment 5% de volatilisation. La volatilisation est *a priori* encore plus faible pour l'Aurin.

On voit ainsi que le taux de circularité global sera très dépendant des conditions de mise en œuvre. Dans les conditions les plus défavorables, qui représentent un cas *a priori* très théorique où chaque maillon est à son plus bas niveau de performance, le taux de circularité de l'azote peut descendre en-dessous de 10 %. Même dans ce cas très théorique, le taux de circularité global reste supérieur à celui de l'agglomération parisienne aujourd'hui (à savoir 5 % – cf. chapitre 3.2). Dans les conditions les plus favorables, on peut imaginer des taux de circularité aux alentours de 98 % (hors volatilisation à l'épandage). Spångberg *et al.* (2014) ont ainsi estimé raisonnable, pour un immeuble d'habitation équipé de toilettes à séparation d'urine et avec épandage après simple stockage, un taux de circularité global de 72 %. La majorité des pertes interviennent au niveau de la toilette à séparation d'urine (25 %) et cet azote est alors évacué avec les matières fécales et peut éventuellement être utilisé selon les modalités de gestion des matières fécales.

Les principales pollutions de telles chaînes de gestion de l'urine sont azotées. Elles vont majoritairement se faire dans le compartiment atmosphérique, par volatilisation d'ammoniac. Dans le pire des cas, ces pollutions peuvent être considérables car presque tout l'ammoniac de l'urine peut théoriquement être volatilisé par la ventilation des cuves de stockage de l'urine. Dans ces cas, la pollution azotée est donc comparable à celle des régimes du tout-à-l'égout à rejet direct, traitement primaire ou secondaire, qui sont encore très courants dans le monde occidental. Seuls les régimes à traitement tertiaire (dénitrification de l'azote) sont nettement moins polluants (38% de pollution dans le cas de l'agglomération parisienne, depuis la dénitrification mise en place en 2012 – cf. chapitre 3.2). Il est intéressant de noter que la transition d'un régime linéaire et polluant à un régime circulaire et non polluant, dans le cas mentionné par Wohlsager *et al.* (2010), s'effectue techniquement par la simple mise en place d'un couvercle. Cette disproportion des moyens techniques à mettre en œuvre pour limiter les pollutions azotées entre le traitement des eaux usées et une gestion efficace des urines se retrouve d'ailleurs aujourd'hui par exemple dans les bilans globaux de pollution azotée du bassin de la Seine. Ils mettent en exergue l'importance de la couverture des stockages de lisier animal dans les exploitations agricoles, au regard des pollutions azotées provenant des systèmes d'assainissement (AESN, 2013).

Dans les cas les plus favorables, la pollution azotée pourra être inférieure à 2 %, dépassant alors très largement les performances des régimes du tout-à-l'égout. Les pollutions azotées peuvent également se faire sous forme de N_2O . Il s'agit d'ailleurs, comme nous l'avons montré à la sous-section 3.3.3.4, du principal gaz à effet de serre fondamentalement lié aux systèmes alimentation/excrétion. Nous avons montré sa sensibilité dans le cas de l'agglomération parisienne aujourd'hui par les taux mesurés d'émission de N_2O très importants au niveau des biofiltres (2,1 % du N entrant en station d'épuration repart sous forme de $N-N_2O$ – cf. chapitre 3.2). Nous n'avons pas identifié de pollution au N_2O dans les chaînes de gestion où les urines sont simplement stockées car l'azote n'est pas ou très peu nitrifié,

hormis au champ où cette émission de N₂O entre alors dans le cadre des émissions du système agricole. Pour le procédé Aurin, les taux d'émission de N₂O de la nitrification des urines n'ont pas encore été investigués mais ce point pourrait s'avérer critique pour l'évaluation des performances de ce procédé.

Le potentiel technique de la séparation à la source de l'urine pour permettre la mise en œuvre d'un régime socio-écologique circulaire et non polluant est donc évident. Son effectivité en conditions réelles dépendra très fortement des modalités de sa mise en œuvre. Nous étudierons dans la cinquième partie les conditions dans lesquelles une mise en œuvre d'une chaîne de gestion performante en termes de circularité et de pollution est envisageable.

4.2.7.2. Évaluations environnementales complémentaires de la séparation à la source de l'urine

Il est bien sûr possible de réaliser une évaluation environnementale d'une chaîne de gestion des urines sur des critères différents de ceux du cadre méthodologique de caractérisation des systèmes alimentation/excrétion que nous avons proposé. De nombreuses études ont ainsi été réalisées pour comparer des scénarios de séparation à la source de l'urine avec le tout-à-l'égout ou avec d'autres chaînes de gestion alternative des urines et matières fécales. Nous avons déjà montré les limites de ces types d'évaluation du fait que leur cadre d'évaluation inclut des éléments du système alimentation/excrétion et des éléments extérieurs au système alimentation/excrétion. On retiendra toutefois que la plupart de ces évaluations concluent à une meilleure performance de la séparation à la source de l'urine par rapport au tout-à-l'égout. La méta-analyse conduite par Jönsson (2017)²¹¹ conclut ainsi à une économie d'énergie primaire de 41 %, une baisse des émissions de gaz à effet de serre de 25 %, une baisse de l'eutrophisation de 26 % et une augmentation du recyclage des nutriments. Les consommations d'eau potable sont aussi diminuées par les systèmes de collecte à sec des urines ou par les toilettes à séparation d'urine à chasse d'eau réduite pour les urines. Cette diminution peut aller jusqu'à 30 L/pers/j soit environ 20 % des usages domestiques de l'eau (cf. Tableau 2.1)²¹².

²¹¹ Jönsson a compilé les valeurs médianes données par Remy (2010), Spångberg *et al.* (2014), Tervahauta *et al.* (2013) ainsi que Kärrman *et al.* (2012) et Wittgren *et al.* 2011 : Kärrman, E., Arnell, M., Rydhagen, B. & Svensson, G. & Wittgren, H.B. 2012. Multikriterieanalys för integrerade systemlösningar i H+ området. Urban WaterAB. Uppdrag 120010, Rapport. Wittgren, H.-B., Malmqvist, P.-A., Norström, A., Pettersson, F. & Svensson, G. 2011. *Systemanalys av kretsloppssystem för Norra Djurgårdsstaden*, Stockholm. Urban WaterManagement Rapport 2011:1.

²¹² Certains bâtiments s'équipent même de toilettes à séparation d'urine presque exclusivement pour l'économie d'eau permise.

On notera également l'impact positif de la séparation à la source de l'urine, dans l'hypothèse de sa mise en place progressive dans une agglomération, sur la station d'épuration existante qui traitait préalablement ces urines, si l'on conserve le tout-à-l'égout pour les eaux ménagères et les matières fécales. Outre la baisse globale de charge induite, la séparation à la source de l'urine rapproche la composition des eaux usées domestiques des ratios DBO5:N:P optimaux de l'assimilation bactérienne à savoir 100:5:1²¹³. En prenant les données de Friedler *et al.* (2013), on trouve en effet un ratio 100:32:4 pour les eaux usées qui descend à 100:8:3 pour des eaux usées théoriques sans urine. Une évolution de la composition des eaux usées en direction de ce dernier ratio permet ainsi d'augmenter la décantation primaire en tête de station d'épuration et, dans le cas désormais relativement usuel où les boues sont digérées, de réorienter le carbone de ces boues vers une digestion pour les convertir en méthane plutôt que de les conserver dans l'eau usée pour la dénitrification. On augmente ainsi l'efficacité du processus de traitement des nouvelles eaux usées à composition équilibrée (Verstraete *et al.*, 2013 ; Bisinella *et al.*, 2015). Les urines représentant environ 75 % de l'azote des eaux usées (cf. Figure 3.26), une séparation à la source totale des urines permettrait – sans même réaliser de dénitrification dans la station d'épuration recevant alors matières fécales et eaux ménagères – un meilleur rendement de traitement global de l'azote que celui constaté aujourd'hui dans l'agglomération parisienne (< 70 %). Ce cas théorique doit bien sûr prendre en compte l'évolution couplée de la mise en œuvre de la séparation à la source de l'urine et celle de la gestion des matières fécales et du reste des eaux usées.

4.2.7.3. Caractéristiques des filières et des typologies urbaines

Les sections de ce chapitre ont montré une interaction forte entre la nature des traitements de l'urine et des autres maillons de la chaîne, leur niveau de technologie, les ressources et savoir-faire mobilisés et les caractéristiques des zones urbaines de mise en œuvre des filières de séparation à la source de l'urine. Nous caractériserons ici ces dernières par leur densité et leur distance aux territoires agricoles et illustrerons ce point dans trois contextes différents :

- au niveau du foyer, la chaîne de gestion de l'urine peut être réduite à l'extrême par la miction urinaire presque directement sur la parcelle cultivée, ou par un stockage préalable, de durée éventuellement très réduite, comme illustré par l'arrosoir Guld Kannan (cf. Figure 4.23). Cette chaîne ne requiert quasiment aucune ressource matérielle ou énergétique. La technologie associée peut être qualifiée de rudimentaire (low-tech). Elle nécessite néanmoins l'acquisition d'un savoir-faire sur l'usage de

²¹³ Référence classique non consultée directement : Metcalf & Eddy, 1991. Wastewater Engineering. Treatment, Disposal and Reuse, 3ed Edition. McGraw-Hill, NewYork.

l'urine. Cette échelle est toutefois limitée par la capacité de la parcelle de ce foyer à pouvoir être l'unique source de valorisation de l'urine du foyer. En effet, en ville, les foyers ne sont usuellement pas producteurs de la majorité de leur alimentation et l'importation nette de nourriture dans le foyer nécessiterait, dans un système circulaire, la mise en place d'une exportation d'urine ;

- les éco-villages suédois sont le cas le plus répandu de mise en œuvre de séparation à la source. Une densité d'habitat relativement faible et une proximité avec des territoires agricoles a systématiquement été retrouvée dans ces éco-villages. Les ressources matérielles et énergétiques mobilisées sont plus importantes mais restent toutefois assez minimales et le niveau technologique également. Les cuves ou bâches de stockage sont l'élément fixe le plus imposant mais il reste relativement modeste (quelques mètres cubes par foyer). Le transport des urines jusqu'à leur lieu de valorisation, comme nous l'avons indiqué à la section précédente (section 4.2.4), pourra constituer un élément relativement intensif en ressources mais finalement plutôt caractéristique du système transport (cf. sous-section 4.2.4.2). La gestion des urines requiert un savoir-faire plus développé (cf. sections précédentes de ce chapitre) mais encore aisément accessible ;
- le centre-ville dense d'une grande agglomération (typiquement à partir d'un million d'habitants) permet plus difficilement de mettre en œuvre les deux chaînes de gestion précédemment évoquées. En effet, une telle zone urbaine présentera :
 - une densité de population élevée entraînant une rareté de l'espace et rendant difficile la mobilisation d'importants volumes pour le stockage d'urines brutes ;
 - une densité importante d'infrastructures de transport très sollicitées et peu susceptibles d'accueillir aisément le trafic supplémentaire représenté par le transport d'urine ;
 - une distance aux territoires agricoles élevée.

Pour ces trois raisons principales, cette échelle favorise donc les chaînes de gestion dans lesquelles l'urine est concentrée afin de limiter l'espace occupé, la fréquence du transport et les quantités de matière à déplacer jusqu'aux champs. En contrepartie, la concentration des urines nécessite des ressources matérielles et énergétiques importantes pour réaliser ce traitement, une technologie qui peut être plus élevée ainsi qu'un savoir-faire spécifique.

Cette analyse invite à compléter éventuellement la méthodologie de caractérisation des systèmes alimentation/excrétion présentée dans la deuxième partie en incluant une typologie des formes

urbaines. Aucun déploiement de séparation à la source de l'urine dans un contexte urbain dense n'existe à ce jour et il paraît pertinent de confronter l'évaluation des avantages et des limites de la séparation à la source en milieu urbain dense avec son expérimentation dans un territoire.