



École des Ponts

ParisTech

ÉCOLE DES PONTS PARISTECH

L'OR LIQUIDE

L'INNOVATION SOCIOTECHNIQUE EN ASSAINISSEMENT PAR LA MISE EN
SYNERGIE D'ACTEURS LOCAUX : LE CAS DE LA COLLECTE SÉLECTIVE
DES URINES SUR LE PLATEAU DE SACLAY

RAPPORT DE GROUPE D'ANALYSE DE L'ACTION PUBLIQUE

Auteurs:

Arnaud CROLAIS

Mathias LEBIHAIN

Antoine LE GAL

Émilie MAYSONNAVE

Encadrant académique:

Fabien ESCULIER (ENPC)

Encadrants professionnels:

Benoit LEBEAU (EPPS)

Tristan LANDRÉ (EPPS)

COMMANDITÉ PAR L'ÉTABLISSEMENT PUBLIC
PARIS-SACLAY



PARIS-SACLAY
ÉTABLISSEMENT PUBLIC



Clause de non-responsabilité

« L'École des Ponts ParisTech, l'AgroParisTech-Engref et l'EPPS n'entendent donner aucune approbation ni improbation aux thèses et opinions émises dans ce rapport ; celles-ci doivent être considérées comme propres à leurs auteurs. »

Clause de non-plagiat

« J'atteste que ce mémoire est le résultat de mon travail personnel, qu'il cite entre guillemets, référence toutes les sources utilisées et qu'il ne contient pas de passages ayant déjà été utilisés intégralement dans un travail similaire. »

Arnaud Crolais

« J'atteste que ce mémoire est le résultat de mon travail personnel, qu'il cite entre guillemets, référence toutes les sources utilisées et qu'il ne contient pas de passages ayant déjà été utilisés intégralement dans un travail similaire. »

Mathias Lebihain

« J'atteste que ce mémoire est le résultat de mon travail personnel, qu'il cite entre guillemets, référence toutes les sources utilisées et qu'il ne contient pas de passages ayant déjà été utilisés intégralement dans un travail similaire. »

Antoine Le Gal

« J'atteste que ce mémoire est le résultat de mon travail personnel, qu'il cite entre guillemets, référence toutes les sources utilisées et qu'il ne contient pas de passages ayant déjà été utilisés intégralement dans un travail similaire. »

Émilie Maysonnave

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier l'Etablissement public Paris Saclay qui nous a missionnés sur ce sujet « original » et plus particulièrement Tristan Landré et Benoît Lebeau qui nous ont permis de mener ce travail en nous fournissant une zone de réflexion concrète.

Nous voulons aussi remercier Fabien Esculier, notre tuteur académique et porteur du projet OCAPI, qui a réussi à nous faire partager sa passion pour le sujet et nous a permis d'avoir accès à l'ensemble des acteurs. Notre travail d'enquête n'aurait pas été possible sans les conseils avisés de Mathilde Soyer sur la préparation et la conduite des entretiens. Nous tenons à la remercier chaleureusement.

Nous remercions enfin toutes les personnes rencontrées qui ont patiemment répondu à nos nombreuses questions lors des entretiens. Nous voulons souligner l'accueil chaleureux qui nous a été accordé par ces personnes. La grande ouverture d'esprit et la capacité de projection dont ils ont su faire preuve laisse à penser que le projet de collecte sélective pourrait voir le jour prochainement.

Résumé

Dans le contexte de développement du Grand Paris, les contraintes qui pèsent sur l'assainissement vont être exacerbées, en particulier sur le traitement de l'azote dans les eaux usées. Des solutions innovantes et écologiques existent, comme la collecte sélective des urines à la source, qui pourrait faire l'objet d'un projet pilote au sein du cluster Paris-Saclay, aménagé par l'Établissement public Paris Saclay (EPPS). Les urines collectées peuvent alors être valorisées en tant que fertilisant en agriculture grâce à leur forte teneur en éléments azotés et phosphorés. Si des expériences locales de collecte sélective des urines ont été concrétisées à l'étranger, des freins au déploiement d'un projet en France existent : acceptabilité des acteurs, relations de confiance, problématiques économiques, sanitaires, réglementaires, techniques et agronomiques. La mise en synergie des acteurs pourrait passer par la création d'un observatoire en concertation avec la recherche, afin de fournir des garanties aux agriculteurs concernant le risque sanitaire et celui associé aux micropolluants tout en identifiant des produits adaptés à leurs pratiques, et assorti d'une gouvernance reflétant les différentes parties prenantes. Une démarche de conception collective par les acteurs pourrait permettre de répondre aux questions qui restent en suspens (choix du traitement des urines, nature des cultures fertilisées, répartition des responsabilités), pour ensuite organiser la chaîne technique de manière innovante. Plusieurs problématiques devront être levées, comme l'acceptation par les différentes parties prenantes impliquées (usagers, agriculteurs, riverains ou encore consommateurs), ainsi qu'une évolution réglementaire pour encadrer ce système d'assainissement écologique.

Abstract

New constraints on sanitation systems will appear with the development of the Greater Paris project, particularly regarding nitrogen treatment in wastewater. Solutions do exist, for instance urine source separation, which is an innovative and ecological sanitation system. The Paris-Saclay cluster, planned by EPPS, could be the right place to develop a pilot project for this system. The urine collected can be valued as a fertilizer in agriculture, thanks to its concentration in important plant nutrients : nitrogen and phosphorus. Pilot projects were successfully implemented abroad but obstacles to the development of a project in France exist : stakeholders' acceptability, relationships of trust, economic, sanitary, legislative, technical and agronomic issues. Building a synergy among the stakeholders requires two important elements. First, a research observatory must be deployed to reassure farmers about sanitary and micro-pollutants risks thanks to scientific data and identify the urine-based products suited for farming practices. Secondly, the construction of shared and representative governance is necessary. The stakeholders could perform a collaborative approach to answer the remaining questions such as the choice of the adequate treatment of urine, the type of fertilized crops, and the responsibility assignment. Then they could organize the technical system in an innovative way. Social acceptance of key stakeholders such as users, farmers, local residents and consumers, and the evolution of legislation to give a framework to this new sanitation system are important issues to be tackled.

Glossaire

ADEME :	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AESN :	Agence de l'Eau Seine Normandie
AEV :	Agence des Espaces Verts
AMO :	Assistance à maîtrise d'ouvrage
ARS :	Agence régionale de santé
CGCT :	Code général des collectivités territoriales
CIPAN :	Culture intermédiaire piège à nitrate
CSP :	Code de la santé publique
CU :	Code de l'urbanisme
DBO :	Demande Biologique en Oxygène
DBO5 :	Demande Biologique en Oxygène à 5 jours
DCE :	Directive cadre sur l'eau
DDT :	Direction départementale des territoires
DERU :	Directive relative au traitement des eaux résiduaires urbaines
DEU :	Dose Equivalent Urine
DSP :	Délégation de Service Public
EIT :	Ecologie Industrielle Territoriale
EPCI :	Etablissement Public de Coopération Intercommunale
EPPS :	Etablissement Public Paris-Saclay
FNSEA :	Fédération Nationale des Syndicats d'Exploitants Agricoles
GAAP :	Groupe d'Analyse d'Action Publique
KCP :	Knowledge - Conception - Proposition
MAFOR :	MAtière Fertilisante d'Origine Résiduaire
MES :	Matière en suspension
NIMBY :	« Not In My BackYard », « Pas dans mon jardin »
MOE :	Maîtrise d'oeuvre

OCAPI :	Optimisation des cycles Carbone, Azote et Phosphore en ville
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
PSDR :	Pour et Sur le Développement Régional
OIN :	Opération d'Intérêt National
SAU :	Surface Agricole Utile
SDAGE :	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SIAAP :	Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne
SIAHVY :	Syndicat Intercommunal pour l'Aménagement Hydraulique de la Vallée de l'Yvette
SIAVB :	Syndicat Intercommunal d'Assainissement du Val de Bièvre
SIVOA :	Syndicat Intercommunal de la Vallée de l'Orge Aval
STEP :	STation d'EPuration des eaux usées
UNIFA :	Union des Industries de la Fertilisation
VUNA :	Valorisation of Urine Nutrients in Africa
ZAC :	Zone d'Aménagement Concerté
ZPNAF :	Zone de Protection Naturelle, Agricole et Forestière

Table des matières

	Page
Introduction	1
I Contexte de la collecte sélective d'urines	5
I.A Récolter l'urine : pourquoi ?	5
I.A.1 Des cycles minéraux fragilisés : l'azote et le phosphore	5
I.A.2 L'azote au coeur du problème de l'assainissement collectif centralisé	7
I.A.3 Un modèle d'assainissement bientôt à bout de souffle : l'impact du Grand Paris et du changement climatique	12
I.B Récolter l'urine : comment ?	14
I.B.1 Le principe de la collecte sélective des urines	14
I.B.2 Les différents traitements possibles de l'urine	19
I.C Récolter l'urine : pour qui ?	26
I.C.1 Les urines : un potentiel de valorisation comme apport d'éléments minéraux	26
I.C.2 La gestion de la fertilisation : un enjeu important pour le monde agricole	30
I.D Récolter l'urine : où ?	35
I.D.1 Présentation du projet de Paris-Saclay	35
I.D.2 La gestion de l'eau au coeur du projet	40
I.D.3 Une activité agricole sur le plateau de Saclay, marqueur de l'identité du territoire	41
II Méthodologie de l'étude	43
II.A Méthodologie globale	43
II.B Réalisation d'une typologie	44
II.C Méthodologie des entretiens semi-directifs et constitution d'un guide d'entretien	48
II.C.1 Des hypothèses formulées pour chaque catégorie d'acteur	48
II.C.2 Le jeu d'acteurs	48
II.D Limites	51
III Analyse socioéconomique de la collecte sélective d'urines	53
III.A Cartographie des acteurs	53
III.A.1 Acteurs de production - usagers	54
III.A.2 Acteurs du bâtiment	58

III.A.3 Acteurs du transport	64
III.A.4 Acteurs du traitement	69
III.A.5 Acteurs de la valorisation	73
III.B Confrontation des logiques d'acteurs en vue d'établir une chaîne fonctionnelle	88
III.B.1 Scénario S1 : la filière de base d'hygiénisation des urines	89
III.B.2 Scénario S2 : la filière de compostage de déchets verts	92
III.B.3 Scénario S3 : La filière d'engrais liquide azoté	93
III.B.4 Scénario S4 : La filière d'engrais solide phosphaté	97
III.B.5 Scénario S5 : Un traitement des urines dans les STEPs existantes .	99
III.B.6 Éléments supplémentaires sur les acteurs	100
III.B.7 Conclusions	100
III.C Analyse technico-économique	101
III.C.1 Présentation de l'étude	101
III.C.2 Résultats du modèle	104
III.C.3 Comparaison des scénarios grâce à l'analyse socio-économique . . .	120
IV Conditions nécessaires à l'émergence d'une collecte sélective des urines	121
IV.A Construire l'acceptabilité pour faire émerger le projet	121
IV.A.1 Les éléments de construction de l'acceptabilité	122
IV.A.2 L'acceptabilité de l'utilisateur	123
IV.A.3 L'acceptabilité des agriculteurs	128
IV.A.4 L'acceptabilité des consommateurs/riverains	130
IV.A.5 Le rôle de l' élu	131
IV.B Réglementation de l'assainissement : une évolution nécessaire	133
IV.B.1 Faisabilité juridique de la collecte sélective des urines	133
IV.B.2 Quel statut pour l'urine ?	134
IV.C Les filières retenues : du prototype au Grand Paris	136
IV.C.1 Présentation des filières retenues	136
IV.C.2 Comment faire émerger cette innovation collective ?	140
IV.D Préconisations à l'intention du décideur	147
Éléments de conclusion	150
A Questionnaire destinés aux usagers - réponses d'une étudiante suédoise	152
B Recueil des jeux d'acteurs	153
B.A Le Sommer Environnement	153
B.B SEDE Environnement	154
B.C SIAVB	154
B.D Veolia	155
B.E Un agriculteur	155

C	Modélisation économique	156
C.A	Production	156
C.B	Collecte	158
C.B.1	Immeubles	158
C.B.2	Toilettes	158
C.B.3	Canalisation	159
C.B.4	Cuve	159
C.C	Transport	160
C.C.1	Vidange des cuves	160
C.C.2	Service en régie	162
C.C.3	Service délégué à une entreprise de transport	164
C.D	Traitement	164
C.D.1	Stockage	164
C.D.2	Nitrification/Distillation	165
C.E	Valorisation	167
C.F	Comparaison à la filière d'assainissement en STEP	168
D	Analyse réglementaire	170
D.A	Installation d'un système de collecte sélective	171
D.A.1	Système d'assainissement collectif ou non collectif?	171
D.A.2	La valorisation de la l'urine collectée au regard de la loi sur l'eau . .	173
D.B	Responsabilité du système de collecte sélective des urines et de son fonc- tionnement	174
D.C	Les conditions de valorisation de l'urine collectée : la question du statut de l'urine.	176
	Table des figures	179
	Table des tableaux	180
	Bibliographie	184

Introduction

Les projections du Grand Paris prévoient une urbanisation croissante ainsi qu'une augmentation de la population d'environ 1 million d'habitants à l'horizon 2030. Cette évolution majeure de la région parisienne marquera l'avenir du plateau de Saclay, où se met en place actuellement le Cluster Paris-Saclay. Celui-ci doit assurer un rayonnement académique et économique au niveau national comme international, avec l'installation de nombreux bâtiments de recherche et développement, public comme privé, ainsi que d'établissements supérieurs de recherche. L'augmentation globale de la population de la région parisienne amène le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (SIAAP) à s'interroger sur l'avenir de ses capacités d'assainissement. En effet, l'augmentation de la population couplée à une probable baisse des débits d'étiage de la Seine en lien avec le réchauffement climatique, conduira à un effet ciseau sur les capacités des stations d'épuration à traiter les flux d'azote et dans une moindre mesure les flux de phosphore provenant des eaux usées. Le risque environnemental encouru est alors de ne pouvoir traiter convenablement ces flux provenant des eaux usées, conduisant à des rejets plus importants dans les milieux et par voie de conséquence à leur eutrophisation. Ce raisonnement amène le SIAAP à questionner son paradigme de gestion centralisée de l'assainissement : vaut-il mieux construire une nouvelle tranche sur la station d'épuration d'Achères, qui est un investissement très coûteux, ou repenser le système d'assainissement et se diriger vers une solution décentralisée ?

L'Etablissement public Paris-Saclay (EPPS) est l'entité publique chargée d'assurer l'aménagement et le développement du Cluster présent sur le plateau. Afin de maîtriser l'impact environnemental d'un tel projet, l'EPPS affiche la volonté de mettre en place un système de gestion durable des eaux, et en particulier pour le volet assainissement. Dans ce contexte, le SIAAP et l'EPPS réfléchissent à une évolution décentralisée de l'assainissement en émettant l'idée de mettre en place une collecte des urines à la source, afin de les séparer du reste des eaux usées. En effet, les urines concentrent l'essentiel de l'azote et du phosphore contenus dans les eaux usées. Dériver ces flux en séparant les urines permettrait d'alléger le système centralisé d'assainissement pour éviter les lourds investissements évoqués. Mais cette séparation implique de traiter séparément les urines. À l'étranger, des expériences d'assainissement écologiques employant cette méthode de séparation des urines à la source ont privilégié la piste d'une valorisation agricole. En effet, l'azote et le phosphore sont deux éléments nutritifs indispensables à la croissance des plantes. Les urines représentent donc un stock potentiel important de fertilisant assez peu valorisé par les stations d'épuration et pourraient se substituer aux autres sources d'azote et de phosphore déjà employées par les agriculteurs, comme les engrais de synthèse dont

la fabrication très énergivore, et reposant sur des ressources finies (hydrocarbures, mines de phosphates...), pose aussi des problèmes écologiques.

L'étude que nous présentons ici fait suite au travail exécuté par Amandine Caby en 2013 lors d'une mission professionnelle encadrée par le SIAAP afin de juger de l'intérêt et de l'opportunité de mettre en place une collecte sélective des urines dans un milieu urbain dense, qui correspond au contexte que doit gérer l'EPPS. En réponse aux travaux d'Amandine Caby, un projet de recherche nommé OCAP (Optimisation des Cycles de l'Azote et du Phosphore en ville), dans lequel s'inscrivent les travaux de notre tuteur, a été lancé en 2015 afin d'analyser les évolutions possibles des systèmes d'assainissement et d'étudier les freins et leviers au déploiement de systèmes alternatifs. Amandine Caby concluait en recommandant la mise en place d'un projet pilote avant d'envisager un développement d'une filière à l'échelle de la région parisienne. Ce projet pilote pourrait ainsi avoir toute sa place sur le plateau de Saclay, où l'exigence d'un développement concerté entre d'une part un environnement marqué historiquement par le monde agricole et d'autre part l'aménagement d'une Opération d'intérêt national trouverait une concrétisation dans un système d'assainissement basé sur la séparation des urines à la source.

En liaison avec le projet de recherche OCAP, dans lequel s'inscrit donc notre travail notre commanditaire, l'EPPS, nous a proposé d'étudier dans le cadre de ce Groupe d'Analyse d'Action Publique les mécanismes et moyens de la mise en œuvre sur le plateau de Saclay d'une synergie d'acteurs locaux pour favoriser l'émergence de cette innovation sociotechnique dans le domaine de l'assainissement. Afin de répondre à ce sujet, nous avons envisagé plusieurs questions : quels sont les verrous et leviers propres à chaque acteur d'une filière de séparation des urines ? Comment construire collectivement une chaîne technique depuis la collecte jusqu'à la valorisation ? Quelles sont les conditions socio-économiques pour mettre en œuvre une synergie et comment la puissance publique peut-elle agir ? Quel modèle économique pourrait être envisagé pour rendre viable la filière ? Nous avons choisi d'y répondre en employant une méthodologie couvrant plusieurs angles d'attaque. Nous avons tout d'abord réalisé une analyse bibliographique, en particulier pour traiter des acteurs jouant un rôle crucial dans la filière sans intervenir directement dans la chaîne technique (usagers, élus. . .). Afin de comprendre les logiques d'acteurs et leurs potentielles articulations, nous sommes allés à leur rencontre en réalisant une série d'entretiens. Enfin, nous avons conçu une modélisation économique de différents scénarios de filières afin de dégager les déterminants de la viabilité d'un modèle économique.

Notre rapport s'organise en quatre parties distinctes. Nous rappelons tout d'abord les éléments contextuels d'un assainissement écologique reposant sur la séparation à la source des urines. Cela nous permet d'introduire dans une seconde partie notre méthodologie, construite afin de valider ou d'infirmer des hypothèses formulées sur la base des éléments contextuels. La troisième partie livre l'exploitation de notre analyse socio-économique et retient les hypothèses pertinentes. La dernière partie ouvre sur nos préconisations, notamment en matière d'action publique, afin de permettre l'émergence de cette filière innovante d'assainissement.

Chapitre I

Contexte de la collecte sélective d'urines

I.A Récolter l'urine : pourquoi ?

I.A.1 Des cycles minéraux fragilisés : l'azote et le phosphore

L'azote et le phosphore sont deux constituants essentiels de la nourriture. Un être humain doit ingérer de l'azote et du phosphore pour ses besoins physiologiques. Ces nutriments, qui sont présents dans les sols, sont captés par les végétaux, que mangeront les hommes ou les animaux. Ces minéraux finiront par se retrouver dans les déjections des hommes et des animaux, loin des sols où les végétaux ont besoin de ces nutriments. L'activité humaine intensive a bouleversé ces cycles en augmentant les besoins en ces minéraux pour avoir des plantes qui poussent plus vite et mieux mais aussi en séparant les zones de culture, qui ont besoin de ces nutriments, des zones d'élevages et des zones urbaines, qui les rejettent. Et après ?

I.A.1.a Le cycle de l'azote

L'azote est l'un des principaux constituants des acides aminés, nucléiques et donc des protéines. Il joue un rôle essentiel dans la transformation de la matière minérale en matière vivante, transformation que les hommes et animaux ne peuvent effectuer par eux-mêmes et qui doivent donc trouver ces nutriments dans les plantes capables de la réaliser [UNIFA, 2005]. L'azote est donc un élément essentiel de l'alimentation, tout en étant à la base de la croissance des plantes et de leur qualité (en déterminant la valeur protéique des céréales par exemple). Une partie des besoins azotés des végétaux est apportée naturellement par fixation biologique d'azote dans les sols. Ce processus ne couvre toutefois que la moitié des besoins des cultures [Esculier et al., 2014]. Le reste des besoins est alors couvert par l'emploi d'engrais azotés. Si l'azote est une ressource que l'on peut quasiment considérer comme inépuisable puisque 80% de l'air qui nous entoure en est composé, il y est présent sous forme de diazote, N_2 , et ne peut être assimilé par les plantes que sous forme de nitrates NO_3^- . Le passage du premier état au second est possible depuis la découverte du procédé d'Haber-Bosch, toutefois hautement énergivore puisqu'il faut fournir 12kWh [Larsen et al., 2013] pour produire 1kg d'azote ammoniacal [Larsen et al., 2013], soit l'équivalent de 15 montées du Mont Blanc depuis Chamonix à la seule force des jambes ! La disponibilité d'engrais azotés est donc étroitement lié à notre

capacité à produire de l'énergie, véritable enjeu du XXI^{ème} siècle.

I.A.1.b Le cycle du phosphore

Le phosphore, lui, joue un rôle-clé dans la croissance de la plante, en stimulant la photosynthèse en synergie avec l'azote, dans le développement de ses racines, favorisant ainsi son alimentation et sa précocité, mais aussi dans la rigidité des tissus, qui sont plus résistants aux maladies et parasites [UNIFA, 2005]. Le phosphore est indispensable à l'agriculture dans la mesure où il n'existe pas de nutriments alternatifs susceptibles de combler les apports nécessaires aux végétaux. Il constitue donc un élément-clé de la production mondiale de nourriture et de biocarburants. Seulement, en France, la plupart des stocks primaires de phosphore des sols agricoles ont été totalement épuisés et l'intégralité du phosphore agricole français est issu d'engrais phosphatés [Esculier et al., 2014]. Ce phosphore, qui se trouve sous forme de roches phosphatées, extractible dans les mines, existe en ressources finies, qui atteindront leur pic autour des années 2030-2040 et sont susceptibles d'être épuisées dans une centaine d'année. Depuis les années 1950, 900 Mt de phosphore ont été extraites des mines et la plupart a fini dans les aquifères, les lacs, les rivières et les océans par ruissellement, le rendant potentiellement inaccessible aux générations futures [Larsen et al., 2013]. Avec une accélération de la consommation de phosphore, atteignant 167 Mt par an en 2011 [van Enk and al., 2011], le cycle du phosphore est mis à mal et devient une source importante de préoccupation. Un groupe de chercheurs a listé les problèmes environnementaux auxquels fait face la planète [Steffen et al., 2015] et le changement climatique, qui est un problème fondamental, n'arrive qu'en troisième position. En premier, nous trouvons la perte de la biodiversité et en deuxième, la perturbation du cycle de l'azote et du phosphore.

De plus, presque toutes les mines de phosphore se trouvent en dehors de l'Europe, le Maroc, la Chine et les États-Unis regroupant à eux trois 65% de la production mondiale de phosphore. L'Union européenne est donc très dépendante de l'importation de cette ressource, dont les réserves ne font que s'appauvrir et le prix qu'augmenter. Cette industrie ne pourra éternellement compter sur ces réserves et doit donc considérer le recyclage du phosphore comme une priorité [van Enk and al., 2011].

I.A.1.c L'urine, un moyen de reconnecter l'aire urbaine au monde agricole

L'intensification de l'activité humaine, le besoin de plantes toujours plus résistantes, à la croissance plus forte et plus rapide, tout cela a amené à briser ces cycles minéraux en rendant obligatoire le recours à des engrais minéraux issus d'une production industrielle. Toutefois, nous n'avons raisonné jusqu'alors que sur les flux qui arrivaient jusqu'à notre assiette, soit directement par l'intermédiaire des végétaux, céréales, légumes soit indirectement avec les produits animaliers, qu'en est-il des flux qui partent de l'homme ? Quand

nous observons les flux sortants, nous voyons que nous rejetons ces nutriments à plus de 98%, mais sous une forme dégradée [Esculier et al., 2014] et il en va de même pour les animaux. Récupérer ces rejets, c'est réduire d'un tiers les besoins en engrais azotés et d'un quart les apports phosphatés. Or une grande partie de ces flux sortants se fait par les urines et les fèces. Une reconnexion des zones d'élevages et des zones de culture se fait déjà avec l'utilisation de fumiers et de lisiers. La filière des boues de station d'épuration constitue, elle, une tentative de reconnexion de l'aire urbaine au monde agricole.

Toutefois, lorsque nous regardons la composition des rejets d'un être humain (FIGURE I.1), nous remarquons que les nutriments se retrouvent en grande partie dans les urines avec 88% de l'azote et 67% du phosphore.

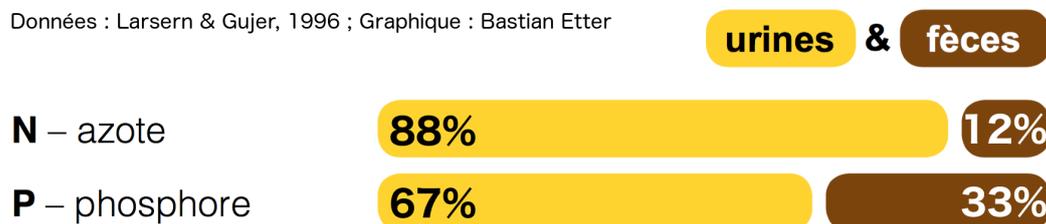


FIGURE I.1 – Répartition de l'azote et du phosphore dans les urines et les fèces

Récupérer les urines humaines est donc un moyen efficace de reconnexion de nos villes avec les terres agricoles et constitue une première dans le recyclage des ressources phosphore et dans l'allègement du coût énergétique de productions d'engrais azotés.

I.A.2 L'azote au coeur du problème de l'assainissement collectif centralisé

En 2008, 82% des logements français sont raccordés à un réseau d'assainissement collectif et cette proportion tend à augmenter [Grégoire and Chaussénéry, 2008]. L'assainissement désigne l'ensemble des moyens de collecte, de transport et de traitement d'épuration des eaux usées et des eaux pluviales avant leur rejet dans les rivières ou dans le sol [Melquiot, 2003]. Les eaux usées, qui sont le mélange des eaux grises, issues des lavabos, des lave-linges et des douches, et des eaux noires, issues des toilettes, sont des effluents pollués et polluants. Avec l'accélération de l'urbanisation et la densification urbaine d'après guerre, les rejets d'eaux usées vont fortement augmenter et détériorer les milieux récepteurs (sols, rivières, ...). La nécessité de passer d'un mode d'assainissement individuel à un mode d'assainissement collectif se fait ressentir. Les eaux usées sont alors transportées dans des canalisations souterraines vers des stations d'épuration (STEPs) pour être traitées et dépolluées afin de rejeter au milieu naturel une eau compatible avec le bon état de ce dernier.

I.A.2.a Le traitement du phosphore et de l'azote dans les STEPs

Une fois arrivées en station d'épuration, les eaux usées vont être traitées afin de réduire les niveaux d'azote et de phosphore aux niveaux imposés par la Directive n°91/271 du 21/05/91 relative au traitement des eaux résiduaires urbaines.

I.A.2.a.i Le traitement du phosphore

Le phosphore est traité en plusieurs étapes [Caby, 2013] :

- une décantation primaire permet d'éliminer 20 à 30% du phosphore des eaux usées ;
- une autre partie du phosphore est consommé par les bactéries utilisées pour le traitement biologiques des effluents.

Deux traitements sont ensuite possibles :

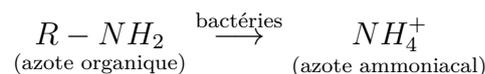
- un traitement biologique avec un stress des bactéries en vue d'une sur-assimilation du phosphore ;
- un traitement physico-chimique par ajout de coagulant (chlorure ferrique) et de flocculant (polymère) afin de faire précipiter le phosphore.

Le traitement du phosphore n'est pas un facteur limitant des stations d'épuration, puisque de fortes quantités de réactifs permettent d'absorber des flux importants de phosphore. Le bilan carbone de la réaction peut toutefois en pâtir. Le plus difficile étant de pouvoir recycler le maximum de phosphore à travers la filière classique des boues, qui affiche aujourd'hui sur Paris un retour de 40% vers les terres agricoles par la valorisation agricole des boues [Esculier et al., 2014].

I.A.2.a.ii Le traitement de l'azote

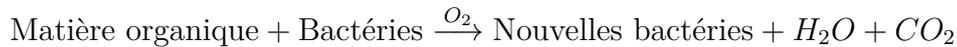
Le traitement de l'azote est lui beaucoup plus problématique et est au coeur de l'évolution des STEPs depuis leur création (FIGURE I.2). Originellement, l'azote subissait trois grandes opérations [Héduit and al., 2001] :

- l'ammonification :



Sous l'action des bactéries du bassin d'aération et par hydrolyse, l'azote organique, qui se trouve dans les urines principalement sous forme d'urée et d'acides aminés, est transformé en azote ammoniacal ;

— l'assimilation :



25% de l'azote est utilisé comme nutriment par les bactéries pour éliminer la charge polluante organique ;

— la décantation : l'azote organique restant après passage dans le bassin d'aération comprend l'azote inclus dans les matières en suspension et l'azote organique soluble non ammonifiable ou azote organique soluble « réfractaire ». Une décantation est opérée pour extraire l'azote contenu dans les matières en suspension. 5 à 10% de l'azote est éliminé par ce processus et plus en temps de pluie.

Toutefois, dans le but de réduire toujours plus la quantité d'azote présente dans les eaux épurées, une étape de nitrification s'insérera dans les pratiques des acteurs de l'assainissement à partir des années 70 (2007 à Achères), qui aboutira à une multiplication du volume des bassins de traitement d'un facteur 3 à 4. Cette nitrification consiste en la double oxydation de l'azote par des bactéries (Nitrosomas pour la nitritation, première oxydation, et Nitrobacter pour la nitratation, deuxième oxydation).



Une étape de dénitrification avec un bassin d'anaérobie seront ajoutés à partir des années 80 pour réduire les nitrates en azote moléculaire N_2 à l'aide de matière carbonée selon l'équation :



Une dernier bassin sera parfois ajouté pour la déphosphatation biologique (le bassin d'anoxie). Cette étape est devenue réglementaire en 1991 avec le directive DERU pour les zones sensibles à l'eutrophisation comme le bassin de la Seine. L'application de cette directive, qui devait être effective en 1998, a finalement été faite en 2012 sur l'agglomération parisienne et la France a échappé de justesse à une amende exorbitante de l'Union Européenne pour non-respect de la directive DERU. C'est donc bel et bien l'azote qui a dicté l'évolution des stations d'épuration depuis leur construction, ajoutant sans cesse des coûts énergétiques et de traitement toujours plus conséquents.

Cette difficulté à traiter l'azote se traduit de façon concrète puisqu'en 2011, les stations d'épuration du SIAAP étaient déjà à un niveau de charge de 105%, soit en surcharge.

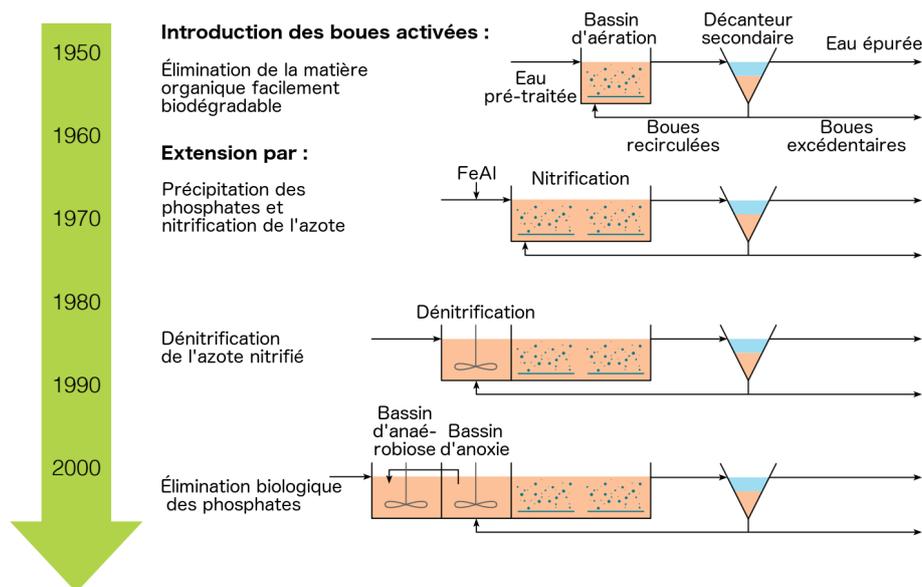


FIGURE I.2 – Une évolution des stations d'épuration dictée par le traitement de l'azote (adapté d'un schéma de l'EAWAG)

I.A.2.b Les effets écologiques d'un traitement sous-efficace de l'azote

En entrée de station d'épuration, la charge moyenne de pollution des eaux est mesurée à partir des niveaux de DBO₅ (demande biologique en oxygène sur 5 jours, indicateur du taux de pollution des eaux), d'azote et de phosphore. La proportion idéale d'un système de traitement des eaux usées est de 100 :5 :1 (DBO :N :P). Or le niveau standard des eaux usées entrantes est de 100 :19 :2 [Caby, 2013], ce qui indique un excès d'azote et de phosphore en amont. Au problème présenté ci-dessus de la difficulté du traitement de l'azote s'ajoutent des niveaux importants en amont de station, obligeant les systèmes d'épuration à travailler dans des régimes à efficacité réduite. Dans ces conditions, il est très difficile et coûteux en énergie d'abaisser les concentrations d'azote rejetés aux niveaux réglementaires.

Cependant, le respect des niveaux réglementaires est indispensable au bon état écologique des cours d'eau. En effet l'azote et le phosphore sont des nutriments dont la présence excessive entraîne des déséquilibres trophiques des cours d'eau pouvant aller jusqu'à leur eutrophisation [Billen and Garnier, 2008]. Comme tous les végétaux, les algues se nourrissent d'azote et de phosphore et vont croître jusqu'à envahir les cours d'eau (FIGURES I.3 et I.4).

Il en résulte un milieu pauvre en nutriments et qui reçoit peu de lumière, bloquée par le lit d'algue en surface. Les plantes du milieu meurent et leur décomposition consomme l'oxygène présent dans l'eau, occasionnant une dégradation du milieu et une réduction de la biodiversité.



FIGURE I.3 – Eutrophisation d'une rivière française (Source : <http://www.cpepesc.org>)



FIGURE I.4 – Algues vertes sur une plage bretonne (Source : <http://www.plancton-du-monde.org>)

I.A.2.c L'urine : l'effluent bloquant

Le traitement de l'azote et le recyclage du phosphore sont des problématiques aigües pour le système d'assainissement actuel. Les conséquences d'une mauvaise gestion de l'épuration de ces nutriments peuvent aboutir à des désastres écologiques en plus de ne pas constituer de solution à la perturbation des cycles azote et phosphore. Comment y remédier ?

Lorsque l'on observe en détail d'où viennent ces minéraux dans les eaux usées (FIGURE I.5), nous nous apercevons que l'axe de travail principal sur lequel agir semble être les urines. Alors qu'elles ne constituent qu'1% du volumes des eaux usées, elles contiennent plus de 75% des nutriments Azote/Phosphore/Potassium avec une grande quantité d'azote, facteur limitant des STEPs.

Enlever les urines en amont des stations d'épuration devient alors une solution naturelle pour soulager les stations d'épuration. L'avantage d'une collecte sélective des urines serait d'une part d'éviter une dilution très forte (facteur 100) de la source principale d'azote dans les eaux usées. D'autre part, séparer les urines des fèces permet d'éviter le plus possible de contaminer les urines, quasi-stériles, et de faciliter le traitement en aval.

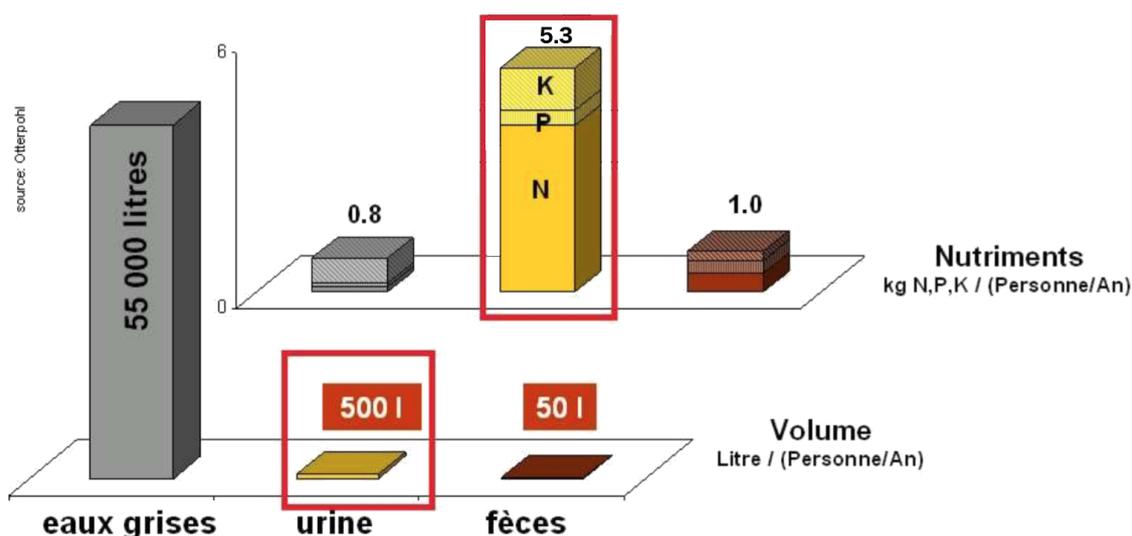


FIGURE I.5 – Répartition de la charge volumique, de l'azote et du phosphore dans les eaux usées [Caby, 2013]

I.A.3 Un modèle d'assainissement bientôt à bout de souffle : l'impact du Grand Paris et du changement climatique

Année après année, le ratio francilien DBO :N :P, facteur d'efficacité des systèmes d'épuration, ne cesse d'augmenter en raison d'une baisse de la DBO consécutive d'une baisse de consommation d'eau potable et d'une augmentation du temps passé dans les émissaires où elle se dégrade. À cela s'ajoute une amélioration de la collecte des eaux usées avec un réseau plus performant et de meilleurs comportements avec une baisse des déversements directs dans la Seine.

Dans ce contexte de pression azotée et phosphatée croissante, le futur apparaît inquiétant : le Grand Paris, qui induit une densification de Paris extra-muros, et le changement climatique, qui réduit les débits d'étiage des cours d'eau, menacent la pérennité du modèle d'assainissement actuel.

I.A.3.a L'impact du Grand Paris

Dans son étude réalisée pour le SIAAP en 2013 [Caby, 2013], Amandine Caby a analysé l'impact du projet du Grand Paris sur le stress azoté des stations d'épuration sur le territoire du SIAAP. Le projet du Grand Paris, initié en 2007, vise à renforcer la région d'Île-de-France en combinant attractivité économique et qualité de vie des résidents. La loi n° 2010-597, du 3 juin 2010, relative au Grand Paris, fixe comme objectif la construction de 70 000 logements par an, ce qui aura pour effet final une augmentation de 10% de la population sur le territoire du SIAAP. Le taux de charge des stations en azote est estimé en 2030 à 109%, donc une augmentation de la charge azotée en amont, qui obligera le SIAAP à augmenter la taille de ses installations.

I.A.3.b L'impact du changement climatique

À cette augmentation de la charge azotée s'ajoute les effets du changement climatique qui induira une baisse du débit des cours d'eau. Des débits décroissants sont synonymes d'une diminution de la capacité de dilution des cours d'eau et donc un besoin d'une épuration encore plus performante sur les rejets de nutriments et de polluants, quand elle peine d'ores et déjà à atteindre les niveaux fixés à l'heure actuelle par la réglementation. Si les installations ne peuvent gagner en performance, l'eau en amont aura des niveaux d'azote plus élevé ce qui ne fera qu'accentuer le problème en aval.

I.A.3.c La place de la collecte sélective d'urine

Les opérateurs d'assainissement vont donc faire face dans le futur à l'effet combiné de l'augmentation des charges d'azote à traiter et de la diminution des charges à rejeter en Seine dans l'optique de maintien du bon état. Ce problème ne pourra être affronté dans le paradigme actuel d'assainissement qu'avec des investissements colossaux dans ses infrastructures de traitement énergivores et coûteuses.

Dans la mesure où l'azote étant la seule charge à saturation dans les STEPs et où cet azote est essentiellement apporté dans les réseaux d'assainissement par les urines humaines, la mise en place d'une collecte sélective des urines sur le territoire du Grand Paris permettrait de soulager les stations de leur stress azoté.

Cette collecte aurait aussi pour bénéfice de recueillir une quantité importante de l'azote et du phosphore rejeté par les humains et de répondre au besoin de reconnecter l'aire urbaine au monde agricole en ramenant à la terre les nutriments indispensables à la vie humaine, animale et végétale.

I.B Récolter l'urine : comment ?

I.B.1 Le principe de la collecte sélective des urines

Dans cette partie, nous présentons le principe de la collecte sélective des urines, en détaillant le système technique associé, en présentant les projets existants à l'étranger et enfin en fournissant des chiffres sur les performances de ce système. Notons que la présentation du système technique qui suit ne se veut pas exhaustive et s'appuie sur une partie des réalisations étrangères : celles pouvant s'adapter au contexte de l'assainissement français tel que nous l'analysons. D'autres systèmes existent (systèmes sous-vide, séparation des urines postérieure à la cuvette etc.), non développés ici. De plus, ce domaine fait aujourd'hui l'objet de peu d'investissements, ce qui laisse supposer qu'à l'avenir, si la séparation des urines à la source se déploie, des systèmes techniques innovants seront développés.

I.B.1.a Le système technique

I.B.1.a.i Des toilettes spécifiques

La collecte sélective des urines est effectuée *à la source*, c'est-à-dire en séparant les urines et les fèces grâce à deux évacuations installées sur des toilettes spécifiques. Il est possible de valoriser les urines, notamment en agriculture (cf. PARTIE I.C), car elles sont riches en nutriments et naturellement quasi-stériles, il est donc particulièrement important de veiller à :

- Réduire au minimum la dilution par l'eau de la chasse ou lors du nettoyage des toilettes ;
- Éviter au maximum le contact entre urines et fèces. En effet, les fèces sont responsables de la transmission de maladies et contaminent les urines en cas de contact.

Avec ces deux points de vigilance, il s'agit donc de concevoir un modèle de toilettes innovant permettant la séparation effective des urines des matières fécales.

Tout d'abord, la solution la plus simple et la plus efficace pour collecter des urines non diluées et qui est déjà commercialisée est celle des urinoirs secs. L'inconvénient est que cet appareil sanitaire n'est utilisable que par les hommes et l'installation dans les logements d'urinoirs est rare.

Concernant les toilettes de forme « classique », deux cuvettes doivent être prévues : une à l'avant permet de récolter les urines, l'autre à l'arrière permet de récolter les fèces. Le principe de fonctionnement est illustré en FIGURE I.6. Ces toilettes sont également appelées « NoMix » par le laboratoire suisse EAWAG et dans une partie de la littéra-

ture. Ces toilettes peuvent être équipées d'une chasse d'eau mais aussi être sèches : des entreprises spécialisées incluent ainsi dans leur gamme de toilettes sèches des toilettes à séparation sans eau.

Plusieurs modèles de toilettes à séparation ont été développés dans les pays pratiquant la séparation des urines à la source (voir partie suivante pour le détail des réalisations). Certains prévoient une évacuation avec un peu d'eau de chasse (comme le modèle suédois Gustavsberg). D'autres, comme le modèle allemand Roediger (FIGURE I.7), prévoient un système de fermeture de l'évacuation des urines, la trappe s'ouvre quand l'utilisateur s'assoit sur les toilettes : ainsi, les urines récoltées ne sont pas diluées, mais tous les usagers (hommes compris) doivent s'asseoir complètement sur la cuvette pour uriner [Caby, 2013].

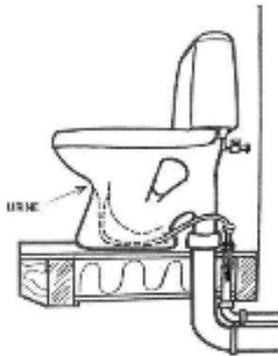


FIGURE I.6 – Principe de fonctionnement de toilettes à séparation d'urines [Caby, 2013]



FIGURE I.7 – Modèle de la firme allemande Roediger de toilettes à séparation (Source : www.green-talk.fr)

Il existe un problème important concernant la maintenance et l'entretien : la formation de struvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) par précipitation dans les tuyaux, conduisant à l'obstruction de ceux-ci. Dès la conception, il faut prévoir une pente suffisante pour l'écoulement des urines et un diamètre minimum des tuyaux (environ 65mm) [Caby, 2013]. Il faut également prévoir d'entretenir régulièrement le système avec de l'acide pour évacuer la struvite.

I.B.1.a.ii Collecte dans une cuve en pied d'immeuble

En bas d'immeuble ou de maison, les urines sont récoltées dans une cuve, le plus souvent enterrée et mutualisée pour tous les habitants de l'immeuble. Le principe est le même pour les maisons individuelles. En fonction du dimensionnement du projet, la cuve peut être mutualisée à l'échelle de l'îlot, soit plusieurs bâtiments.

I.B.1.a.iii Vidange de la cuve et transport des urines

Pour vidanger la cuve, deux solutions apparaissent :

- transport par réseau gravitaire jusqu'à une unité de traitement (l'étape 2 n'est alors pas nécessaire) ;
- transport par camions jusqu'à une unité de traitement.

Nous avons retenu la deuxième solution pour les raisons suivantes : la faisabilité de la construction d'un troisième réseau d'assainissement (en plus des eaux usées et des eaux pluviales) paraît douteuse, pour des raisons techniques (formation de struvite par précipitation des urines brutes sur des longues distances) et économiques [Caby, 2013]. De plus, toutes les expérimentations de ce système ayant réussi ont utilisé un transport des urines par camion. Dans une note de synthèse sur le traitement et le transport des urines collectées séparément des eaux usées, Martina Winker et Felix Tettenborn estiment que le système de transport le plus raisonnable est d'acheminer sur une courte distance les urines vers des cuves (correspondant à la section toilettes-cuve décrite plus haut), puis à transporter les urines de la cuve vers la station de traitement par camion-citerne [Winker and Tettenborn, 2011].

Le système technique proposé pour la séparation des urines à la source est résumé et schématisé en FIGURE I.8. Les fèces et les eaux grises sont toujours traitées par le système d'assainissement classique dont sont retirées les urines collectées.

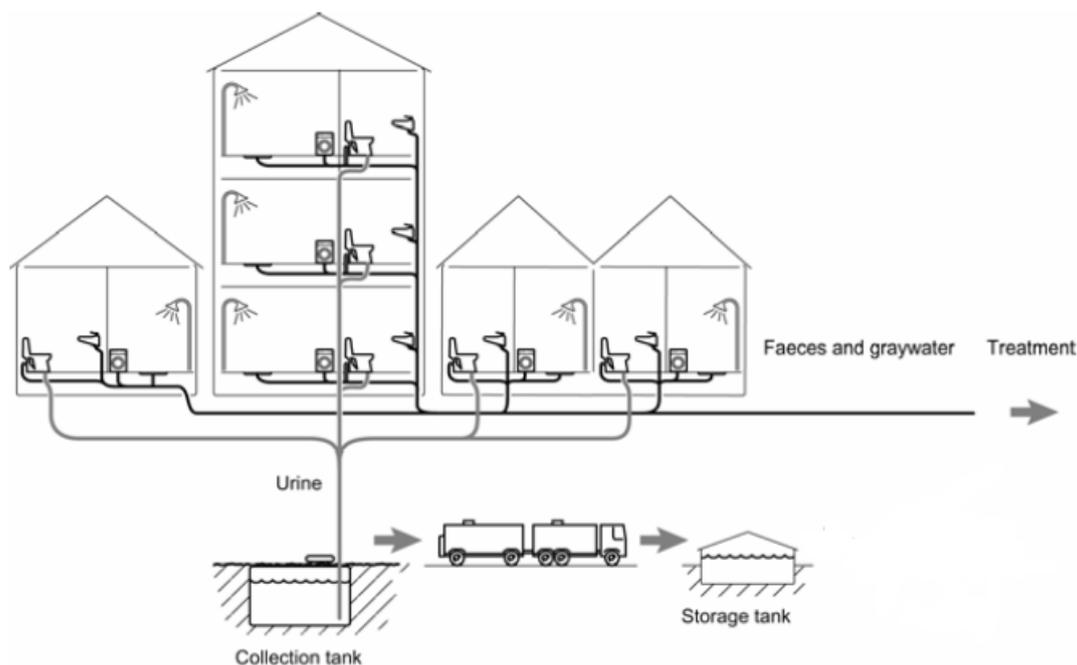


FIGURE I.8 – Système technique de la séparation des urines à la source (Schéma adapté de [Schönning, 2001])

I.B.1.b Les projets existants

Dans son mémoire de thèse professionnelle en 2013, Amandine Caby a mené un travail conséquent pour répertorier les réalisations de séparation des urines à la source. Nous reprenons ici les principaux enseignements de ce travail.

En Europe, la Suède a été pionnière dans le développement de la technique de séparation des urines à la source. Dès les années 90, ce système a été envisagé pour équiper les maisons isolées en zone rurale (difficultés de raccordement au réseau d'assainissement et sensibilité à l'eutrophisation des lacs) ou les éco-villages. Aujourd'hui, au moins une trentaine de villes font l'objet de projets de séparation des urines à la source [Kvarnström et al., 2006]. À Küllön, en périphérie de Stockholm, un écoquartier de 250 logements a été équipé de toilettes à séparation. Certains bâtiments de type tertiaire ont été équipés, à l'image du Musée de la Science et de la Découverte qui a été équipé en 2001 (dès la conception) de 25 toilettes à séparation. Les premiers projets ont connu des difficultés : problèmes de responsabilité dans la filière de valorisation des urines, dysfonctionnements, mauvaises odeurs etc. Cependant, dans les retours d'expérience consultés, ces problèmes semblent avoir été résolus pour le cas suédois. Amandine Caby note dans son mémoire que ces projets suédois sont surtout menés en zone rurale ou en zone urbaine peu dense, ils ne sont donc pas directement transposables au cas d'espaces urbains comme le Grand Paris.

En Suisse, le laboratoire de recherche EAWAG, spécialisé dans l'eau et l'assainissement, a lancé un programme de recherche nommé Novaquatis dans les années 2000, chargé d'étudier la technique de séparation des urines à la source. Plusieurs projets-pilotes ont été lancés, sous supervision scientifique de l'EAWAG : quatre appartements privés, l'immeuble de bureaux de l'EAWAG, l'université des sciences appliquées et une bibliothèque. Ces projets permettent de tester à grande échelle les équipements, de faire des retours d'expérience aux industriels qui produisent les équipements et de définir les bonnes pratiques pour la séparation des urines à la source. Des projets sont apparus également en Allemagne et plus récemment en Autriche, ainsi qu'aux Etats-Unis (avec le Rich Earth Institute). D'autres exemples existent en Asie, en Amérique latine ou encore en Afrique (projets VUNA de l'EAWAG) avec des systèmes sanitaires totalement différents des toilettes « occidentales », donc peu transposables au cas français, nous ne détaillons pas plus ce point.

En France, nos recherches et celles d'Amandine Caby nous ont montré qu'il n'existe aucun projet d'envergure de séparation des urines à la source. Certains festivals à sensibilité « verte » installent des toilettes sèches temporaires à séparation, les urines sont collectées mais ce genre d'initiative reste à la marge. Il existe des toilettes à séparation

dans les hôpitaux pour les services de médecine nucléaire : l'urine des patients traités à l'iode 131 doit être collectée séparément car c'est elle qui contient en majorité l'iode radioactif. Les urines doivent être stockées pour abaisser leur radioactivité avant rejet dans le système classique. Cependant, il s'agit d'un marché de niche et le coût de ces toilettes est prohibitif : environ 4 000€ (contre 300€ pour une cuvette classique).

I.B.1.c Les performances du système

On donne dans cette partie quelques chiffres donnés par différentes études sur ce système afin d'estimer ses performances, techniques et environnementales.

I.B.1.c.i Les performances techniques : le rendement de la collecte

L'intérêt de la mise en place d'une filière de séparation des urines à la source consiste à maximiser le rendement de la collecte, c'est-à-dire à récupérer le maximum des urines produites. On s'interroge dans cette partie aux performances des toilettes à séparation existant actuellement concernant la récupération effective d'urine.

Les études menées dans le cadre du programme Novaquatis de l'EAWAG fournissent des données sur la collecte des urines : un résultat important est que seulement 60% à 75% des urines produites par les usagers sont collectées par les toilettes de type NoMix installées sur les projets-pilotes suisses [Larsen and Lienert, 2007].

Dans son rapport en 2015, Mathilde Besson fait une revue des projets existants de séparation des urines à la source et étudie le taux de récupération de l'urine : il permet de traduire les performances des équipements et des usagers. Ce taux est difficile à calculer : le volume est corrompu par les chasses d'eau qui varient d'un modèle de toilettes à l'autre, on peut suivre des éléments chimiques mais l'azote a tendance à se volatiliser et le phosphore à précipiter. Un suivi de sels comme le chlorure de sodium peut être une bonne solution (il se conserve au cours du transport) mais la mesure n'est pas effectuée à chaque projet pilote. Finalement, l'auteur avance un taux de récupération des urines variant de 50 à 90% [Besson, 2015]. Les différences de taux rencontrés entre des projets équipés du même système technique peuvent traduire des différences de motivation entre les usagers (un taux plus élevé est relevé dans un quartier où les habitants étaient volontaires pour adopter le système de séparation des urines).

I.B.1.c.ii Les performances environnementales : éléments de bilan-carbone et de pic d'azote dans les stations d'épuration

Dans son mémoire de thèse professionnelle, A. Caby a étudié les capacités de traitement en azote des stations d'épuration du SIAAP à l'horizon 2030 en utilisant les projections de population du Grand Paris : elle a conclu que pour ne pas dépasser les capacités actuellement de traitement de l'azote, il fallait récupérer l'urine d'un million d'équivalents-habitants [Caby, 2013].

Elle a également mené une comparaison en bilan carbone entre la création d'une nouvelle filière membranaire (pour le traitement de l'azote) dans la station d'épuration d'Achères et la mise en place d'une filière de séparation des urines à la source. Ses hypothèses sur la filière de séparation sont les suivantes : un million de producteurs, transport par camion (150 camions par jour prévus sur l'ensemble du territoire du SIAAP), traitement des urines par précipitation sous forme de struvite suivie du procédé Anammox (voir partie suivante sur les différents traitements possibles). Les émissions en tonnes-équivalents CO_2 (tEq CO_2) concernant la partie traitement, mise en place des canalisations dans les bâtiments, transport par camions citernes sont prises en compte. Pour la mise en place de la nouvelle filière membranaire à Achères, les émissions correspondant aux travaux de génie civil, aux consommations énergétiques et aux matériaux et services entrants sont prises en compte. Les résultats sont les suivants :

- Le bilan carbone est favorable à la mise en place de la filière de séparation des urines à la source ;
- Sous la contrainte suivante : les camions ne doivent pas parcourir plus de 1100 km environ pour le trajet correspondant aux déplacements vers le point de collecte et de celui-ci vers l'usine de traitement.

Le bilan carbone apparaît donc favorable au système de séparation des urines à la source, même pour une valorisation des urines relativement lointaine de l'agglomération parisienne. Indiquons enfin que les avantages en termes de bilan environnemental de la séparation des urines à la source ont été étudiés dans plusieurs travaux de recherche : nous pouvons notamment évoquer [Larsen and Lienert, 2007]. L'objet du GAAP n'étant pas centré sur ce point, nous ne détaillons pas davantage la question.

I.B.2 Les différents traitements possibles de l'urine

Les urines brutes ne sont pas valorisables immédiatement après production car elles sont instables et peuvent contenir des agents pathogènes issus de la contamination croisée des urines par les fèces [Caby, 2013]. De plus, les urines sont la principale voie d'excrétion des résidus médicamenteux et hormonaux, indésirables en cas d'un retour à la terre des urines (sous forme d'engrais). De nombreux traitements existent, du simple stockage à des procédés plus sophistiqués, plusieurs sont développés dans le cadre du projet Novaquatis de

l'EAWAG. Notre travail pour répertorier les traitements existants ne se veut pas exhaustif et répond au cadrage initial des hypothèses mené au sein du projet de recherche OCAP : deux formes de valorisation - urines brutes stockées et urines concentrées - ont été retenues au cours des premiers mois du projet OCAP et l'objet du GAAP est de les étudier, de les confronter au regard du jeu d'acteurs impliquer et de proposer d'autres traitements si ceux-ci se révèlent être plus adaptés. Nous présentons ci-après les traitements que nous avons retenus, avec leurs avantages et inconvénients, ainsi qu'un tableau de synthèse. Nous proposons en premier lieu un zoom sur la question des micropolluants.

I.B.2.a La question des micropolluants dans les urines

La consommation de médicaments étant forte en Europe et l'excrétion des ingrédients actifs se faisant à 70% par les urines [Larsen and Lienert, 2007], la question de leur dégradation au cours du traitement se pose. Si l'on cherche à valoriser les urines comme engrais en agriculture, le problème de leur présence est d'importance. Ces micropolluants peuvent être de deux sortes : minéraux ou organiques. Les teneurs en micropolluants minéraux dans les urines ne sont pas considérées comme problématiques car très en deçà des teneurs dans les lisiers, dans les engrais chimiques et dans les boues de station d'épuration [Caby, 2013].

La question des micropolluants organiques est plus problématique. Dans les directives de l'OMS pour une utilisation sans risque des excréta (dont les urines), le risque de micropolluants est analysé et il en ressort que la question des résidus médicamenteux n'est pas très préoccupante : en effet, les lisiers ont des concentrations en résidus hormonaux plus importantes et les sols ont des capacités de dégradation de ces résidus bien supérieures aux milieux aquatiques [OMS, 2012]. Dès lors, ce risque ne devrait pas empêcher la valorisation en agriculture des urines collectées. Cependant, les phénomènes de dégradation de tous les micropolluants organiques restent méconnus et des études au niveau de la parcelle recevant les urines devront être menées pour caractériser les doses et les processus de dégradation

I.B.2.b Objectif de simplicité : l'hygiénisation par stockage

Il s'agit de la solution technique la plus simple et la moins coûteuse (pas de consommation énergétique directe). Elle est mise en œuvre dans les réalisations en Suède où le stockage se fait dans des cuves chez l'agriculteur.

Les urines sont hygiénisées grâce à un stockage hermétique à l'air, à 20°C, pendant 6 mois [OMS, 2012]. Le principal risque à une mauvaise fermeture de la cuve est la libération d'ammoniac volatile, impliquant la perte d'une partie du nutriment azote, à cause de l'hydrolyse de l'urée présente dans les urines. Notons qu'une alternative à ce procédé est également recommandé par l'OMS : stocker l'urine à 4°C pendant un mois, ce qui

réduit considérablement le temps de stockage. Cette alternative n'apparaît pas dans nos scénarios de base car nous avons pas pu la prendre en compte suffisamment tôt dans notre travail.

Un traitement complémentaire peut être incorporé dans la cuve afin de stabiliser l'urine : l'acidification par ajout d'ions H^+ . Ainsi, le pH est maintenu faible et l'urée ne s'hydrolyse pas en ammoniac NH_3 volatil. De plus, ce procédé permet d'éliminer de 50 à 95% des micropolluants [Caby, 2013].

L'inconvénient est l'obtention d'un produit faiblement concentré en azote, plusieurs passages de tracteurs seront nécessaires pour la fertilisation des sols, ce qui induit des consommations énergétiques indirectes.

Récapitulons :

- *Avantages* : élimination des éléments pathogènes, pas de consommation énergétique directe, possibilité de stabilisation pour récupérer la quasi-totalité de l'azote par acidification ;
- *Inconvénients* : produit faiblement concentré en azote, pertes potentielles d'azote par évaporation de l'ammoniac NH_3 , pas d'élimination totale des micropolluants.

I.B.2.c Objectif de récupération du phosphore : précipitation sous forme de struvite

Grâce à une réaction entre le phosphore et l'azote des urines et du magnésium ajouté, on forme un précipité appelé struvite, de formule $(MgNH_4PO_4, 6 H_2O)$, riche en phosphore. Comme dans cette réaction le phosphore est le réactif limitant, la majorité de l'azote se trouve dans l'effluent liquide.

Cette technologie est mature et ne nécessite pas de consommation énergétique (à petite échelle, si automatisation alors consommation d'énergie). Environ 90% des micropolluants se retrouvent dans la phase liquide et le lavage final du précipité permet de réduire à 2% la teneur en micropolluants dans le produit final [Besson, 2015].

Récapitulons :

- *Avantages* : récupération du phosphore, obtention d'un produit solide transportable, pas de consommation énergétique à petite échelle, bon traitement des micropolluants ;
- *Inconvénients* : pas de traitement de l'azote.

I.B.2.d Objectif de récupération de l'azote : nitrification puis distillation

C'est le procédé mis en place lors des projets VUNA menés par l'EAWAG en Afrique. Il consiste en deux étapes successives :

- nitrification : deux réactions chimiques pour transformer l'ammonium NH_4^+ en nitrite NO_2^- puis le nitrite en nitrate NO_3^- . Le tout est réalisé dans une colonne de nitrification. Cette étape permet d'éviter la volatilisation de l'ammoniac NH_3 ;
- distillation : elle permet de concentrer les urines grâce à l'élimination de l'eau.

Finalement on perd peu d'azote par volatilisation. Le taux de récupération de l'azote est supérieur à 99% et celui des autres nutriments (P et K) est de 100%. À partir de 1000L d'urines brutes, on obtient 30L d'engrais. La concentration en azote dans le produit liquide final est de 50g/L ce qui est plus proche d'un engrais azoté chimique (chiffres fournis par [Etter et al., 2015]).

Concernant l'élimination des micropolluants, le bilan est mitigé : les conclusions des projets VUNA indiquent que la distillation semble dégrader convenablement plusieurs micropolluants, que les concentrations d'autres restent hautes et qu'une dernière catégorie de micropolluants n'est pas affectée par le traitement [Etter et al., 2015].

Le gros inconvénient de ce procédé est sa consommation énergétique élevée : 50Wh/L d'urines pour la nitrification, 80Wh/L d'urines pour la distillation. La technologie n'est pas encore mature, en particulier l'EAWAG continue la recherche dans ce domaine pour réduire les coûts et pense pouvoir les réduire d'un facteur 10 à 20 sous peu.

Récapitulons :

- *Avantages* : produit concentré proche d'un engrais classique, réduction volume, récupération des nutriments ;
- *Inconvénients* : grosse consommation énergétique, abattage imparfait des micropolluants.

I.B.2.e Objectif d'éliminer les nutriments : nitrification/dénitrification ou procédé Anammox

Si l'objectif est de traiter les urines afin de les rejeter dans les milieux aquatiques, il convient de retirer les nutriments de type azote et phosphore pour éviter notamment l'eutrophisation des milieux.

Deux procédés existent [Caby, 2013] pour le traitement de l'azote :

1. Cycle de nitrification/dénitrification, visant à transformer l'ammonium en diazote gazeux :
 - *Avantages* : élimination de l'azote ;
 - *Inconvénients* : consommations énergétiques importantes, apport de matière carbonée nécessaire.
2. Procédé Anammox : basé sur l'utilisation de bactéries, elle vise aussi à obtenir du diazote gazeux :
 - *Avantages* : élimination de l'azote, plus économe en oxygène que le cycle de nitrification/dénitrification et nécessite peu d'apport carboné ;
 - *Inconvénients* : les besoins en énergie pour l'aération sont diminués par rapport à la nitrification/dénitrification mais restent élevés.

I.B.2.f Objectif d'éliminer les micropolluants

Plusieurs procédés existent, nous en présentons ici trois : l'électrodialyse, la nanofiltration et l'ozonation.

L'électrodialyse utilise des membranes échangeuses d'ions qui permettent de séparer les nutriments des urines des micropolluants (retenus dans la membrane). Elle permet aussi de concentrer le produit. C'est toutefois une solution coûteuse en entretien.

La nanofiltration utilise également des membranes pour retenir les micropolluants, cette technologie est sensible au pH. Les coûts associés à petite échelle sont prohibitifs, des problèmes d'entretien des équipements sont relevés ainsi qu'une consommation énergétique importante [Caby, 2013].

Concernant l'ozonation, avec une concentration d'ozone suffisante (le chiffre de 4,5g/L est fourni par la littérature, notamment par [Besson, 2015]), l'ensemble des micropolluants est éliminé. Les inconvénients sont que la production d'ozone est énergivore et que le produit obtenu n'est pas concentré en nutriments par rapport aux engrais classiques [Besson, 2015].

Récapitulons :

- *Avantages* : bonne élimination des micropolluants, encore meilleure par combinaison des méthodes (exemple : une électrodialyse suivie d'une ozonation) ;
- *Inconvénients* : solutions coûteuses en équipement et en entretien, nanofiltration peu mature, production d'ozone énergivore.

I.B.2.g Conclusions

Les technologies présentées ci-dessus répondent à des objectifs particuliers : elles ne sont pas adaptées à tous les cas mais répondent à des attentes particulières. Certaines de ces stratégies peuvent se combiner. Deux stratégies de traitement des urines se distinguent :

- traitement seul : si l'on veut rejeter les urines dans les milieux en se substituant aux stations d'épuration (capacités de traitement de l'azote « soulagées » par la collecte séparative des urines). Alors, on privilégiera les technologies permettant d'éliminer les nutriments comme Anammox ;
- valorisation des urines : on veut un produit sûr du point de vue sanitaire pour l'épandage, avec une préférence pour un produit concentré, à l'instar des engrais chimiques classiques. On pourra privilégier la précipitation sous forme de struvite dans un premier temps (technologie mature), à plus long terme le procédé nitrification/distillation devrait gagner en maturité et sera une bonne solution pour produire un engrais concentré.

Notons que l'EAWAG propose la combinaison électrodialyse et ozonation sur de l'urine stockée (l'urée est hydrolysée) : cela permet d'éliminer la totalité des micropolluants et de concentrer les urines. Le produit obtenu est stabilisé et sûr [Pronk, 2007]. Il s'agit d'une solution technologique coûteuse en équipement et en consommation énergétique.

Dans notre étude, nous avons privilégié la deuxième approche avec valorisation des urines. Deux filières se distinguent :

- la filière engrais phosphaté avec formation de struvite et traitement de l'azote par le procédé Anammox ;
- la filière engrais azoté avec le procédé nitrification/distillation.

On résume dans la (TABLE I.1) les performances des procédés de traitement en fonction de divers objectifs (NB : le sigle « - » signifie sans objet).

Procédé	Élimination de l'azote	Élimination micropolluants	Récupération azote	Récupération phosphore	Réduction volume	Consommation énergétique	Forme du produit
Stockage simple	Non	Non	Oui, risque d'ammoniac volatil	Oui	Non	Faible	Liquide
Stockage avec acidification	Non	Moyenne (50-95%)	Oui	Oui	Non	Faible	Liquide
Précipitation struvite	Non	Bonne (98%)	Faible	Oui	Oui	Faible	Solide
Nitrification-distillation	Non	Moyenne	Oui	Oui	Oui	Forte	Liquide
Anammox	Oui	Ne sait pas	Non	Non	Non	Moyenne	–
Électrodialyse	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Forte	Liquide
Nanofiltration	Non	Oui	Oui	Oui	Légère	Forte	Liquide
Ozonation	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Forte	Liquide

TABLE I.1 – Performances des procédés de traitement des urines en fonction des objectifs poursuivis

Plusieurs techniques de traitement ont été présentés ici mais cette revue de procédés ne se veut pas exhaustive. En effet, dans ce GAAP, il ne s'agissait pas d'étudier de manière exhaustive les traitements possibles de l'urine mais d'en sélectionner certains et de les analyser avec le jeu d'acteurs associé, ce que nous présentons en PARTIE III. D'autres procédés innovants existent, ce qui implique que nos conclusions devront être nuancées à l'aune de ces possibilités non étudiées.

I.C Récolter l'urine : pour qui ?

I.C.1 Les urines : un potentiel de valorisation comme apport d'éléments minéraux

Nous avons pu voir précédemment que les enjeux de la récolte de l'urine humaine à la source étaient nombreux, notamment d'un point de vue écologique, et qu'il existait différentes possibilités de traiter et de transformer cette urine. À la suite de cette étape de traitement, il est nécessaire de s'interroger sur les types de valorisation que peuvent prendre les urines humaines, afin de tirer le meilleur parti des services qu'elles peuvent rendre et de rentabiliser au mieux le modèle économique de la filière. L'enjeu de cette étape de valorisation est aussi d'établir une logique de boucle entre espaces de collecte et espaces de valorisation, dans une réflexion d'économie circulaire.

I.C.1.a Les urines : un stock d'éléments minéraux

Comme précisé plus haut, les urines humaines concentrent les éléments azote et phosphore de nos eaux usées. Cependant, il est nécessaire de s'interroger sur les valeurs de ces concentrations ainsi que sur la nature des autres constituants des urines, afin d'envisager les débouchés possibles.

Amandine Caby [Caby, 2013] cite notamment [Maksimovic et al., 2001], qui a étudié la composition des urines, constituées avant tout d'eau (95% de la masse) :

Paramètres	Urines (g/j/pers)
Poids humide	900-1200
Poids sec	60
Azote	11
Phosphore	1
Potassium	2,5

TABLE I.2 – Composition des urines

Cependant, les urines contiennent aussi de nombreux autres éléments, à des concentrations plus faibles, comme l'ont montré les analyses effectuées pour le projet VUNA [Etter et al., 2015] : calcium, magnésium, soufre, fer, manganèse, bore, molybdène, zinc, cuivre, plus du chlorure de sodium et des matières organiques. Les urines peuvent notamment aussi contenir des micropolluants, comme expliqué précédemment.

On peut ainsi considérer les urines comme un stock d'éléments, en particulier en ce qui concerne l'azote et le phosphore. Les éléments de contexte précédents ont montré l'importance de ces éléments pour la croissance végétale. Les autres éléments présents dans les urines jouent aussi un rôle dans la croissance et la santé des plantes. L'idée naturelle pour valoriser les urines humaines serait ainsi d'exploiter le stock d'éléments qu'elles constituent pour réaliser une fertilisation complémentaire voire totale des cultures.

I.C.1.b Une utilisation passée et présente

C'est d'ailleurs dans le cadre d'une valorisation agricole que les urines ont été et sont actuellement utilisées, bien que d'autres usages aient été privilégiés par le passé (traitement des textiles en Rome Antique ou fabrication de poudre à canon jusqu'au XX^{ème} siècle par exemple)

I.C.1.b.i Dans le passé : la récupération des fèces à Paris

Par exemple à Paris au XIX^{ème} siècle, la séparation urines / matières fécales était déjà opérée [Caby, 2013], à l'aide d'un système composé de deux tonneaux superposés. Le tonneau du dessus récupérait les matières fécales et filtrait les urines qui étaient récupérées dans le tonneau inférieur. Les excréments secs servaient alors à fabriquer de la poudrette alors que les urines séparées servaient à l'industrie de l'urate ou du sulfate d'ammoniac, substances utilisées comme engrais dans les espaces cultivés autour de la ville afin d'y produire une alimentation locale.

I.C.1.b.ii Actuellement : différents projets autour de la fertilisation par les urines

Comme expliqué dans la partie précédente, les urines sont aussi utilisées actuellement dans les projets en Suède d'EcoSanRes [Kvarnström et al., 2006] et de VUNA en Afrique du Sud [Etter et al., 2015] dans le cadre d'une valorisation agricole. Les urines sont aussi utilisées dans de nombreux autres projets des pays en voie de développement, permettant de régler en partie la problématique de leur assainissement tout en fournissant un intrant à des populations qui ont souvent des difficultés à s'approvisionner en engrais de synthèse.

En Suède, l'urine est épandue du printemps à l'été sur des cultures d'hiver comme apport complémentaire. Il faut en pratique pour intéresser ces agriculteurs suffisamment de volume d'urines, ce qui correspond à 100 kg d'azote par an et par hectare pour leurs cultures, soient les urines collectées d'au moins 25 personnes [Kvarnström et al., 2006]. L'urine est appliquée grâce à un épandeur utilisé habituellement pour épandre le purin animal. Si l'urine est épandue sur sol nu, il faut la faire pénétrer dans le sol dès que possible afin d'éviter les pertes d'azote [Caby, 2013].

Le projet VUNA, comme décrit précédemment, permet de traiter les urines à l'aide d'un procédé de dénitrification-distillation pour obtenir une substance concentrée en azote et phosphore se rapprochant plus des standards des solutions fertilisantes. L'objectif en Afrique du Sud est bien de produire localement une matière fertilisante applicable à des surfaces cultivées [Etter et al., 2015].

Aux États-Unis, le potentiel de l'urine pour faire pousser de la pelouse a également été testé empiriquement, comme le montre la photographie I.9, ouvrant la voie à une valorisation dans un cadre autre qu'agricole, pour l'entretien par exemple d'espaces verts.



FIGURE I.9 – La bande plus verte du milieu a reçu un traitement à l'urine alors que les bandes adjacentes n'ont rien reçu (Source : <http://news.nationalgeographic.com/news/2014/02/140202-peecycling-urine-human-waste-compost-fertilizer/>)

I.C.1.c Des premiers tests encourageants concernant ce potentiel agronomique

I.C.1.c.i Les tests suédois

De nombreux tests agronomiques ont été réalisés dans différents pays du monde (Allemagne, Chine, Australie, etc.). Parmi eux, plusieurs expériences en champ ont été menées en Suède, dont deux sont rapportées, la première sur 3 ans et la seconde sur 1 an seulement ([Jönsson, 2001]). Elles ont permis de montrer que l'urine séparée à la source, épandue sur le sol ou sur des cultures en phase de croissance, représentait un fertilisant équilibré avec des effets proches des fertilisants azotés et phosphorés de synthèse. Ainsi l'effet azote enregistré variait entre 70% et 100% de l'efficacité d'un fertilisant azoté classique, avec une moyenne à 90%. En ce qui concerne l'effet phosphore, il était égal à celui d'un fertilisant de synthèse.

En plus de ces considérations, les émissions d'ammoniac après épandage restaient limitées, variant entre 1 et 10%. De plus, aucun effet toxique de cet épandage n'a été relevé dans les cultures de céréales effectuées [Jönsson, 2001].

I.C.1.c.ii Les tests VUNA

Le projet VUNA a mené ses propres expérimentations sur le pouvoir agronomique des urines. Sur la FIGURE I.10, deux résultats de ces expériences sont présentés.

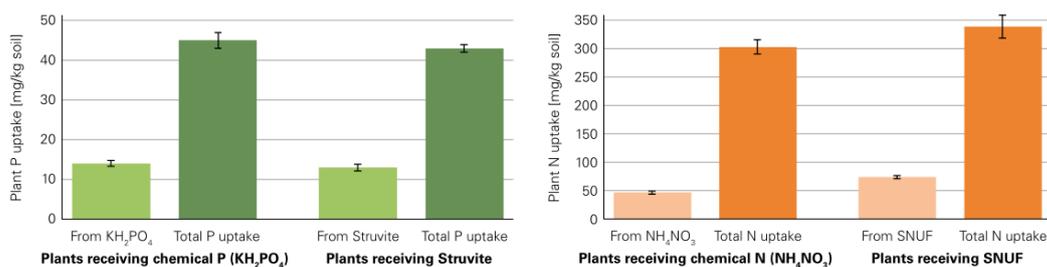


FIGURE I.10 – Résultats des tests de pouvoir agronomique réalisés par le projet VUNA, en comparaison de fertilisants azotés et phosphorés [Etter et al., 2015]

En premier lieu, le pouvoir fertilisant azoté de la substance obtenue par le procédé nitrification-distillation, appelée SNUF, est comparé à celui d'un fertilisant azoté classique. La captation totale d'azote par la plante est du même ordre de grandeur dans les deux cas et la plante semble mieux capter l'azote provenant du SNUF que du fertilisant classique.

En second lieu, c'est le pouvoir fertilisant phosphoré de la struvite, produit obtenu par la précipitation des urines (cf. PARTIE I.B), qui est comparé à celui d'un fertilisant phosphoré classique. Là encore, les résultats montrent que les effets sont comparables, la captation totale de phosphore par la plante étant équivalente avec les deux substances, et parmi ce phosphore les quantités captées provenant de chacune d'entre elles sont aussi équivalentes.

Ces différents résultats restent à être renforcés par des expérimentations plus nombreuses, mais confirment le potentiel des urines et de différents procédés de traitement pour en faire une substance fertilisante intéressante.

I.C.2 La gestion de la fertilisation : un enjeu important pour le monde agricole

I.C.2.a La fertilisation, une pratique agricole généralisée

Il a été expliqué précédemment que le bon pilotage de la fertilisation des cultures, en particulier en azote et phosphore, est un enjeu important du rendement comme des impacts environnementaux de l'agriculture. La fertilisation recouvre deux types d'apports :

- *engrais* : pour apporter des éléments nutritifs aux plantes ;
- *amendements* : pour apporter des éléments nutritifs mais aussi opérer une modification des propriétés physico-chimiques du sol.

La fertilisation est réalisée à l'aide de fumures organiques, complétés par des engrais minéraux de synthèse, dont l'utilisation est devenue prépondérante en grandes cultures, comme l'illustre l'exemple de la fertilisation azotée (FIGURE I.13) et généralisée à l'ensemble du territoire (FIGURES I.11 et I.12). Pour l'ensemble des grandes cultures, c'est ainsi une moyenne de 140 kg d'azote minéral et de 56 kg de phosphore minéral par hectare qui sont apportées. Ces apports se font de manière fractionnée (2 ou 3 passages) au printemps, sur des périodes encadrées, souvent dans le cadre d'un raisonnement de cette pratique pour apporter la dose juste.

Part de surfaces en grandes cultures recevant du phosphate minéral

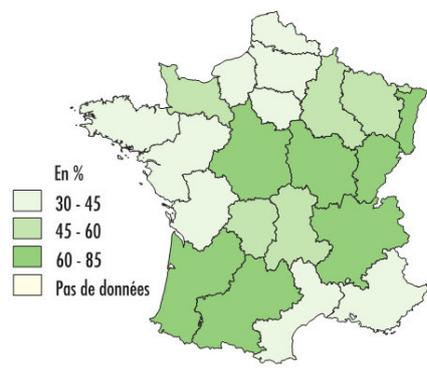


FIGURE I.11 – Part de surfaces en grandes cultures recevant du phosphate minéral [Agreste, 2014]

Part des surfaces fertilisées avec de l'azote minéral

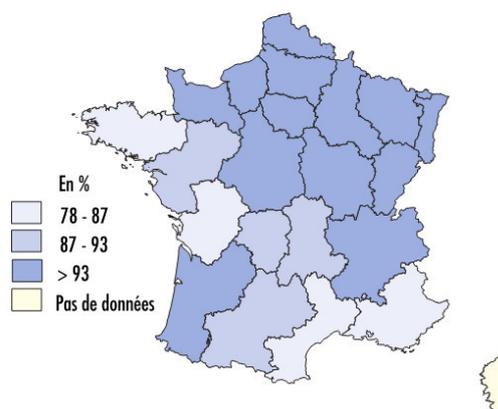


FIGURE I.12 – Part des surfaces fertilisées avec de l'azote minéral [Agreste, 2014]

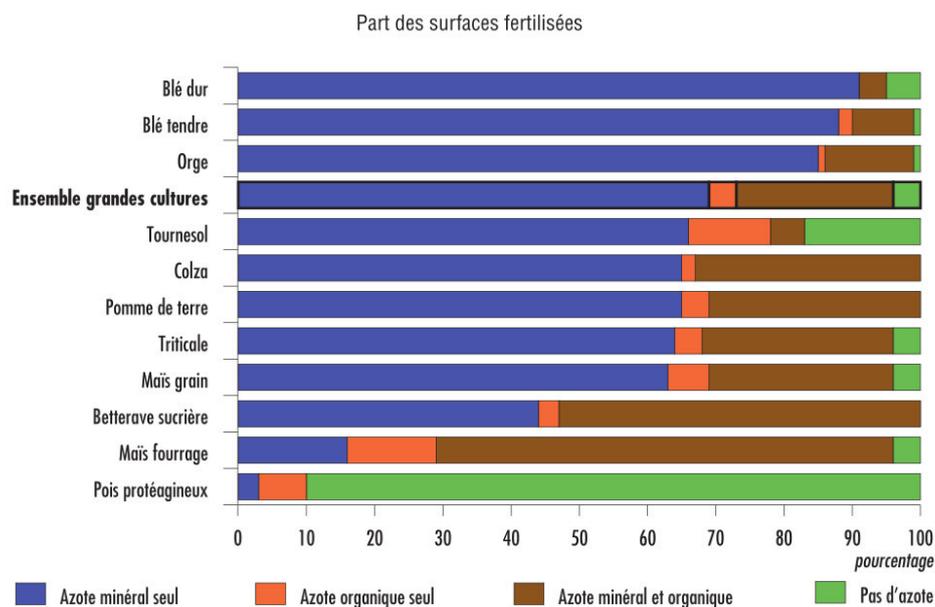


FIGURE I.13 – Fertilisation azotée en grande culture [Agreste, 2014]

I.C.2.b La fertilisation : un déterminant important de la conduite des exploitations

La bonne conduite de la fertilisation est un facteur clé dans la construction du rendement des cultures, qui assure la viabilité économique des exploitations. Mais outre les externalités négatives (cf. PARTIE I.A), la gestion de la fertilisation a un coût, dans un contexte d'augmentation des prix des fertilisants de synthèse (FIGURE I.14). La fertilisation minérale de synthèse est en effet un marché globalisé, corrélé au prix de l'énergie, qui est nécessaire à la synthèse de ces engrais [Aubry et al., 2014].

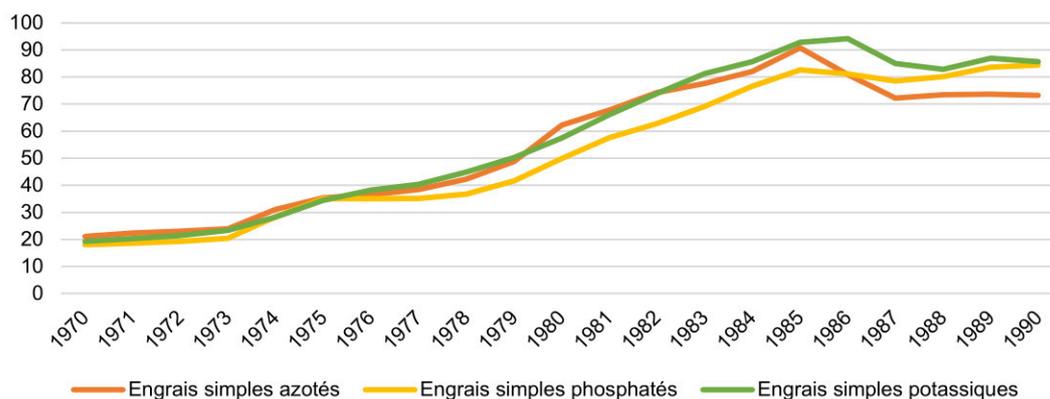


FIGURE I.14 – Évolution du prix d'achat des engrais en France entre 1970 et 1990 (indice moyen annuel base 100 en 2005) (Source : Agreste 2013 tiré de EscoMafor)

Ces différents éléments contribuent à une modification des raisonnements de la fertilisation, d'une part en modifiant les rotations pour introduire des cultures qui retiennent l'azote apporté en surplus (CIPAN – culture intermédiaire piège à nitrate) ou des plantes fixant de l'azote atmosphérique, d'autre part en diversifiant les types d'apports plutôt que de recourir systématiquement à des engrais minéraux de synthèse.

Proposer une nouvelle source de fertilisants au travers des urines séparées à la source pourrait donc s'inscrire dans ce contexte de changements, en assurant une meilleure résilience (moins de variations des prix, facilité d'approvisionnement local).

I.C.2.c La fertilisation : une pratique amenée à évoluer ?

Au-delà de la problématique des coûts des intrants synthétiques, la pratique de la fertilisation minérale s'inscrit dans un modèle agricole décrié pour sa faible durabilité écologique. Cette pratique est liée à plusieurs enjeux environnementaux déjà évoqués (pollution des eaux par les nitrates en excès, rejets dans l'atmosphère de gaz à effet de serre, etc.).

Ces deux critères de la durabilité, économiques et écologiques, ont donné lieu dans la littérature à l'établissement de scénarios pour les modèles agricoles réduisant le recours aux intrants minéraux de synthèse. On peut par exemple citer les scénarios du rapport Afters50, qui permettent une projection de modèles agricoles d'ici 2050 [Couturier et al., 2014]. Le scénario proposé intègre un bilan entrée-sortie de l'azote dans les sols agricoles, entre 2010 et 2050 (FIGURE I.15).

Sources et flux d'azote en kt/an	2010		2050	
	Entrées	Sorties	Entrées	Sorties
Bilan azote « sols agricoles » 2010				
Fourniture primaire d'azote				
Engrais minéraux	2 550		1 020	
Fixation symbiotique	690		1 700	
Exportations d'azote				
Exportations par les fourrages		1 990		1 610
Exportations par les cultures		2 190		2 950
Flux de recyclage et de recirculation				
Redéposition atmosphérique	570		370	
Retour via la pâture	550		280	
Retour via les effluents d'élevage	690		360	
Retour via les résidus de culture non prélevés	630		370	
Retour via les digestats (déjections, herbe de prairie, résidus de culture, cultures intercalaires)	40		1 380	
Pertes diffuses				
Pertes par volatilisation et lessivage		1 550		920
TOTAL	5 720	5 720	5 470	5 470

FIGURE I.15 – Bilan azote des “sols agricoles” 2010 - 2050 [Couturier et al., 2014]

Ce bilan montre que la consommation d'azote minéral de synthèse pourrait passer de 2,6 millions de tonnes en 2010 à 1 million de tonnes seulement en 2050, notamment grâce à une augmentation des surfaces en légumineuses et à une plus grande utilisation des digestats de méthanisation.

La valorisation des urines devra donc se concevoir dans un contexte de mutation possible des pratiques agricoles, dans le cadre d'une meilleure prise en compte des attentes environnementales.

I.C.2.d Première tentative de connexion avec les déchets urbains : exemple des boues issues de STEPs

L'idée de valoriser les déchets urbains dans le cadre de la fertilisation agricole n'est pas neuve, comme l'a montré le bref rappel historique du contexte parisien. Dans le cadre du paradigme actuel de l'assainissement, cette reconnexion a déjà eu lieu avec l'exploitation des boues issues de stations d'épuration, et ce depuis une centaine d'années, en particulier en Ile-de-France avec la station d'Achères. Les boues sont épandues sur les sols cultivés pour récupérer les éléments nutritifs et la matière organique qu'elles contiennent. C'est ce qu'on appelle des matières fertilisantes organiques (Mafor).

Ces matières sont intéressantes économiquement pour les agriculteurs, car le coût de production, d'acheminement sur les parcelles et d'épandage est supporté par le producteur des boues, c'est-à-dire l'acteur d'assainissement (en agglomération parisienne, le SIAAP). Cette pratique se nomme le « 0 euro rendu racine ».

Cependant, durant les premières années d'exploitation de ces boues, le rejet massif de métaux lourds contenus dans les eaux industrielles sans traitement adéquat a conduit à épandre des matières trop chargées en éléments traces métalliques (FIGURE I.16). Cela a provoqué une contamination excessive de certains sols en maraîchage d'Ile-de-France qui ont dû être abandonnés, suscitant la colère du monde agricole dans la région. Ainsi, bien que l'exploitation de ces boues se soient améliorée et que des agriculteurs les utilisent encore, leur consommation a ralenti et l'encadrement juridique a beaucoup progressé.

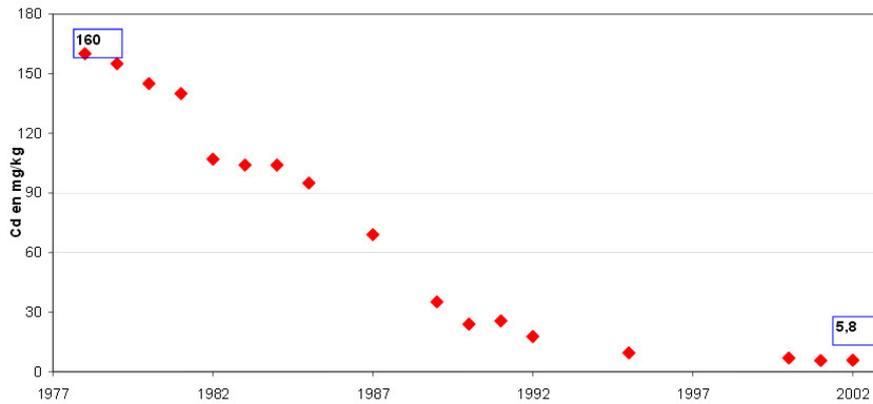


FIGURE I.16 – Teneurs en cadmium dans les boues d'Achères (Seine-Aval)
[Baize et al., 2006]

I.D Récolter l'urine : où ?

I.D.1 Présentation du projet de Paris-Saclay

I.D.1.a Un projet du Grand Paris porté par l'Établissement public Paris-Saclay

Le territoire de Paris-Saclay est situé au sud de Paris sur une zone couvrant 49 communes des départements de l'Essonne et des Yvelines. Il est marqué par un vaste espace agricole et naturel entre les vallées de l'Yvette au sud et de la Bièvre au nord. Les terres limoneuses du plateau de Saclay en font l'un des secteurs les plus fertiles avec une activité agricole importante : aujourd'hui le plateau comporte 2 700 ha de surface agricole utile.

Le territoire Paris-Saclay s'est par ailleurs développé depuis les années 1950 autour de grandes écoles et de centres de recherches publics et privés, notamment dans le domaine de la physique moderne. Aujourd'hui, environ 13% des effectifs de la recherche française y travaillent. C'est aujourd'hui un bassin de vie de 657 000 habitants avec 372 000 emplois.

Dans le cadre du Grand Paris, et s'appuyant sur les atouts scientifiques et économiques du territoire, Paris-Saclay a été retenu pour mettre en œuvre un *cluster* d'innovation technologique de niveau mondial, au même titre que Cambridge, Oxford... Dans son article 1^{er}, la loi n° 2010-597 du 3 juin 2010 relative au Grand Paris avance que « *le projet du Grand Paris favorise également la recherche, l'innovation et la valorisation industrielle au moyen de pôles de compétitivité et du pôle scientifique et technologique du plateau de Saclay dont l'espace agricole est préservé.* »

L'ambition de Paris-Saclay articule trois logiques de projet à trois échelles différentes [EPPS, 2012] :

- un projet métropolitain : intensifier pour innover en permettant au pôle d'innovation de s'appuyer sur l'ensemble de la métropole ;
- un projet du « grand territoire » : décloisonner et rapprocher les différents acteurs du territoire pour relancer l'innovation ;
- un projet urbain : concilier nature, science et ville.

Créé par la loi du 3 juin 2010 relative au Grand Paris, l'Établissement public Paris-Saclay (EPPS), établissement public à caractère industriel et commercial de l'État, est chargé « *de conduire toute action susceptible de favoriser les activités d'enseignement, de recherche et d'innovation et leur valorisation industrielle, et de réaliser des opérations d'aménagement du pôle scientifique et technologique* »¹. Les sites stratégiques du projet Paris-Saclay sont classés en opération d'intérêt national (OIN) permettant ainsi à l'EPPS de prendre l'initiative de zones d'aménagement concerté.

L'Établissement public Paris-Saclay

L'établissement public créé en 2010 mène les opérations d'aménagement et de développement urbain du pôle scientifique et technologique de Paris-Saclay. Il est aménageur de zones d'aménagement concerté situées dans les secteurs stratégiques du projet, classés en opération d'intérêt national.

L'établissement public créé en 2010 mène les opérations d'aménagement et de développement urbain du pôle scientifique et technologique de Paris-Saclay. Il est aménageur de zones d'aménagement concerté situées dans les secteurs stratégiques du projet, classés en opération d'intérêt national.

Paris-Saclay est donc une grande opération d'aménagement portée par l'EPPS, ensemble pour ce projet, et les collectivités locales. Onze territoires d'aménagement, ou zones d'aménagement concerté, ont été définis (FIGURE I.17) :

- trois territoires au niveau de la frange sud du plateau entre Saclay et Palaiseau avec notamment la ZAC² du quartier de l'école Polytechnique et celle du Moulon : ces zones correspondent au Campus urbain ;
- une ZAC au niveau du plateau de Satory à Versailles ;
- Saint-Quentin-en-Yvelines avec quatre ZAC ;
- un territoire à Courtaboeuf ;
- un territoire à Massy-La Bondes ;
- un territoire à Jouy-en-Josas au niveau de l'INRA et HEC.

1. Article 25 de la loi du 3 juin 2010 relative au Grand Paris

2. Zone d'aménagement concerté

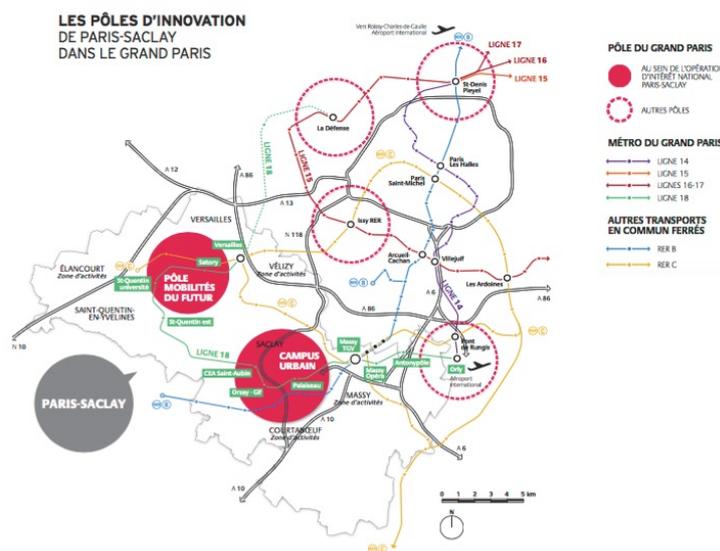


FIGURE I.17 – Le projet Paris-Saclay au sein du Grand Paris (Source EPPS)

Que ce soit sur le Campus urbain, ou dans les autres territoires, Paris-Saclay a pour ambition « *de faire la ville durable avec des services innovants, des nouvelles technologies et la possibilité d'intégrer très en amont des réflexions sur l'eau, l'énergie, la biodiversité ou encore la gestion des déchets* » (site internet de l'EPPS).

I.D.1.b Une volonté de développer un éco-territoire

Le projet de Paris-Saclay³ a traduit son objectif de développement d'un éco-territoire exemplaire dans ses programmes autour des objectifs qui peuvent être schématisés de la manière suivante selon six piliers (FIGURE I.18)

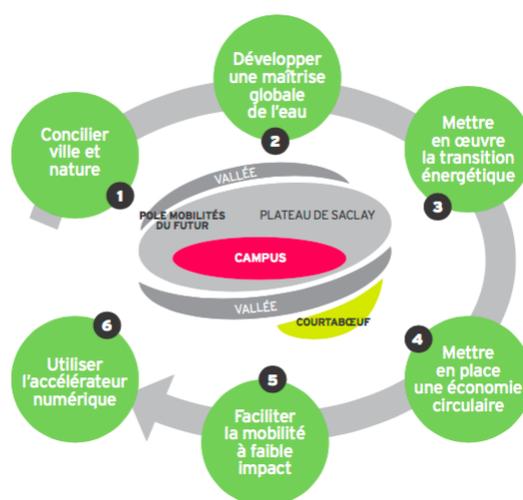


FIGURE I.18 – Les six piliers de l'éco-territoire de Paris-Saclay (Source EPPS)

3. Le schéma de développement territorial de Paris-Saclay a été adopté en janvier 2012 par le conseil d'administration de l'EPPS. Ce document stratégique fixe les orientations du projet pour un développement équilibré du territoire

L'EPPS a répondu à l'appel à projets du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie « Territoire à énergie positive pour la croissance verte » lancé en 2014, qui a pour but d'assurer la déclinaison locale des objectifs fixés par le projet de loi sur la transition énergétique. Le projet conjugue donc la réalisation de bâtiments très performants avec le développement d'infrastructures innovantes pour exploiter les énergies locales et renouvelables (réseau de chaleur et de froid bas carbone exploitant la nappe de l'Albien et des réseaux électriques intelligents pour le Campus urbain, projet de gestion de gestion intelligente et dynamique de l'énergie sous toutes ses formes. . .).

La protection et la mise en valeur du patrimoine écologique, naturel et agricole, constituent également une composante essentielle du projet Paris-Saclay pour s'inscrire dans l'objectif d'un développement durable du territoire. À ce titre, la zone de protection naturelle, agricole et forestière (ZPNAF) de 2 469 ha consacrés aux activités agricoles et 1 646 ha d'espaces naturels concourent à cet objectif.

Au vu de ces éléments, la collecte sélective de l'urine s'inscrit pleinement dans les objectifs d'économie circulaire, et de maîtrise du cycle de l'eau affichés par l'EPPS.

I.D.1.c Le Campus urbain, une zone pour le projet pilote de collecte sélective des urines

Le campus urbain a pour ambition d'être tourné vers la recherche et le développement au cœur du cluster en développant un projet scientifique d'ampleur inédite. L'enjeu est de mettre en synergie les ressources scientifiques, notamment à travers une proximité organisée et un décloisonnement des relations. Desservi par le RER B, il accueillera trois gares de la ligne 18 du métro du Grand Paris.

Le Campus urbain est marqué par une programmation mixte de logements, d'activités tertiaires, d'équipements publics de commerces autour de l'université Paris Sud, des grandes écoles et des centres de recherches avec une volonté affichée de travailler sur le lien entre la ville et l'agriculture et les espaces naturels.

L'EPPS est aménageur de deux ZAC correspondant à deux des quartiers structurant du campus urbain : celui de l'Ecole Polytechnique sur les communes de Palaiseau et Saclay, et celui du Moulon sur les communes de Gif-sur-Yvette, Orsay et Saint-Aubin. Dans ces deux ZAC, l'EPPS aménage les espaces paysagers, les voiries et les réseaux divers. Il finance le programme des équipements publics de superstructures (groupes scolaires, crèches, équipements sportifs, équipements culturels) qui seront ensuite remis aux collectivités locales. Le projet opérationnel est aujourd'hui mis en œuvre dans les deux quartiers de l'Ecole polytechnique et de Moulon.

Focus sur la ZAC du Moulon

Cette ZAC a fait l'objet d'un arrêté préfectoral de création en date du 28 janvier 2014. Le projet urbain de Moulon, sur les communes de Gif-sur-Yvette, Orsay et Saint-Aubin est bordée à l'ouest par Saint-Aubin, au sud par les coteaux de la vallée de l'Yvette et à l'ouest par les espaces agricoles. La ZAC prévoit 870 000 m² de programmation répartis de la manière présentée en FIGURE I.19. [EPPS, 2014]

Les principes d'aménagement de la ZAC doivent permettre la création d'un quartier ouvert, animé et de grande qualité. Le secteur accueillera donc des quartiers résidentiels pour étudiants et chercheurs ainsi que des logements familiaux en nombre important. Le site a pour ambition de proposer un cadre de vie et de travail qualitatif avec une insertion paysagère de qualité.

À l'ouest le parc de Moulon est l'espace central autour duquel se déploient Centrale Supélec et l'École normale supérieure de Cachan, des logements étudiants et des quartiers résidentiels pour les familles. *C'est sur cette zone que l'EPPS a proposé d'étudier la mise en place d'une collecte sélective des urines pour un programme de 899 logements étudiants sociaux avec au total 1082 lits dans le quartier Joliot-Curie (FIGURE I.20).*

Ce programme, sous maîtrise d'ouvrage SODEARIF, sera livré en septembre 2017 au futur gestionnaire sera la Fondation CentraleSupélec. Compte tenu de l'avancement de ce programme en cours de construction, l'installation d'un système de collecte ne pourra pas être réalisé dans ce programme. Néanmoins, cela permet de conduire une analyse précise sur un cas d'étude réel en disposant de l'ensemble des données nécessaires.

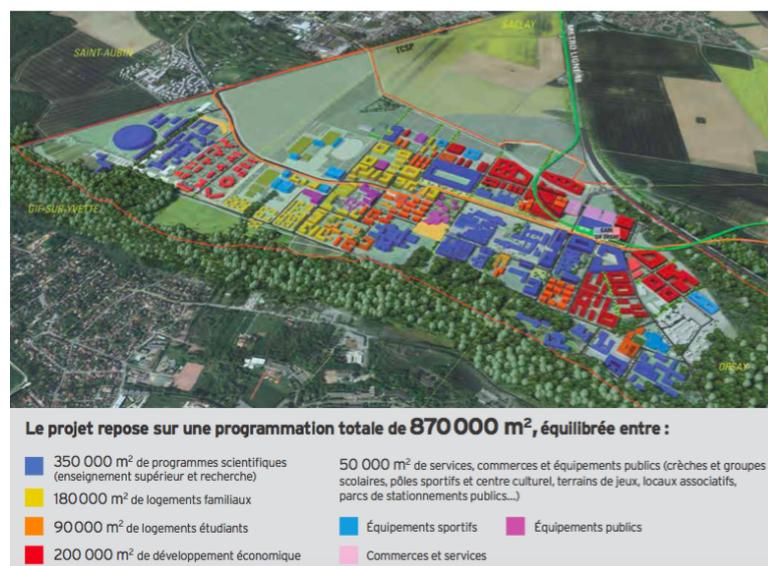


FIGURE I.19 – Les chiffres clés du projet urbain du Moulon (Source EPPS)

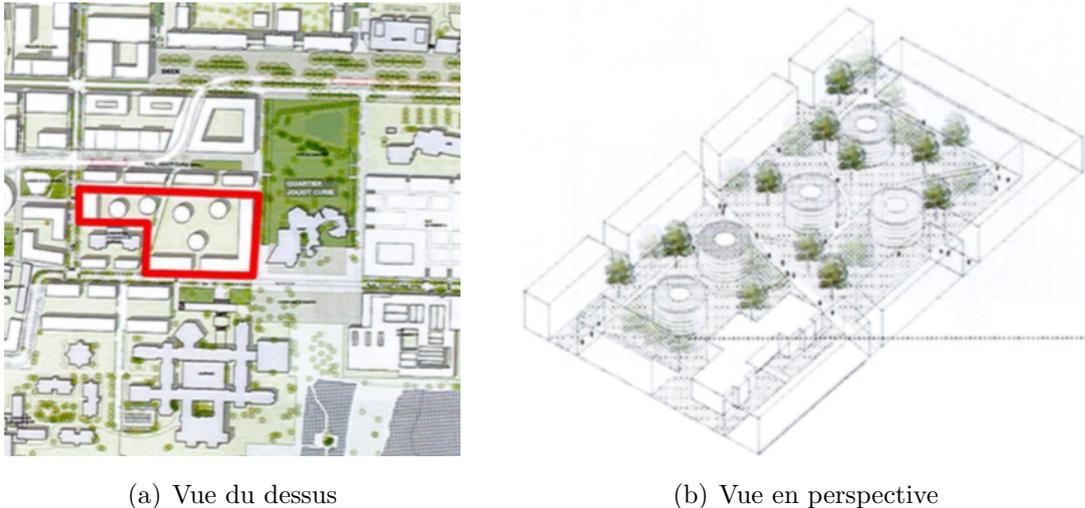


FIGURE I.20 – Plans de l'îlot proposé pour étude (Source EPPS)

I.D.2 La gestion de l'eau au coeur du projet

La gestion de l'eau est un enjeu-clé pour le secteur de Saclay à cheval sur plusieurs bassins versants naturels. Il surplombe des vallées urbanisées avec un risque important d'inondation. Une stratégie d'ensemble a été définie pour limiter les ruissellements, les risques d'inondations et améliorer la qualité des eaux.

Le développement du territoire entrainera l'arrivée de milliers d'habitants dans les prochaines années, posant alors un problème évident de gestion des eaux usées. L'assainissement du plateau est un enjeu qui a été identifié dès le démarrage du projet dans un contexte de réchauffement climatique qui devrait notamment réduire les débits d'étiage des cours d'eau. L'assainissement est aujourd'hui assuré par les usines du Syndicat interdépartemental d'assainissement de l'agglomération parisienne (SIAAP) après un transport des effluents par les syndicats intercommunaux (le Syndicat intercommunal d'assainissement du Val de Bièvre - SIAVB, le Syndicat intercommunal de la Vallée de l'Orge aval - SIVOA, le Syndicat intercommunal pour l'aménagement hydraulique de la vallée de l'Yvette - SIAHVY). Un projet de construction de station d'épuration desservant spécifiquement le plateau de Saclay a été abandonné après les études de faisabilité. Il a donc été décidé de raccorder le plateau au réseau du SIAAP, sans réelle innovation dans le domaine.

En outre, le SDAGE Seine-Normandie demande la mise en œuvre de mesures de rationalisation du système d'assainissement pour les unités hydrographiques Bièvre et Orge-Yvette à travers une déconcentration des effluents. *Cette contrainte a imposé la mise en avant du traitement local des effluents au niveau des programmes d'aménagement. La collecte sélective de l'urine pourrait pleinement s'inscrire dans cet objectif global.*

I.D.3 Une activité agricole sur le plateau de Saclay, marqueur de l'identité du territoire

L'activité agricole marque le paysage du territoire de Paris-Saclay. Ses 2 700 ha de terres exceptionnellement fertiles sont principalement vouées à l'exploitation céréalière.

Si la majorité des terres est dédiée aux grandes cultures céréalières et oléo-protéagineuses, une agriculture maraîchère est présente sur ce territoire, et partant, fait partie de son identité. Trente-trois exploitations agricoles sont présentes sur le plateau de Saclay avec 202 emplois agricoles (Source SAFER, 2011) :

- dix-sept exploitations de grandes cultures : 10% des emplois agricoles du plateau et une surface agricole utile (SAU) moyenne de 152 ha (26 ha à 390 ha), supérieure à la moyenne francilienne ;
- cinq organismes de recherche qui représentent 556 ha de SAU ;
- treize autres exploitations (pépinières, aviculture, centres équestres, apiculture, horticulture) sur 186 ha de SAU mais qui représentent plus de la 50% des emplois agricoles (120 emplois).

Les exploitations sont globalement bien structurées avec une relative solidité économique. L'enjeu que représente l'agriculture pour le plateau de Saclay a conduit le législateur à créer par la loi du 3 juin 2010 relative au Grand Paris une zone de protection naturelle, agricole et forestière du plateau de Saclay (ZPNAF) dont la surface affectée à l'agriculture est de 2 469 ha sur les 4 115 ha de la zone 4. Cette innovation législative permet ainsi de sanctuariser les espaces naturels et agricoles qui y sont intégrés, interdisant toute construction présente ou future.

L'aménagement s'inscrit donc dans une ambition de maintien d'une agriculture économiquement viable sur le long terme en évitant l'étalement urbain. Il s'accompagne de la volonté de créer une synergie entre le monde agricole et le secteur urbain proche afin de retisser le lien entre les deux mondes. La collecte sélective de l'urine, avec une valorisation en agriculture, s'insère totalement dans cet objectif de lien entre le monde agricole et le monde urbain. Elle doit pouvoir s'appuyer sur la proximité géographique de ces deux mondes au niveau du territoire de Saclay.

Chapitre II

Méthodologie de l'étude

II.A Méthodologie globale

L'objectif affiché de la commande est d'analyser les synergies d'acteurs locaux du Plateau de Saclay qui permettraient l'émergence de l'innovation de séparation à la source des urines dans le cadre des nouveaux aménagements portés par l'EPPS. Il était ainsi attendu explicitement une exploration de la chaîne d'acteurs de l'aménagement du plateau de Saclay, et ce par la conduite d'entretiens d'acteurs afin d'envisager leurs freins et leviers dans le cadre d'une construction collective d'un scénario innovant d'assainissement. Dans le même temps, les entretiens devaient permettre d'explicitier les conditions à même de rendre viable pour chacun des acteurs le modèle économique de l'assainissement avec séparation à la source des urines.

Nous avons donc privilégié une méthodologie en 4 étapes successives, que nous décrivons et justifierons plus précisément par la suite et qui est résumée en FIGURE II.1. La première étape consiste en l'élaboration d'une typologie des différents acteurs qui pourraient être potentiellement impliqués dans la mise en oeuvre d'une filière d'assainissement avec séparation d'urine à la source, sur la base des échanges avec nos commanditaires et de la littérature. À l'aide de cette typologie, nous avons réalisé une base de contacts afin de réaliser les entretiens requis dans la commande. En raison du temps imparti, il était impossible de viser à l'exhaustivité des acteurs implicables, ni d'envisager une répétition des entretiens à la suite de nos avancées. Compte-tenu de ces contraintes, nous avons procédé par une méthode d'entretiens semi-directifs. Ceux-ci étaient conduits sur la base d'un guide d'entretien précédemment établi, reprenant les hypothèses concernant les freins et leviers envisagés pour chaque catégorie d'acteurs, ainsi que nos scénarios de référence pour une filière d'assainissement avec séparation à la source. Nos entretiens ont permis de tester nos hypothèses et ces scénarios, à la suite d'une analyse qualitative sur la base des comptes-rendus d'entretien obtenus.

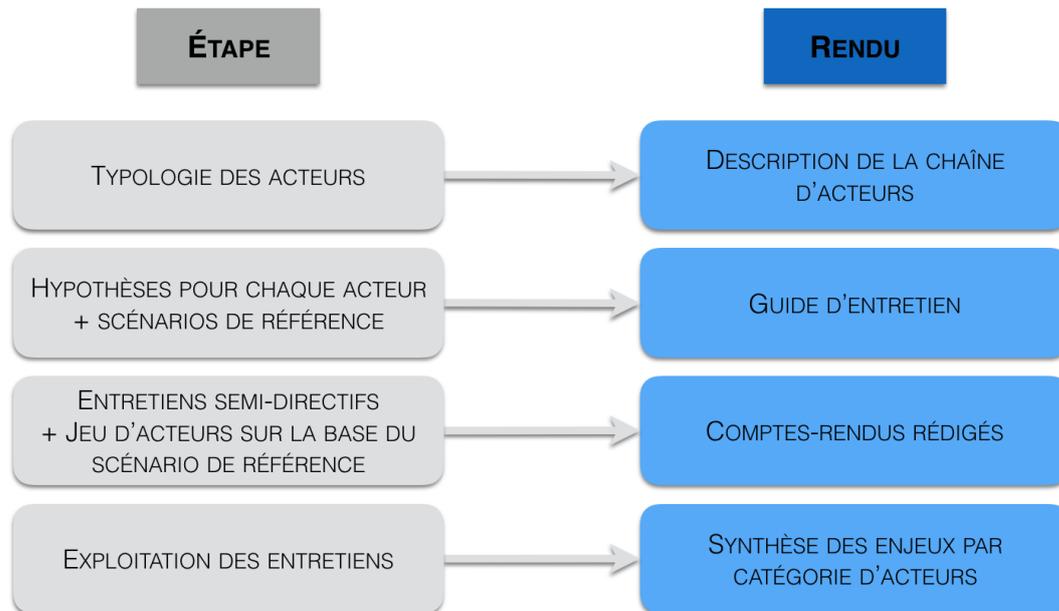


FIGURE II.1 – Résumé des différentes étapes de la méthodologie employée

II.B Réalisation d'une typologie

Nous avons commencé par procéder à une typologie des acteurs susceptibles d'intervenir sur la chaîne technique de l'assainissement par séparation des urines à la source (FIGURE II.2). Sur la base des 5 groupes fonctionnels proposés par Tilley [Tilley et al., 2014] (interface usager, collecte et stockage, transport, traitement et valorisation), nous avons retenu 4 groupes d'acteurs, en traitant ensemble l'interface usager et la collecte/stockage. :

- *Acteurs du bâtiment* : ils sont chargés de concevoir et d'installer les équipements nécessaires à une collecte à la source, comme les toilettes à séparation et la tuyauterie. Cette catégorie peut donc regrouper des acteurs aussi divers que la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'oeuvre, les bureaux d'étude, les aménageurs, etc. ;
- *Acteurs du transport* : ils supervisent la gestion du flux d'urine prélevé à la source, depuis son lieu de collecte jusqu'au lieu de traitement ou de valorisation (usine, champ, etc.). Il peut s'agir d'acteurs de l'assainissement ou du transport de déchets, ou encore de valorisation ;
- *Acteurs du traitement* : ils mettent en oeuvre les procédés permettant de faire de l'urine une substance utilisable dans le cadre d'une valorisation. Il peut s'agir d'une simple hygiénisation par stockage comme de traitements plus complexes permettant une transformation physico-chimique des urines ou de ses constituants ;
- *Acteurs de la valorisation* : ces acteurs utilisent les urines comme matière première afin de la valoriser en tant qu'intrant. Il peut s'agir d'agriculteurs ou d'industriels.

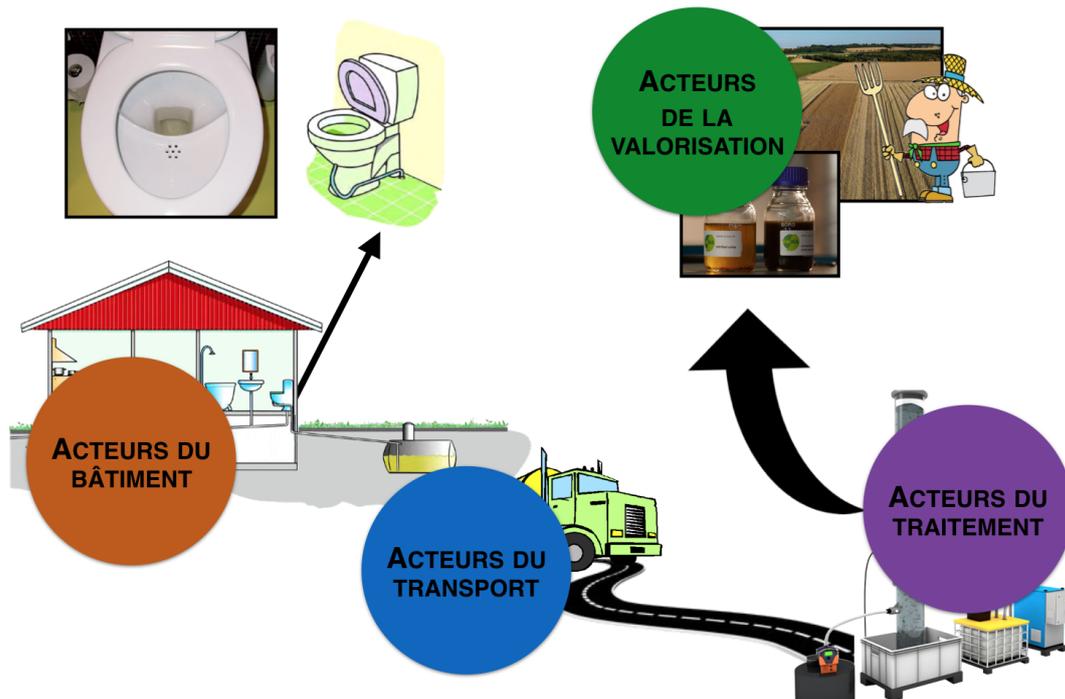


FIGURE II.2 – Catégories d'acteurs identifiées dans la chaîne technique

Cependant cette chaîne technique n'est pas indépendante du contexte dans lequel une filière alternative d'assainissement pourrait émerger, concernant les aspects suivants :

- *politique* : les élus sont porteurs des projets d'aménagement, et ils peuvent représenter également les associations locales qui porteront ou au contraire freineront le projet ; des usagers : bien que nous ne les ayons pas intégrés à notre chaîne technique, car déjà étudiés par ailleurs [Caby, 2013], ils sont cruciaux dans la réussite de la mise en place d'une telle filière. En effet, leur choix d'habiter dans un logement équipé de toilettes à séparation et leurs habitudes détermineront la possibilité même de collecte d'urine et le rendement de la récupération des urines et donc des quantités d'azote et de phosphore valorisables ;
- *concurrentiel* : bien que des acteurs divers puissent se structurer pour justement porter cette nouvelle filière, cette dernière vient s'inscrire dans des paradigmes et des marchés pré-existants, où coexistent différentes forces de pression. Celles-ci pourront considérer la filière comme une opportunité à saisir, être neutre vis-à-vis de son développement, ou bien la percevoir comme une concurrence potentielle ;
- *réglementaire* : la filière des urines étant complètement neuve en France, elle ne dispose pas d'une réglementation affirmée ni dédiée. La construction réglementaire autour de la filière peut créer les conditions favorables à son émergence et à sa diffusion comme l'empêcher de voir le jour ou de se développer.

Ces différents acteurs et leurs interactions, entre eux ou avec la chaîne technique de la séparation à la source, sont résumés en FIGURE II.3

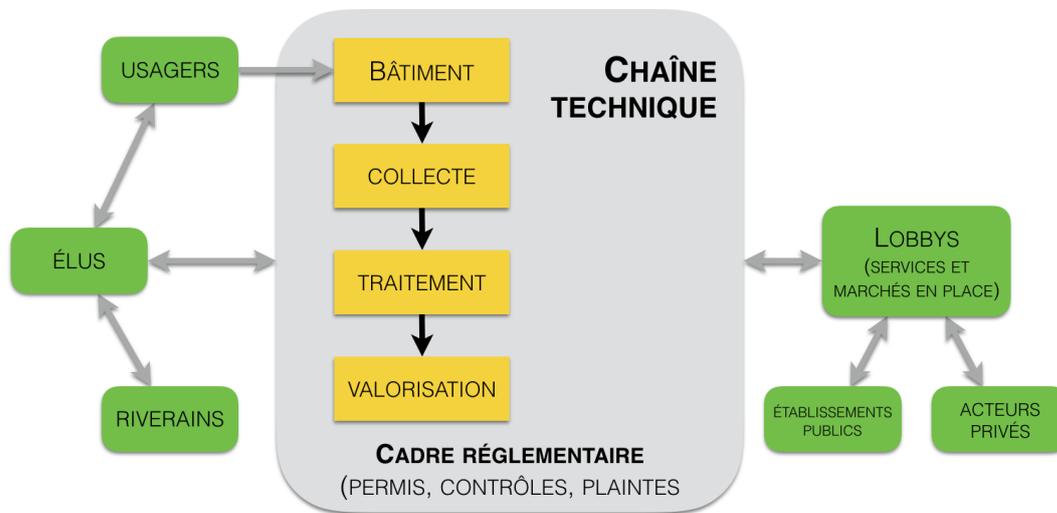


FIGURE II.3 – Contexte d'inscription de la chaîne technique

À la suite de l'élaboration de cette typologie, nous avons réalisé une base de contacts parmi ces différents acteurs, en privilégiant des représentants de la chaîne technique, afin de réaliser nos entretiens. Comme nous l'avons précisé plus haut, nous n'avons pu rencontrer qu'un nombre limité d'acteurs par catégorie, et ce une seule fois, compte tenu du temps imparti. Nous aurions ainsi pu rencontrer l'ARS (Agence Régionale de Santé), ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), le MAAF (Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Forêt), des représentants politiques (maires).

Type d'acteurs	Acteurs contactés
Bureaux d'étude	Le Sommer Environnement (AMO/MOE construction)
	Berim (ingénierie bâtiment, techniques urbaines et environnement)
	SEDE Environnement (conseil, accompagnement des collectivités et industriels producteurs de boues d'épuration ou de déchets organiques et minéraux)
Maîtrise d'ouvrage	SODEARIF (promoteur immobilier)
	EPPS (Etablissement Public Paris-Saclay)
Assainissement	SIAAP (Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne)
	SIABV (Syndicat Intercommunal pour l'Assainissement de la Vallée de la Bièvre)
	Veolia
	AESN (Agence de l'Eau Seine Normandie)
	Police de l'EAU (DRIEE IDF)
	Toilettes du Monde (association spécialisée dans le domaine de l'assainissement écologique)
Recherche	INRA (UMR ECOSYS & SAD-APT)
	LEESU (Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains de l'ENPC)
	EAWAG (Institut Suisse des Sciences et des Techniques de l'eau)
Acteurs agricoles	Les fermes de Gally (agriculteur)
	Terre & Cité (association représentant les agriculteurs du plateau de Saclay)
	UNIFA (Union des Industries de la Fertilisation)
	Chambre d'agriculture d'Ile-de-France (conseil aux agriculteurs)
	GAB Ile-de-France (Groupement des Agriculteurs Bio)
Acteurs espaces verts	Agence des espaces verts

TABLE II.1 – Liste des acteurs contactés au cours de notre étude

NB : nous n'avons pu rencontrer un représentant que d'un seul grand groupe français de l'assainissement : Veolia. Nous avons l'intention de rencontrer des représentants de Suez et de SAUR mais pour des raisons d'ordre pratique, cela n'a pas été possible.

II.C Méthodologie des entretiens semi-directifs et constitution d'un guide d'entretien

La méthode choisie est l'entretien semi-directif avec chacun des acteurs rencontrés. Dans ce cas particulier, nous avons procédé par une étude de la littérature existante, couplée à un questionnaire à une utilisatrice de ce type de toilettes.

La méthode de l'entretien semi-directif provient de la sociologie, et permet, en s'appuyant sur un guide d'entretien récapitulant les thèmes et hypothèses propres à chaque interlocuteur, d'aborder l'ensemble des points désirés par l'enquêteur. Elle permet de plus d'envisager une comparaison des résultats, sous la forme des comptes-rendus d'entretiens, en structurant les données recueillies.

II.C.1 Des hypothèses formulées pour chaque catégorie d'acteur

Pour chaque catégorie d'acteur, une revue bibliographique a permis de constituer un guide d'entretien en proposant pour chaque acteur les hypothèses concernant :

- la logique propre de chaque acteur concernant une innovation comme la filière d'assainissement avec séparation à la source des urines ;
- sa posture spécifique par rapport à cette filière ;
- les freins et leviers envisageables.

Des scénarios de base présentés aux acteurs à l'aide d'un jeu d'acteurs.

II.C.2 Le jeu d'acteurs

Nous avons supposé dans nos hypothèses que le secteur du bâtiment suivait des logiques internes et ne dépendait du reste de la chaîne technique que dans l'établissement concret de cette chaîne. Si aucune chaîne viable de transport, traitement et valorisation ne se développe, les acteurs du bâtiment ne pourront porter l'innovation. Si cette chaîne est en place, les logiques de développement de cet acteur n'entreront que très peu en synergie avec le reste de la chaîne.

Cependant, il n'en va pas de même pour le reste de la chaîne où le choix d'un type de transport pourrait conditionner les acteurs de traitement (on imagine mal un transport effectué par l'agriculteur qui redonnerait ces urines à une station de traitement en vue de les récupérer par la suite), et les acteurs de traitement conditionnent eux-même le choix d'un type de valorisation (il est peu probable que de l'urine brute non-traitée arrive sous forme de bidon chez un particulier, alors que des granulés sont tout à fait envisageables).

Le choix d'une valorisation sous forme d'urines brutes bloque de fait tout traitement industriel de ces urines. Ainsi la chaîne Transport/Traitement/Valorisation fonctionne de manière matricielle et un véritable jeu d'acteurs est possible.

Nous souhaitions confronter nos interlocuteurs à la question de cette chaîne dans nos entretiens. Les mettre devant une feuille blanche et les laisser créer eux-même cette chaîne sous-entend au préalable que nos interlocuteurs ont une bonne connaissance du principe de la collecte sélective des urines, ont réfléchi à la mise en place effective de cette collecte sur tous les plans que nous souhaitions aborder. Or, travaillant sur une innovation assez récente, peu répandue dans notre pays et les pays voisins, la collecte séparée des urines est relativement peu connue de nos interlocuteurs et, quand bien même ces derniers aient été sensibilisés par des spécialistes du domaine comme Fabien Esculier, la plupart n'y ont jamais réfléchi en détails et sont plus à la recherche de données, d'informations en vue d'une réflexion future.

Il nous a donc fallu trouver un moyen leur permettant de créer simplement et rapidement leur vision de la chaîne après avoir reçu de notre part les informations, qui leur semblaient nécessaires. Nous avons donc décidé de créer notre jeu d'acteurs, qui comporte des vignettes plastifiées et aimantées reliées à chaque type d'acteurs, qu'il est possible de faire bouger sur un tableau aimanté (FIGURE II.4).

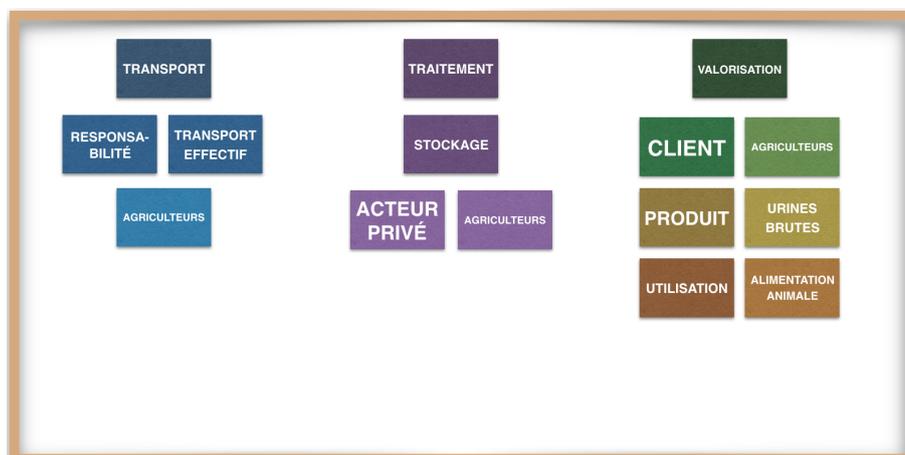


FIGURE II.4 – Reproduction d'un tableau d'acteurs potentiels

Nous avons répertorié un nombre fini de vignettes correspondant aux acteurs possibles, répondant aux questions suivantes :

- pour les acteurs du transport : qui a la responsabilité légale de la réalisation de la collecte et du transport des urines stockées dans les cuves en bas d'immeuble ? Qui réalise le transport dans les faits ?
- pour les acteurs de traitement : le traitement des urines consiste-t-il en un simple

stockage hygiénisant ou en un processus industriel ? Qui réalise ce traitement ?

- pour les acteurs de la valorisation : qui est le receveur final ou « client » de ces urines ? Sous quelle forme reçoivent-ils les urines ? Sur quel type de culture utilisent-ils le produit comme engrais ?

Des acteurs sont naturellement proposés aux personnes interrogées (FIGURE II.5), dont le degré de précision peut être adapté à leur profil et à leurs connaissances et réflexions préalables (la vignette « acteur public » est bien plus générale que la vignette « SIAAP »). Des vignettes blanches sont ajoutées pour inclure les propositions de l'interlocuteur. Le tableau blanc aimanté peut être annoté pour ajouter des précisions ou encore mettre en valeur des connexions dans la chaîne d'acteurs.

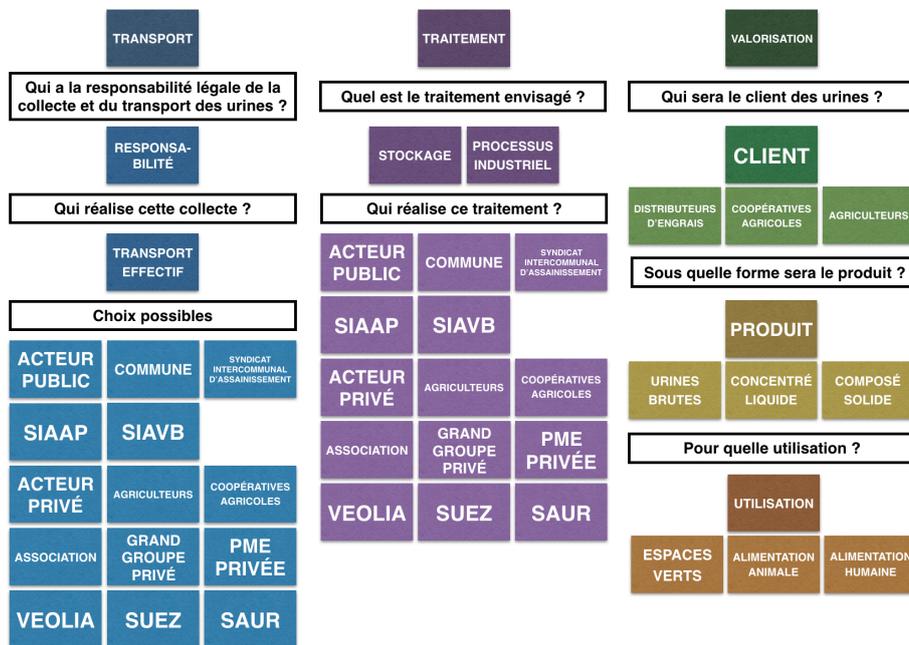


FIGURE II.5 – Ensemble des choix de notre jeu d'acteurs

Ce choix a payé puisque nous avons eu de très bons retours de la part de nos interlocuteurs sur le jeu et celui-ci a permis aux personnes interrogées de formuler des remarques que l'entretien sous sa forme classique n'avait pu faire émerger. Nos interlocuteurs se sont souvent pris au jeu, pour aboutir à des chaînes bien spécifiques, quand bien même leurs connaissances préalables de la collecte sélective des urines étaient quasi inexistantes (FIGURE II.6). Toutefois, cette réussite est à nuancer puisque, si les jeux effectués se sont révélés instructifs, le jeu ne se prêtait pas à chaque entretien et nous avons finalement peu de retours à exploiter (5 retours sur les 20 entretiens conduits). Les jeux d'acteurs récoltés sont retranscrits en ANNEXE B.

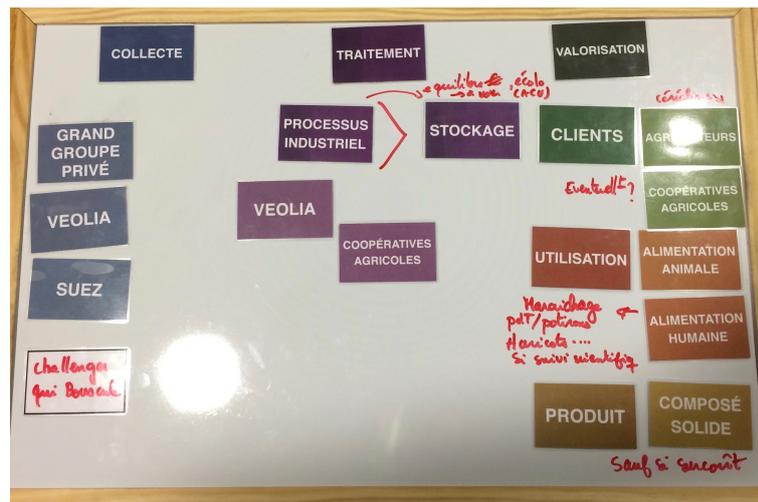


FIGURE II.6 – Exemple d’un jeu d’acteurs au cours d’un entretien avec un agriculteur

II.D Limites

Au moins deux limites fondamentales se rattachent à la méthodologie que nous avons employée afin de répondre à la question de nos commanditaires.

La première est d’ordre matériel et limite la puissance de l’étude du point de vue de sa fiabilité. En effet, nous n’avons pu évidemment rencontrer l’ensemble des acteurs potentiellement impliqués dans la mise en place d’une filière alternative d’assainissement avec séparation à la source des urines. Nous avons été contraints, pour chaque catégorie d’acteur identifiée lors de la réalisation de la typologie, d’en choisir quelques représentants, en fonction des contacts et disponibilités de chacun. Il est ainsi difficile, à partir d’un ou quelques acteurs rencontrés pour une catégorie, d’imputer un comportement global à tous les acteurs potentiels de cette catégorie. Nous n’avons pu de plus, pour chaque structure, ne rencontrer que quelques interlocuteurs. Ces derniers ne sont pas forcément représentatifs de la position de l’acteur rencontré. En effet, dans de nombreux cas, nous avons rencontré des personnes déjà sensibilisées aux problématiques soulevées par cette filière et déjà informés par ailleurs. Souvent, les interlocuteurs avaient une posture particulière dans la structure, en s’occupant des fonctions de veille, de prospective ou d’innovation par exemple. Considérer le discours de l’interlocuteur rencontré comme un reflet de celui de l’ensemble de la structure, et notamment de sa fonction stratégique et dirigeante, est une hypothèse forte que nous avons dû employer. Enfin, il n’a pas été possible de s’entretenir plusieurs fois avec les interlocuteurs rencontrés. En effet il aurait été intéressant, suite à l’analyse qualitative des différents entretiens menés, de réaliser un second passage afin de faire valider les synthèses et éventuellement faire évoluer les positions.

La seconde limite très forte de notre travail est la perception de notre posture par les interlocuteurs rencontrés. La présentation de notre démarche, le discours employé, sont autant d'éléments qui ont pu influencer la teneur du propos de nos interlocuteurs. Nous étions en effet rarement perçus de manière neutre, comme étudiants menant une démarche d'analyse sociotechnique, par les acteurs rencontrés. Plusieurs arguments viennent étayer cette affirmation :

- plusieurs interlocuteurs nous ont suggéré de taire nos commanditaires ou de bien mettre en avant les aspects « scolaires/recherche » de notre travail, pour nos prochains entretiens, en raison du regard porté par les interlocuteurs rencontrés ;
- certains interlocuteurs semblaient nous percevoir comme porteur du projet d'assainissement avec séparation à la source, avec apparemment un discours en faveur de sa mise en oeuvre, malgré le fait que nous nous présentions dans le cadre d'une démarche d'observation et d'analyse des avantages/coûts et leviers/freins pour chaque acteur, de manière objective.

La difficulté réside alors dans le fait que notre implication dans le projet, par la méthodologie qualitative employée, peut modifier la mesure effective de ce que nous cherchions à évaluer, et ce de manière importante. Les réactions et réponses à nos questions ont pu rencontrer le biais induit par les interactions entre les acteurs rencontrés.

Chapitre III

Analyse socioéconomique de la collecte sélective d'urines

L'objet de ce GAAP est d'analyser les synergies d'acteurs locaux qui permettraient l'émergence de ce nouveau modèle d'assainissement au niveau des futurs aménagements du plateau de Saclay, en s'appuyant sur un volet économique mettant en exergue les conditions qui seraient à même de rendre économiquement viable ce modèle pour chacun des acteurs de la chaîne de l'assainissement, tant en investissement pour la mise en place des infrastructures qu'en exploitation du système.

Partant de notre méthodologie présentée en PARTIE II, nous avons pu dresser après notre série d'entretien une cartographie des acteurs de la collecte sélective des urines mettant en lumière les logiques propres à chaque acteur et leur vision du système (PARTIE III.A). Ces visions seront ensuite confrontées à de multiples chaînes d'acteurs afin d'en faire émerger les avantages, les inconvénients et leur probabilité de réalisation effective (PARTIE III.B). Cette analyse sociologie sera éclairée à l'aune d'une analyse technico-économique basée sur un modèle de production des urines sur un territoire donné (PARTIE III.C). Cette dernière partie permettra de revoir les scénarios considérés en III.B en incluant des éléments chiffrés techniques et économiques, qui vont parfois à l'encontre de nos intuitions premières inscrites dans notre scénario de base détaillée en (PARTIE II).

III.A Cartographie des acteurs

En vue d'analyser les synergies d'acteurs locaux du Plateau de Saclay qui permettraient l'émergence de l'innovation de séparation à la source des urines, il est important, dans un premier temps, de mettre en évidence les logiques propres de chaque acteur : les leviers qui pourraient l'inciter à pousser l'émergence de la collecte sélective des urines, les blocages qu'il présente mais aussi les idées qu'il peut avoir sur le système. Dans un second temps, il est intéressant d'observer quels avis portent les autres acteurs de la chaîne sur l'acteur en question : quels blocages identifient-ils ? Les leviers d'entrée annoncés par l'acteur et ceux déduits par les autres acteurs sont-ils les mêmes ? Les réponses à l'ensemble de ces questions permettront, une fois ces logiques propres mises en valeur, de les confronter en PARTIE III.B à l'aune de ce qui a pu nous être dit dans les entretiens.

Les acteurs traités vont de l'utilisateur, acteur de production (PARTIE III.A.1) à l'agriculteur, acteur de valorisation (PARTIE III.A.5), en passant par les acteurs du bâtiment (PARTIE III.A.2), du transport des urines (PARTIE III.A.4) et de leur traitement (PARTIE III.A.4).

III.A.1 Acteurs de production - usagers

Dans cette partie, nous nous intéressons aux acteurs de la production des urines, c'est-à-dire les usagers dont l'urine est collectée de manière séparative, et le contexte dans lequel cette production a lieu : logement, bâtiment de type tertiaire etc.

Nous n'avons pas mené de large enquête auprès d'utilisateurs ou de potentiels usagers pour les raisons suivantes :

- la littérature existante présente plusieurs retours d'utilisateurs dans les pays où des toilettes à séparation d'urine ont été installées, nous utilisons les résultats de ces travaux ;
- Amandine Caby, dans son mémoire de thèse professionnelle, a déjà mené un sondage auprès de 125 personnes (84 retours), non-utilisateurs, pour connaître leur acceptabilité *a priori* du système. Nous utilisons les résultats de ce sondage.

En complément, nous avons pu contacter une ancienne étudiante suédoise des Ponts et Chaussées, ayant déjà utilisé de manière régulière des toilettes à séparation d'urine, afin de vérifier des points précis concernant l'utilisation, les résultats sont présentés en PARTIE III.A.1.b.

De plus, nous présentons en PARTIE III.A.1.c les avis exprimés sur la production par les différents acteurs rencontrés en entretien.

III.A.1.a Hypothèses initiales

Les retours d'expérience, notamment dans les projets-pilotes de l'EAWAG, permettent de soulever les points techniques suivants [Caby, 2013] :

- dans l'un des appartements privés, les toilettes ont dû être changées car les enfants avaient des difficultés à utiliser ces toilettes ;
- des mauvaises odeurs peuvent se développer ;
- des dysfonctionnements peuvent survenir : par exemple l'obstruction du tuyau par formation de struvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4, 6 \text{H}_2\text{O}$).

Les différents retours d'usagers permettent de soulever les points suivants à propos des toilettes nécessitant la position assise pour actionner le système de séparation des urines à la source (modèle Roediger) :

- il existe des réticences, pour les hommes comme pour les femmes, à s'asseoir sur les toilettes dans les lieux publics, pour des raisons d'hygiène [Blume and Winker, 2011] ;
- le changement d'habitude pour les hommes (uriner assis) peut être très contraignant et les femmes peuvent éprouver des difficultés à uriner dans la bonne cuvette [Caby, 2013] ;
- les personnes sont plus enclines à utiliser ce système au travail que chez elles (sondage réalisé par A. Caby dans [Caby, 2013]) ;
- un point noir concernant la chasse d'eau pour les fèces est relevé par certains usagers : il est parfois nécessaire d'actionner deux fois la chasse d'eau pour une évacuation complète des fèces [Besson, 2015]. D'après des informations données par notre tuteur, il semble que le modèle Roediger ne soit plus produit. Il s'agissait pourtant, contrairement aux toilettes séparatives du marché suédois, d'un système sans chasse d'eau pour les urines, ce qui permet d'éviter leur dilution. Toujours selon les informations de notre tuteur, l'EAWAG travaillerait avec un industriel sur un prototype de toilettes à séparation assurant l'absence d'eau dans le tuyau d'évacuation des urines.

Enfin, un facteur de motivation pour les ménages est soulevé dans un retour d'expérience suédois [Berne, 2009] : à Vaxholm, les habitants se sont sentis motivés et ont commencé à réellement entretenir leurs toilettes séparatives quand la filière de valorisation agricole a été mise en place et portée à leur connaissance. La perspective d'une valorisation a donc été un facteur de motivation pour ces ménages.

Ces éléments et nos réflexions personnelles nous ont permis de constituer nos hypothèses de travail :

- les désagréments constatés (mauvaises odeurs, problème de chasse d'eau, dysfonctionnements) sont un frein à la bonne utilisation des toilettes. Ceci peut induire de mauvais rendements (utilisation comme s'il s'agissait de toilettes classiques) ;
- ces désagréments peuvent être résolus grâce à un entretien et une maintenance réguliers, avec formation du personnel de nettoyage. Il apparaît donc que le système de collecte séparée des urines sera probablement plus facile à installer et à pérenniser dans des immeubles de bureaux, grâce aux contrats passés avec les sociétés de nettoyage ;
- le changement d'habitudes peut être contraignant et pourrait être contrebalancé

- par le levier de la conscience écologique avec le parallèle du tri des déchets ;
- un levier économique peut être envisagé avec la baisse de la facture d'eau pour les usagers dont les urines sont collectées, traitées et valorisées.

III.A.1.b Recueil d'un témoignage d'utilisateur

Nous avons envoyé un questionnaire à une ancienne étudiante suédoise des Ponts et Chaussées afin de connaître son avis sur les désagréments produits par les toilettes et le changement d'habitudes qui doit intervenir. Le questionnaire et la réponse (les deux en anglais) sont fournis en ANNEXE A). Malheureusement, nous n'avons pas pu obtenir d'autres retours, notamment d'hommes. Une autre limite à ce retour est que cette personne est particulièrement sensibilisée aux enjeux de l'eau et de l'assainissement, elle est donc non-représentative de la majorité de la population.

Les résultats de son retour d'expérience sont les suivants :

- elle a utilisé des toilettes à séparation sèches (aucune eau n'est utilisée), sans difficulté particulière de nettoyage ;
- elle n'a pas eu à changer ses habitudes ;
- elle n'a noté aucune nuisance olfactive et estime même que ces toilettes sèches produisent une odeur plus agréable que les toilettes classiques ;
- elle indique avoir eu des réticences initialement à vivre dans un logement équipé de ce système de toilettes (il s'agissait d'une résidence étudiante) mais qu'à l'usage elle en était satisfaite. Elle ajoute qu'il est agréable de faire quelque chose de positif pour l'environnement sans avoir à faire quoi que ce soit.

III.A.1.c Avis portés sur la production par les acteurs rencontrés

III.A.1.c.i La question de la redevance acquittée par les usagers

Avec notre interlocuteur au SIAAP, nous avons discuté des plus-values pour les usagers dont les urines sont collectées : à première vue, seulement des désavantages apparaissent, la plus-value que l'on peut trouver est que le prix de l'eau devrait « *moins augmenter que prévu* » (si la collecte séparée des urines permet d'éviter la construction de tranches supplémentaires dans les stations d'épuration). Mais l'interlocuteur pense que ceci serait totalement invisible pour l'utilisateur. De plus, notre interlocuteur estime que l'utilisateur doit continuer à s'acquitter de sa redevance, car c'est transparent pour lui si ses urines sont traitées séparément ou en station d'épuration.

Notre interlocuteur chez Veolia estime qu'il est inenvisageable d'augmenter le prix de l'eau pour ces usagers si le traitement des urines s'avère plus coûteux qu'en station d'épu-

ration. Au contraire, l'interlocuteur suggère une incitation que pourrait mener le SIAAP en baissant de 10% sa redevance.

D'autres interlocuteurs, comme dans le bureau d'études BERIM, sont plus sceptiques quant à l'impact de la facture d'eau sur les choix des usagers. La personne que nous avons rencontrée estime que la facture d'eau n'est pas une grosse préoccupation en ville et qu'il vaut mieux envisager de jouer sur les recettes (rétribution monétaire aux usagers, sous la forme de chèques versés par un EPCI qui se créerait localement) que sur les charges (réduction de la facture d'eau).

III.A.1.c.ii Un changement d'habitudes nécessaire mais difficile

Les deux personnes rencontrées chez les bureaux d'études Le Sommer Environnement et BERIM estiment que le changement d'habitudes sera particulièrement contraignant pour les hommes dans la société française, ils ont tous les deux évoqué une « population mâle latine » pour le premier et une « culture latine » pour le second conduisant à un rejet masculin de la position assise pour uriner.

III.A.1.c.iii Prise de conscience écologique

Notre interlocuteur au SIAAP estime qu'inculquer l'idée que la séparation des urines est du même ordre que le tri des déchets serait plus efficace pour motiver les usagers à adopter ce système que jouer sur la facture d'eau.

Notre interlocuteur chez Le Sommer Environnement estime qu'une pédagogie active est nécessaire auprès des usagers, pour bien faire comprendre les enjeux de l'assainissement et pour les inciter à être rigoureux dans leur utilisation afin de limiter les pertes de rendement. Cette pédagogie peut s'appuyer sur les progrès actuels dans la prise de conscience écologique avec notamment une logique de recyclage plus imprégnée dans les mentalités que par le passé.

III.A.1.d Conclusions

Les acteurs de productions, les premiers de la chaîne, disposent d'un fort pouvoir sur l'ensemble de la filière car si l'utilisation est négligente ou que des dysfonctionnements (obstruction des tuyaux) surgissent, le rendement de la collecte peut chuter et les quantités collectées diminuer significativement. Il existe notamment un cas, comme à Erdos en Chine, où un rejet fort des usagers a provoqué un abandon complet du projet avec remplacement des toilettes sèches à séparation par des toilettes avec chasse d'eau [Caby, 2013].

Ces acteurs doivent être convaincus de l'intérêt de la filière, par une pédagogie active et un parallèle avec le tri des déchets par exemple, pour garantir une utilisation optimale des toilettes à séparation d'urines. Des éléments de conviction peuvent être avancés : action en faveur de l'environnement en ne produisant que peu d'efforts, existence d'une filière de valorisation en aval.

En contrepartie, les désagréments doivent être limités au maximum (odeurs, obstruction) pour que la prise de nouvelles habitudes se fasse au mieux. Pour convaincre un grand nombre d'utilisateurs, le niveau de « confort » doit être équivalent à l'utilisation de toilettes classiques. La question des habitudes peut être problématique : premièrement beaucoup d'hommes montrent des réticences à uriner assis, deuxièmement dans les lieux publics, pour des raisons d'hygiène, hommes et femmes répugnent à s'asseoir complètement sur les toilettes (ce qui pose la question du design et de la fonctionnalité du type de toilettes choisi).

Le levier économique peut également être envisagé avec une rétribution pour les usagers : il semble qu'il soit plus efficace de jouer sur le levier des recettes (rétribution sous forme de chèques annuels, paniers de légumes fertilisés à l'urine etc.) plutôt que sur le levier des charges (économies sur la facture d'eau). Remarquons que toute rétribution financière des usagers ne peut s'envisager que si la filière génère des bénéfices, ce qui ne paraît possible qu'à moyen terme, si la filière est bien développée.

III.A.2 Acteurs du bâtiment

Les acteurs du bâtiment sont ceux qui gravitent autour de la construction des infrastructures susceptibles d'accueillir des dispositifs de collecte sélective des urines. Cette catégorie d'acteurs rassemble les aménageurs, la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage, les constructeurs, les promoteurs immobiliers et les bailleurs.

Au cours de notre série d'entretiens, nous avons pu rencontrer dans cette catégorie d'acteurs : un aménageur (l'EPDS), deux bureaux d'études (BERIM et Le Sommer Environnement) et un maître d'ouvrage/constructeur (SODEARIF, filiale de Bouygues Bâtiment Ile-de-France).

III.A.2.a Hypothèses initiales

Au début de notre étude, nous avons formulé les hypothèses suivantes concernant les acteurs du bâtiment :

- *pour les bailleurs* : ces acteurs expriment une certaine sensibilité à l'égard du développement durable et de l'argument commercial qu'il constitue. L'acceptabilité du projet est toutefois fortement entamée si les logements viennent à rester vacants

- ou peu attractifs du fait de la présence des toilettes à séparation d'urine ;
- *pour les aménageurs et la maîtrise d'ouvrage* : ces acteurs expriment une sensibilité marquée à l'argument commercial du développement durable et de faire d'un territoire une « vitrine verte » en s'inscrivant dans une réflexion sur l'assainissement à long terme. L'acceptabilité du système est donc bonne tant que celui-ci ne nuit pas à la vente des lots et des logements. Dans ce contexte, ces acteurs attendent une réversibilité du système vers le « tout à l'égout » standard, au moins dans les phases de développement initiales ;
 - *pour la maîtrise d'œuvre* : nous distinguons les bureaux d'étude et les architectes. Pour les premiers, nous supposons un intérêt vis-à-vis du système dans l'optique d'une « spécialisation verte », qui demandera une formation de leurs employés et un maintien à jour des connaissances dans le domaine. Du côté des architectes, le système de collecte séparée des urines ne modifiera pas leur métier mais reste un argument marketing ;
 - *pour les constructeurs et promoteurs immobiliers* : ces acteurs expriment eux-aussi une certaine sensibilité à l'égard du développement durable et de l'argument commercial qu'il constitue. Une nouvelle fois, le système ne doit pas nuire à l'attractivité des logements équipés. Un autre frein leur est spécifique, celui de la faisabilité technique d'installation de ces équipements et du surcoût engendré.

III.A.2.b Exploitation des entretiens réalisés

III.A.2.b.i L'importance de travailler *ab initio*

Nous avons décidé, au début de notre étude, de cantonner les bâtiments susceptibles d'accueillir des équipements de collecte sélective d'urines aux bâtiments neufs. Cette hypothèse était déjà choisie par Amandine Caby [Caby, 2013] : « *la collecte sélective des urines étant mise en place uniquement dans les logements neufs pour des raisons techniques et économiques* ». Au cours de notre entretien avec SODEARIF, notre interlocuteur nous a expliqué que dans des logements étudiants classiques, les tuyaux d'eaux usées étaient mutualisés dans une gaine reliée en bas d'immeuble au tout-à-l'égout. Les tuyaux réservés aux urines, partant de chaque toilettes, devront s'inclure obligatoirement dans cette gaine et ces ajouts pourront exiger l'augmentation de son diamètre. En conséquence, en plus des travaux standards d'installation des toilettes, de leur liaison à la cuve, qui devra être terrassée pour autoriser le pompage par camion, la mise en place de collecte sélective des urines pourrait amener à modifier tout le réseau d'assainissement de l'immeuble. Ce sont effectivement des raisons techniques et économiques qui motivent l'installation de tels équipements dans les bâtiments neufs, où leur intégration sera pensée en amont de la construction.

Cela est d'autant plus vrai que la personne rencontrée chez BERIM ajoute qu'il existe, dans le domaine de l'assainissement, une forte réticence à ce que des usagers se déconnectent du réseau collectif. En effet, les investissements dans ces réseaux ont été consentis pour plusieurs décennies et souffrent d'ores et déjà de la baisse de consommation d'eau, qui induit une baisse des recettes pour un réseau surdimensionné.

L'interlocuteur rencontré chez Veolia insistera lui aussi sur l'importance de « *travailler ab initio* ». Ces raisons confortent notre idée selon laquelle le projet a plus de chances d'aboutir dans du neuf.

III.A.2.b.ii Des surcoûts matériels importants, des coûts de « connaissance » inexistantes

Nous avons supposé dans nos hypothèses que la mise en place d'une collecte séparée des urines induirait des coûts de formation et de production et maintien de connaissances pour les constructeurs et la maîtrise d'œuvre. Du côté constructeur, notre interlocuteur chez SODEARIF a infirmé ces surcoûts de connaissance technique : il ne s'agira que de rajouter des tuyaux et de les relier à une cuve terrassée pour soutenir la charge d'un camion de pompage. La mise en place des équipements de collecte séparée ne mobilise que des connaissances déjà acquises par les constructeurs du bâtiment. Cette idée est confortée par Le Sommer Environnement, chez qui notre interlocuteur déclare que « *tout ce qui est réseau ce n'est pas très compliqué dans le bâtiment, ça reste un tuyau mais sans plus* ». Il en va de même pour les bureaux d'études puisque nos interlocuteurs chez BERIM et Le Sommer Environnement confirment que les coûts de production et de maintien des connaissances sur ce sujet seront négligeables dans leur corps de métier.

Les vrais surcoûts du système de collecte sélective des urines au niveau du bâtiment sont essentiellement matériels et multiples :

- surcoût dû à la cuve et à son installation : notre interlocuteur chez SODEARIF explique qu'il ne faut pas tenir compte uniquement de la valeur marchande de la cuve. Dans la mesure où nous imaginons un pompage de cette cuve par camion, il faut dimensionner la dalle au-dessus de la cuve pour que celle-ci puisse supporter le poids d'un camion de pompage plein. Il faut donc ajouter au prix de la cuve le coût du terrassement ;
- surcoût dû à la création du réseau secondaire pour les urines : comme évoqué *supra*, le surcoût du réseau secondaire dédié aux urines n'est pas le simple coût du linéaire de tuyau supplémentaire, mais aussi le surcoût potentiel de la place occupée par

- ces tuyaux dans la gaine qui regroupe tous les tuyaux d'eaux usées. Cette gaine est sujette à une réglementation concernant sa taille. D'ores et déjà quasi-saturée à l'heure actuelle pour des logements collectifs de type étudiant, l'insertion de nouveaux tuyaux pourrait obliger les constructeurs à passer au diamètre de gaine supérieur, entraînant une perte de surface disponible. Or le surface disponible est le maître-mot pour un constructeur, toute perte de surface a un fort effet dissuasif ;
- surcoût dû aux toilettes à séparation d'urine : ces toilettes sont actuellement destinée aux établissements hospitaliers, pour qui il est indispensable de récupérer les substances radioactives rejetées dans les urines après certains traitements thérapeutiques comme la chimiothérapie. Le marché étant petit et ciblé, le coût de telles toilettes est aujourd'hui prohibitif, avoisinant 4000€ soit 20 à 40 fois plus cher qu'un WC classique. Dans une logique de montée en puissance, il apparaît indispensable à notre interlocuteur chez Le Sommer Environnement que les acteurs du sanitaire s'impliquent et se saisissent de la filière. Notre interlocuteur chez SO-DEARIF s'est, de son côté, proposé de sensibiliser ses partenaires dans le domaine du sanitaire au sujet de toilettes à collecte séparée des urines, dans le but d'ouvrir le marché à la concurrence et de faire baisser les coûts. Pour Le Sommer Environnement, cela va encore plus loin puisque le design du WC doit être au centre de l'innovation, *motto* des bureaux d'étude, pour s'adapter à la population « mâle latine », augmenter les rendements mais aussi favoriser l'acceptation du produit en ayant un design innovant, qui irait au delà du simple ajout d'un tuyau dédié aux urines.

III.A.2.b.iii La réversibilité au service de la question d'attractivité des logements

La question d'attractivité des logements est belle et bien omniprésente dans nos entretiens avec les acteurs du bâtiment. Pour l'EPPS, porteur du projet, il est essentiel que ces logements soient attractifs et puissent se vendre. À leurs yeux, l'existence de quartiers équipés vivants et reconnus et non de simples quartiers témoins constituerait un réel soutien à la viabilité du projet. Les freins à l'attractivité de ces logements sont directement reliés aux problématiques d'acceptation de l'utilisateur discutées en partie précédente. Ces questions restent cependant sans réponse en l'absence de démonstrateur et cela freine l'émergence de vrais quartiers fonctionnant sur le système de collecte sélective d'urine.

Toutefois, si le système s'avère réversible, des acteurs comme l'EPPS paraissent moins effrayés de sauter le pas et de faire partie d'un projet test. De nos entretiens ressort toutefois le besoin que cette réversibilité ne soit qu'une solution de dernier recours et n'appartienne pas à l'utilisateur, qui pourrait alors se couper du système à la première difficulté

ou même sans l'avoir réellement essayé du fait des problèmes inhérents d'acceptabilité liés au « effet beurk ». La solution doit être donc possible à l'échelle du bâtiment et accessible au seul gérant d'immeuble. D'un point de vue technique, notre interlocuteur chez SO-DEARIF estime que l'installation d'une vanne en bas d'immeuble permettrait de rendre possible un by-pass des urines destinées à la cuve vers le réseau d'assainissement collectif classique. Au delà d'une réversibilité totale, ce système assurerait une résilience accrue lors d'épisode de maintenance utilisant des produits chimiques ou bien lors d'un souci temporaire dans la collecte des urines en cuve.

Le SIAVB insiste toutefois sur le fait que si la solution technique apparaîtrait simple, les modalités pratiques de ce by-pass devront être soumises à une étude plus poussée, leurs équipements étant sensibles à un pic d'azote, comme ce pourrait être le cas avec des urines brutes non-diluées par les eaux de chasse d'eau et autres eaux usées.

III.A.2.b.iv Des conceptions différentes de la « vitrine verte » de la collecte des urines

L'ensemble des acteurs rencontrés partagent la volonté de proposer une offre toujours plus « verte » et ceci dans chacun des domaines de leur métier, dont la question de l'eau et de l'assainissement. Toutefois, si l'intérêt de se positionner sur la collecte sélective des urines semble partagé, les raisons sous-jacentes sont multiples et façonnent des conceptions d'autant plus variées de ce système.

Du côté des aménageurs, l'EPPS, dans son dossier de demande d'une autorisation d'une opération classée au titre de la loi sur l'eau, présente « *la gestion de l'eau comme élément fondateur du projet* » avec pour grand objectif « *la remise en état écologique des cours d'eau* » permis par un « *traitement des eaux usées sur le plateau, dans la mesure de ce qui est techniquement et économiquement possible et dans le respect des compétences des collectivités territoriales* ». Nous pouvons aussi noter la volonté de cet établissement de « *faire du campus urbain un lieu d'expérimentation où seront développées les techniques et méthodes qui permettront de concevoir et gérer les territoires en répondant aux enjeux technologiques* ». Il est tout naturel que le projet de collecte sélective des urines s'inscrive dans la politique de l'EPPS. Leur rôle est essentiel puisqu'ils peuvent, avant commercialisation des lots, imposer de façon contractuelle au maître d'œuvre d'insérer la collecte sélective des urines dans le projet.

Cette impulsion est déterminante puisque, selon notre interlocuteur de SODEARIF, si l'aménageur imposait la collecte séparée d'urine dans son cahier des charges, tous les promoteurs se positionneraient sur l'offre et cela ne créerait pas d'effet d'éviction de la part des promoteurs. Il faut toutefois que le projet ait déjà été testé, ce qui souligne

l'importance aux yeux des aménageurs et des promoteurs d'un projet pilote, sur lequel Bouygues se placerait avec envie. Il ajoute qu'un maître d'œuvre ne proposerait pas la mise en place d'une collecte sélective des urines à un aménageur n'en ayant pas exprimé le souhait. Seule une association éprouvée et pérenne avec un acteur de la filière de collecte et transport pourrait inciter SODEARIF à le proposer en amont aux aménageurs.

Les bureaux d'étude raisonnent d'une façon spécifique à leur métier. Aux yeux de notre interlocuteur chez BERIM, l'argument du développement durable et des circuits verts ne suffira pas à l'émergence du projet dans la mesure où les gens ne sont pas sensibilisés aux circuits courts dans le domaine de l'eau autant qu'ils peuvent l'être pour l'agriculture. Au coeur de leur raisonnement réside la notion d'innovation. Pour preuve, la personne sensibilisée au concept de collecte séparée des urines chez Le Sommer Environnement a pour mission de porter un regard innovant sur l'entreprise et ses pratiques, dans le but d'être un précurseur dans chaque domaine et de « *découvrir ce qu'ils ne sont pas encore* ». Dans ce contexte, les bureaux d'étude estiment que le concept proposé doit être une innovation en rupture avec ce qui se fait actuellement mais ne doit pas apparaître comme un retour en arrière comme a pu l'être la gestion des eaux pluviales. Le système se doit d'être aussi technologiquement attirant, du WC, dont le design doit être finement travaillé, au système de traitement, avec une valorisation visuelle des stations de traitement des urines, et même jusqu'au produit, qui sera d'autant plus attirant qu'il sera sous une forme éloignée des urines. Une filière simple telle que nous pouvons la proposer à la base ne trouverait pas écho chez les bureaux d'étude qui se spécialisent en haute technologie. Ainsi, si le système s'avère représenter un retour en arrière ou être trop simple pour créer de la valeur ajoutée dans leurs domaines de compétence, les bureaux d'étude ne feraient pas une promotion active du développement d'un tel système.

III.A.2.c Conclusions

Tous les acteurs, qu'ils fassent partie des acteurs du bâtiment ou d'une filière plus éloignée, s'accordent sur la nécessité de travailler *ab initio*, sur du bâtiment neuf, afin de pouvoir penser le système de collecte sélective en amont et l'intégrer au mieux au bâtiment. La mise en place d'un tel système a toutefois un coût pour les acteurs du bâtiment. S'il n'engendrera pas ou peu de surcoûts liés à la production de nouvelles connaissances et compétences, des surcoûts techniques sont à prévoir imputables à la cuve et son terrassement, les tuyaux réservés aux urines et leur installation, et les toilettes à collecte séparée d'urines et leur prix actuellement prohibitif. Ces surcoûts seront portés essentiellement par le constructeur, pour qui la réduction potentielle de la surface habitable constitue le blocage principal.

L'aménageur, les bailleurs et les promoteurs portent eux le risque d'un manque d'attractivité des logements équipés de systèmes de collecte sélective des urines. Si l'attractivité de ces logements est étroitement reliée à l'acceptabilité des habitants, sur lesquels ces acteurs ont peu d'influence, ils peuvent toutefois se prémunir de ce risque avec la mise en place d'un système de collecte réversible qui pourra rebasculer sans coûts sur le « tout à l'égout » classique.

Enfin, si les acteurs du bâtiment partagent une sensibilité à l'argument de « vitrine verte », les raisons qui pourraient les pousser à entrer dans ce marché sont très diverses. Les constructeurs y pénétreraient vraisemblablement sous l'impulsion déterminante des aménageurs, qui pourraient profiter de l'argument écologique pour vendre ces logements en ayant l'assurance d'une réversibilité du système. Les bureaux d'étude, qui sont insérés dans une course à l'innovation, feraient la promotion du projet si celui-ci marque une vraie rupture avec la conception classique de l'assainissement et toute solution trop simple ne les inciterait pas à inclure la collecte séparée des urines dans leur offre.

III.A.3 Acteurs du transport

La collecte et le transport correspondent à l'acheminement des urines, de la cuve de collecte située au niveau des habitations vers le lieu de traitement ou de valorisation selon la solution retenue.

Au cours de notre série d'entretiens, nous avons pu rencontrer dans cette catégorie d'acteurs : le SIAVB, le SIAAP, Veolia, la SEDE Environnement et des agriculteurs puisque nos scénarios initiaux prenaient potentiellement en compte un acheminement des urines par l'agriculteur.

III.A.3.a Hypothèses initiales

Le transport de l'urine brute par réseaux gravitaires a été écarté en raison du phénomène de précipitation de l'urine en struvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) dans les tuyaux qui a tendance à les obstruer et à rendre inexploitable un tel système dès que les longueurs de tuyaux sont importantes. Il s'agit alors ici d'un transport par camion citerne.

Le transport a été identifié comme un élément central du système à mettre en place. En effet, aussi bien du point de vue économique, que de son acceptabilité sociale, le transport est un maillon essentiel de la chaîne d'assainissement de l'urine. Au départ, il a été considéré que cette partie de la chaîne était susceptible d'être perçue comme un nouveau marché aussi bien par le SIAAP que par des acteurs privés opérant d'ores et déjà dans le domaine de la logistique ou du transport de déchets. Par conséquent, l'hypothèse initiale

a été de considérer que le choix de l'organisation du transport devait être réalisé en analysant, d'une part, les conditions économiques du transport et les moyens de le financer, et d'autre part, en mettant en place un système qui ne conduise pas à un blocage d'acteurs qui pourraient se sentir lésés par le choix retenu et, partant, pourraient utiliser leur pouvoir de lobby pour complexifier l'émergence d'un tel projet.

Dans ces conditions, trois hypothèses de transport ont été envisagées :

- un transport réalisé par l'agriculteur ou une coopérative si la collecte est compatible avec la période d'épandage et si le coût du produit est nul ;
- un transport réalisé par le SIAAP afin de continuer de prendre en charge les effluents domestiques pour des usagers acquittant la redevance ;
- un transport réalisé par un acteur privé intéressé par le développement d'un nouveau marché.

III.A.3.b Exploitation des entretiens réalisés

III.A.3.b.i Le monde agricole, un client du système de transport

Les agriculteurs rencontrés ont tenu une position constante sur la question du transport. Pour eux, le transport ne peut pas être réalisé par l'agriculteur, qui doit plutôt être appréhendé comme le client final, à l'instar de ce qui est fait pour les boues d'épuration. Le monde agricole envisage plus facilement un transport réalisé par un acteur privé plutôt que directement en régie par un syndicat d'assainissement. Pour la ferme de Gally, « *il faut penser un contexte favorable aussi à l'émergence de start-up qui viendront challenger ces grands acteurs* ». On est donc ici face à une expression de l'émergence d'un nouveau marché potentiel qui pourrait être porteur de développement pour les entreprises.

En outre, confronté à notre hypothèse initiale d'un transport réalisé par l'agriculteur, le SIAAP a estimé que cela n'était possible que dans une phase d'expérimentation afin d'être dans un système de circuit court plus favorable à la communication initiale sur le projet pilote. La proximité des exploitations agricoles sur le plateau de Saclay est, selon notre interlocuteur, un élément favorable pour envisager cette solution. Néanmoins, cette solution ne semble pas partagée par les agriculteurs. Au surplus, au delà de cette phase initiale, le SIAAP considère qu'il est impératif de professionnaliser l'activité de transport. Une collecte par l'agriculteur ne lui paraît pas réaliste à l'échelle du Grand Paris.

Principaux déchets produits par une station d'épuration à partir des effluents liquides. Elles peuvent être valorisées en agriculture par épandage ou compostage.

III.A.3.b.ii Un besoin d'autorité organisatrice mais qui reste difficile à mobiliser

Les acteurs industriels rencontrés, Veolia et SEDE Environnement, ont insisté sur l'importance de l'organisation du transport par une autorité organisatrice publique. Dans les échanges qui ont eu lieu, il est apparu que cette responsabilité devait être endossée par l'autorité organisatrice de l'assainissement, ici le SIAVB, compte tenu de ses compétences. Cette logique de donneur d'ordre public est conforme au fonctionnement existant pour les boues d'épuration, mais également à ce qui est rencontré par ces groupes industriels dans le domaine de la gestion de l'eau, de l'assainissement ou des déchets par exemple.

Le SIAVB, aujourd'hui chargé du transport des effluents, est ancré dans la logique cognitive du « tout tuyau ». Dans la mesure où les urines seraient transportées par camion, il ne se sent pas concerné par le projet, même s'il comprend les enjeux et l'intérêt du projet. En effet, l'option de transport routier ferait sortir l'urine de la responsabilité du service d'assainissement pour entrer dans le domaine des déchets. Ainsi, cette logique de rejet de la compétence s'est clairement illustrée lorsque le SIAVB a conseillé de discuter de ce point avec le syndicat intercommunal de gestion des déchets. Ce ne serait donc pas le type de produit transporté qui fonderait la logique de compétence mais bien la technique de transport. Néanmoins cette approche très tranchée a été par la suite aménagée quand le SIAVB a indiqué qu'en dernier lieu, le syndicat s'adapterait au contexte : si les acteurs amont (politiques, bâtiments, utilisateurs) et aval (traitement, valorisation) montraient une réelle demande pour un transport séparé des urines, le SIAVB pourrait se positionner et redessiner ses métiers et ses compétences. L'enjeu central pour le SIAVB réside dans la nécessaire adaptation de ses métiers à ce type de système, et la complexité de conduire ce changement profond. Au delà de sa propre compétence, le SIAVB a indiqué être favorable à un transport réalisé par une structure publique plutôt que par un acteur privé.

En outre, le SIAVB a soulevé la question du régime légal du transport d'urines brutes et des restrictions et contraintes qui pourraient y être attachées. Lors de l'entretien avec Veolia, notre interlocuteur n'a pas identifié de difficultés ayant trait au transport de l'urine d'un point de vue de la classification légale et du risque pour l'environnement. Il a comparé ce transport à celui du vin.

III.A.3.b.iii Le SIAAP, un acteur volontaire pour mettre en place le système de transport

Le SIAAP, lors des entretiens, a montré un intérêt particulier pour ce projet, notamment en étant disposé à prendre en charge le transport de l'urine. Selon les éléments

échangés, ce transport pourrait être réalisé à redevance d'assainissement constante. En effet, il considère que le service de transport, et même plus globalement le système de collecte sélective des urines, doit être transparent pour l'habitant. Dans ces conditions notre interlocuteur a avancé être prêt à s'inscrire dans cette perspective qui nécessiterait une adaptation des métiers du SIAAP, mais permettrait, en corollaire, de développer de nouvelles compétences. Interrogé sur l'accueil qui pourrait être fait à cette solution par les salariés du SIAAP et leurs représentants, il nous a été indiqué qu'une telle évolution pourrait être perçue comme intéressante pour l'évolution de l'entreprise. Néanmoins, cet élément est à prendre avec prudence compte tenu, d'une part, de l'absence d'éléments factuels sur l'acceptabilité interne d'une telle perspective, et, d'autre part, de la position particulière de notre interlocuteur au sein du SIAAP qui, par nature, le rend plus enclin à accepter le changement.

III.A.3.b.iv Des acteurs techniques volontaires pour mettre en place le transport des urines

Le SIAAP a confirmé lors des entretiens que ce système pourrait permettre l'émergence d'un nouveau marché de transport pour les groupes industriels. Ce nouveau marché peut être envisagé comme un moyen de réduire le risque d'opposition des grands groupes qui pourrait se faire jour en raison de la peur d'une baisse des investissements des syndicats d'assainissement. Néanmoins, le SIAAP a précisé que si un acteur tiers réalisait ce transport sans intervention du SIAAP, un financement devrait être mis en place et qu'une modulation de la redevance d'assainissement ne semblait pas réalisable en l'état.

Veolia a réagi positivement à la proposition de transport routier des urines. Cela s'inscrit pleinement dans le système de production de Veolia qui maîtrise le domaine du transport à travers son activité déchets ou curage notamment. Ainsi, pour Veolia, les camions de transport seraient de simples camions pompes avec un coût acceptable. Techniquement ce système est maîtrisé et les coûts de production peuvent être anticipés finement. Lors de l'entretien, le transport de l'urine est apparu comme un marché potentiel pour Veolia qui pourrait faire profiter le système de son expérience dans l'optimisation de la collecte des déchets. Ainsi la mise en place de système électronique de surveillance des cuves pour optimiser le circuit de collecte a été avancée comme une illustration de ce qui pourrait être déployé sur la base de l'expérience de Veolia dans système de collecte du verre. Veolia se placerait donc bien sur la partie transport de l'urine, d'autant plus que cela fait partie de la politique politique de Veolia et s'inscrit dans la devise du groupe « *Faire du déchet une ressource* ».

SEDE Environnement, filiale de Veolia, est un acteur majeur de la filière de valori-

sation des boues d'épuration et des déchets. Notre interlocuteur nous a précisé que la société ne se positionnerait pas sur le transport de l'urine mais pourrait néanmoins intervenir dans la mise en place de la filière de valorisation de l'urine, notamment grâce à leur expertise en plans d'épandage et en valorisation agricole. La prestation, organisée par une autorité publique, pourrait ensuite être sous-traitée à un acteur du transport. Dans cette optique, notre interlocuteur considère qu'un acteur privé serait plus pertinent pour le développement de ce marché et pour porter les risques de ce nouveau système. Toutefois, il juge qu'il n'est pas absolument nécessaire qu'un grand groupe soit missionné, étant donné la faible complexité du système.

Les bureaux d'études rencontrés s'inscrivent dans une logique de rupture et d'innovation. Cette logique inhérente à leur métier transparaît également dans le système de collecte envisagé. À leurs yeux, les syndicats publics d'assainissement présentent une inertie trop importante ne permettant pas de s'adapter rapidement à ce nouveau système de transport, notamment pour ajuster leurs métiers. Selon eux, les acteurs privés qui interviennent aujourd'hui dans le domaine des déchets disposent des compétences et des équipements pour réaliser ce transport et pourraient donc être privilégiés. Néanmoins, le système de collecte de l'urine étant en rupture avec la logique actuelle, il leur semble que le marché devrait être tourné vers des start-up, plus à même de s'adapter à ce nouveau système. Au-delà de cette position sur l'organisation de la collecte, les bureaux d'études ont surtout des préoccupations liées au design du système, aux contraintes techniques, notamment pour les opérations de vidange et à l'espace nécessaire dans l'opération d'aménagement.

En revanche, pour l'AESN, le transport, s'il n'est pas complexe, présente un certain nombre de risques d'usages qui pourraient être préjudiciables à la valorisation de l'urine. Par exemple, les camions pompes qui pourraient réaliser des diverses vidanges pourraient contaminer l'urine si aucune précaution n'est prise. Compte tenu de ce risque, un de nos interlocuteurs s'est montré méfiant vis-à-vis de l'hypothèse d'un transport réalisé par un acteur privé.

III.A.3.c Conclusions

Les entretiens menés avec les différents acteurs potentiels du système de collecte sélective des urines ont montré un grand nombre de convergences sur la question du transport.

Il ressort qu'une majorité d'acteurs font un parallèle entre le transport de l'urine et celui des boues de stations d'épurations. Dès lors, *le syndicat d'assainissement apparaît comme devant être responsable du transport comme pour les boues, en tant qu'autorité organisatrice*. Une telle organisation apparaît cohérente avec le cadre de réglementaire encadrant l'assainissement qui place la collectivité comme responsable. Néanmoins, par

rapport à la responsabilité du producteur ce n'est pas le producteur primaire de l'urine, ici l'habitant, qui serait responsable mais la collectivité, à l'instar de ce qui existe pour la collecte des déchets.

Le SIAVB ne se sent toutefois pas concerné par ce transport, celui-ci n'étant pas fait par tuyau. On observe ici une première difficulté dans l'organisation de la chaîne de transport qui pourrait apparaître, avec le syndicat a priori responsable de l'organisation du transport qui refuse cette perspective. Au vu des discussions qui ont eu lieu avec ce syndicat, c'est un changement de mode d'appréhension de son métier qu'il n'est pas prêt à faire sans une demande forte des autres acteurs et sous contrainte. Il s'est en effet dit prêt à s'inscrire dans ce changement si la demande émanait de l'ensemble des acteurs de la filière et que la demande politique existait. Ce sont donc ici deux leviers importants qui ressortent pour l'organisation de la collecte.

Au delà du SIAVB, il est intéressant de relever que le SIAAP est volontaire pour réaliser ce transport. Dans ce cadre une solution à négocier semble pouvoir émaner entre le SIAVB et le SIAAP pour la mise en place d'un système pilote sur le plateau de Saclay. Il ressort également qu'un grand nombre d'acteurs est favorable à une prise en charge du transport par une société privée agissant par délégation de la collectivité. Ils jugent qu'un tel système permet de s'adapter plus facilement aux exigences de ce nouveau marché et à ses contraintes, en profitant notamment de l'expérience de certains acteurs déjà en place pour du transport de déchets ou de boues d'épuration. *L'étude économique sera intéressante pour donner des éléments d'éclairage sur le choix du mode d'organisation du transport.*

III.A.4 Acteurs du traitement

Les acteurs du traitement sont ceux chargés de réceptionner les urines après transport et de leur appliquer le traitement prévu en vue de leur future utilisation (engrais, compost etc.) : cela peut être le stockage des urines brutes ou le conditionnement des urines (par nitrification/distillation ou précipitation en struvite).

Sur le périmètre d'étude sur le plateau de Saclay, le SIAAP est responsable du traitement des eaux usées. Il est donc un acteur-clé à envisager pour l'étape de traitement. D'autres acteurs peuvent également intervenir : les agriculteurs si le stockage se fait sur leur exploitation, les grands groupes de l'assainissement qui pourraient se positionner sur ce nouveau marché ou encore des entreprises spécialisées dans la valorisation des déchets en agriculture comme la SEDE Environnement. On s'intéresse dans cette partie à leurs logiques d'acteurs, c'est à dire les opportunités et/ou contraintes perçues vis-à-vis du système de traitement, qui peuvent être éclairées par d'autres acteurs, comme nous le verrons

ci-dessous.

III.A.4.a Hypothèses initiales

Nous avons constitué au début de notre travail les hypothèses de travail suivantes concernant le traitement :

- les grands groupes peuvent trouver un intérêt à se positionner sur un nouveau marché de l'assainissement ;
- dans le scénario de stockage des urines brutes, une solution pratique consiste à faire le stockage directement chez les agriculteurs (sous réserve d'accord du chef d'exploitation et d'espace suffisant).

III.A.4.b Exploitation des entretiens réalisés

III.A.4.b.i Se positionner sur un nouveau marché d'assainissement : des visions contrastées

L'interlocuteur que nous avons eu au SIAAP est favorable à l'idée que celui-ci réalise le service de vidange, de stockage/conditionnement et de mise à disposition, par transparence vis à vis des usagers qui s'acquittent d'une redevance d'assainissement, et par-là ont droit au traitement de tous leurs effluents par la structure responsable. L'interlocuteur a indiqué que si le SIAAP devenait collecteur des urines, il aurait intérêt à trouver un débouché commercial, grâce à un processus industriel pour traiter l'urine (par exemple : le procédé de nitrification/distillation de l'EAWAG). Le SIAAP pourrait être conditionneur d'urine vendue en tant que matière première.

Un élément important dans la logique de cet acteur est qu'il est prêt à assurer le coût de la distillation car en contrepartie, à grande échelle c'est à dire en sortant les urines d'un nombre important de personne (cf. PARTIE I.A), la construction d'une tranche supplémentaire de STEP ne serait pas nécessaire (coût évité). Son intérêt avant tout est de sortir l'azote du cycle d'épuration, ce qui pose la question de l'échelle du projet : si le projet est trop petit et ne permet pas d'enlever suffisamment d'azote des eaux traitées, le SIAAP sera-t-il toujours motivé pour s'investir dans le projet ?

Interrogé sur les blocages que ce projet pourrait soulever dans la culture industrielle du SIAAP, l'interlocuteur a indiqué que selon lui il n'y aurait pas de blocage majeur car le projet n'implique pas de révolution industrielle. Au contraire, il permet selon lui de stabiliser l'activité sous de nouvelles contraintes (l'émergence du Grand Paris, le changement climatique avec l'impact sur les débits d'étiage) pour l'assainissement avec en plus la création d'un nouveau métier : conditionneur d'urines. *Pour le SIAAP, le développement*

d'un projet de séparation des urines à la source est donc perçu comme une opportunité pour développer un nouveau métier : conditionneur d'urines avec des contraintes qui sont levées grâce à un coût de construction évité.

Notre entretien chez Veolia nous conduit à postuler que le système de traitement par nitrification/distillation (coût et consommation énergétique importants) ne constitue pas une opportunité intéressante pour Veolia. Lors de l'entretien, nous n'avons pas confronté cet acteurs aux filières de la struvite et du co-compostage. L'interlocuteur a indiqué que Veolia pourrait se positionner sur le stockage avec acidification (pour stabiliser le produit) car cela lui semblait être la solution la plus robuste, en suggérant que le stockage ait lieu dans l'exploitation agricole pour des raisons pratiques (fonctionnement en circuit court).

Nos deux interlocuteurs à la SEDE Environnement se sont montrés très intéressés par le projet et ont indiqué que l'entreprise pourrait se positionner sur la mise en place de la filière de traitement et assurer des débouchés grâce à leur expertise en plans d'épandage et en valorisation agricole. En effet, le retour au sol est le cœur de métier de la SEDE et la mise en place de circuits courts sur les éléments N :P :K (Azote/Phosphore/Potassium) est la priorité de l'entreprise. *Le traitement des urines est donc perçu comme une opportunité par la SEDE.*

III.A.4.b.ii Le cas particulier des plates-formes de compostage : entre réticences et opportunités

Même si l'incorporation des urines brutes dans le compost a été évoquée comme une solution séduisante au cours des entretiens (UNIFA, Chambre d'agriculture, SEDE), des points de vigilance ressortent de notre recherche bibliographique et de notre analyse personnelle. Les gestionnaires de plates-formes de compostage pourraient avoir des réticences à incorporer une substance qui peut comporter des éléments pathogènes et des micropolluants. Le compostage est un processus mature et répandu, qui bénéficie d'une image positive de recyclage dans la société, il faut éviter tout scandale à l'image de celui des boues de station d'épuration qui pourrait ternir l'image du compost. Certes les bactéries présentes dans le compost ont la propriété de détériorer certains éléments pathogènes et des micropolluants mais des tests, avec validation scientifique, restent à mener. L'incorporation d'une substance riche en azote est également une opportunité pour les plates-formes de compostage : en effet, le rapport C/N est primordial pour le compostage (objectif : C/N environ de 8) et en hiver, ce rapport a tendance à augmenter pour atteindre 20 (du fait de la prédominance de matériaux de type ligneux avec les branchages), l'apport d'urines permettrait donc de maintenir ce rapport à l'objectif fixé, tout au long de l'année et donc de régulariser le produit.

Si une telle solution était retenue avec des plates-formes agréées acceptant d'utiliser les urines collectées, un accompagnement technique serait à mettre en place auprès des plates-formes, afin de développer des bonnes pratiques de gestion des urines : dégagement d'ammoniac volatil par exemple.

III.A.4.b.iii Divergences des acteurs sur la question du stockage dans l'exploitation agricole

Concernant le stockage, contrairement à notre correspondant chez Veolia qui postule un stockage dans l'exploitation agricole, les interlocuteurs de la SEDE estiment que les agriculteurs ne seraient probablement pas volontaires pour conserver ces urines chez eux. Il faudrait envisager le stockage ailleurs, dans une structure centralisée.

La personne rencontrée de l'association Terre & Cité est partagée sur le stockage des urines chez l'agriculteur : celui-ci peut à la fois être un frein ou un levier. En effet, les agriculteurs peuvent être rassurés de gérer l'urine chez eux pour garder une mainmise sur l'aspect sanitaire. Dans le même temps, ils ne voudront pas porter les investissements potentiels s'il faut améliorer le système de stockage, et ne voudront pas non plus devoir ensuite prendre la responsabilité de l'épandage d'une urine saine en cas de risque.

À la Chambre d'agriculture d'Ile-de-France, un avis plus pragmatique a été émis quant au stockage sur l'exploitation : il peut s'envisager s'il n'y a pas de coût pour l'agriculteur. *Les avis sont donc partagés sur la question du stockage chez l'agriculteur, cela peut être une opportunité pour cet acteur ou au contraire une source de risque. Il ne doit en tout cas pas être une source de coûts supplémentaires pour l'agriculteur.*

III.A.4.b.iv Les solutions technologiques : un facteur différenciant ?

Le point de vue des bureaux d'études sur le traitement permet d'avancer l'argument suivant : le développement de solutions sophistiquées, innovantes pourrait être un facteur différenciant pour les structures se positionnant sur le traitement. Montrer la rupture et la modernité est une condition de réussite du projet d'assainissement écologique, avec comme fer de lance un traitement maîtrisé et innovant. La présence d'une unité de traitement moderne, implantée sur le territoire, et sur laquelle on communique, permettrait de gagner l'adhésion des usagers et riverains et ainsi de forger une image positive de l'acteur de traitement.

Au contraire, notre interlocuteur à Terre & Cité est sceptique quant à l'acceptation par les agriculteurs d'un processus industriel de traitement des urines : ce n'est pas le

caractère innovant en soi qui est rejeté mais les risques de panne inhérents à un système technologique complexe.

III.A.4.c Conclusions

Le SIAAP perçoit la séparation des urines à la source comme une opportunité pour se positionner sur le marché du traitement avec le développement d'un nouveau métier : conditionneur d'urines. Cependant, son intérêt premier est de sortir l'azote du cycle, ce qui pose la question de l'échelle du projet : la motivation du SIAAP sera-t-elle intacte si le projet est trop petit et ne permet pas d'éviter la construction d'une tranche supplémentaire de traitement de l'azote à Achères ?

Nous n'avons rencontré qu'un seul grand groupe de l'assainissement : Veolia. Notre interlocuteur n'a pas semblé convaincu par l'idée de se positionner sur le nouveau marché de traitement s'il s'agit d'un procédé trop complexe : il recommande une simple hygiénisation par stockage avec acidification pour abaisser le pH. Nous avons contacté un autre groupe (SAUR) : la personne contactée n'a pas pu obtenir (et elle le regrette) la mobilisation sur le sujet de ses collègues disposant d'une certaine expertise pour échanger avec nous sur ce système d'assainissement écologique. En revanche, la SEDE, filiale de Veolia, est tout à fait prête à se positionner sur le nouveau marché car cela rentre complètement dans son cœur de métier : le recyclage de déchets organiques en agriculture. Notre hypothèse de départ sur l'opportunité pour les grands groupes de se lancer sur un nouveau marché est donc à nuancer. Le facteur différenciant - vision des bureaux d'études - provenant du fait de se positionner sur un traitement sophistiqué des urines est ressenti par le SIAAP et la SEDE mais pas par Veolia.

Quant au stockage des urines brutes directement dans les exploitations agricoles, notre hypothèse de départ (solution la plus pratique) doit être nuancée : les différentes positions des acteurs rencontrés ne convergent pas mais les acteurs les plus proches du monde agricole de Saclay (Terre & Cité, la Chambre d'agriculture) y semblent favorables sous conditions : l'absence de coûts pour l'agriculteur et la nécessité d'un suivi sanitaire extérieur pour accompagner l'agriculteur. Cette solution paraît donc envisageable sur le papier mais sera à rediscuter si un projet pilote est lancé sur le plateau de Saclay.

III.A.5 Acteurs de la valorisation

En aval de la chaîne socio-technique décrivant la filière de séparation des urines, se trouvent les acteurs de leur valorisation. Les urines sont employées généralement par le secteur agricole, en tant qu'intrant, en vertu de leur composition en azote, phosphore, potassium et autres éléments nécessaires à la croissance végétale.

Nous avons privilégié dans nos scénarios de filière une valorisation dans le secteur agricole, bien que nous ayons laissé ouverte la possibilité d'utiliser les urines pour l'entretien des espaces verts. Ce choix a été déterminé en raison de plusieurs éléments considérés *a priori* :

- La potentialité agronomique forte des urines en tant que stock d'azote et de phosphore (cf. PARTIE I) ;
- la logique écologique de faciliter un bouclage des cycles azote-phosphore en connectant les secteurs de l'assainissement et agricole, comme cela est réalisé pour les boues issues de stations d'épuration ;
- la capacité d'absorption du volume d'urine produite par ce secteur, capable en Ile-de-France, de s'adapter à une échelle locale ou plus globale ;
- un blocage psychologique moins fort dans le secteur agricole, en particulier pour des filières ne produisant pas directement pour l'alimentation humaine.

Les urines peuvent être utilisées comme intrant agricole de façon directe, par l'épandage d'urines brutes ou légèrement transformées (par le procédé VUNA de l'EAWAG par exemple), soit de façon indirecte, en servant de matière première à la fabrication d'un intrant plus complexe, comme la struvite par exemple (PARTIE I.B.2).

Nous avons considéré ces trois possibilités lors de la construction de nos scénarios. L'épandage direct, à la suite d'un stockage d'environ six mois pour assainir l'urine, est la valorisation la plus immédiate et simple à mettre en œuvre, sur le modèle de ce qui se pratique en Suède à proximité de certains éco-quartiers (PARTIE I.B.1). Cette pratique s'illustre dans notre premier scénario de valorisation, qui nous semblait *a priori* le plus acceptable dans l'immédiat par les agriculteurs. Dans un second scénario, nous proposons une valorisation sur la base du procédé VUNA, qui permet d'obtenir une urine assainie et concentrée, au prix d'une transformation plus complexe et coûteuse. Enfin, notre troisième scénario de valorisation propose d'envisager l'utilisation agricole d'un intrant fabriqué à partir de la matière première urine.

III.A.5.a Hypothèses initiales

Puisque nous avons envisagé uniquement le secteur agricole comme débouché pour la valorisation des urines, en raison des arguments présentés ci-dessus, nous avons construits nos hypothèses sur les déterminants de l'acceptation par les agriculteurs de cette substance comme intrant.

Nous nous sommes en partie appuyés sur un rapport ([Aubry et al., 2014]) analysant

les déterminants de l'utilisation de matières fertilisantes organiques en agriculture. Ce document nous a permis d'identifier plusieurs facteurs susceptibles de freiner l'utilisation d'urines d'origine humaines :

- le facteur « beurk » : sentiment négatif des agriculteurs à propos des Mafor issues de l'assainissement ;
- le manque de confiance dans les producteurs, les risques de contaminations ;
- l'existence d'alternatives à l'utilisation d'eaux usées et le fait que ces matières devraient être gratuites.

Ce document nous a aussi permis de dresser une liste de plusieurs critères qui construisent la rationalité des choix des agriculteurs en matière de fertilisation et qui nous ont semblé pertinents dans le cadre du plateau de Saclay :

- la sensibilité à la qualité du sol et à l'importance de maintenir cette qualité ;
- le mode de commercialisation des produits semble jouer un rôle important : les céréaliculteurs en lien avec les négociants sont réticents, notamment à l'utilisation de boues d'épuration, évoquant une difficulté historique (cahiers des charges excluant les boues). Ceux qui vendent en coopérative peuvent par contre être incités à acheter les Mafor commercialisés par les coopératives (lisier porcin séché breton par exemple) ;
- l'inscription dans le réseau local, par exemple pour le prêt de matériel d'épandage, peut faciliter le choix de pratiquer une fertilisation organique. À l'inverse, la réalité ou la perception d'hostilités de la part de l'entourage de l'exploitation (habitants proches) peut inciter à ne pas pratiquer.

En fonction de ces critères, il a été possible d'établir une typologie des profils de discours que nous pourrions rencontrer chez ces acteurs, en se basant sur les comportements analysés dans cette étude vis-à-vis des Mafor :

- des non-utilisateurs radicaux ;
- des opportunistes si la filière venait à se développer en présentant des arguments favorables d'un point de vue agronomique et économique, en l'absence de risques sanitaires ;
- des utilisateurs de « déchets » qui pourraient être moteurs : les urines seront perçues comme un déchet provenant de la ville, l'agriculteur rend un service en les réutilisant sur ses terres et son intérêt réside dans la gratuité de la substance ou dans son implication économique dans la filière ;
- des utilisateurs de « produits » qui pourraient être moteurs : ils portent un intérêt

fort pour la qualité de leurs sols et choisissent les urines pour leurs propriétés agronomiques en ayant une vision « produit » plutôt que « déchet » de la substance, à l'instar du regard porté sur les engrais classiques.

À la suite de cette première phase d'analyse de la littérature, nous avons choisi de tester lors de nos entretiens les hypothèses suivantes :

- la nécessaire maîtrise du risque sanitaire et légal : il sera nécessaire que la substance utilisée ne présente aucun risque sanitaire et qu'elle soit reconnue comme telle par la législation, avec une autorisation d'utilisation. Nous supposons que le secteur agricole sera ainsi plutôt favorable au développement d'un tel intrant pour des plantes (en particulier des céréales) non destinées à l'alimentation humaine. Une utilisation sur les espaces verts ne présenterait sans doute pas non plus de blocage particulier ;
- un déterminant économique prédominant dans la rationalité des acteurs : il faut, comme pour tous les acteurs, que l'intrant constitué d'urine présente un intérêt économique ;
- le contexte sociotechnique, notamment la structuration du jeu d'acteurs dans le marché des intrants et la place que l'agriculteur y occupe, peut influencer la mise sur le marché d'une telle substance : la concurrence à l'égard d'autres intrants pourrait entraîner une autocensure des agriculteurs envers l'utilisation des urines, en raison des liens avec les structures dont ils dépendent largement, comme les coopératives, qui pourraient voir d'un mauvais œil le développement de cette filière.

III.A.5.b Exploitation des entretiens réalisés

III.A.5.b.i Le besoin de démonstration vis-à-vis du risque sanitaire/écologique

Tous les acteurs liés aux secteurs agricoles ou d'entretien des espaces verts ont émis la même condition *sine qua non* à l'utilisation des urines, quelles que soient leurs formes : la garantie d'absence de risque sanitaire.

Une posture de méfiance vis-à-vis des déchets urbains de la part des acteurs agricoles rencontrés

Nos interlocuteurs de l'association Terre & Cité, la Chambre d'Agriculture d'Ile-de-France, de l'INRA ainsi que des fermes de Gally, nous ont fait part du « scandale d'Achères » qui avait forcé plusieurs maraîchers à quitter leurs terres, du fait de la conta-

mination des sols par les boues de station d'épuration fournies par le SIAAP comme intrants.

Ces différents acteurs évoquent une méfiance de la part du monde agricole envers le SIAAP à la suite de cet épisode. Selon eux, cette méfiance à la suite d'un événement historique ponctuel se conjugue à une celle entretenue à l'égard du monde urbain en général. Leur discours exprime l'idée que les espaces urbains ont souvent cherché, en particulier en région parisienne, à se débarrasser de leurs « déchets » (les usines polluantes et les cimetières délocalisés en banlieue ont pu être pris comme exemple) dans les espaces périphériques, en particulier ruraux, et ce au prix d'une certaine unilatéralité dans les rapports entre ces deux mondes.

Cette opposition entre « urbains » et « ruraux » se retrouve dans les rapports évoqués entre les agriculteurs du plateau de Saclay et l'EPPS lors de notre rencontre avec l'interlocuteur de Terre & Cité. Les agriculteurs se sentiraient imposées certaines décisions concernant les projets d'aménagement, en particulier les « lisières » imaginées pour créer un espace tampon entre les quartiers d'habitation ou d'activité et les milieux cultivés. Cet élément contextuel se retrouve dans l'entretien mené avec l'interlocuteur de l'Agence des Espaces Verts (AEV), l'autre acteur de valorisation envisagé, qui refuse l'idée de remplacer les agriculteurs possédant actuellement les terres situées sur l'espace prévu pour la lisière par d'autres agriculteurs de type maraîchers, comme imaginé dans le projet de l'EPPS.

L'existence d'une opposition se lit aussi dans les discours de façon plus positive, puisque plusieurs interlocuteurs rencontrés, de Terre & Cité ou bien des fermes de Gally, représentant aussi l'association « Le Vivant et la Ville », disent travailler à réconcilier ces deux mondes. En revanche le rôle de la FNSEA dans cette opposition semble plus ambigu, puisque cette organisation syndicale agricole est vue par les acteurs du monde agricole comme favorable à cette réconciliation, alors qu'il ressort de notre entretien avec une sociologue spécialiste qu'au contraire elle pourrait alimenter par son discours la fracture, en se positionnant comme « défenseur du monde rural, menacé par les urbains ».

En revanche, le facteur « NIMBY » (Not In My Backyard, qui se réfère au réflexe d'opposition de résidents à un projet local d'intérêt général parce qu'ils pourraient en subir des nuisances), qui pourrait être évoqué avec ce type de substance, ne semble pas très prégnant chez les acteurs rencontrés. Il serait nécessaire selon notre interlocuteur des fermes de Gally de questionner les manipulateurs directs, mais le facteur « beurk » associé aux substances d'origine humaine ne semble pas soulever plus question que celles d'origine animale. Ces deux facteurs, « beurk » et « NIMBY », pourraient en revanche jouer chez

les associations de riverains et les élus, surtout si des désagréments (mauvaises odeurs notamment) apparaissaient. Cette éventualité a notamment été évoquée par les interlocuteurs de Terre & Cité ainsi que de la chambre d'agriculture dans le cas de l'installation de la compostière chez un agriculteur du plateau de Saclay, contestée par des riverains qui pourtant soutiennent une permanence agricole sur le plateau malgré l'urbanisation.

Une question technique non résolue

La question des micropolluants issus des urines et de leur élimination dans le sol, ou au contraire de leur absorption par les plantes a été posée par tous les acteurs agricoles rencontrés. La question de l'utilisation sans risque des urines, notamment comme fertilisant agricole, est encadrée par une recommandation de l'OMS [OMS, 2012] qui préconise à la suite de la séparation à la source une phase de stockage de durée variable selon la valorisation envisagée. Au-delà de la question réglementaire, il est nécessaire pour eux que la recherche se positionne sur le risque encouru à utiliser une telle substance sur leurs sols.

Les avis convergent ainsi vers une nécessité des expérimentations, sur une échelle de temps de 5 à 10 ans pour observer le devenir des constituants des urines dans le sol avant toute utilisation. Les interlocuteurs de Terre & Cité, des fermes de Gally et de la chambre d'agriculture indiquent le besoin d'acteurs scientifiques reconnus, comme l'INRA, pour encadrer ces expérimentations afin de garantir la « crédibilité scientifique » des résultats issus de ces expérimentations. Ils citent notamment l'INRA, qui va mener des expérimentations avec les agriculteurs du plateau de Saclay. Terre & Cité insiste sur l'implication des agriculteurs dans le processus de recherche et d'expérimentation, préalable à leur adhésion : les essais doivent avoir lieu sur une parcelle gérée par un agriculteur du plateau. La chambre d'agriculture souligne son importance dans l'adhésion des agriculteurs aux résultats de ces expérimentations. Selon son représentant, les agriculteurs n'adopteront pas les urines tant qu'elle n'aura pas donné son feu vert.

Cette question technique s'est retrouvée aussi lors de l'entretien avec les interlocuteurs de l'AEV, qui pointe la nécessité de parcelles pilotes afin de rassurer les propriétaires fonciers au sujet de l'évolution de la qualité de leurs sols lorsque les urines sont utilisées comme intrants.

III.A.5.b.ii La problématique du prix

Quelque soit la forme prise par l'intrant à base d'urines, la problématique du prix est apparue comme un blocage potentiel pour son adoption par les agriculteurs. En effet, les acteurs agricoles rencontrés font immédiatement le parallèle avec les boues d'origine urbaine. Or cette filière revient aux agriculteurs à un coût rendu racine nul, puisque les

acteurs de l'assainissement fournissent gratuitement les boues et paient les frais relatifs à leur épandage.

Cette logique s'inscrit dans une vision des urines identifiées comme un « déchet » d'origine urbaine. Les agriculteurs rendent ainsi un « service » à la ville en étant en bout de chaîne du processus d'élimination de ses déchets polluants. Dans cette vision, tous les acteurs rencontrés nous ont affirmé qu'il était impossible d'envisager une autre solution que le « 0 euro rendu racine » pour les urines, de la même manière que pour les boues, au moins dans un premier temps. La seule possibilité à terme de monnayer auprès des agriculteurs les urines dans cette logique serait de démontrer une efficacité agronomique excellente en comparaison de ce qu'ils peuvent trouver sur les marchés des intrants, y compris les produits d'origine minérale. Or ces derniers présentent des avantages, notamment pour la facilité de pilotage de la nutrition azotée des sols, qui sont difficilement atteignables par des substances d'origine organique comme les urines, leur assimilation par le sol étant plus complexe.

En revanche, il est possible d'envisager pour les intrants à base d'urines une vision « produit », notamment si les urines subissent un procédé de transformation, comme le procédé VUNA ou bien une précipitation sous forme de struvite. La logique alors employée par les acteurs du monde agricole est celle de l'intrant organique accessible sur les marchés. L'adoption de cet intrant répondrait alors à sa compétitivité, en matière de coût/efficacité, avec les intrants déjà à disposition, notamment organiques. Il faut cependant noter que cette vision « produit » ne pourra être envisagée qu'avec une modification de la législation, puisque les urines d'origine humaine ne sont pour le moment considérées que dans une perspective « déchet » (PARTIE D).

Il faut noter tout de même la différence dans la distribution des responsabilités lors de l'usage d'un tel intrant, selon que l'on se positionne selon une vision « déchet » ou « produit ». En effet, le producteur du déchet est responsable de celui-ci, même après l'épandage sur une terre agricole, comme dans le cas des boues. En revanche, si l'urine était distribuée sous forme d'un produit au sens juridique du terme, l'agriculteur qui l'utilisera sera responsable des éventuelles conséquences néfastes engendrées. Ce déplacement de la responsabilité freine d'autant plus fortement son utilisation, tant que la recherche scientifique n'aura pas validé l'absence de risque sanitaire.

III.A.5.b.iii L'acceptation basée sur une rationalité économique, insertion dans les pratiques

Tous les acteurs agricoles rencontrés ont insisté sur la rationalité des agriculteurs dans leurs processus de décisions. Cependant celle-ci est à nuancer dans la mesure où plusieurs de ces acteurs ont fait part de leur méfiance vis-à-vis des déchets en provenance de la ville, en se référant à l'épisode de la contamination d'Achères, mais sans justifier plus ce sentiment. Au-delà de cette rationalité pointée parfois comme une résurgence du « bon sens paysan », des oppositions idéologiques (basée sur un réflexe personnel, ou plus largement de groupe professionnel) peuvent ainsi venir influencer la décision finale.

L'importance du critère économique est prépondérant dans les discours de chacun des acteurs agricoles rencontrés. Notre interlocuteur des fermes de Gally a ainsi expliqué que le ratio coûts/capacité agronomique serait le critère déterminant, rejetant l'hypothèse de décisions fondées sur une idéologie (refuser des intrants fabriqués à partir de déchets urbains). Une fois le cap du risque sanitaire levé par l'existence de résultats scientifiques crédibles, c'est bien ce critère économique, par rapport aux besoins émis par les agriculteurs en fonction du contexte pédo-climatique de leur exploitation et des systèmes de cultures choisis, qui sera critique pour l'adoption des urines.

L'interlocuteur de Terre & Cité a insisté sur l'importance accordée par les agriculteurs à la qualité de leurs sols et à son évolution. Cette qualité est importante, à tous les points de vue : en raison du risque sanitaire évidemment, mais aussi parce qu'il constitue leur premier outil de travail et qu'il y a un attachement patrimonial à ces sols. Les agriculteurs sont donc en premier lieu soucieux d'entretenir leurs sols et sa qualité, ce qui est un déterminant fort de leurs choix sur les intrants à utiliser ou des amendements à réaliser.

Les interlocuteurs de Terre & Cité, des fermes de Gally, ainsi que de la chambre d'agriculture et de l'UNIFA, ont souligné l'importance d'avoir un intrant sous une forme qui soit compatible avec les pratiques agronomiques en vigueur. Ainsi l'interlocuteur des fermes de Gally nous a livré sa version du raisonnement d'un agriculteur vis-à-vis de son exploitation et de son mode de fonctionnement : selon lui, l'agriculteur anticipe qu'il n'a au maximum dans sa carrière que 40 cycles de saisons pour réussir à valoriser au mieux les terrains qu'il utilise, en fonction de leurs caractéristiques et des contraintes inhérentes ; il s'ensuit que l'agriculteur met en place un système de pratiques qu'il affine au fur et à mesure de l'accumulation de connaissances, notamment sur le milieu naturel dont il dispose, pour le rendre plus robuste et efficace vis-à-vis des objectifs de production et donc économiques fixés. En conséquence, modifier ces pratiques relève d'une prise de risque pour l'agriculteur, comme lorsqu'il utilise un nouvel intrant comme les urines. Cette prise de risque

est selon lui inhérente au métier d'agriculteur, surtout dans une vision entrepreneuriale de la profession. L'agriculteur va donc chercher à mesurer le risque engendré par une modification de ses pratiques, qu'il mettra en balance avec les bénéfices potentiels. Dans cette logique, présenter un intrant sous une forme qui sera la plus à même de s'inscrire dans les pratiques existantes et déjà en place aura le plus de chance de percer sur le marché.

Les différents acteurs que nous avons pu rencontrer ont donc souligné les points suivants qui faciliteraient une insertion dans les pratiques :

- la prise en compte du stockage : en fonction des caractéristiques physico-chimiques de la substance, les volumes du stockage, les matériaux à utiliser pour les cuves de stockage, la prévention contre le gel, nécessiteront des équipements spécifiques ;
- l'utilisation des machines d'épandage ou de pulvérisation : en Ile-de-France, l'absence d'élevage implique que le matériel d'épandage de lisier/fumier animal est rare. Si les urines ne se trouvent pas sous une forme utilisable avec le matériel de pulvérisation des intrants minéraux, fragiles et donc éventuellement soumis à corrosion par les urines liquides, il sera nécessaire d'investir dans des matériels spécifiques coûteux ;
- la difficulté du pilotage de l'enrichissement azote/phosphore : au contraire des intrants minéraux utilisés en Ile-de-France pour les grandes cultures, les urines sont de nature organique et présentent donc des propriétés d'absorption par les sols et les plantes plus complexes à piloter.

III.A.5.b.iv La problématique de l'insertion dans un marché de l'engrais

Trois thématiques ont été explorées au cours de nos entretiens :

Les urines comme matière première

Les urines constituent une source d'azote et de phosphore potentiellement utilisables comme matière première par l'industrie. Cependant, d'après l'interlocuteur de l'UNIFA, les quantités disponibles au vu des volumes d'urines mobilisables sont trop faibles pour intéresser les industriels des engrais (cf. calcul ci-dessous). Cette industrie est mondialisée, avec des flux provenant des régions du monde riches en énergie (Russie, Golfe Persique, Brésil, États-Unis...), avec des volumes très importants, qui permettent d'obtenir des coûts de production faibles. Quelques industriels sont présents en France, mais utilisent des dispositifs calibrés et donc difficilement adaptables aux urines comme matière première sans coûts très importants.

Calcul comparatif : Notre modèle (PARTIE III.C) de production des urines nous permet

d'estimer le rendement annuel en azote/phosphore pour 1 million d'individus, qui est le nombre de personnes maximal *a priori* atteignable d'ici 2030 par la collecte séparée des urines.

Quantité d'azote (t)	Quantité de phosphore (t)
2403	219

TABLE III.1 – Production d'azote et de phosphore par la collecte des urines d'1 million de personnes

Ces chiffres peuvent être mis en regard avec les livraisons d'intrants déclarées par l'UNIFA sur la France entière pour une année. Ils correspondent aux quantités d'azote et de phosphore mobilisées dans le cadre du modèle agricole français actuel, tourné notamment vers l'exportation. Ces quantités d'intrants livrées sont très importantes et les substituer par les urines ne semble possible qu'à la marge compte-tenu du modèle actuel. Cependant, les scénarios d'évolution à long-terme de l'agriculture française prévoient une forte diminution des consommations d'intrants azotés de synthèse : de 2,6 millions de tonnes à 1 million de tonnes en 2050 [Couturier et al., 2014]. L'utilisation accrue des urines pourrait s'inscrire dans ce type de scénarios d'évolution des modèles et pratiques.

Quantité d'azote (t)	Quantité de phosphore (t)
2 216 017	429 831

TABLE III.2 – Livraisons annuelles en azote et en phosphore déclarés par l'UNIFA

La concurrence avec les produits existants

Un engrais à base d'urine humaine viendrait s'insérer dans un marché où coexistent déjà de nombreuses substances, minérales comme organiques.

Proposer un nouvel intrant en développant la filière de séparation à la source des urines peut être vu comme une concurrence possible par les producteurs d'intrants existants, ou bien comme une opportunité d'étoffer le bouquet de substances déjà sur le marché. Au vu des volumes d'azote et de phosphore contenus dans les urines mobilisables, très réduits en comparaison des volumes d'intrants consommés par l'agriculture française (TABLE III.2), l'interlocuteur de l'UNIFA estime que ce problème de concurrence potentielle ne se pose pas. Le développement de la filière urines séparée représenterait un micro-marché par rapport aux tonnages engagés chaque année d'engrais de synthèse.

Les urines sont d'origine organique et rentrent donc en concurrence avec les autres produits d'origine organiques présents sur le marché, de par leurs caractéristiques agronomiques (pilotage plus complexe). Ces produits sont pour le moment exclusivement d'origine animale, issus des fumiers et lisiers d'élevage. En particulier, le cas de l'humival a

été évoqué. Cet intrant est conçu à partir des lisiers animaux et exportés depuis la région Bretagne où les éleveurs le produisent, vers l'Île-de-France où il est utilisé par les céréaliers. Dans le succès de cette filière, nos entretiens ont permis de révéler deux moteurs. D'abord, il est évoqué le lien de confiance entre agriculteurs, qui permet le passage à l'acte de contractualisation. Ensuite, le portage par les syndicats et les chambres d'agriculture, qui valident cette filière en lui apportant une crédibilité et font jouer la solidarité entre agriculteurs pour permettre aux éleveurs bretons d'affronter la crise écologique liée aux excès de la pollution aux nitrates.

Le risque fournisseur

Tous les acteurs du plateau se sont accordés sur les difficultés d'accès à cet espace dans le cadre des activités agricoles, en raison de l'enclavement dans une zone densément urbanisée. Notre hypothèse initiale reposait sur le risque d'abandon des livraisons aux agriculteurs par des fournisseurs si les volumes d'intrants demandés se réduisaient. Cependant, tous les acteurs ont balayé cette hypothèse en arguant des faibles volumes concernés en cas de substitution.

III.A.5.b.v Les formes d'intrant privilégiées et la vision des acteurs sur le développement de la filière

La problématique de la concentration du produit en azote/phosphore

Les interlocuteurs de l'UNIFA et de la chambre d'agriculture ont indiqué qu'une valorisation sous la forme d'urines brutes (concentration en azote : 8,8g/L) ou d'urines concentrées par un procédé de type VUNA (concentration en azote : 50g/L) serait difficilement envisageable, au vu des standards de concentration en azote et phosphore dans les solutions minérales azotées (concentration à 30% pour une densité de 1,2 donc environ 360g/L d'azote). Ces concentrations plus faibles avec des substances issues des urines impliqueraient de plus nombreux passages que ce qui est actuellement pratiqué pour les apports d'azote ($\frac{3}{4}$ passages au printemps de manière fractionnée). Le stockage avec de faibles concentrations serait un frein supplémentaire, car les coûts seraient très importants. Notre interlocuteur fait notamment référence à la réglementation des solutions minérales azotées, qui implique l'utilisation d'un bac de rétention si le volume stocké dépasse 100m³.

Les standards des effluents organiques issus d'élevage sont en revanche plus proches. Les urines humaines sont ainsi plus concentrées que certains fumiers (bovins et porcs), bien que ces concentrations soient très inférieures à celles rencontrées dans les fumiers issus d'élevages avicoles. Cependant, à la différence des engrais minéraux de synthèse (cf. contexte), seule une partie de l'azote contenu dans les fumures est réellement assimilable

par la plante, le reste étant volatilisé ou perdu dans le sol lors de l'assimilation par les micro-organismes. Ces apports, généralement plus fractionnés et moins maîtrisés, sont difficilement comparables avec les engrais minéraux de synthèse et ne sont adaptés qu'à certains types de cultures [Agreste, 2014].

Teneur en azote : coefficients forfaitaires				En kg/tonne ou m ³	
Fumier bovins (<i>tonnes</i>) :	5,50	Lisier bovins :	4,00	Composts animaux :	9,45
Fumier bovins (<i>m³</i>) :	3,85	Lisier lapins :	9,00	Composts végétaux :	11,00
Fumier canards :	5,00	Lisier ovins :	7,70	Composts ordures ménagères :	12,90
Fumier ovins :	10,80	Lisier porcs :	5,00	Vinasse :	23,00
Fumier de porcs :	4,10	Lisier poules pondeuses, canards :	6,80	Écume, eaux de sucrerie :	4,10
Fumier volailles de chair et fientes d'oies (<i>tonnes</i>) :	29,00	Lisier veaux :	2,86	Boues :	7,50
Fumier volailles de chair et fientes d'oies (<i>m³</i>) :	10,15			Autres effluents :	6,10
Fientes poules pondeuses :	20,00				

FIGURE III.1 – Teneur en azote de différents intrants organiques : coefficients forfaitaires

La problématique de la volatilisation de l'ammoniac

Plusieurs interlocuteurs, et notamment à l'UNIFA, se sont inquiétés des pertes par volatilisation de l'ammoniac.

Cette volatilisation pourrait avoir lieu lors des phases de transport, de stockage et d'épandage. Ce phénomène diminuerait encore la concentration en azote de l'apport organique et aurait pour conséquence d'augmenter le nombre de passages sur la culture pour apporter la dose d'azote adaptée.

De plus, le dégazage, notamment lors de la phase de stockage, pourrait constituer un danger pour les manipulateurs. En effet l'ammoniac est un gaz hautement toxique et inodore.

Les références concernant ces pertes proposent des chiffres très variables. En effet, les retours d'expérience suédois proposent une perte par émission d'ammoniac inférieure à 1% sur l'ensemble du processus collecte/transport/stockage [Jönsson, 2001]. En revanche, [Spångberg et al., 2014] propose de considérer :

- 0,1% de perte en stockage et transport ;
- 4% de perte en stockage sur l'exploitation agricole ;
- 5% de perte lors de l'épandage (toutefois il y a aussi des pertes d'azote lors de l'épandage d'engrais chimique, suite à la dénitrification).

Le taux total de perte d'azote est donc de 5% à 10% selon qu'on inclut ou non l'épandage.

Vision intrant *versus* vision amendement

La vision de l'urine comme intrant, en lien avec le stock d'azote et de phosphore qu'elle constitue, a été remise en cause par nos interlocuteurs de l'UNIFA et de la chambre d'agriculture. En raison des problématiques évoquées ci-dessus, ces interlocuteurs pensent que les urines ne peuvent concurrencer des solutions minérales azotées et ne donnent pas de plus-value majeure en comparaison d'une fumure organique classique issue d'élevage.

En revanche, ils nous ont invité à considérer une nouvelle vision des urines et du stock d'azote qu'elles contiennent. Celles-ci pourraient trouver selon eux un débouché dans la fabrication de co-compost, utilisable comme amendement, pour améliorer la structure des sols tout en réalisant un apport de fond d'éléments nutritifs, plutôt que comme engrais.

Les urines seraient notamment utilisables pour valoriser les déchets verts sous forme de mélange composté. Les déchets verts, en particulier les végétaux ligneux, ont une faible teneur en azote, ce qui freine leur minéralisation dans le sol. Ces déchets verts ont en général un rapport C/N de 20 ou 30. Ce rapport entre matière organique et azote détermine la vitesse de dégradation dans le sol et la quantité d'azote mobilisée dans le sol par les micro-organismes pour cette dégradation. Lorsque l'azote est en défaut dans le compost (rapport C/N élevé), les micro-organismes mobilisent l'azote contenu dans le sol pour engager la dégradation du compost, et cet azote n'est alors plus mobilisable par les plantes pour leur croissance conduisant à un effet négatif de l'apport de compost. L'objectif selon notre interlocuteur est donc de savoir si combiner ces composts avec les urines, relativement riches en azote, qui est de plus présent dans les urines sous une forme ammoniacale directement utilisable par les micro-organismes du sol, permettrait de rééquilibrer le rapport C/N du mélange à 8, rapport plus adapté à une bonne assimilation par le sol. Un tel amendement serait alors jugé de bonne qualité, avec une vitesse de dégradation rapide et sans mobiliser de l'azote contenu dans le sol.

Cette proposition permettrait peut-être en outre d'hygiéniser les urines lors de la montée en température du compost, qui dégrade selon notre interlocuteur de nombreuses molécules. Cette valorisation résoudrait de plus le problème du stockage tampon des urines lors des périodes d'interdiction d'épandage.

Il serait ainsi nécessaire d'évaluer si les volumes produits en Ile-de-France de composts de déchets verts sont suffisants pour absorber les volumes d'urines produits dans l'hypothèse du Grand Paris, car pour un marché limité, une réutilisation locale serait intéressante selon notre interlocuteur.

Diffusion de l'innovation

Concernant la diffusion d'une telle innovation, le passage par un observatoire des conséquences sanitaires et agronomiques pour les différents types de substances (urines brutes, urines concentrées avec un procédé de type VUNA, co-compost) est un préalable requis par l'ensemble des acteurs. Il s'agit de développer un modèle fonctionnant à l'échelle du plateau de Saclay, pour permettre le déploiement d'une réglementation adaptée.

Plusieurs interlocuteurs, notamment des fermes de Gally, de la chambre d'agriculture et de l'INRA, font ainsi implicitement référence au modèle de Rogers [Bidaud, 2013] de la courbe en S de diffusion de l'innovation, aussi dit de « vulgarisation par dessus la haie » (FIGURE III.2). Un pionnier met en place chez lui une expérimentation, réussit ou échoue, et ses voisins l'imitent en fonction de ses résultats.

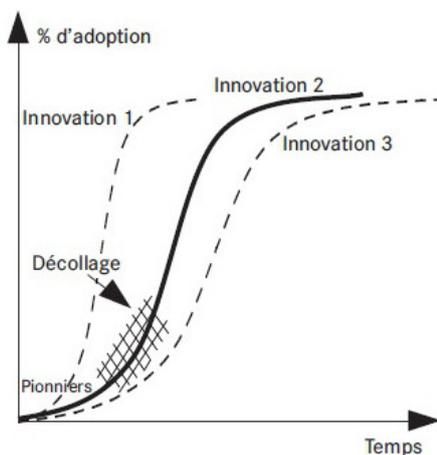


FIGURE III.2 – La courbe en S de diffusion des innovations

III.A.5.c Conclusions

Les trois hypothèses proposées initialement ont pu être abordées avec les acteurs, tout en ouvrant de nouvelles perspectives.

Le faible volume d'azote/phosphore concerné par les urines humaines, en comparaison des quantités mobilisées par le marché des intrants, a fait dire aux interlocuteurs rencontrés que le développement de cette filière ne viendrait pas bousculer l'ordre établi, sans provoquer non plus d'opposition marquée par les acteurs en jeu.

Le verrou principal consiste dans le risque sanitaire que comporte l'utilisation des urines, ainsi que l'inconnu sur l'encadrement administratif qui viendra reconnaître cette filière. Tous les acteurs sont d'accord pour préconiser une première phase de pilote menée par les agriculteurs et la recherche afin d'évaluer les risques et rétablir un climat de confiance avec les acteurs urbains (EPPS et SIAAP) dont la crédibilité est entamée auprès

du monde agricole.

La capacité des urines humaines à convaincre les agriculteurs reposera ensuite sur les arguments économiques et de praticité, compte-tenu de leur valeur agronomique, qui seront développés. Cette rationalité peut cependant être influencée par les acteurs qui encadrent le secteur agricole, comme les chambres d'agriculture et les syndicats, comme le montrent *a priori* l'exemple de l'humival.

Il conviendrait de tester les différentes formes que pourrait prendre cet intrant à base d'urine humaine, et notamment en mélange avec des composts. Ce mélange de compost-urine permettrait d'optimiser les avantages agronomiques des deux substances tout en contournant les difficultés rencontrées pour l'urine liquide (trop faible concentration, même après distillation, et possibles difficultés d'insertion dans les systèmes techniques et pratiques) ou précipitée sous forme de struvite (perte d'une bonne partie de l'azote contenue dans les urines). Ce pivot par rapport à nos premiers scénarios de valorisation des urines, proposé par les acteurs, invite à reconsidérer le rôle joué par les urines humaines en invoquant leurs propriétés en tant qu'amendement pour améliorer la structure des sols plutôt que leur pouvoir fertilisant.

III.B Confrontation des logiques d'acteurs en vue d'établir une chaîne fonctionnelle

Dans cette partie, nous identifions les scénarios de la chaîne technique de collecte sélective des urines et les discutons. Les critères retenus pour le choix des scénarios sont les suivants :

- *faisabilité technique* : par exemple, nous excluons les traitements trop sophistiqués des urines qui ne sont pas encore matures du point de vue du procédé comme les traitements d'électrodialyse, de nanofiltration ou d'ozonation ;
- *transposition au cas francilien des projets existants* : scénarios déjà testés à l'étranger, étude de leur adaptation au contexte francilien de l'assainissement ;
- *suggestions d'acteurs lors des entretiens* : par exemple, la réalisation d'une unité de traitement à l'échelle de l'îlot a été évoquée lors de l'entretien au Sommer Environnement.

La liste n'est donc pas exhaustive mais les scénarios retenus sont suffisants pour discuter l'émergence d'une filière de collecte sélective des urines en région parisienne.

La constitution de des scénarios prend en compte certains éléments fixes comme la collecte des urines dans une cuve-tampon en bas d'immeuble (ou mutualisée à l'échelle de l'îlot) et le transport des urines brutes par camion-citerne (dans les cas où celles-ci doivent être transportées).

Chaque scénario est construit de la manière suivante : la chaîne technique est décomposée en trois étapes dont on détaille le contenu (Transport, Traitement, Valorisation), on indique de le type de produit obtenu. Puis, on détaille les acteurs pouvant être impliqués dans les étapes du scénario et on discute en fonction de l'emplacement retenu si cela a un intérêt dans le jeu d'acteur.

Notons une caractéristique essentielle des scénarios pour la filière de collecte sélective des urines : les choix techniques et d'acteurs peuvent conditionner les choix en aval ou en amont. Par exemple, la valorisation des urines collectées conditionne le traitement de celle-ci : si l'on fait le choix de proposer un engrais liquide azoté concentré, il faut mettre en place en amont une unité de traitement de type nitrification/distillation, une unité de simple stockage ne suffira pas. De même pour le choix d'acteurs : si le SIAAP est désigné responsable de la collecte des urines (vidange et transport), il est peu probable que le traitement des urines soit confiée (en matière de responsabilité et de gestion effective) à un industriel privé plutôt qu'au SIAAP.

Nous listons ci-dessous les scénarios retenus, nous expliquons brièvement pourquoi ils ont été choisis et nous confrontons les logiques d'acteurs vis à vis des choix techniques et du choix des acteurs.

III.B.1 Scénario S1 : la filière de base d'hygiénisation des urines



FIGURE III.3 – Scénario 1 – la filière de base d'hygiénisation des urines

Nous avons retenu cette filière car il fournit le traitement minimal aux urines (hygiénisation) pour le coût de traitement *a priori* le plus avantageux.

Dans les projets réalisés en Suède, l'agriculteur vient collecter lui-même les urines brutes puis les stocke chez lui, selon les recommandations usuelles. On définit alors le scénario S1a.

III.B.1.a Scénario S1a : hygiénisation avec collecte par l'agriculteur et stockage dans l'exploitation agricole



FIGURE III.4 – Scénario S1a – Hygiénisation avec collecte par l'agriculteur et stockage dans l'exploitation agricole

Au cours de notre analyse, ce scénario est rapidement apparu inadapté au contexte français de l'assainissement et aux pratiques d'épandage de substances issues de déchets urbains : en vertu du principe du « zéro euro rendu racine » en vigueur pour les boues de STEP, il paraît impossible qu'un agriculteur, *a fortiori* non-habitué à utiliser de telles

substances comme les exploitants du plateau de Saclay, se déplace pour collecter une substance de faible concentration en azote, même gratuite. En circuit très court, cette solution pourrait s'envisager mais au delà d'un seuil (rapidement atteint au vu de la localisation des exploitations agricoles) les distances à parcourir par les agriculteurs pourraient très rapidement s'avérer trop importantes (entretien au SIAAP). De plus, il est peu probable que les agriculteurs souhaitent investir dans du matériel de transport adapté aux urines. *Par cette analyse sociologique et technique rapide, nous choisissons d'écarter le scénario S1a.*

Nous envisageons donc un nouveau scénario où la collecte est effectuée par un syndicat d'assainissement en régie ou un acteur privé en délégation de service public (DSP). Le stockage a lieu chez l'agriculteur, comme cela se fait en Suède.

III.B.1.b Scénario S1b : hygiénisation avec transport en régie ou DSP puis stockage dans l'exploitation agricole



FIGURE III.5 – Scénario S1b – Hygiénisation avec transport en régie ou DSP puis stockage dans l'exploitation agricole

La PARTIE III.A.4 sur les logiques des acteurs de traitement nous a permis de conclure que les acteurs sont mitigés sur la possibilité du stockage chez les agriculteurs : celui-ci est envisageable s'il est gratuit mais la question de la responsabilité et de la maîtrise du traitement se pose. De plus, notons que le choix du traitement - ici le stockage dans l'exploitation agricole - conditionne la valorisation qui consistera forcément en épandage direct dans les champs (on imagine mal un agriculteur stocker dans son exploitation une substance mise à disposition d'horticulteurs). Dès lors, on a un effet d'éviction concernant la filière de valorisation : l'utilisation des urines hygiénisées dans les espaces verts ou par des structures d'horticulture. Cela implique qu'il n'existe pas de « solution de rechange » en cas de défection de l'agriculteur et d'arrêt d'utilisation de l'urine.

Ces éléments nous invitent à penser que cette solution ne peut être postulée a priori pour définir une filière adaptée pour la séparation des urines à la source, on ne peut pas compter à l'avance sur le fait que le stockage, s'il s'agit de la solution technique retenue,

doit avoir lieu dans les exploitations agricoles.

III.B.1.c Scénario S1c : hygiénisation mutualisée à l'échelle du territoire



FIGURE III.6 – Scénario S1c – Hygiénisation mutualisée à l'échelle du territoire

On envisage à présent un stockage dans une structure mutualisée à l'échelle du territoire. Dans ce cas, d'autres valorisations sont envisageables : en agriculture mais aussi en horticulture ou dans les espaces verts.

Pour les acteurs privés de transport en délégation de service public, cette solution est une bonne opportunité car il y a de gros volume d'urines brutes à transporter. Ce scénario permet de doubler les trajets pour acheminer les urines : d'abord du bâtiment de production vers l'unité de stockage, puis de cette dernière vers l'exploitation agricole. Pour un acteur public faisant le service de transport en régie, le raisonnement est inverse : il s'agit de minimiser les déplacements, un stockage chez l'agriculteur est préférable.

Le choix-même de l'hygiénisation par stockage pour le traitement fait débat parmi les acteurs : cette solution est convaincante pour les acteurs prônant la mise en place d'un système simple et robuste pour commencer, c'est le cas de Veolia et aussi de Terre & Cité (bien que l'interlocuteur rencontré à Terre & Cité soit mesuré sur cette question). D'autres évoquent la nécessité d'avoir un produit transformé, dont l'image est éloignée de celle des urines brutes : c'est le cas des bureaux d'études et de la SEDE Environnement notamment. En particulier, le Sommer Environnement estime que le traitement par stockage n'est pas assez technologique et constitue un retour en arrière, tout comme le transport d'urines par la route. Deux visions opposées se dégagent : innover en rupture comme condition de réussite de l'émergence de la filière d'assainissement écologique, ou développer un système simple, qui s'appuie sur cas expérimentés : parallèle entre transport d'urines par camion citerne et celui des déchets, parallèle entre l'épandage d'urines et celui de boues de STEPs.

Au vu des résultats de la PARTIE III.A.5, il est possible que les agriculteurs ne trouvent pas d'intérêt à utiliser une substance aussi peu concentrée en azote que les urines brutes, en comparaison avec les engrais minéraux usuels. Une autre difficulté qui pourrait créer

des réticences de la part des agriculteurs est la difficulté de manipulation des urines stockées du fait des dégagements d'ammoniac volatil.

Ce scénario pose également le problème des micropolluants, imparfaitement éliminés par le processus de stockage, même couplé à une acidification.

III.B.1.d Conclusions

Le principal atout de ce scénario est sa simplicité, et par là il pourrait se mettre en place rapidement du point de vue technique. Mais cette simplicité joue aussi en sa défaveur avec un produit qui ne présente pas de garanties suffisantes d'absence de micropolluants et qui est compliqué à manipuler par les agriculteurs. De plus, il induit un effet d'éviction des acteurs type bureaux d'études, orientés vers la technologie et l'innovation en rupture. Il est également possible que la forme des urines brutes, même stockées, crée des réticences auprès des consommateurs finaux des produits ou des riverains. Concernant ce traitement, nous préconisons de mener tests scientifiques sur les micropolluants et sur le rendement de récupération de l'azote et de procéder à l'étape d'acidification qui permet de stabiliser les urines et de limiter les pertes d'azote.

III.B.2 Scénario S2 : la filière de compostage de déchets verts

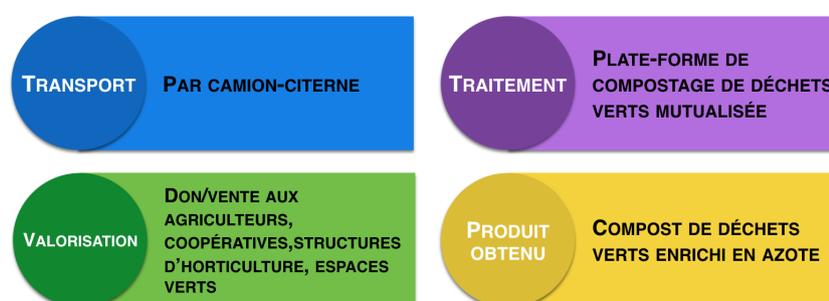


FIGURE III.7 – Scénario S2 – La filière de compostage de déchets verts

Nous n'avons pas envisagé cette filière dans nos recherches initiales. Ce mode de valorisation est apparu quand notre tuteur nous a parlé de l'association Toilettes du Monde qui a produit une étude sur les pratiques de valorisations des produits issus de toilettes sèches mobiles [Berne, 2009]. Notre entretien à la SEDE (société spécialiste dans la valorisation des déchets, notamment en agriculture) ainsi que nos entretiens tournés vers l'agriculture (Chambre d'agriculture, UNIFA) ont confirmé l'intérêt de cette filière. Nous imaginons l'implantation d'une plate-forme de compostage mutualisée à l'échelle du territoire, dimensionnée en fonction du gisement local de déchets verts.

Ce scénario semble créer un consensus parmi les acteurs. En effet, la filière de transport est toujours une opportunité pour les acteurs privés. Les sociétés comme la SEDE Environnement peuvent valoriser une nouvelle substance et proposer de nouveaux produits : des composts avec un rapport C/N homogène dans l'année grâce à l'apport des urines. Les agriculteurs ne devraient pas éprouver de réticences car le compostage est un processus mature qui a su gagner la confiance des acteurs. La partie « noble » : les déchets verts, l'emporterait sur les urines dans l'imaginaire public (entretien Chambre d'agriculture). L'effet d'éviction des acteurs orientés vers l'innovation en rupture devrait être moins fort qu'avec le scénario précédent : si les bienfaits supposés de l'urine sur le compost sont avérés, cela constituerait une innovation sur la technique de compostage. Quelques points de vigilance sont à signaler : des études scientifiques poussées doivent être mises en œuvre pour comprendre les processus de dégradation des agents pathogènes et des micropolluants des urines par le compostage. Les difficultés de manipulation rencontrées avec les urines brutes (dégagement d'ammoniac) sont présentes ici également pour l'incorporation des urines au compost, un savoir-faire est donc à développer pour ne pas perdre l'essentiel de l'azote.

Au delà de cette synergie d'acteurs qui semble se dessiner autour de la filière d'incorporation des urines dans un compost de déchets verts, cette solution ne nous paraît pas être la « solution miracle » vis à vis des enjeux exprimés dans la PARTIE I : le compost, de par son action d'amendement organique, ne limite pas l'utilisation d'engrais de synthèse azotés ou phosphatés à court terme. Cette solution ne fournit pas de réponse à l'enjeu de raréfaction du phosphore et à l'ambition de produire moins d'engrais azotés.

III.B.3 Scénario S3 : La filière d'engrais liquide azoté



FIGURE III.8 – Scénario S3 – La filière d'engrais liquide azoté

Nous avons retenu ce scénario car on obtient un produit compétitif avec les engrais synthétiques en matière de pouvoir fertilisant (cf. PARTIE I.C). C'est un procédé qui a déjà été mis en œuvre dans des projets de l'EAWAG (en Afrique avec les projets VUNA), quoique coûteux et pouvant être amélioré, et qui pourrait être développé à moyen terme.

Le grand avantage de ce scénario est sa performance accrue de récupération d'azote et de phosphore. Le produit obtenu est plus riche en nutriments, plus concentré, dès lors il devrait pouvoir éveiller l'intérêt des agriculteurs. De plus, il s'agit d'une technologie en rupture que les bureaux d'études pourraient intégrer à leur offre pour se différencier.

La question de l'emplacement et du niveau de décentralisation de l'usine de traitement s'est posée au cours des entretiens, nous conduisant à envisager plusieurs cas, présentés ci-dessous.

III.B.3.a Scénario S3a : la filière d'engrais liquide azoté à l'échelle de l'îlot (décentralisé)



FIGURE III.9 – Scénario S3a – La filière d'engrais liquide azoté à l'échelle de l'îlot (décentralisé)

Nous avons retenu ce scénario car au cours de l'entretien avec le Sommer Environnement, l'interlocuteur était convaincu qu'il s'agissait de la seule solution réellement innovante et partant susceptible d'émerger. En effet, le transport routier des urines et l'épandage dans les champs lui semblaient être des méthodes ancrées dans le passé, sans réelle innovation.

Dans ce scénario, il n'y a pas de transport par camion citerne des urines brutes car l'unité de traitement est décentralisée à l'échelle de l'îlot : les urines sont acheminées par tuyau sur de courtes distances, du bâtiment à l'unité de traitement.

Deux types d'acteurs pourraient s'opposer à ce scénario : les acteurs du bâtiment et les acteurs de transport (de type privé). Concernant les acteurs du bâtiment, l'installation d'une usine de traitement, même moderne et avec un design pensé, pourrait être mal perçue par les architectes de l'îlot équipé de toilettes à séparation. Il s'agirait d'un élément imposé à la programmation, qui ferait perdre de la surface (désaccord des constructeurs) et pourrait introduire une discontinuité paysagère. On a donc un double effet d'éviction avec les acteurs de transport type Veolia et les acteurs du bâtiment. La question de l'acteur responsable de la construction de l'unité de traitement et de sa maintenance se

pose : si l'unité est placée à l'échelle de l'immeuble, on envisage un mode de gestion collectif par un syndic. Si l'unité est à l'échelle de l'îlot, un acteur de traitement serait désigné responsable et ses effectifs de maintenance augmenteraient avec cette solution décentralisée. La PARTIE III.C devra arbitrer entre les différents coûts et économies : la réduction du volume des urines impliquant une contraction du besoin de transport, le coût du traitement VUNA, le coût d'une solution décentralisée pour l'acteur de traitement.

III.B.3.b Scénario S3b : la filière d'engrais liquide azoté à l'échelle du territoire

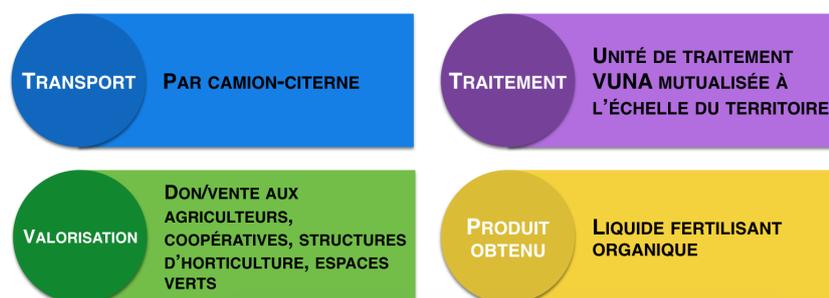


FIGURE III.10 – Scénario S3b – La filière d'engrais liquide azoté à l'échelle du territoire

Par rapport au scénario précédent, celui-ci permet de gommer l'effet d'éviction des acteurs du bâtiment et du transport : en effet, les unités de traitement sont rejetées plus loin des îlots et des acteurs privés pourraient récupérer un marché de transport d'urines brutes. Ce scénario a été retenu car il pourrait permettre de réaliser des économies d'échelle sur le traitement, très coûteux en investissement, en énergie et en entretien pour le moment. L'étude économique devra arbitrer si les économies d'échelle réalisées sur le traitement permettent d'équilibrer l'introduction de coûts de transport conséquents.

On peut aussi s'interroger sur la réaction des riverains (*a priori* non-usagers des toilettes séparatives) de ces unités de traitement qui peuvent être assimilées à des mini-STEPS : il est possible que les riverains s'y opposent. L'un des objectifs environnementaux des stations d'épuration est aussi de réduire les nuisances pour les riverains. Au delà de cela, le message renvoyé par cette filière peut être contesté : l'un des objectifs du système est d'éviter l'agrandissement d'une grande station d'épuration et une multiplication de mini-STEPS est proposée ici, avec ses nuisances associées pour de nouveaux riverains.

III.B.3.c Scénario S3c : la filière d'engrais liquide azoté à l'échelle régionale



FIGURE III.11 – Scénario S3c – La filière d'engrais liquide azoté à l'échelle régionale

Cette solution a été proposée par nos interlocuteurs à l'AESN pour des raisons d'équipement et de maintenance : en effet, les STEPs sont équipées de structures de traitement pour les effluents de vidange, il paraît cohérent de compléter avec un équipement de traitement des urines, dont la maintenance ne devrait pas poser problème grâce à la présence des ouvriers spécialisés des STEPs.

L'inconvénient est que ce scénario implique de longues distances parcourues par les camions, du fait de la faible densité de stations d'épuration en Ile-de-France (paradigme de centralisation) (FIGURE III.12). On sort ainsi de la logique de circuit court qui est importante dans notre compréhension des enjeux. On choisit donc d'écarter ce scénario.

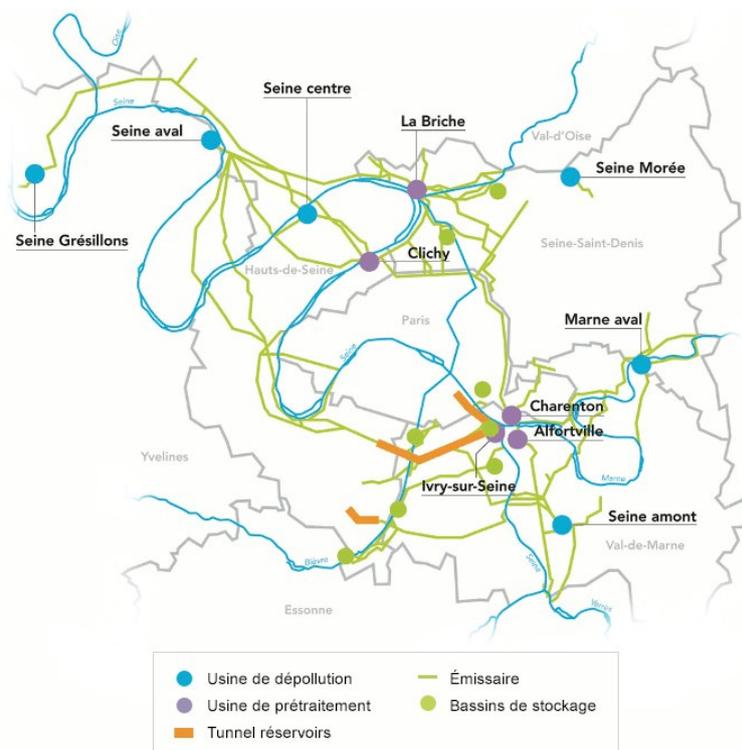


FIGURE III.12 – Emplacement des stations d'épuration en Ile-de-France (Source : www.siaap.fr)

III.B.4 Scénario S4 : La filière d'engrais solide phosphaté

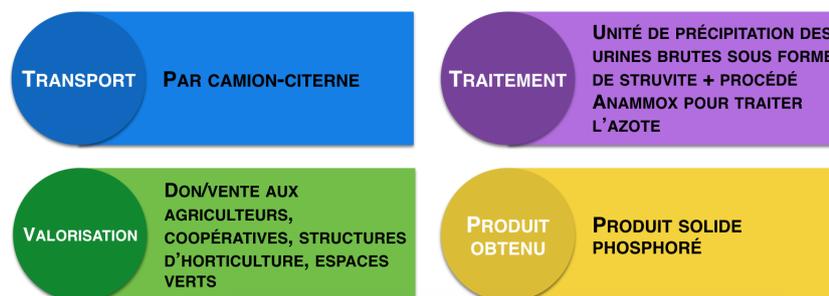


FIGURE III.13 – Scénario S4 – La filière d'engrais solide phosphaté

Nous avons retenu ce scénario car le procédé de précipitation est peu coûteux pour un projet-pilote. On obtient un engrais solide phosphaté, dont est éliminée une part importante de micropolluants ainsi qu'un effluent liquide « propre » grâce à l'élimination de l'azote par le procédé Anammox.

À l'instar de la filière « engrais liquide azoté », la question de l'emplacement de l'unité de traitement se pose et permet de définir trois scénarios.

III.B.4.a Scénario S4a : la filière d'engrais solide phosphaté à l'échelle de l'îlot



FIGURE III.14 – Scénario S4a – La filière d'engrais solide phosphaté à l'échelle de l'îlot

Nous avons retenu ce scénario par analogie avec celui de la filière « engrais liquide azoté » à l'échelle de l'îlot. Les scénarios S3a et S4a présentent des similitudes, sauf au niveau du traitement : les acteurs de traitement seraient probablement plus motivés pour se positionner sur ce scénario « engrais solide phosphaté » qui est plus mature du point de vue du technologique que le procédé VUNA, au moins à court terme. Ils pourraient communiquer sur le recyclage d'une ressource non renouvelable : le phosphore. L'obtention d'un engrais solide devrait gagner l'adhésion des agriculteurs, en effet, nos interlocuteurs à la Chambre d'agriculture et aux Fermes de Gally nous ont indiqué que la forme solide en granulés était la plus pratique. Il s'agit aussi de la forme de produit la plus éloignée

des urines, celle à plus à même de limiter le facteur « beurk ».

Cependant, au vu des enjeux du projet, aucune valorisation de l'azote n'est possible avec ce traitement (contrairement au procédé VUNA qui permet de récupérer azote et phosphore).

III.B.4.b Scénario S4b : la filière d'engrais solide phosphaté à l'échelle du territoire

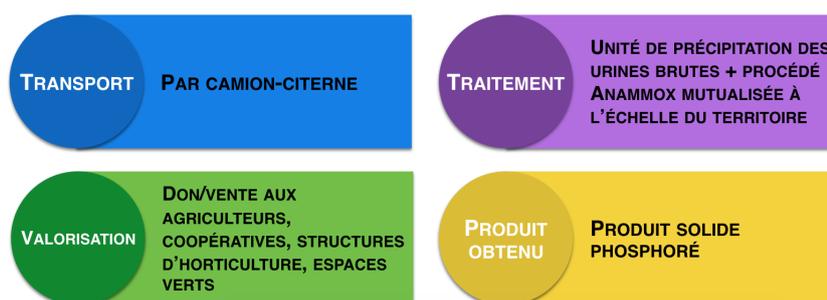


FIGURE III.15 – Scénario S4 b– La filière d'engrais solide phosphaté à l'échelle du territoire

Ce cas est similaire au scénario S3b en ajoutant les éléments détaillés ci-dessus sur les différences entre les scénarios struvite+anammox et VUNA.

III.B.4.c Scénario S4c : la filière d'engrais solide phosphoré à l'échelle régionale

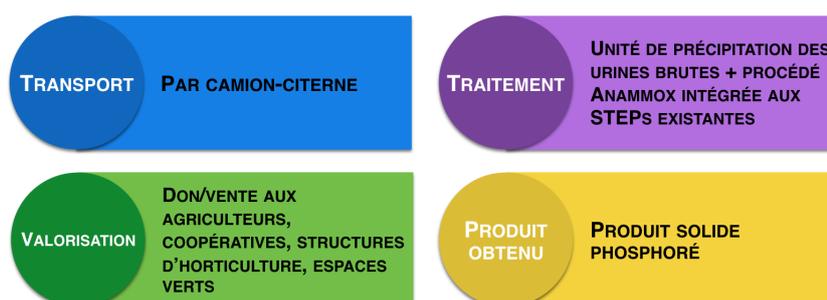


FIGURE III.16 – Scénario S4c – La filière d'engrais solide phosphaté à l'échelle régionale

Avec le même raisonnement que pour le scénario S3c, on décide d'écarter ce scénario qui rompt la logique de circuit court.

III.B.5 Scénario S5 : Un traitement des urines dans les STEPs existantes



FIGURE III.17 – Scénario S5 – Un traitement des urines dans les STEPs existantes

Ce scénario diffère complètement des autres : il vise à stocker les urines brutes dans une cuve-tampon puis à les acheminer vers les stations d'épuration existantes en utilisant le réseau d'assainissement usuel. Cela permet de lisser les pics d'azote en contrôlant le débit des urines rejetées dans le réseau.

Mais ce dernier scénario ne semble pas pertinent du fait des enseignements retenus de notre entretien au SIAAP : en effet, notre interlocuteur a indiqué que, selon lui, il n'y avait pas de pic d'azote dans la journée dans les stations d'Ile-de-France, un contrôle du débit d'azote n'est donc pas utile. De plus, ce scénario va à l'encontre des enjeux du projet présentés dans la PARTIE I.A : pas de réponse aux enjeux des cycles de l'azote et du phosphore, pas d'action en faveur de la désaturation des STEPs. Ce scénario pourrait remporter l'adhésion des acteurs car il ne leur impose que peu de contraintes (mises à part celles pesant sur les usagers). Justement, cette absence de contraintes (pas de transport d'urines brutes par camion, pas besoin de construire des stations de traitement etc.) est liée à un manque d'innovation de ce scénario : ce point est confirmé par la vision de deux de nos interlocuteurs en entretien (au Sommer Environnement et à l'AESN), ceux-ci estiment que le système d'assainissement collectif actuel n'est pas durable, et qu'il a un fort besoin de se renouveler et d'innover. *Nous choisissons donc d'écarter le scénario S5.*

III.B.6 Éléments supplémentaires sur les acteurs

Les scénarios évoqués ci-dessus pourraient être intégralement mis en œuvre, de la collecte à la mise à disposition des produits, par le SIAAP. Les avantages sont les suivants : transparence vis-à-vis de l'utilisateur pour sa facture d'eau (qui est la même si ses urines sont traitées sélectivement ou non), évitement du problème des bases de données de raccordement des particuliers (il faudrait distinguer les usagers « hors du cycle de l'azote », ce qui est une tâche difficile selon notre interlocuteur au SIAAP). Un autre avantage réside dans le fait que le syndicat local de transport - le SIAVB - ne s'est pas senti concerné par le transport des urines et un positionnement fort du SIAAP sur le projet permettrait d'éviter des luttes avec le SIAVB pour lui imposer le transport.

Mais il existe aussi des inconvénients à un scénario « tout-SIAAP ». En effet, les relations entre les agriculteurs et le SIAAP sont dégradées depuis le scandale des boues de station d'épuration. Il y a alors un risque que les acteurs de la valorisation se rétractent par manque de confiance. De plus, le SIAAP n'est réellement intéressé par le projet que si celui-ci dépasse un seuil critique : le scénario « tout-SIAAP pourrait tuer le projet dans l'oeuf si le nombre de personnes déconnectées du réseau n'atteint pas leurs objectifs internes.

Le cas du transport en régie n'a été que peu évoqué par rapport à un acteur privé en DSP : cela est dû au fait que le syndicat de transport dont nous avons rencontré un employé ne s'est pas senti concerné par le projet, nous avons donc moins de matière. La PARTIE III.C qui suit traitera des différences entre un service en régie et un service privé en DSP.

III.B.7 Conclusions

De notre discussion, on retient les scénarios techniques suivants :

- Hygiénisation des urines brutes par stockage - option acidification, avec deux alternatives : stockage chez l'agriculteur ou dans une structure mutualisée à l'échelle du territoire ;
- Incorporation des urines à un compost de déchets verts - amendement organique ;
- Traitement de nitrification/distillation pour concentrer les urines et récupérer les nutriments (azote et phosphore) avec deux alternatives : unité de traitement à l'échelle de l'îlot ou du territoire ;
- Précipitation des urines brutes en struvite pour récupérer le phosphore suivie du procédé Anammox pour traiter l'azote dans l'effluent liquide.

III.C Analyse technico-économique

III.C.1 Présentation de l'étude

III.C.1.a Cadre théorique

Nous nous plaçons dans le cadre de nos hypothèses hypothèses présentées en PARTIE II. Nous modélisons dans cette étude la partie production des usagers, la partie collecte dans les bâtiments avec l'installation des équipements nécessaires à la collecte séparée des urines, la partie transport en camion-citerne, la partie traitement avec le stockage hygiénisant et le traitement VUNA de nitrification/distillation et enfin la partie valorisation supposée dans l'agriculture. Nous présentons dans cette partie le principe de cette étude. Son détail est présenté en ANNEXE C.

III.C.1.a.i Le territoire

Nous considérons dans notre étude un territoire composé de deux types d'habitats :

- des habitats « Résidentiel » qui correspondent à des logements collectifs d'une taille caractéristique de 250 habitants ;
- des habitats « Tertiaire » qui correspondent à des lieux de travail et de loisirs d'une taille caractéristique de 1000 habitants.

Chacun de ces secteurs d'habitats rassemble un nombre de personnes donné, qui participeront à la collecte d'urine sur le territoire. Une personne habitant sur le territoire mais n'y travaillant pas sera comptabilisé dans le secteur « Résidentiel » mais pas « Tertiaire ». Une personne ne venant sur le territoire que pour travailler sera comptabilisé dans le secteur « Tertiaire » mais pas « Résidentiel ». Une personne y habitant et y travaillant sera comptabilisé dans les deux secteurs.

III.C.1.a.ii La production

Chacune de ses personnes produira une quantité donnée d'urines par jour, typiquement de l'ordre d'1,5L. Ces urines ne seront toutefois pas forcément récoltée : la personne partage son urine entre chez elle et son travail, peut habiter ou travailler dans un bâtiment non-équipé, elle peut se déplacer hors du territoire, ses pratiques peuvent ne pas être adapté aux toilettes (uriner debout pour un homme sur une cuvette Nomix par exemple), les toilettes en question peuvent diluer ces urines avec de l'eau de chasse. Tous ces éléments sont pris en compte dans la production d'urine pour atteindre un niveau de finesse important. Nous déduisons de cette modélisation une quantité d'urine produite quotidien-

nement sur le territoire.

Cette production est différente en fonction des secteurs puisqu'une personne urine, en moyenne, davantage chez elle qu'au travail, en particulier à cause des weekends, mais que l'efficacité de la collecte est plus importante au travail, puisque des urinoirs secs, qui ne diluent pas les urines, peuvent être installés, n'obligeant plus les hommes à s'asseoir.

III.C.1.a.iii La collecte

Pour recueillir ces urines, les bâtiments du territoire doivent être équipés de toilettes à collecte séparée, ces toilettes doivent être reliées par des tuyaux à une cuve potentiellement mutualisée entre plusieurs bâtiment, et forcément terrassée pour soutenir le poids du camion qui la vidangera. Tous ces postes de dépenses sont modélisés dans notre étude afin de pouvoir identifier les éléments les plus coûteux et estimer le coût par bâtiment et par tête de l'installation de tels équipements.

Il est certain que des toilettes sont partagées par plus de personnes au travail que chez soi, donc moins nombreuses dans le secteur tertiaire. Le mètre de tuyau est donc lui aussi plus faible. Les postes de dépenses seront donc différents en fonction du secteur considéré.

III.C.1.a.iv Le transport

Une fois ces urines récoltées, il faut venir les chercher et les transporter jusqu'aux centres de traitement. Pour une collectivité, qui voudrait assurer ce service elle-même ou une entreprise qui voudrait se lancer sur ce métier, il lui faut acheter des camions, employer des conducteurs, des garagistes et des personnes pour les diriger si le volume de travail venait à gonfler. En fonction de la taille du territoire, un conducteur pourra faire plus ou moins de vidanges par jour. C'est un des facteurs déterminants pour cette partie de l'étude. Nous comparerons ces éléments techniques et économiques au prix d'un service délégué à Veolia, qui a estimé les tarifs d'une collecte des urines.

III.C.1.a.v Le traitement

Ces urines récoltées sont transportées dans des centres de traitement. Nous regarderons les coûts de fonctionnement et de main d'œuvre d'un service de stockage hygiénisant et celui d'une nitrification suivie d'une distillation comme réalisé à l'EAWAG.

III.C.1.a.vi La valorisation

Une fois traitées, ces urines sont valorisées pour leurs nutriments dans l'agriculture. Notre étude permet de simuler les quantités de nutriments NPK produits chaque année et de les comparer aux besoins nutritionnels des sols afin d'en déduire la surface nécessaire pour valoriser ces urines. Il est alors possible d'évaluer les recettes qu'il est possible de tirer de la vente de cet engrais.

III.C.1.a.vii Des éléments de comparaison avec le traitement en STEP

Enfin, notre modélisation s'attache à comparer le traitement de ces urines retirées du réseau d'assainissement classique à celui qu'elles auraient subi en STEP. Nous regarderons en particulier la différence de coût entre ces modèles d'assainissement mais aussi la consommation énergétique de chaque traitement.

III.C.1.b Objectifs

Les objectifs de cette analyse sont multiples :

- évaluer le volume d'urine induit par l'installation d'une collecte sélective sur un territoire, la quantité de camions affectés au transport de ces urines sur les routes, le nombre d'installations de traitement nécessaires et les quantités de nutriments récoltés ;
- évaluer le coût humain et création d'emplois dans les domaines du transport et du traitement. Le nombre de personnes affectées à la valorisation agricole (épandage d'un produit liquide par exemple) ne sera pas estimé ;
- évaluer le coût économique de la mise en place d'une telle filière en particulierisant ces coûts pour chaque domaine du système de collecte sélective des urines, à savoir le bâtiment, le transport et le traitement, au niveau de l'investissement initial et des coûts de fonctionnement (humains, énergétiques, etc.). Ces estimations permettront d'identifier des postes de subventions de la part d'organismes publics qui ont pu apparaître au cours de nos entretiens ;
- identifier les coûts évités du traitement de ces urines en STEP, avec une comparaison finale du coût volumique d'un traitement des urines en STEP et d'un traitement séparé selon nos différents procédés.

Ces études s'appuieront sur les travaux antérieurs d'Amandine Caby [Caby, 2013], de Mathilde Besson [Besson, 2015], sur les résultats du projet OCAPAPI ainsi que des données résultant des retours d'expérience à l'étranger, notamment en Suisse avec le soutien technique et scientifique de l'EAWAG.

III.C.2 Résultats du modèle

III.C.2.a Résultats généraux

Avant d'appliquer notre modèle à des cas précis, commençons par balayer des résultats généraux basés sur notre modélisation.

III.C.2.a.i Des subventions bien ciblées

La collecte sélective des urines est un système d'assainissement innovant et en rupture avec le paradigme actuel du tout-à-l'égout. Dans ce contexte, les changements nécessaires à sa mise en pratique sont nombreux et nous ont poussés à nous concentrer sur le bâti neuf. Toutefois, même pour le neuf, le surcoût existe et est conséquent : de nouvelles toilettes, des kilomètres de tuyaux à tirer, des cuves à installer, des camions de pompage, d'énormes cuves de stockage ou des machines de traitement à acheter, et une fois en place des frais de fonctionnement (humains, énergie, essence, etc.) à couvrir. À toute échelle, nos simulations nous montrent que les investissements initiaux à réaliser sont souvent bien plus importants que les frais de fonctionnement, ce qui constitue un frein à l'entrée d'acteurs sur le marché.

Toutefois, au cours de nos entretiens, nous avons été sensibilisés par différents acteurs sur la possibilité de bénéficier de subventions. Terre & Cité envisage des subventions potentielles de l'ADEME, de la région Ile-de-France et du conseil départemental de l'Essonne. La chambre d'agriculture identifie elle aussi l'ADEME et la région comme des entités pouvant apporter un soutien financier au projet, notre interlocuteur précisant qu'elles pourraient subventionner des expérimentations et des infrastructures de type usine mais pas des cuves de stockage chez l'agriculture par souci de distorsion de la concurrence. L'AESN avait, de son côté, demandé qu'une petite STEP « du futur » soit construite sur le plateau, en engageant l'action des écoles scientifiques présentes pour réfléchir au dispositif et en profitant des subventions ADEME sur les projets d'avenir. Ce projet n'a toutefois pas vu le jour.

Dans la mesure où ce projet n'a pas vu le jour, l'AESN porterait le projet de collecte des urines avec une volonté forte. Nos interlocuteurs déclarent « [rêver] de financer des opérations qui font évoluer le système ». L'AESN pourrait alors être aussi une entité subventionnaire, non-identifiée jusqu'alors par les autres interlocuteurs. Nos interlocuteurs ajoutent qu'un maître d'ouvrage portant un projet bien ficelé serait la clé pour obtenir les subventions. Ce financement ne concernera toutefois que les coûts d'investissement et non les coûts d'exploitation. Il atteindra au maximum 50% des coûts pour un investisseur privé et 80% pour un acteur public.

Cette déclaration est à nuancer puisque notre premier interlocuteur à l'AESN pense que le système de collecte sélective des urines ne serait probablement pas retenu dans le programme de projets subventionnés, bien qu'il soit éligible. Il voit éventuellement une participation financière de l'AESN sous la forme de primes d'épuration pour les particuliers, qui seraient un atout pour l'attractivité de ces logements.

III.C.2.a.ii Des secteurs aux caractéristiques bien différentes

Les secteurs du « Résidentiel » et du « Tertiaire » ont des caractéristiques bien différentes : le premier bénéficie d'une présence le plus souvent accrue des habitants alors que le deuxième montre souvent des performances meilleures dans la récolte des urines avec des équipements plus performants (urinoirs secs par exemple) et une maintenance professionnelle. Dans la compétition de ces effets, c'est l'effet présentiel qui l'emporte puisqu'à nombre de participants égal, le secteur « Résidentiel » produit 2,2 fois plus d'urines que le secteur « Tertiaire » et 2,5 fois plus de nutriments.

Cette productivité supérieure est à contrebalancer avec des coûts qui sont aussi supérieurs. Pour 1000 habitants, il faudra dans notre modélisation :

- pour le secteur « Résidentiel » : 500 toilettes et 1000m de tuyaux et une cuve vidangée tous les 13 jours ;
- pour le secteur « Tertiaire » : 50 toilettes et 500m de tuyaux et une cuve vidangée tous les 30 jours.

Ainsi, si la production est plus de 2 fois supérieure, il faudra 10 fois plus de toilettes, qui portent à l'heure actuelle l'essentiel des coûts dans le domaine du bâtiment, 2 fois plus de tuyaux, et un transport 2,3 fois plus fréquent et donc 2,3 fois plus cher.

Si l'objectif est de désaturer les stations d'épuration à un horizon donné, dans la mesure où un projet évolue dans un univers contraint de coûts mais dans notre cas aussi de bâtiments construits, un arbitrage entre coûts et vitesse de construction sera à effectuer afin d'optimiser le choix des bâtiments qui recevront des équipements de collecte sélective des urines. Notre étude, si elle permet de mettre en évidence ce phénomène, ne permet pas de le quantifier en raison de la grossièreté de la modélisation, notamment en matière de transport.

III.C.2.a.iii Une valorisation peu rentable

En vendant nos nutriments au prix du marché, la somme ainsi dégagée est négligeable devant les coûts de fonctionnement du système de collecte sélective et de traitement des urines. Pour exemple, pour une population de 1000 à 100 000 habitants, notre engrais

azoté devrait être vendu entre 3500 et 5500 €/tN pour pouvoir rentabiliser une collecte et un transport effectué par Veolia (le traitement n'est même pas pris en compte !), alors que le prix du marché est de l'ordre de 200€/tN.

Si cette vente ne permet pas d'absorber les coûts de fonctionnement, peut-être pourrions nous en profiter pour rémunérer les habitants participant à ce système afin d'augmenter l'attractivité et l'acceptabilité de la collecte sélective des urines ? La vente permettrait de leur reverser à chacun un chèque d'une valeur comprise entre 15 et 30 centimes chacun, ce qui paraît bien évidemment dérisoire ! Une entreprise de 1000 personnes sur le plateau pourrait tout au plus organiser un pot à l'honneur de la collecte d'urines.

La leçon que l'on peut en tirer est essentielle : les bénéfices de la collecte d'urine ne se trouveront pas dans la vente d'engrais, même si son prix venait à augmenter d'un facteur 2 ou 3. Dans un premier temps, il semble alors plus logique de rester dans la logique du « 0 euro rendu racine », classique pour les engrais-déchets.

III.C.2.a.iv Une nouvelle vision des traitements

Dans cette étude, seuls deux traitements ont été déterminés : le stockage hygiénisant et la nitrification/distillation de type VUNA. Nos simulations nous permettent d'établir que :

- en matière d'investissement initial, au niveau actuel, l'investissement initial dans des cuves de stockage se révèle plus cher de 50% en moyenne qu'un investissement initial dans des machines de nitrification/distillation alors que le prix de ces derniers est amené à diminuer de façon bien plus importante ;
- en matière de coût de fonctionnement, ceux du stockage sont des coûts de transport jusqu'aux parcelles de l'agriculteur, qui sont comparables à ceux de collecte, quand ceux du procédé VUNA sont essentiellement énergétique et humains. Ces coûts se révèlent aujourd'hui comparables.

Le stockage hygiénisant, qui apparaissait simple et *a priori* moins coûteux, se révèle plus cher qu'un procédé technologique comme la nitrification/distillation, dont le prix est amené à diminuer fortement au cours des prochaines années.

Un autre point intéressant est d'examiner le volume que devrait récupérer les camions de transport pour que la vente d'engrais permette d'absorber les coûts de transport. On observe que le volume des urines en cuve devraient être réduit de 95%. L'étude technico-économique donne alors du poids au traitement VUNA en pied d'immeuble que l'étude socio-technique a rejeté. Si le traitement des urines venait à être automatisé de façon fiable et que la station arrivait à être visuellement valorisable, la piste du positionnement

des dispositifs de traitement en bas d'immeuble pourrait être réouverte à l'avenir.

III.C.2.b Modélisation d'un prototype

III.C.2.b.i Description

On considère aussi un prototype de 1000 personnes. Ce prototype sera de 2 natures : un prototype résidentiel basé sur le modèle de l'îlot de la ZAC de Moulon proposé par l'EPPS et un prototype tertiaire sur le modèle de ce que pourrait être le futur bâtiment de l'AgroParistech sur le plateau de Saclay (TABLE III.3). Les objectifs sont pluriels : il s'agira tout d'abord de chiffrer, dans les limites de notre modèle, le coût de la mise en place d'un système de collecte sélective des urines sur un prototype mais aussi d'illustrer les résultats présentés ci-dessus et observer aussi, à petite échelle, l'intérêt de la collecte des urines.

Synthèse du projet		
Caractéristiques principales		
Nombre d'habitants « Résidentiel »	1000	0
Nombre d'habitants « Tertiaire »	0	1000
Projection	Court terme	

TABLE III.3 – Modélisation d'un prototype - Caractéristiques principales

III.C.2.b.ii Production

La production d'un tel prototype est donné en TABLE III.4. Les conclusions que nous pouvons en tirer sont qu'un bâtiment résidentiel produit 2,2 fois ce que produit un bâtiment tertiaire à occupation égale. Toutefois le volume d'urine récolté dans le tertiaire est largement suffisant pour alimenter un programme de recherche sur la valorisation des urines en agriculture (aspects agronomiques et sanitaires des différents traitements).

Production		
Production journalière (m^3)	0,7	0,3
Production hebdomadaire (m^3)	4,6	2,1
Production mensuelle (m^3)	20	9
Production annuelle (m^3)	237	108

TABLE III.4 – Modélisation d'un prototype - Production

III.C.2.b.iii Bâtiment

Les résultats concernant la collecte des urines dans le bâtiment sont résumés en TABLE III.5. La production plus faible dans le tertiaire entraîne logiquement un intervalle de collecte plus important que dans le résidentiel, 30 jours au lieu de 13. Le message à retenir toutefois est qu'à l'heure actuelle, pour une production à 220% de la production tertiaire, le secteur résidentiel coûte presque 10 fois plus cher lorsque l'on rapporte ce coût par tête. Ce coût est essentiellement porté par l'achat des toilettes, dans un secteur comme dans l'autre avec 95% dans le secteur résidentiel et 77% dans le secteur tertiaire. Ce poste de dépenses peut bénéficier de subventions et doit en faire l'objet puisqu'il constitue le plus gros frein à l'heure actuel pour les acteurs du bâtiment.

Collecte		
Immeubles		
Nombre d'immeubles équipés	4	1
Nombre de toilettes installées	500	50
Nombre de mètres de tuyaux tirés (m)	1000	500
Cuves		
Volume d'une cuve (m^3)	10	
Nombre de cuves installées	1	1
Intervalle de collecte (j)	13	30
Coûts		
Total coûts Toilettes (k€)	400	40
Total coûts Tuyaux (k€)	10	5
Total coûts Cuves (k€)	7	7
Investissement initial dans le bâtiment (k€)	417	52
Investissement moyen par bâtiment (k€)	104	52
Coût moyen par tête (€)	417	52

TABLE III.5 – Modélisation d'un prototype - Filière du bâtiment

III.C.2.b.iv Transport

Les résultats concernant le transport des urines sont résumés en TABLE III.6. À petite échelle, une prise en charge en régie du transport ne sera pas rentable au vu de la faible activité de transport, une délégation du service est donc préférable. Toutefois le camion du service délégué ne sera pas occupé à plein temps sur la collecte d'urines, le soucis de contamination des urines par un produit pompé antérieurement dans le camion se pose. Pour ce qui est de la comparaison entre secteur, à niveau de production inférieur correspond des frais de transport annuels inférieurs mais un coût volumique identique. Il sera intéressant de comparer ce coût volumique à petite échelle au coût volumique à grande échelle dans la partie suivante.

Transport		
Logistique		
Flotte de camion nécessaire	1	1
Humains		
Nombre de conducteurs	1	1
Nombre de garagistes	1	1
Nombre de chefs de groupe	0	0
Coûts		
Investissement initial dans les camions	260	260
Total coûts annuels Garage (k€)	5	5
Total coûts annuels Humains (k€)	53	53
Coûts annuels d'un service assuré par Veolia (k€)	5,6	2,5
Coût volumique du transport (€/m ³)	23,5	23,5

TABLE III.6 – Modélisation d'un prototype - Filière du transport

III.C.2.b.v Traitement

Les résultats concernant le traitement des urines sont résumés en TABLE III.7. Comme annoncé en partie précédente, l'investissement initial d'un traitement industriel type VUNA est moins élevé que celui d'un stockage hygiénisant. Lorsqu'on compare les frais de fonctionnement, ceux du VUNA sont virtuellement gonflés par la prise en compte d'un employé maintenance qui n'a pas de raison d'exister dans la mesure où ce rôle pourra être rempli par l'équipe de recherche associée au projet à coût nul en raison du petit nombre de machines. Le coût du transport chez l'agriculteur pour le stockage et le coût énergétique du traitement VUNA sont alors comparables.

Traitement		
1ère solution : Stockage sanitaire		
Logistique		
Volume d'une cuve de stockage (m^3)	150	
Nombre de cuves de stockage nécessaire	2	2
Coûts		
Investissement initial dans le stockage (k€)	170	170
Coût de fonctionnement du stockage (transport) (k€)	5,6	2,5
2ème solution : Nitrification/Distillation		
Logistique		
Nombre de nitrificateurs nécessaires	1	1
Volume de traitement journalier des nitrificateurs (m^3/j)	0,7	0,3
Nombre de distillateurs nécessaires	2	1
Volume de traitement journalier des distillateurs (m^3/j)	0,6	0,6
Consommation énergétique annuelle (MWh)	31	14
Humains		
Nombre d'employés surveillance/maintenance	1	1
Coûts		
Investissement initial en machines de traitement (k€)	126	61
Total coûts annuels Énergie (k€)	4,5	2,1
Total coûts annuels Humains (k€)	30	30

TABLE III.7 – Modélisation d'un prototype - Filière du traitement

III.C.2.b.vi Valorisation

Les résultats concernant la valorisation des urines sont résumés en TABLE III.8. Un prototype dans le secteur résidentiel produira en moyenne 2,4 fois plus de minéraux qu'un prototype dans le tertiaire, affectant le nombre d'hectares potentiellement satisfaits en azote et le chiffre d'affaire de la vente d'engrais. Au vu des sommes engagées, il est évident que le « 0 euro rendu racine » est une évidence pour un prototype. Nous remarquons qu'au vu des concentrations en nutriments des urines résidentielles plus élevées que dans le tertiaire, le coût de transport de l'azote est plus faible de 12% dans le secteur résidentiel.

Valorisation		
Minéraux		
Azote annuel produit (t)	1,7	0,7
Phosphore annuel produit (t)	0,2	0,1
Potassium annuel produit (t)	0,4	0,2
Agriculture		
Nombre d'hectares nourris en azote (ha)	17	7
Énergie évitée de production d'engrais (MWh)	20	8
Économie		
Prix potentiel de l'engrais azoté (€/t)	125	
Chiffre d'affaires de la vente d'engrais (€)	216	87
Prix de l'engrais azoté pour couvrir les frais de transport (€/tN)	3261	3692
Réduction de volume nécessaire pour couvrir les frais de transport au prix actuel (%)	94	95

TABLE III.8 – Modélisation d'un prototype - Valorisation

III.C.2.b.vii Comparaison à la filière d'assainissement actuel

Comme nous pouvons le voir en TABLE III.9, le coût du traitement de l'azote en STEP est important. Un rapide calcul permet de montrer, sous l'hypothèse d'un transport par une société type Veolia et d'un traitement industriel suivi et contrôlé par des chercheurs, que l'investissement dans des installations de traitement est rentabilisé au bout de 5 à 7 ans en raison de coûts de fonctionnement (transport et traitement) bien plus faible pour la collecte sélective d'urines. Ce coût n'est pas réellement évité puisqu'à petite échelle, la collecte sélective des urines ne permet pas d'éviter la construction de nouvelles STEP, mais ceci est le premier exemple du coût plus faible du traitement des urines en dehors du circuit d'assainissement classique. En outre, d'un point de vue énergétique, le coût énergétique d'un traitement VUNA est semblable à celui en STEP, les engrais sont donc produits à coût nul énergétiquement. En dépit des hypothèses fortes de modélisation près (absence de l'essence du transport), on peut supposer que ce mode de fonctionnement est moins énergivore.

Comparaison à la filière d'assainissement actuel		
Coût annuel « évité » du traitement d'azote (k€)	34	14
Énergie annuelle « évitée » du traitement d'azote (MWh)	31	12

TABLE III.9 – Modélisation d'un prototype - Comparaison à la filière d'assainissement actuel

III.C.2.c Modélisation d'une collecte à grande échelle

III.C.2.c.i Description

Nous allons à présent regarder l'analyse technico-économique d'une collecte à grande échelle. L'idéal aurait été de prendre 1 000 000 de personnes comme Amandine Caby le souhaitait dans sa thèse professionnelle [Caby, 2013]. Toutefois, la modélisation du transport est de plus en plus mauvaise au fur et à mesure que le territoire s'agrandit (on imagine mal des centres de traitements en périphérie lorsque la zone s'étend sur 100km) et il est davantage probable que cette innovation se développe par pôle de taille plus réduits. Nous choisirons donc un territoire où 100 000 habitants vivent et travaillent et nous voyons à long terme, avec les facteurs de réduction des prix qui en découlent. Cette modélisation est résumée en TABLE III.10.

Synthèse du projet	
Caractéristiques principales	
Nombre d'habitants « Résidentiel »	100 000
Nombre d'habitants « Tertiaire »	100 000
Projection	Long terme

TABLE III.10 – Modélisation d'une collecte à grande échelle - Caractéristiques principales

III.C.2.c.ii Production

Les résultats concernant la production des urines sont résumés en TABLE III.11. Nous voyons tout d'abord qu'avec un volume journalier de $95 m^3$, la collecte sélective des urines a peu de chances d'affecter le métier des transporteurs d'eaux usées comme le SIAVB, qui brasse environ $25000 m^3$ par jour. La collecte sélective des urines, même à grande échelle, a peu de chances d'aggraver le problème de sur-dimensionnement des réseaux tant le volume retiré est faible au vu des volumes transportés. Nous notons une nouvelle fois que pour un territoire accueillant logements et entreprises, les premiers sont les plus gros producteurs.

Production	
Production journalière (m^3)	95
Production hebdomadaire (m^3)	662
Production mensuelle (m^3)	2892
Production annuelle (m^3)	34 542
Volume issu du « Résidentiel » (%)	69
Volume issu du « Tertiaire » (%)	31

TABLE III.11 – Modélisation d'une collecte à grande échelle - Production

III.C.2.c.iii Bâtiment

Les résultats concernant la collecte des urines dans le bâtiment sont résumés en TABLE III.12. 500 immeubles sont équipés d'un système de collecte sélective des urines, 100 bâtiments de 1000 personnes dans le tertiaire et 400 de 250 personnes dans le résidentiel. Malgré un coût des toilettes divisé par 10, ce poste de dépenses représente 90% de l'investissement total dans le bâtiment. L'investissement par tête dans le résidentiel reste 7 fois plus important que dans le secteur tertiaire avec un surcoût de 215€ contre 30€. Niveau production/prix, il faut donc mettre en balance une production 2 fois moins importante dans le tertiaire pour un investissement 7 fois moins cher. Si nous n'étions

pas bloqués par un marché conditionné au bâti neuf et une contrainte de désaturation des STEPs à horizon donné, il est évident que le tertiaire aurait été la cible à privilégier économiquement.

Dans l'objectif de désaturation des STEPs, Amandine Caby a évalué qu'il était nécessaire de retirer 11 tonnes d'azote par jour du réseau [Caby, 2013]. Elle avait alors déduit qu'il fallait enlever à plein temps les urines d'1 000 000 de personnes du réseau. Sa modélisation ne prenait pas en compte des facteurs de pertes et une différence entre secteurs. Cela correspond, dans notre modélisation, à 5 900 000 personnes dans le secteur tertiaire, 2 400 000 personnes dans le secteur résidentiel ou encore 1 700 000. Il est évident qu'il n'est pas possible de réaliser l'objectif de désaturation des STEPs en ne s'attaquant qu'au secteur tertiaire quand bien même notre analyse économique tendrait à le préconiser.

Collecte	
Immeubles	
Nombre d'immeubles équipés	500
Nombre de toilettes installées	550 000
Nombre de mètres de tuyaux tirés (m)	150 000
Cuves	
Volume d'une cuve (m^3)	10
Nombre de cuves installées	200
Intervalle de collecte « Résidentiel »	13
Intervalle de collecte « Tertiaire »	30
Coûts	
Total coûts Toilettes (k€)	22 000
Total coûts Tuyaux (k€)	1500
Total coûts Cuves (k€)	1067
Investissement initial dans le bâtiment (k€)	24 567
Investissement moyen par bâtiment « Résidentiel » (k€)	39
Investissement moyen par bâtiment « Tertiaire » (k€)	54
Coût moyen par tête « Résidentiel » (€)	39
Coût moyen par tête « Tertiaire » (€)	215

TABLE III.12 – Modélisation d'une collecte à grande échelle - Filière du bâtiment

III.C.2.c.iv Transport

Les résultats concernant le transport des urines sont résumés en TABLE III.13. Nous remarquons qu'à grande échelle, le prix du transport proposé par Veolia n'est plus compétitif : l'investissement dans une flotte de camions est presque rentabilisée dès la première année de fonctionnement. Si la collecte sélective des urines monte en puissance, l'entité responsable de la collecte et du transport des urines aura tout intérêt à prendre en charge elle-même la collecte ou bien négocier fortement les prix d'un transport délégué. Il est aussi intéressant de noter que le coût volumique du transport a augmenté de 60% par rapport au prototype, cela est dû à la modélisation d'un territoire avec des centres de traitement en périphérie : les camions devront se déplacer sur un territoire plus grand et le trajet moyen est plus long, diminuant le rendement journalier de la collecte.

Transport	
Logistique	
Nombre de cuves à vider chaque jour	10,5
Flotte de camion nécessaire	5
Humains	
Nombre de conducteurs	8
Nombre de garagistes	2
Nombre de chefs de groupe	1
Coûts	
Investissement initial dans les camions	1083
Total coûts annuels Garage (k€)	24
Total coûts annuels Humains (k€)	300
Coûts annuels d'un service assuré par Veolia (k€)	1302
Coût volumique du transport (€/m ³)	37,7

TABLE III.13 – Modélisation d'une collecte à grande échelle - Filière du transport

III.C.2.c.v Traitement

Les résultats concernant le traitement des urines sont résumés en TABLE III.14. À grande échelle et à long terme, l'investissement dans un procédé VUNA, dont le prix a fortement chuté, est devenu 2,6 fois moins élevé que celui dans un stockage hygiénisant pour une plus-value au niveau du produit plus importante. Les coûts de fonctionnement restent eux comparables.

Traitement	
1ère solution : Stockage sanitaire	
Logistique	
Volume d'une cuve de stockage (m^3)	200
Nombre de cuves de stockage nécessaire	174
Coûts	
Investissement initial dans le stockage	19 140
2ème solution : Nitrification/Distillation	
Logistique	
Nombre de nitrificateurs nécessaires	20
Volume de traitement journalier des nitrificateurs (m^3/j)	4,7
Nombre de distillateurs nécessaires	158
Volume de traitement journalier des distillateurs (m^3/j)	0,6
Consommation énergétique annuelle (MWh)	4490
Humains	
Nombre d'employés surveillance/maintenance	19
Coûts	
Investissement initial en machines de traitement (k€)	7 266
Total coûts annuels Énergie (k€)	659
Total coûts annuels Humains (k€)	563

TABLE III.14 – Modélisation d'une collecte à grande échelle - Filière du traitement

III.C.2.c.vi Valorisation

Les résultats concernant la valorisation des urines en agriculture sont résumés en TABLE III.15. 100 000 personnes affectées à la production d'urines au travail et chez eux permettent de nourrir en azote 2403 hectares de cultures soit un peu plus de la totalité des cultures du plateau de Saclay ! Le prix volumique du transport augmentant avec la taille du territoire, la vente de ces engrais est encore moins susceptible d'absorber les coûts de transport avec un prix de la tonne d'azote à 5419€.

Valorisation	
Minéraux	
Minéraux issus du « Résidentiel » (%)	71
Minéraux issus du « Tertiaire » (%)	29
Azote annuel produit (t)	240
Phosphore annuel produit (t)	22
Potassium annuel produit (t)	56
Agriculture	
Nombre d'hectares nourris en azote (ha)	2403
Énergie évitée de production d'engrais (MWh)	2872
Économie	
Prix potentiel de l'engrais azoté (€/t)	125
Chiffre d'affaires de la vente d'engrais (k€)	30,3
Prix de l'engrais azoté pour couvrir les frais de transport (€/tN)	5419
Réduction de volume nécessaire pour couvrir les frais de transport au prix actuel (%)	97

TABLE III.15 – Modélisation d'une collecte à grande échelle - Valorisation

III.C.2.c.vii Comparaison à la filière d'assainissement actuel

Si l'on considère que le transport des urines est réalisé par Veolia (afin de prendre en compte des éléments non-modélisés comme le carburant) et que le traitement est une nitrification/distillation surveillée par des employés, nous arrivons à un coût d'environ 10k€/tN, qui correspond à la moitié du coût déterminé pour les stations d'épuration. La collecte sélective des urines, si elle demande des investissements importants, est un procédé qui permet de traiter l'azote à des coûts inférieurs! Dans la mesure où le coût énergétique du traitement en STEP et dans nos centres de traitement est comparable, l'engrais ainsi produit se fait à un coût énergétique nul. Le bilan carbone de production de cet engrais reste une inconnue importante et sera à creuser dans les études suivantes.

Comparaison à la filière d'assainissement actuel	
Coût de traitement de la tonne d'azote en STEP (k€/tN)	20
Coût de traitement de la tonne d'azote en collecte sélective d'urine (k€/tN)	10
Coût annuel « évité » du traitement d'azote (k€)	4806
Énergie annuelle « évitée » du traitement d'azote (MWh)	4325

TABLE III.16 – Modélisation d'une collecte à grande échelle - Comparaison à la filière d'assainissement actuel

III.C.2.d Conclusions

Finalement, cette étude technico-économique nous permet de conclure que :

- si la production d'urines et d'engrais dans le secteur résidentiel est environ 2,4 fois plus importante que dans le secteur du tertiaire, le coût d'installation des équipements de collecte séparée des urines est lui 7 à 8 fois plus important pour le secteur résidentiel. Le tertiaire apparaît donc comme la cible prioritaire de la collecte des urines, toutefois elle demanderait d'enlever 5 900 000 personnes du réseau d'assainissement classique au travail afin de répondre à l'objectif de désaturation des STEPs. Au delà du critère économique, il est important de regarder les marchés potentiels du bâti neuf autour de Paris afin de déterminer la meilleure péréquation entre installation résidentielle et tertiaire ;
- des subventions de l'ADEME, de la région Ile-de-France et de l'AESN sont potentiellement accessibles pour des financements d'infrastructures. Les postes de dépenses les plus importants sont les toilettes dans le bâtiment et les installations de traitement. Un financement de ces dépenses permettrait au projet d'émerger plus rapidement ;
- au niveau des traitements considérés, le stockage hygiénisant demande un investissement plus important que des installations de nitrification/distillation pour des coûts de fonctionnement similaire ;
- les recettes de la vente d'engrais sont minimales par rapport aux coûts du transport, qui ne pourraient être rentabilisés que si les engrais étaient vendus à 20 fois le prix du marché, ce qui paraît impensable dans la mesure où les prix sont un facteur déterminant pour l'agriculteur. Répartir ces recettes au sein des usagers sous forme de chèques verts est aussi peu probable dans la mesure où cette somme s'élèverait à quelques dizaines de centimes par personne et par an. Rester dans le paradigme de l'engrais déchet à « zéro euro rendu racine » est donc l'hypothèse la plus probable. Cependant, si les urines venaient à être concentrées en pied d'immeuble, les frais de transport pourraient être en grande partie absorbés par les recettes d'engrais ;
- la collecte sélective des urines n'est pas un système d'assainissement qui ne fait que coûter. Le coût du traitement de l'azote par ce moyen est deux fois plus faible qu'en STEP pour des consommations d'énergie égales dans le cas d'un traitement de nitrification/distillation. Les engrais azotés ainsi obtenus sont donc créés à coût énergétique « nul » ce qui est une avancée forte par rapport au procédé d'Haber-Bosch.

Cette étude n'a toutefois pas inclus le calcul d'externalités environnementales négatives du système d'assainissement actuel (coût du changement climatique, de l'eutrophisation des cours d'eau, etc.) par rapport aux gains potentiels de la collecte sélective des urines. Ces axes de progression seront à envisager fortement dans les prochaines études.

III.C.3 Comparaison des scénarios grâce à l'analyse socio-économique

À l'issue de la PARTIE III.B, nous avons retenu les scénarios suivants, que nous classons en fonction de leur traitement ou non par l'analyse économique :

- non traitées par l'analyse économique : filière compost de déchets verts, filière précipitation des urines en struvite, hygiénisation des urines brutes avec stockage chez l'agriculteur. Nos conclusions sont donc les mêmes qu'à la PARTIE III.B ;
- traitées par l'analyse économique : hygiénisation des urines brutes par stockage dans une structure mutualisée, traitement de nitrification/distillation pour concentrer les urines avec deux alternatives (unité à l'échelle de l'îlot ou du territoire).

L'étude économique a montré que le scénario de l'hygiénisation des urines brutes par stockage, qui nous paraissait le plus simple et le moins coûteux, est finalement plus cher que le scénario de traitement par nitrification/distillation : en effet, ce dernier, bien qu'énergivore, a un coût de fonctionnement (énergie essentiellement) plus faible que le coût de transport des urines brutes du lieu de stockage vers l'exploitation agricole. Le scénario d'hygiénisation des urines brutes perd alors son premier atout : son coût *a priori* le plus faible parmi les traitements. Son autre atout, sa simplicité, est mise en concurrence avec le compostage. Dans les deux cas, le danger est la perte d'azote par volatilisation, minimisée dans le cas du compostage puisque celui-ci est réalisé par des professionnels. En l'absence de facteur différenciant et compte tenu des inconvénients présentés en PARTIE III.B, la solution d'urines brutes ne semble pas une option crédible.

Concernant le traitement par nitrification/distillation placé à l'échelle de l'îlot, nous avons montré que ce scénario risquait de susciter des réticences chez les acteurs du bâtiment et de transport. Dans l'analyse économique, sur le scénario du traitement nitrification/distillation à l'échelle du territoire, un calcul intéressant a été mené : celui de la réduction du volume des urines transportées (de la cuve-tampon vers l'unité de traitement) pour que la vente d'engrais équilibre les coûts de transport. Le calcul a conclu que le volume des urines en cuve devait être réduit de 95% : ce qui conforte l'intérêt économique à concentrer les urines sur place, au plus près de la production. Dès lors, il nous paraît important de ne pas laisser de côté ce scénario.

Chapitre IV

Conditions nécessaires à l'émergence d'une collecte sélective des urines

L'objectif d'un Groupe d'Analyse d'Action Publique est d'opérer une réflexion critique sur des opérations d'action publique. En ce sens, il nous paraît important de nous placer dans le cadre de l'aide à la décision afin de proposer des solutions aux problèmes présentés en PARTIE III. Nous avons vu au cours de notre analyse socioéconomique qu'autant en amont, du côté des usagers, qu'en aval du côté des agriculteurs et des consommateurs, il émerge une vraie question autour de l'acceptabilité de la collecte sélective des urines. Nous nous appuyerons sur notre analyse et sur des projets connexes, comme le tri sélectif des déchets, afin de proposer une construction collective de l'acceptabilité en (PARTIE IV.A). Nous aborderons ensuite la question de la réglementation en lien avec l'assainissement et ses évolutions nécessaires à la création d'un terreau favorable à l'émergence de cette innovation PARTIE IV.B. Nous finirons par exposer notre avis sur les filières les plus à même d'émerger tout d'abord sur un prototype mais aussi à plus grande échelle et par articuler cette émergence autour de la méthode KCP PARTIE IV.C. L'ensemble de nos préconisations seront rassemblées sur 3 pages à l'attention des décideurs publiques PARTIE IV.D.

IV.A Construire l'acceptabilité pour faire émerger le projet

L'analyse présentée précédemment a montré le rôle prépondérant que joue l'acceptabilité des acteurs (usagers, agriculteurs, consommateurs, riverains) dans l'émergence d'un système de collecte sélective des urines. Il importe donc de s'attacher à construire cette acceptabilité. Nous proposons, après avoir présenté des éléments de construction de l'acceptabilité, de détailler les moyens qui pourraient être mis en œuvre pour aller dans le sens d'une plus grande acceptabilité des producteurs d'urine (les usagers), des agriculteurs, des consommateurs et des riverains.

IV.A.1 Les éléments de construction de l'acceptabilité

Les différentes recherches sur l'acceptabilité, notamment s'agissant du développement de technologie, s'accordent sur le fait que l'acceptation fait appel à de multiples facteurs. Le concept d'acceptabilité est relativement difficile à manipuler compte tenu de son caractère multiscalair, avec une différenciation de l'acceptation en fonction des échelles territoriales, et évolutif dans le temps. Toutefois, la notion d'acceptabilité interroge la question de la légitimité sociale et de la crédibilité du projet ainsi que de la confiance. En ce sens, l'acceptabilité sociale relève d'un construit social qu'il convient d'appréhender afin d'identifier les leviers à utiliser pour le développement efficace de la collecte sélective de l'urine.

Comme l'a rappelé Amandine Caby [Caby, 2013], *la construction de l'acceptabilité suit un processus en trois phases, tout d'abord l'acceptabilité a priori, puis l'acceptation et enfin l'appropriation* [Terrade et al., 2009]. Ainsi, dans le cas de la collecte sélective de l'urine, compte tenu de l'innovation que cela représente, l'usage de cette technologie peut être étudié au travers son acceptabilité *a priori*. Celle-ci porte sur la représentation subjective que l'on se fait de l'usage de la technologie. Cette représentation est construite sur les dimensions d'utilité perçue, d'utilisabilité perçue, et d'acceptabilité sociale. Les normes sociales, la perception que l'on a de la réaction de la société vont jouer un rôle décisif selon le modèle théorique du comportement planifié développée par Ajzen [Ajzen, 1991]. Ainsi, *il apparaît pertinent de travailler sur ces trois dimensions (utilité, utilisabilité, acceptabilité sociale) afin de permettre le développement de la collecte sélective de l'urine.*

L'acceptabilité sociale est influencée par un ensemble de variables sociales, et notamment, les normes subjectives, l'identité sociale, l'image et les normes morales [Pasquier, 2012]. En ce sens l'acceptabilité d'une technologie, d'un projet est contingente de l'environnement social. C'est ce que confirme Ajzen quand il précise que « *l'environnement social exerce une forte influence sur le comportement des gens* » [Fishbein and Ajzen, 2010].

Les facteurs qui influencent les comportements des personnes et expliquent l'usage d'une technologie peuvent être résumés de la manière suivante :

- *les normes subjectives* : elles sont définies comme l'idée subjective que l'on se fait de ce que conseilleraient de faire les personnes importantes pour elle [Pasquier, 2012] ;
- *l'identité sociale* : en référence à la théorie de l'identité sociale de Tajfel, l'appartenance à un groupe social tend à motiver la personne à s'aligner sur le comportement du groupe. L'identité sociale est donc fondée sur l'image que l'on a de la norme du groupe et le niveau d'identification que l'on a avec le groupe ;
- *l'image* : elle correspond à la perception que l'on a de l'effet que peut avoir un

comportement sur le statut de la personne ;

- *les normes morales* : elles sont définies comme l'idée subjective que l'on se fait de la moralité des comportements et font référence à la pression sociale exercée. Selon les études, les normes morales sont d'autant plus déterminantes que le comportement souhaité a trait à la moralité [Pasquier, 2012].

Selon, Pasquier, l'efficacité des variables est fonction du type de comportement souhaité. *Ainsi, les comportements pro-sociaux, valorisés socialement, sont plutôt influencés par l'identité sociale, comme par exemple pour le tri des déchets domestiques. En outre, les normes sociales sont importantes pour les comportements à forte moralité* [Pasquier, 2012].

Pour la collecte sélective de l'urine, ces facteurs apparaissent comme des leviers intéressants à rechercher pour en améliorer l'acceptabilité sociale. À cet effet, la communication, la pédagogie, la mise en avant du bénéfice social de ce système d'assainissement et l'engagement des institutions doivent permettre d'aller dans le sens d'une plus grande acceptabilité. Sur la base de l'expérience du tri sélectif des déchets, la partie suivante présente des pistes de leviers pouvant être avancées.

S'agissant de l'utilité de ce système, le partage de connaissance et la communication doivent permettre de faire partager l'intérêt de ce système. Il doit être perçu comme répondant à une problématique globale. L'utilisabilité, pour sa part, nécessite un travail important pour améliorer le système et réduire les contraintes qu'il fait porter sur les utilisateurs (cf. PARTIES I.B.1 et III.A.1).

IV.A.2 L'acceptabilité de l'utilisateur

Les entretiens menés avec les différents acteurs ont montré le rôle central de l'utilisateur, producteur initial d'urine, dans le système global, mais également la réticence initiale qui pourrait exister. Son engagement est primordial pour pouvoir espérer mettre en place un système d'assainissement alternatif étant donné qu'aujourd'hui ce système n'est pas neutre pour lui avec un certain nombre de contraintes. À partir des éléments théoriques de construction de l'acceptabilité et de l'analyse de la mise en place du tri sélectif des déchets, des leviers peuvent être identifiés pour « construire » l'utilisateur. Néanmoins, certaines limites dans ce processus peuvent apparaître, notamment dans la perspective d'une généralisation à l'échelle de la région.

IV.A.2.a Le cas de la fabrication de l'utilisateur dans le système de tri des déchets

Il est apparu intéressant de faire une analyse du système qui a été développé pour la mise en place du tri sélectif des déchets dans les années 1990, qui représente aujourd'hui une relative réussite. Cette analyse, basée sur le travail de Barbier [Barbier, 2002],

doit permettre d'identifier des leviers qui pourraient être développés pour la collecte de l'urine. En effet, la nécessaire évolution du comportement des usagers pour l'urine peut, à certains égards, être comparée à celle qui a été réalisée pour le système de tri des déchets.

Pour la mise en place du tri sélectif des déchets dans les ménages français, les pouvoirs publics se sont attachés à fabriquer un usager en créant un nouveau réseau-socio-technique centré sur l'utilisateur producteur-trieur. Cette analyse montre tout d'abord l'importance, dans le système de construction de l'utilisateur, de l'influence des éléments culturalistes, de la structure industrielle et des liens qui existent avec les pouvoirs publics et plus généralement les construits collectifs dans le domaine. Dans les années 1990, la France était marquée par une croyance partagée que les questions environnementales pouvaient être maîtrisées par des évolutions techniques. Cette caractéristique, complétée par une absence, à l'époque, de doctrine dans le domaine des déchets, a conduit à faire émerger une solution basée sur une logique de coercition mutuelle par une participation raisonnable de l'utilisateur. Un des fondements de cette solution mise en place en France pour le tri réside dans le fait que l'industriel n'est pas le seul responsable, et qu'il existe une responsabilité partagée de l'ensemble des acteurs. C'est ici le consommateur-citoyen qui est mis en avant. Ce principe a conduit effectivement à l'émergence d'une politique de tri des déchets, mais il a également fait passer au second plan la question de la réduction à la source des déchets.

L'invention de ce nouvel usager responsable a nécessité une évolution des comportements pour les rendre compatibles avec le système de tri et ses contraintes. Cette évolution s'est appuyée sur trois dimensions :

- *la mise en mot du gisement de déchet* : il a été nécessaire de donner aux producteur-trieurs les éléments permettant de se repérer dans les consignes de tri et de partager un vocabulaire pour maintenir une qualité suffisante de collecte sans erreurs ;
- *une nécessaire mise en conformité des pratiques* : des ajustements dans les pratiques et dans les comportements ainsi que dans les lieux (adapter l'intérieur des maisons, les extérieurs) pour permettre les opérations de tri ou les faciliter ;
- *une mise en valeur du geste de tri et une offre de sens* : le tri a été inscrit dans la sphère de la moralité [Barbier, 2002] et plus rarement dans l'intérêt notamment financier. Ainsi, comme le relève l'auteur, les motivations déclarées par les utilisateurs lors d'enquêtes étaient le « civisme, l'insertion dans un tissu social, l'écologie de proximité, la lutte contre les excès de la société de consommation, un impact positif en faveur de l'emploi, la simplicité des modalités de tri ». Ces éléments confirment l'influence des variables sociales précisés dans la partie précédente et notamment de l'identité sociale, des normes morales.

L'étude a montré que les attitudes et motivations déterminent, pour partie, les com-

portements. Ces attitudes favorables au tri ont été renforcées par des messages répétés en combinant des contacts directs et des traces écrites pédagogiques. En outre, pour renforcer le dispositif, les bons résultats de la collecte sélective ont été diffusés. Le système s'est aussi appuyé sur des relais et des ambassadeurs locaux pour démultiplier et désofficialiser les canaux d'information. À terme, ces médiations doivent se retirer pour laisser la place à la phase d'accoutumance où le soutien n'est plus nécessaire au delà de repères routiniers. Il faut relever qu'aujourd'hui cette phase ne semble pas atteinte.

Un élément complémentaire peut être tiré de l'analyse faite sur la valorisation des MAFOR [Aubry et al., 2014] concernant l'importance de la confiance du gestionnaire d'un système innovant. Les auteurs relèvent que l'établissement d'une confiance, non pas fondée sur de bons résultats antérieurs, mais sur la perception d'une proximité de valeur entre les acteurs est source de réussite et d'acceptation d'une innovation par l'ensemble des acteurs.

IV.A.2.b La communication et la responsabilisation comme vecteur permettant de construire le producteur-usager de la collecte de l'urine

S'agissant du producteur de l'urine, l'analyse présentée précédemment pour le tri des déchets permet d'esquisser plusieurs leviers qui pourraient être activés afin d'accompagner l'utilisateur dans ce nouveau système d'assainissement.

Tout d'abord, comme pour les déchets, *dans un objectif de créer du sens, il est important que l'utilisateur ait conscience du processus de traitement et de valorisation de l'urine, et ainsi qu'il comprenne l'intérêt d'une collecte à haut rendement, sans pertes importantes*. Cela passe donc par le partage de connaissance avec l'utilisateur et une communication active qui donne les principaux enjeux du système. Néanmoins cette communication persuasive n'est pas suffisante comme cela est souligné dans le rapport sur la valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire [Aubry et al., 2014].

Ensuite, *l'acceptabilité doit se construire en axant le travail autour des variables sociales qui sont déterminantes pour obtenir le comportement d'usage souhaité qui est considéré comme pro-social*. À l'instar de ce qui a été fait pour le tri des déchets, il paraît important que les valeurs morales soient mises en avant. *Les porteurs du projet au niveau d'un territoire doivent s'attacher à construire des normes morales qui sont favorables à la collecte sélective de l'urine. Ainsi, une communication partagée entre les institutions, les agriculteurs, des associations, permettrait d'aller dans le sens de la construction de la norme*. Dans le message, la valorisation locale des produits issus de la récupération de l'urine en agriculture, en tant qu'économie circulaire, doit être mise en avant. *Ceci conduit à conseiller de mettre en valeur dans la communication l'apport positif de la récupération*

de l'urine d'un point de vue environnemental, l'intérêt global et locale de cette solution, afin de motiver le sentiment moral d'agir pour l'environnement et le territoire.

De plus, conformément à ce qui a été réalisé pour les déchets, *la communication doit être continue et multicanaux et s'appuyer sur des relais locaux qui bénéficie d'un bon niveau de confiance. Ils devront porter la communication sur ce système et avoir un fort pouvoir de conviction.* La question de la légitimité de ces médias devra être au centre des préoccupations. *Compte tenu de l'importance de mettre la collecte sélective des urines dans une perspective morale d'économie circulaire, il apparaît opportun que les relais soient identifiés à la rencontre des mondes agricoles et urbains. À cet effet, l'association Terre & Cité pourrait être un vecteur favorable.* En outre, les moyens de communication de l'Agence des espaces verts identifiés lors des entretiens (entretien AEV) sont susceptibles d'organiser une partie du travail de pédagogie sur le territoire. Au moment de la phase opérationnelle du projet pilote, la communication devra également intégrer une part importante sur la mise en avant des résultats positifs de la collecte sélective de l'urine.

Pour améliorer l'acceptabilité, la collecte de l'urine pourrait s'inscrire dans la sphère de l'intérêt, en jouant sur des mécanismes économiques ou d'avantage en nature. L'AESN a avancé l'idée de mise en place d'une prime d'épuration pour ces usagers comme présenté dans l'analyse technico-économique (cf. PARTIE III.C). Une telle prime pourrait augmenter l'attractivité des logements équipés mais sans certitude sur l'acceptabilité et l'usage adapté des toilettes. La solution du chèque à l'utilisateur avancé par d'autres acteurs n'apparaît pas adaptée compte tenu des montants dérisoires résultants des résultats de l'étude technico-économique. En revanche, d'autres acteurs ont proposé que les habitants puissent recevoir, par exemple, des paniers de fruits et légumes provenant de l'agriculteur qui utiliserait l'urine comme fertilisant. Cette solution donne tout son sens à l'usage des toilettes et l'inscrit dans un circuit d'économie circulaire. C'est donc le caractère pro-social de la collecte et le lien avec l'agriculture qui sont mis en avant, permettant alors d'améliorer l'acceptabilité. *La solution de fourniture aux utilisateurs des paniers de produits agricoles devrait donc être regardée avec attention pour la mise en œuvre du projet.*

Enfin, le système mis en œuvre doit être totalement fonctionnel sans problème d'utilisation pour les usagers sous peine de refus des utilisateurs et de ne pas obtenir une mise en conformité des pratiques des utilisateurs.

IV.A.2.c Un travail industriel nécessaire sur le design des toilettes

Les désagréments liés à l'utilisation des toilettes mentionnés précédemment (cf. PARTIE III.A.1) ont été identifiés comme extrêmement limitant pour l'acceptabilité du système. Cela confirme l'importance du facteur « utilisabilité » présenté précédemment (cf. PARTIE IV.A.1).

Ainsi, le design des toilettes est clairement identifié aujourd'hui comme un frein au développement du système, au-delà des questions de coût unitaire. Sans cette évolution du design, et partant, de l'utilisabilité du système, il apparaît difficile d'envisager une généralisation de l'installation de ce type de toilettes dans les nouvelles habitations au-delà de projets pilotes.

Dans ces conditions, *il est important qu'un travail soit lancé avec les industriels pour repenser le design des toilettes afin d'en faciliter l'utilisation, la maintenance et en réduire le coût.* Cette évolution nécessite un développement industriel qui, pour être initié, doit identifier un marché potentiel. Cette recherche pourrait être construite au démarrage par le secteur public sur la base du projet pilote pour ensuite être co-construite avec le secteur privé et profiter de l'environnement académique du Plateau de Saclay. Les analyses sur le projet pilote, et plus particulièrement l'analyse sociologique qui pourrait être conduite, constituent une opportunité intéressante pour faire émerger une recherche dans le domaine. Plus avant, l'implication de grands acteurs industriels du secteur de l'assainissement, du bâtiments et d'acteurs publics doit permettre de donner une impulsion dans ce processus. Cet engagement doit permettre de donner une garantie aux industriels afin de leur permettre de porter le risque lié à la recherche et développement dans ce domaine. En outre, *un financement pourrait être recherché auprès de l'AESN, voire de l'ADEME, afin de conduire les recherches nécessaires à ce développement.*

IV.A.2.d Le projet pilote permet de dépasser certains freins avec cependant des limites dans la généralisation

Les études de sociologie du travail menées par Fritz Roethlisberger et William Dickson [Roethlisberger and Dickson, 1939] dans l'usine Western Electric de Cicero ont montré que la conscience qu'ont les personnes de participer à une expérimentation a une conséquence importante pour ce qui a trait à leur motivation. Cet effet, désigné comme l'effet Hawthorne, a tendance à augmenter la motivation des participants.

Dès lors, dans le cas du projet pilote, la communication qui pourrait être réalisée à destination des habitants afin de renforcer la conscience de participer à une expérimentation serait de nature à améliorer leur motivation. *L'effet Hawthorne permet alors d'espérer optimiser la performance de la collecte et faciliter l'évolution des comportements attachés à l'utilisation de toilettes spécifiques.* Il doit donc être considéré comme un levier permettant de faciliter la mise en place du projet pilote et, partant, doit être utilisé pour conduire le changement nécessaire. Cela passe par une communication constante avec les participants en insistant sur leur rôle dans la réussite du projet et en valorisant l'utilité sociale. De cette manière il est envisageable que l'effet Hawthorne s'exprime pleinement

dans le cas du projet pilote.

Il faut toutefois nuancer les conséquences de cet effet, qui ne peut pas fonctionner pour une généralisation du système. Dans ces conditions, le travail sur l'acceptabilité et la motivation de l'utilisateur des toilettes reste nécessaire. À cet effet, le projet pilote peut servir d'outil de communication et de persuasion par l'exemple pour faire évoluer l'acceptabilité *a priori* de l'opinion publique en construisant autour de ce projet une nouvelle norme sociale qui valorise cet usage. En effet, comme cela a été précisé précédemment, l'évolution d'usage passe par une évolution des normes sociales qui, pour être diffusée, doit s'appuyer sur l'expérience et la valorisation du groupe pilote.

Un autre élément semble être favorable au projet pilote. En retenant un projet dans un complexe étudiants, les utilisateurs devraient être homogènes en âge. Or, il a été prouvé que l'âge est une variable qui a une influence importante sur l'adaptation et l'utilisation d'objets innovants [Pasquier, 2012]. Ces éléments sont également confirmés par les entretiens qui ont eu lieu avec les différents acteurs du bâtiment et du traitement. Dès lors, ce choix semble être favorable à la réussite du projet pilote. En outre, les logements étudiants font l'objet d'un choix sous contrainte par les occupants, ce qui permet de réduire le risque pour le promoteur. Toutefois, ces éléments devront aussi être intégrés dans la réflexion sur la généralisation du système qui, elle, devrait toucher une part plus large et plus diverse de la population.

IV.A.3 L'acceptabilité des agriculteurs

L'acceptabilité des agriculteurs se construira dans un premier temps autour de deux questions déterminantes : la sécurité sanitaire, puis l'intérêt de l'insertion d'une substance issue des urines dans les pratiques. Il sera nécessaire de mettre en place les outils permettant de traiter ces deux questions, avant d'envisager les facteurs d'incitation pour une adoption plus généralisée.

IV.A.3.a Mise en place d'une phase d'expérimentation, puis d'un observatoire assorti d'une gouvernance multipartite

Une phase préalable d'expérimentations, suivie de la mise en place d'un observatoire de l'impact des urines sur le milieu cultivé, devrait permettre de lever les craintes du monde agricole tout en révélant les potentialités des substances issues des urines.

En effet, nos entretiens ont révélé que la problématique des relations tendues et du manque de confiance entre les acteurs des mondes urbains et ruraux était cruciale avant la mise en place de tout projet. Chez les agriculteurs du plateau, la question sanitaire est

prédominante en raison du souvenir du scandale d'Achères, et les relations avec l'EPDS sont difficiles, en lien avec les diverses problématiques de l'aménagement (installation des lisières par exemple).

Afin de régler cette question sanitaire, nos différents interlocuteurs agricoles ont proposé *la mise en place d'une série d'expérimentations, légitimées par des acteurs institutionnels de recherche dans lesquels ils ont confiance, notamment l'INRA*. Des tests évaluant l'impact de substances issues des urines sur la qualité des sols pourrait prendre place dans la campagne d'essai réalisée dans le cadre du programme de recherche « Pour et sur le développement régional » (PSDR) en 2016 et 2017. Selon nos interlocuteurs, des agriculteurs doivent absolument participer au projet, tout comme la chambre d'agriculture, afin d'apporter une légitimité précieuse par la suite pour la diffusion de l'innovation qui pourrait résulter en cas de résultats positifs. Ces expérimentations prendraient la forme d'essais contrôlés, avant des essais au champ.

Pour faire suite à cette première phase d'essais et si les résultats sont rassurants, *un observatoire pourrait être monté afin d'enrichir les connaissances sur les impacts des urines*. Cet observatoire devrait être assorti d'une gouvernance incluant toutes les parties prenantes, y compris les riverains, les élus et les associations environnementales, afin de tenir compte de leurs revendications concernant la filière et permettre la construction de l'acceptabilité.

Afin d'apporter au consommateur la garantie d'une qualité des produits agricoles finalement consommés, cette phase de recherche doit aussi permettre de mettre en place un système de traçabilité des produits valorisés. Celui-ci pourrait s'inspirer du système en vigueur dans le cadre de l'utilisation des boues issues de stations d'épuration.

Il est enfin apparu que le processus de décision des agriculteurs dans le choix des substances fertilisantes est complexe, et que les besoins exprimés sont difficilement conciliables avec les caractéristiques des substances issues de la filière amont et des traitements disponibles. *Un accompagnement par la recherche d'une démarche de conception collective entre les différents acteurs de la chaîne technique de la filière de séparation à la source des urines pourrait permettre de définir conjointement et concrètement la forme que devrait prendre le produit valorisé issu des urines*. La gamme de produits valorisés définie pourrait alors être testée durant la phase d'essais expérimentaux puis dans le cadre de l'observatoire. Cela permettrait d'évaluer leurs qualités concernant les critères de choix (agronomiques, économiques, facilité d'insertion dans les pratiques existantes) des agriculteurs.

IV.A.3.b Quels facteurs pour une acceptabilité à une plus large échelle ?

Au-delà d'une première phase expérimentale se déroulant à une échelle micro-locale, d'autres facteurs vont venir influencer l'acceptabilité du monde agricole envers la filière urine. Il s'agit notamment des facteurs réglementaires et économiques.

En effet, les agriculteurs ne pourront prendre de manière massive une décision favorable à la filière urine tant que le contexte réglementaire n'aura pas été éclairci. Or il demeure un flou sur plusieurs questions qui influencent la perception des urines par les agriculteurs ainsi que sur les possibilités de valorisation :

- les conditions d'épandage (fenêtre temporelle) qui peuvent avoir un rôle sur les durées de stockage et donc de volumes stockés, l'urine étant produite en continu ;
- la nature déchet/produit des substances tirées des urines, qui induit une vision binaire chez les agriculteurs : les déchets sont gratuits et gérés par leurs producteurs, alors que les produits ont un coût et la confiance est plus forte ;
- l'absence dans le cahier des charges européen en bio qui empêche son utilisation pour ce type de production ;

Il sera nécessaire pour les porteurs de projet de faire clarifier ces réglementations, ou d'engager leur évolution, durant la phase d'expérimentations. Il pourrait s'agir par exemple d'*engager le processus permettant de faire reconnaître l'utilisation des urines dans le co-compost ou en agriculture biologique.*

La perception de la nature déchet/produit est aussi importante car elle conditionne le consentement à payer des agriculteurs, qui sont habitués au mécanisme du « 0 euro rendu racine » lorsque des boues de stations d'épuration sont épandues sur leurs sols. Faire reconnaître les urines comme un produit pourrait permettre d'y associer un prix et donc de rentabiliser en partie la filière. Cependant l'analyse économique montre le peu d'impact, vu les prix des substances fertilisantes analogues, de la mise en marché de substances issues des urines. *Adopter le « 0 euro rendu racine » pour les urines et leurs dérivés serait donc un bon moyen d'améliorer l'acceptabilité des agriculteurs à plus large échelle.*

IV.A.4 L'acceptabilité des consommateurs/riverains

Les études menées à l'étranger montrent que les craintes principales des consommateurs par rapport à la fertilisation issue de la collecte sélective des urines portent sur la question du risque sanitaire pour l'homme et l'environnement, à l'instar de ce qui a été présenté pour les agriculteurs [Larsen et al., 2013]. Ces craintes ont été soulevées dans

la grande majorité des entretiens que nous avons conduits. En outre, compte tenu du contexte associatif du plateau de Saclay, avec une volonté de développement d'une agriculture biologique et de protéger un cadre de vie de qualité, le risque d'une opposition des différents acteurs sur ces thèmes n'est pas à exclure. *La mise en place d'une phase pilote d'expérimentation avec un observatoire et un suivi scientifique comme proposé précédemment doit permettre de co-construire la confiance réciproque nécessaire à l'émergence du projet. Cette phase doit associer les différents acteurs du territoire. La traçabilité, identifiée également comme un facteur de réussite pour l'acceptabilité des agriculteurs a un rôle tout aussi important pour obtenir l'adhésion des consommateurs et des riverains.*

Enfin, il nous apparaît préférable de considérer qu'une valorisation en agriculture devra se concentrer sur les cultures céréalières ou les cultures oléoprotéagineuses. Cela permet de réduire le risque d'opposition des consommateurs en assurant une distance entre ces derniers et le produit fertilisé. En effet, le filtrage réalisé par le sol serait un moyen de construire une « naturalisation » du fertilisant à base d'urine.

IV.A.5 Le rôle de l' élu

Un territoire, c'est aussi une puissance publique représentée par ses élus. Plusieurs de nos interlocuteurs nous ont sensibilisés sur le rôle potentiel que pourront jouer les élus dans l'émergence du système de collecte sélective des urines. Cette idée s'inscrit plus généralement dans la question du rôle de l' élu dans le soutien à l'innovation territoriale.

IV.A.5.a Un consensus sur l'importance du rôle de l' élu

Il est ressorti de nos entretiens avec les bureaux d'études que les élus pourraient jouer un rôle important dans l'émergence et l'acceptation de cette innovation. Pour notre interlocuteur chez BERIM, s'implanter sur un territoire avec un élu sensibilisé aux questions d'assainissement et qui a une culture « verte » est une condition de réussite du projet. Pour Le Sommer Environnement, il paraît nécessaire de faire comprendre aux élus qu'en traitant en amont les urines, on limite la saturation des STEPs, ce qui présente un coût en moins pour les collectivités. L'association Terre & Cité estime que les élus pourraient être porteurs du projet s'ils y voient un potentiel pour le territoire, qui deviendrait tête de pont d'une agriculture saine et écologique. Toutefois, notre interlocuteur précise que si ces élus y voient au contraire un risque sanitaire, ils pourraient constituer un frein à l'émergence de cette innovation. L'AESN, de son côté, met en avant l'exemple de Daniel Markovic, ancien élu de Paris et actuel président de la commission territoriale au comité de bassin Seine-Normandie, qui développe des contacts avec Aéroports de Paris au sujet de la collecte potentielle d'urines sur le site d'Orly. L' élu peut avoir un rôle prépondérant dans les décisions d'assainissement comme le prouve l'exemple de Gabriel Amard, qui, en 2010, organisait un vote citoyen pour sortir Viry-Châtillon du syndicat des Eaux

d'Ile-de-France et créer la régie publique Eau des Lacs de l'Essonne. Nous avons tenté de le rencontrer afin d'approfondir la question du rôle de l' élu dans l' assainissement et la gestion des eaux, mais ce dernier n'a pas donné suite à notre prise de contact.

IV.A.5.b La loi NOTRe conforte le rôle de l' élu dans l' innovation territoriale

Dans son rapport sur l' innovation territoriale [Oural, 2015], Akim Oural met en avant le fait que les collectivités qui ont su dépasser la posture du « faire seul » de la régie et celle du « faire faire » de la délégation de service publique pour « faire avec » dans une logique d' accompagnement sont celles qui ont réussi le mieux à impulser une dynamique d' innovation territoriale. Dans le cadre des politiques de décentralisation actuelles, les collectivités pourraient profiter de leur figure de « tiers de confiance » et de leur connaissance précise des ressources, des enjeux et des besoins de leur territoire pour porter les projets innovants afin d' utiliser leur pouvoir d' initiative discrétionnaire issue de la clause de compétence générale de la commune (loi de 1887).

Les élus sont légitimes par les urnes et bon nombre d' entre eux entretiennent des liens forts avec leurs administrés et leur territoire, au point de faire figure de « tiers de confiance ». Si le principe et les bénéfices de la collecte des urines parlent à l' élu, la communication qu' il en fera auprès de ses administrés sera d' autant plus efficace qu' elle ne revêt pas l' aspect technocratique de la puissance publique et qu' elle peut s' adapter au territoire et à ses enjeux et ses besoins. Dans le cas de Saclay, la proximité de centaines d' hectares de culture crée des besoins clairs en engrais et une politique de soutien à la collecte sélective des urines, qui permettrait de renouer des liens de proximité avec le monde agricole, d' adopter une position novatrice en terme de gestion de l' eau, s' inscrirait dans un contexte historique favorable en Essonne après les actions entreprises par Gabriel Amard.

Promouvoir cette innovation ferait rentrer les élus en question dans le nouveau rôle de catalyseur qu' Akim Oural identifie comme essentiel pour l' innovation territoriale. Il n' est pas le seul puisque pour Armel Le Coz, cofondateur de Démocratie Ouverte, on n' attend plus « un élu visionnaire, mais un élu catalyseur d' un écosystème citoyen bouillonnant qui fait émerger et accompagner des solutions imaginées par les acteurs locaux ».

Une communication priorisée vers les élus pourrait leur permettre de porter le projet et assurer une communication supplémentaire portée par des représentants des citoyens légitimes par les urnes.

IV.B Réglementation de l'assainissement : une évolution nécessaire

La collecte sélective des urines n'est aujourd'hui prévue par aucune réglementation nationale ou européenne, ce qui pourrait complexifier tout projet de développement. Une analyse réglementaire détaillée de la collecte sélective de l'urine a été réalisée dans le cadre de ce GAAP pour identifier à quelles conditions elle pourrait être mise en œuvre sur un projet pilote et à plus grande échelle. L'analyse juridique complète est présentée en annexe (cf. ANNEXE D). Les éléments suivants reprennent les principaux résultats de cette analyse.

IV.B.1 Faisabilité juridique de la collecte sélective des urines

Tout d'abord, la question se pose de savoir si la collecte sélective de l'urine est une installation relevant de l'assainissement collectif ou non collectif. Dans le cas d'espèce, la collecte sélective de l'urine ne rentre *a priori* pas dans les catégories prévues par la législation.

Or, la qualification du système en assainissement collectif ou assainissement non collectif a une influence déterminante sur la répartition des responsabilités de l'ensemble du système et sur l'encadrement réglementaire à respecter. Pour réduire la responsabilité du propriétaire du bâtiment, qui peut à certains égards être un frein au développement, il pourrait apparaître opportun de considérer ce système comme un assainissement collectif au sens où la collectivité assure la responsabilité de la collecte à partir de la cuve de stockage en pied de bâtiment. *Pour le projet pilote, en cas de classification en assainissement non collectif, il pourrait être envisagé qu'une convention puisse être conclue entre le propriétaire et le service public afin que ce dernier prenne en charge l'entretien de la cuve et même sa construction.*

S'agissant de l'épandage des urines, celui-ci semble être soumis au respect de la loi sur l'eau et entrer dans le champ de la rubrique 2.1.4.0 de la nomenclature eau du code de l'environnement. Au regard des caractéristiques du projet pilote, avec une production annuelle projetée de 1,5 t/an d'azote (cf. PARTIE III.C), ce dernier serait soumis à déclaration. Un dossier de déclaration devra donc être réalisé dans ce cadre et transmis à la DDT. Ce dossier devrait permettre de lever les incertitudes juridiques liées à l'absence

Assainissement connecté à un réseau public recevant les eaux usées avec une épuration soumise à l'obligation de résultats

Assainissement local mis en place par les propriétaires avec une épuration soumise à l'obligation de moyens

La cuve devrait être installée dans le domaine public
2° de l'art. L. 2224-10 du CGCT

d'encadrement réglementaire de ce type de système d'assainissement.

Ainsi, bien que demeure un aléa juridique quant à la faisabilité juridique d'un système de collecte sélective des urines, à la catégorie d'assainissement correspondant et à leur valorisation en agriculture, essentiellement en raison du fait qu'un tel système n'a jusqu'alors pas été envisagé dans les lois et réglementations applicables, **la lecture des textes existants conduisent à penser que ce système ne rencontre pas d'obstacles juridiques majeurs dans une phase d'émergence, dès lors qu'il se destine à être réalisé dans le strict respect des dispositions encadrant l'assainissement et la protection des milieux aquatiques et en les considérant de manière extensive.** Plus précisément, le système de collecte sélective des urines devra faire l'objet de garanties équivalentes à celles imposées notamment aux systèmes d'assainissement non collectif pour ce qui concerne notamment la cuve, la protection contre les pollutions, la traçabilité, l'entretien du système.

Il apparaît important que les services de l'Etat (DDT), l'Agence régionale de la santé et les collectivités chargées de l'assainissement soient associés dès le démarrage du projet afin de permettre son émergence bien que rien ne soit prévu dans le droit positif. Pour une phase de généralisation, il sera nécessaire que le corpus juridique soit modifié en conséquence pour encadrer spécifiquement ce type de système d'assainissement écologique.

IV.B.2 Quel statut pour l'urine ?

Juridiquement, l'urine doit aujourd'hui être considérée comme un déchet. Le statut juridique de déchet issu du code de l'environnement permet d'appliquer les principes qui y sont associés : principe pollueur-payeur, principe de prévention, principe de responsabilité élargie du producteur, principe de traçabilité. Néanmoins, le statut de déchet peut-être un frein, notamment économique et juridique, à la valorisation de substances telles que les urines qui pourraient constituer des ressources *in fine*. C'est dans ce cadre que la classification en produit au sens du code de la consommation apparaît intéressante. Un produit peut être commercialisé et utilisé librement sans demande d'autorisation, contrairement au déchet. Dans le cas de l'urine, le statut de produit permettrait de la vendre au même titre que tous les engrais industriels et d'éviter la mise en place d'un plan d'épandage par le fournisseur et sous sa responsabilité.

Si d'un point de vue purement technique, l'urine semble pouvoir répondre aux exigences liées à la qualification de produit, notamment au regard des éléments présentés dans le rapport de l'Organisation nationale de la santé (OMS) relatif à l'utilisation sans risque des excréta[OMS, 2012], il convient de rester extrêmement prudent quant à la possibilité d'obtenir cette qualification pour l'urine. Les difficultés rencontrées pour faire passer

de déchet à produit les digestats de méthaniseurs et les boues d'épuration ne permettent pas d'être optimiste sur cette possibilité pour l'urine à moyen terme. Néanmoins, il serait intéressant que des démarches soient engagées dès le développement du projet pilote afin d'initier le processus de demande. Ce dernier nécessitera des données scientifiques relatives à l'utilisation de l'urine et à l'effet sur les sols. Dès lors, il paraît intéressant d'accumuler les données nécessaires pour la démarche de qualification en produit de l'urine dès le suivi scientifique qui pourrait être mis en place pour le projet pilote.

En outre si l'utilisation de l'urine devait être envisagée sur des plates-formes de compostage, il serait nécessaire que l'urine soit positionnée dans la liste des déchets fixées à l'annexe II de l'article R. 541-8 du code de l'environnement. Cette démarche est actuellement à l'étude dans un groupe de travail qui regroupe l'association Toilettes du Monde, le Réseau d'Assainissement Ecologique et l'ADEME. L'objectif est de mener des analyses microbiologiques, physico-chimiques et agronomiques afin d'estimer les potentiels impacts sanitaires et environnementaux et permettre la classification de l'urine dans la liste et ainsi permettre l'utilisation de l'urine par exemple sur des plates-formes de compostage.

IV.C Les filières retenues : du prototype au Grand Paris

Dans cette partie, nous menons un travail d'identification de la filière qui nous apparaît comme la plus propice à se mettre en place. Dans un premier temps, nous utilisons les résultats de la l'analyse économique en PARTIE III.C pour comparer les scénarios de la PARTIE III.B, puis nous présentons les filières globales retenues. Il nous apparut nécessaire de différencier le projet-pilote de la généralisation à plus long terme de la collecte sélective de l'urine à l'échelle francilienne. Une première filière à court terme qui semble adaptée pour l'émergence du projet-pilote est présentée avant d'esquisser ce que pourrait être la filière à l'échelle du Grand Paris. Mais l'émergence de cette solution, quelle que soit l'échelle, ne se réduit pas à l'identification d'une filière. Il s'agit de mettre en place les conditions nécessaires à la conduite de ce changement pour dépasser les freins qui ont pu être identifiés précédemment. Nous proposons de faire émerger cette innovation collective en s'appuyant sur une gouvernance territorialisée et par l'utilisation d'une méthode issue de la sociologie de l'innovation pour construire le projet adapté au territoire avec l'ensemble des acteurs.

IV.C.1 Présentation des filières retenues

La principale difficulté pour déterminer une filière adaptée est le manque de connaissances précises sur plusieurs sujets clés : propriétés agronomiques des urines (libération des nutriments et assimilation par la plante) en tant que fertilisant ou en tant qu'amendement organique avec le compost, dégradation des micropolluants dans les urines stockées ou conditionnées et dans le sol, etc. Des données existent mais elles ne sont pas suffisamment précises pour le moment et ne peuvent convaincre les agriculteurs de l'absence de risque à utiliser les urines comme intrant. Nous n'avons pas pu mener d'étude sur les blocages des consommateurs de produits fertilisés à l'urine humaine mais nous supposons d'après nos retours d'entretien que des réticences pourraient surgir en l'absence de garanties sur le risque sanitaire et de micropolluants.

Dès lors, nous envisageons deux échelles spatio-temporelles associées à deux filières : *dans un premier temps (moins de cinq ans), sur un projet-pilote, nous préconisons de collecter les urines et de les valoriser dans le cadre d'un projet scientifique de recherche agronomique.* Tous les produits possibles - urines brutes stockées, urines brutes stockées et acidifiées, urines nitrifiées et distillées, struvite, compost enrichi en urines - doivent être testés sur une parcelle agricole, avec un encadrement scientifique de l'INRA (proximité avec le monde agricole), afin de déterminer les propriétés agronomiques et les compositions de ces produits et d'être en mesure de comparer ces produits avec les engrais chimiques

de synthèse ou les composts non-enrichis avec des urines. La question du risque sanitaire et celle des micropolluants doit être traitée. Cette première étape a donc pour but de faire progresser la connaissance et de produire des garanties scientifiques aux acteurs qui pourraient être impliqués dans la filière à plus grande échelle. Si les résultats de ce projet de recherche sont positifs et permettent de recommander un traitement des urines adapté pour leur valorisation en agriculture, alors une généralisation du système à plus grande échelle est envisageable. La *réversibilité* du système à petite échelle doit être pensée : par exemple, les urines doivent pouvoir être déversées, à débit contrôlé pour éviter les pics d'azote, dans le réseau d'assainissement principal en cas de dysfonctionnement dans la filière aval. Ce projet-pilote est aussi l'occasion de résoudre les éventuels problèmes techniques pouvant intervenir dans la chaîne : entretien des toilettes, de la tuyauterie et de la cuve-tampon, transport des urines, etc. Le projet-pilote permet aussi de réfléchir au design du produit final.

Dans un deuxième temps, à long terme (quelques années, les tests pourraient être lancés d'ici deux ans d'après notre contact à l'INRA), un système intégré à l'échelle d'un territoire voire d'une région comme l'Ile-de-France pourra être développé, en équipant des nouvelles constructions du Grand Paris par exemple. (taille typique suggérée : de 50 000 à 100 000 usagers). À une telle échelle, un objectif fort sera la résilience de la chaîne : le système devra être robuste, un retour en arrière dû à des dysfonctionnements est à proscrire, au vu des investissements qui seront consentis. On détaille ci-dessous les filières proposées.

IV.C.1.a Filière pour un projet-pilote

Un projet-pilote pourrait avoir lieu dans un immeuble ou un groupe d'immeubles de logements ou dans un bâtiment tertiaire comme AgroParisTech sur le plateau de Saclay (proposition du Sommer Environnement).

Responsabilité générale du système : le SIAAP

Grâce au format de prototype et à l'absence de cadre réglementaire clair sur la collecte des urines, on estime que la responsabilité du système devrait pouvoir être confiée à un syndicat d'assainissement volontaire pour porter le projet : à cet égard, le SIAAP nous paraît tout désigné pour assurer la responsabilité de la collecte sélective des urines., .

La collecte : à définir en fonction du montage du projet

Nous ne pouvons proposer d'acteur tout indiqué pour la responsabilité de la collecte : cela dépend de l'acteur de transport choisi et de la structure responsable du bâtiment. En effet, la responsabilité de la collecte peut être assurée par le syndic ou le bailleur si celui-ci est volontaire pour mettre en place un système d'assainissement écologique, mais

cela nécessite une formation aux bonnes pratiques). Si l'acteur du transport peut développer des compétences sur la gestion de la cuve-tampon, la responsabilité par cet acteur est aussi envisageable.

Le transport : acteur avec de l'expérience dans le transport de déchets

Pour le transport, afin de minimiser les coûts pour le prototype, nous suggérons la désignation d'un acteur disposant déjà de camions, pour diminuer le risque d'échec du projet-pilote.

Le traitement : consortium INRA, SIAAP et acteurs d'assainissement Tous les traitements doivent pouvoir être testés. Pour mener à bien ces traitements, nous proposons un consortium entre l'INRA, le SIAAP et des acteurs privés d'assainissement qui verraient une opportunité dans le projet-pilote et souhaiteraient se positionner sur la collecte sélective des urines.

Valorisation : en recherche agricole Sous la responsabilité de l'INRA, on teste les différents produits sur une parcelle d'expérimentation, avec la participation d'un agriculteur pour travailler la terre (labour etc.). La participation de l'agriculteur est importante car cela crée de la crédibilité au projet grâce à un retour d'expérience dans le monde agricole (entretien Terre et Cité). Si le système génère un excédent d'urines ne pouvant être valorisées dans le projet de recherche, cet excédent doit être rejeté dans le réseau d'eaux usées (d'où l'importance d'une responsabilité par le SIAAP).

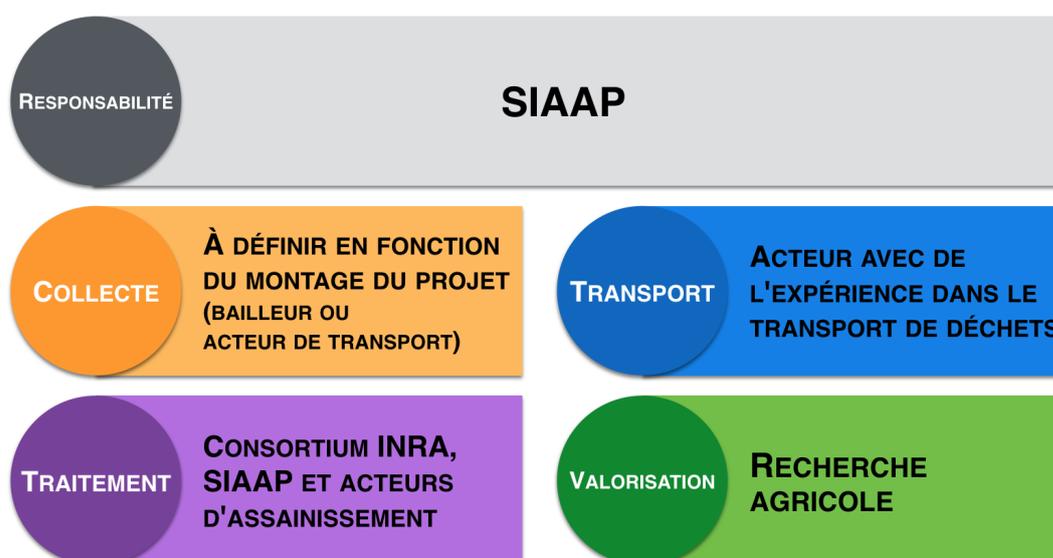


FIGURE IV.1 – Synthèse de la filière imaginée pour un prototype

IV.C.1.b Filière à long terme

On suggère ici un consortium entre les acteurs de collecte, de transport et de traitement, qui pourrait répondre de manière groupée à un appel d'offre. De par nos entretiens, nous avons pu définir une combinaison intéressante : Veolia à la collecte et au transport et sa filiale la SEDE pour le traitement et le recyclage des nutriments en agriculture. Mais cette combinaison ne saurait être la seule.

Responsabilité générale du système : le SIAAP

Il ressort de notre travail que le SIAAP est un acteur difficile à exclure du projet de séparation des urines à la source. En effet, il s'agit d'un acteur transverse du transport, du traitement et de la valorisation dans le cadre des boues de station d'épuration, et qui présente un intérêt fort dans le projet, en particulier à grande échelle.

Collecte et transport : un industriel du transport de déchets et de l'assainissement

Nous suggérons que la collecte et le transport soient pris en charge par un industriel du type Veolia (mais c'est le seul que nous avons rencontré) qui pourraient adapter ses métiers au transport des urines et utiliser ses liens avec la grande industrie pour améliorer le service de collecte en amont avec le bâtiment (abaisser le coût des toilettes à séparation, équipement d'une jauge et d'un système d'alerte de remplissage dans les cuves-tampons des îlots). De plus, cette gestion effective non-menée par le SIAAP permettrait d'assurer la pérennité du système si les objectifs du SIAAP vis-à-vis de la collecte sélective des urines (détourner l'urine de plus d'un million de personnes pour éviter la construction d'une tranche supplémentaire à la station de Seine Aval) ne sont pas réalisables aux échéances attendues et que le SIAAP souhaite alors se retirer.

Traitement : une entreprise spécialisée dans le recyclage des nutriments et proche du monde de l'assainissement

Nous suggérons que le traitement soit pris en charge au sein du consortium par un acteur ayant un lien fort avec le milieu de l'assainissement mais aussi agricole du type de la SEDE Environnement.

L'analyse des scénarios techniques sur une base sociologique et économique nous invite à proposer trois traitements possibles, qui devront être testés lors du projet-pilote qui précède :

- traitement visant à concentrer les urines : exemple de la nitrification/distillation. Deux cas sont possibles : emplacement de l'unité au plus près de la production (rentabilité meilleure mais obstacles d'acteurs aujourd'hui), ou mutualisation du traitement à l'échelle d'un territoire (solution plus consensuelle mais plus l'arbi-

trage des coûts n'est pas évidente : on perd en coûts de transport mais on gagne en coûts de maintenance) ;

- incorporation des urines brutes à un compost de déchets verts ;
- précipitation sous forme de struvite suivie d'un procédé Anammox.

Dans tous les cas, la question du risque sanitaire et de celui associé aux micropolluants doit être traitée avec une grande vigilance.



FIGURE IV.2 – Synthèse de la filière imaginée à long terme

IV.C.2 Comment faire émerger cette innovation collective ?

IV.C.2.a La méthode KCP

IV.C.2.a.i Cadre théorique

Le changement nécessaire à la mise en place de la filière de collecte et de valorisation de l'urine nécessite une coordination entre les acteurs. Selon Michel Crozier, le changement est un processus d'apprentissage collectif qui porte sur l'acquisition de nouveaux modèles relationnels, de nouveaux modes de raisonnement [Crozier, 1977]. Ainsi, on peut avancer que la définition d'un système de collecte et de valorisation de l'urine viable, en tant que processus d'innovation et de changement, passe par la mise en œuvre d'une intelligence collective qui intègre les visions des différents acteurs et leur logique propre.

Les obstacles à la définition des projets innovants sont de deux ordres :

- cognitifs : comment dépasser les solutions préétablies et faire émerger l'innovation avec un grand nombre d'acteurs C'est ici la question des nouveaux modes de

raisonnement au sens de Crozier qui est posée ;

- organisationnels : les relations au sein du groupe ne permettent pas de faire émerger une innovation qui viendrait perturber le fonctionnement du groupe et les rapports de pouvoir existants. C'est ici la question des nouveaux modes relationnels au sens de Crozier qui est posée.

On retrouve dans ces obstacles, les principaux freins identifiés pour la mise en œuvre de la collecte sélective des urines avec des acteurs qui ont des logiques d'actions différentes, une perception différente des urines et du modèle à développer. Ainsi, au delà de la gouvernance, que l'on développera par la suite, il faut des méthodes qui permettent simultanément de dépasser les paradigmes dominants pour inventer de nouveaux modèles, tout en gardant la cohésion de tous les acteurs nécessaires au projet.

Pour surmonter ces difficultés, il nous paraît intéressant de s'inspirer de la méthode KCP (Knowledge - Concept - Proposition) développée initialement pour stimuler l'innovation de rupture dans les entreprises à partir de la théorie C-K [Hatchuel and Weil, 2009]. Cette méthode montre que la conception innovante se construit simultanément sur deux espaces expansifs de pensée qui obéissent à des logiques différentes : un espace de concepts (C) qui intègre des propositions inconnues et non vérifiées qui nécessitent une conception et un espace de connaissances (K). Par un processus d'expansion corrélée dans ces deux espaces, les connaissances font émerger de nouveaux concepts qui eux même conduisent à de nouvelles connaissances.

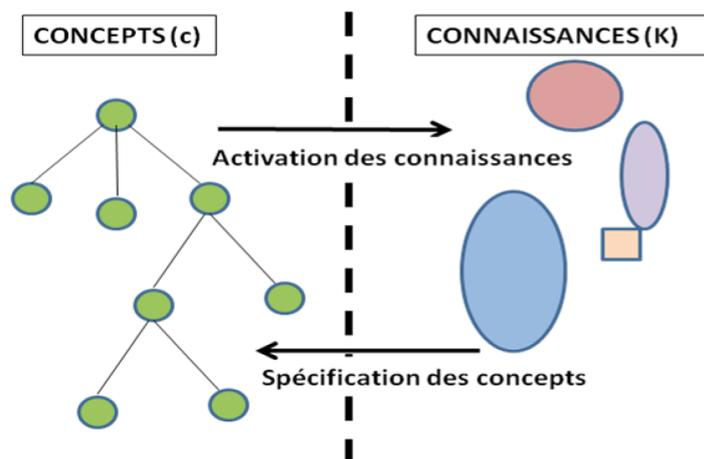


FIGURE IV.3 – Représentation du processus de la théorie C-K (Sophie Colasse et Michel Nakhla)

La méthode s'articule autour de trois phases progressives qui visent à développer la conception collective :

- la phase « Knowledge » : il s'agit d'un partage de connaissances entre les acteurs, d'identification des connaissances à construire. C'est également une phase de par-

- tage des points de vue, des enjeux et contraintes de chacune des parties ;
- la phase « Concept » : elle vise à organiser la créativité, à imaginer les formes nouvelles. Elle démarre à partir d'un concept identifié à la phase précédente (concept projecteur situé au sommet de l'arbre des choix de la FIGURE IV.3) qui progresse suivant la la théorie C-K en interaction avec les connaissances ;
 - la phase « Proposition » : elle s'appuie sur les productions des deux phases précédentes afin d'identifier et proposer les changements ou innovations prometteuses qui répondent aux enjeux initiaux.

Cette méthode en trois temps permet de se projeter dans un système collectif et ainsi de développer la coordination des acteurs au sein du groupe, élément central dans les processus d'innovation comme cela est rappelé dans la partie relative à la gouvernance (cf. PARTIE IV.C.2.b). Elle doit notamment à casser les schémas mentaux des acteurs pour sortir des solutions habituelles et des positions prédéfinies. En dehors du domaine de l'industrie, cette méthode a été utilisée pour traiter des questions de gestion d'un agroécosystème avec la création d'une filière courte de production de Luzerne en Poitou-Charentes [Berthet et al., 2014]. Dans ce projet, pour lequel les clivages étaient importants entre les écologues et les professionnels agricoles, la conception collective par la méthode KCP a permis de faire émerger une solution collective.

IV.C.2.a.ii Mise en pratique sur le cas de la collecte sélective des urines

Au regard de ces éléments, la conception collective semble une solution qui pourrait être utilement mobilisée pour concevoir le système globale de collecte et de valorisation des urines aussi bien sur l'organisation de la filière, la forme du produit à valoriser et les débouchés. Sur ces thèmes on est face à des visions et des contraintes différentes selon les acteurs qu'il convient de concilier de manière créative.

Il peut donc être proposé de mettre en place d'ateliers de conception collective sur le territoire du projet pilote. Ces ateliers, sous forme de séminaires, regrouperaient les acteurs du territoire intervenants dans le projet et qui sont représentés dans la gouvernance. L'encadrement de ces ateliers devrait être réalisé par des personnes maîtrisant la méthode de conception.

De manière synthétique, le déroulement pourrait être le suivant :

- la phase K : le partage de connaissance est réalisé à partir de présentations et débats entre les parties : expériences étrangères, éléments scientifiques, éléments agronomiques, pratiques agricoles, éléments environnementaux, les confrontations...

Cette phase doit aussi être l'occasion de définir les connaissances à développer. Cette phase doit également aboutir à la définition de concept « créatif » dont la faisabilité n'a pas besoin d'être vérifiée. Ici un concept pourrait être, par exemple, « la valorisation de l'urine sous forme concentrée dans l'agriculture biologique ». Plus simplement, la « valorisation de l'urine en agriculture » pourrait être un concept de départ.

- la phase C : elle ferait l'objet d'atelier de créativité dirigée qui s'appuierait au départ sur le ou les concepts identifiés à la phase précédente. À partir de ce point de départ, l'animateur piloterait le processus de créativité pour dégager des concepts par exemple sur la nature du produit, la technique utilisée, les cultures cibles l'organisation de la filière, son financement, la redéfinition des attributs de l'urine ... Cela conduit à identifier des connaissances à développer en parallèle ;
- la phase P : l'ensemble des solutions issues de la phase précédente devra être présenté aux parties prenantes en même temps que les actions ultérieures qui permettront d'explorer les propositions : prototype, expérimentation, projet *in situ*.

Une telle démarche doit permettre d'explorer le système socio-technique à mettre en place pour collecter et valoriser l'urine sur le territoire du projet pilote. Cette réflexion collective organisée apporte une réponse aux difficultés cognitives et organisationnelles attachées aux processus innovants. Elle doit permettre de mobiliser les acteurs pour créer une solution adaptée au plateau de Saclay. Au delà du projet, cette méthode pourrait constituer un outil intéressant pour faire émerger des politiques publiques sur un territoire en intégrant toutes les parties.

IV.C.2.b La gouvernance

Comme cela a été précisé précédemment, il est important qu'une synergie territoriale soit mise en place pour permettre l'émergence d'un projet pilote, mais également à plus long terme, pour espérer un déploiement plus large de ce système d'assainissement alternatif et ainsi répondre à la problématique à plus long terme de saturation des STEP (cf. PARTIE I.A.2).

Dès lors, la question se pose de savoir comment construire un groupe capable de créer et porter cette synergie et quelle gouvernance doit être mise en place. La confiance entre les parties a été identifiée comme levier important qui devait être développé. La mise en place d'une gouvernance équilibrée du groupe des parties prenantes est à ce titre primordiale.

Du point de vue sociologique, le groupe est une construction sociale dont la rationalité est relative aux membres qui le compose. Au sein de ces groupes, les stratégies d'actions mises en œuvre sont conditionnées par les ressources et les objectifs des membres, mais également par la capacité des acteurs à s'organiser pour mener leur démarche commune [Crozier, 1977].

Or, les processus innovants, comme celui de la collecte sélective de l'urine, mobilisent un grand nombre d'acteurs et de parties prenantes. Il semble nécessaire, dans ce cadre, de dépasser la seule concertation ou mise en relation des acteurs pour aboutir à une coordination des acteurs comme l'avance Grenier dans son article sur les politiques publiques et l'innovation [Grenier and Guitton-Philippe, 2010]. Ces éléments rejoignent le besoin fort identifié lors des entretiens du monde agricole d'améliorer la coordination avec l'EPPS pour aller au-delà de la concertation. Selon les travaux présentés dans cet article, la construction de coordination passe par la mise en place d'un système de règles du jeu co-construites et localement institutionnalisées. Cela impose un processus en trois étapes identifié dans les travaux sur la structure cognitive collective de Weick et Roberts [Weick and Roberts, 1993] :

- la *représentation* : tous les enjeux et positions doivent être représentés dans le groupe ;
- la *contribution* : prise de conscience de chaque acteur de l'intérêt de produire sa contribution pour définir des solutions innovantes ;
- la *subordination* : acceptation des acteurs de se soumettre aux décisions du groupe.

Ces éléments doivent permettre de mettre en place une gouvernance territorialisée à même de produire l'innovation nécessaire.

L'importance du territoire dans la gouvernance présentée ci-dessus pose la question de celle qui devra porter la généralisation du système. À ce stade, il est difficile d'aller au-delà de grands principes, mais il semble nécessaire qu'une gouvernance régionale s'articule avec des gouvernances territorialisées au niveau des zones de projets.

L'exemple de la mise en place de l'écologie industrielle territoriale (EIT) sur le territoire fournit des éléments intéressants qui peuvent servir de base pour construire la gouvernance territorialisée. Selon les préconisations du CGDD [Abitbol et al., 2014], qui s'inscrivent pour partie dans les éléments théoriques rappelés ci-avant, les conditions du succès d'une démarche EIT sont principalement fondées sur le facteur humain : légitimité du porteur, qualité du mode de gouvernance et d'animation, qualité des réseaux d'acteurs, culture de la coopération. Ainsi, la gouvernance est un enjeu central pour la réussite des projets afin d'obtenir la coordination des acteurs. Elle doit être légitime, solide, pérenne et faire dialoguer les acteurs pour réussir à faire partager les enjeux de chacun et ainsi assurer une convergence des intérêts.

Il est donc conseillé qu'elle regroupe des acteurs clés du territoire, légitimes, et dont les intérêts propres font qu'ils seront moteurs dans la démarche. En outre, afin de créer la coopération des acteurs, il est indispensable de mettre en œuvre les conditions favorables à travers un dialogue permanent entre l'ensemble des acteurs. Ce dialogue a pour effet de créer une mobilisation spontanée des acteurs du projet et de renforcer la capacité à combiner leurs propres intérêts et ressources.

À la lumière de ces éléments, il semble important que la gouvernance regroupe l'EPPS, les acteurs de l'assainissement (SIAVB et SIAAP), des représentants du monde agricole, des acteurs de la valorisation locale, des représentants du monde scientifique, l'AESN, des représentants d'associations environnementales et de riverains. La présence de représentants d'associations de consommateurs devra être regardée plus avant pour juger de son opportunité en lien avec les autres acteurs précités. Cette gouvernance, représentative des enjeux du territoire permettrait de partager les enjeux de chacun. Le pilotage de cette structure et le rôle de liant entre les acteurs pourraient être réalisés par l'EPPS en lien avec une association qui relie l'agriculture et l'urbain.

Des oppositions ou, à tout le moins des divergences, apparaîtront lors de ce partage. Pour les dépasser et construire un projet viable et pérenne pour le territoire, la méthode de construction de projet innovant impliquant de multiples acteurs peut être envisagée. Elle devrait être à même de construire la coordination nécessaire en créant la chaîne de

L'AESN s'est montrée volontaire pour accompagner le projet, notamment sur le plan économique, mais aussi de conseils techniques

collecte la plus adaptée au territoire et aux enjeux des parties.

IV.D Préconisations à l'intention du décideur

Répondre à la question sanitaire pour construire l'acceptabilité

1. Sur la base du projet pilote, mener une expérimentation (essais en conditions contrôlées puis en plein champ) portant sur l'utilisation de l'urine dans l'agriculture sous toutes les formes envisagées (compost, urine brutes, urines concentrées, etc.), sous le pilotage de l'INRA et associant les agriculteurs. Cette expérimentation viserait à caractériser les différents traitements de l'urine envisagés vis-à-vis de leur praticité pour l'agriculture et des enjeux sanitaires. Ces essais pourraient s'inscrire dans le programme de recherche « pour et sur le développement régional » (PSDR) de l'INRA avec un financement à chercher auprès de l'AESN ;
2. Compléter les essais par la mise en place d'un observatoire pour maintenir les relations de confiance sur le long terme ;
3. Réfléchir aux contraintes à définir en matière de traçabilité du produit et de son utilisation pour apporter une garantie ;
4. Commencer par valoriser l'urine en culture non-alimentaire afin de permettre d'obtenir plus facilement l'adhésion des consommateurs et des riverains en naturalisant le produit ;
5. S'appuyer sur les chambres d'agriculture pour diffuser ensuite l'innovation.

Adopter une gouvernance territoriale pour conduire le projet

1. Aller au delà de la concertation en créant une coordination des acteurs (co-construction) : EPPS, les acteurs de l'assainissement (SIAVB et SIAAP), des représentants du monde agricole, des acteurs de la valorisation locale, des représentants du monde scientifique, AESN, des représentants d'associations environnementales et de riverains. La présence de représentants d'associations de consommateurs devra être regardée plus avant pour juger de son opportunité en lien avec les autres acteurs précités. Le pilotage de cette structure et le rôle de liant entre les acteurs pourraient être réalisés par l'EPPS en lien avec une association qui relie l'agriculture et l'urbain ;
2. Pour le projet à l'échelle du Grand Paris, s'appuyer sur une gouvernance régionale articulée avec des gouvernances territorialisées au niveau des zones de projets.

Construire l'utilisateur-produit dans les logements équipés

1. Créer du sens afin que l'utilisateur ait conscience de l'intérêt de la collecte sélective : mettre en place un partage de connaissance et une communication active sur les enjeux du système ;
2. Mettre en avant dans la communication le caractère pro-social de la collecte sélective de l'urine et le lien avec l'agriculture sur le territoire. Il s'agit de motiver le sentiment moral d'agir pour l'environnement et le territoire et l'inscrire dans une perspective d'économie circulaire ;
3. Construire une communication continue et multicanaux, partagée entre les institutions, les agriculteurs, des associations, permettant d'aller dans le sens de la construction d'une norme sociale de la collecte sélective de l'urine ;
4. S'appuyer sur des relais locaux bénéficiant d'un haut niveau de confiance pour désofficialiser la communication. Les relais devraient être à la rencontre des mondes agricoles et urbains. À cet effet, l'association Terre & Cité pourrait être un vecteur favorable. Les moyens en communication de l'AEV peuvent aussi être mobilisés ;
5. Réfléchir, pour les usagers, à des formes de rétribution visant à souligner le caractère d'économie circulaire du projet ;
6. Travailler le design des toilettes pour réduire les nuisances potentielles et se servir du projet pilote pour mener des recherches ergonomiques.

Définir la filière de collecte et valorisation de l'urine (les acteurs, les techniques, le type de valorisation, etc.)

1. Mettre en place une démarche de conception collective, par exemple par la mobilisation de la méthode KCP, permettant de créer une coordination des acteurs et de sortir des schémas cognitifs habituels :
 - Mettre en place des ateliers de conception collective sur le territoire du projet pilote. Ces ateliers, sous forme de séminaires, regrouperaient les acteurs du territoire intervenant dans le projet qui sont représentés dans la gouvernance. L'encadrement de ces ateliers devrait être réalisé par des personnes maîtrisant la méthode de conception, par exemple un programme de recherche associé à l'observatoire ;
 - Construire la méthode à partir des connaissances déjà développées par les études précédentes, les exemples internationaux et nos travaux.

Trouver les modes de financement

1. Étudier les possibilités de financement des installations (bâtiment et agriculteurs) auprès de l'AESN, de l'ADEME et du Conseil régional.

Définir les conditions économiques permettant l'émergence du projet

1. Assurer un 0 euros rendu racine aux agriculteurs pendant la phase de développement ;
2. Conduire des études économiques permettant d'évaluer les coûts de chaque option afin d'objectiver les éléments de décision.
3. Travailler à l'évaluation du coût des externalités environnementales (changement climatique, eutrophisation, etc.) que la collecte sélective d'urine permettrait d'économiser.

Prendre en compte les questions réglementaires dans la conduite du projet

1. Se rapprocher des services de l'Etat (DDT, DRIEE, ARS) et des collectivités territoriales chargées de l'assainissement afin de définir les conditions de réalisation de la phase de prototype ;
2. Engager des réflexions sur l'évolution de la réglementation en s'appuyant sur l'expérimentation et le suivi scientifique ;
3. Considérer l'urine comme un déchet à moyen terme et engager les démarches pour développer le statut de produit en s'appuyant sur le suivi scientifique des essais en plein champ ;
4. Mener les démarches pour que l'urine soit inscrite dans la liste des déchets qui peuvent être utilisés sur une plate-forme de compostage.

Éléments de conclusion

Notre étude avait pour objectif de proposer une analyse des mécanismes de mise en place de synergies locales favorables à l'émergence d'une innovation sociotechnique dans le domaine de l'assainissement écologique : la séparation à la source des urines, en vue d'une valorisation agricole comme fertilisant. Nous avons proposé une réflexion multi-scalaire, en raisonnant d'abord à l'échelle du cas d'étude du plateau de Saclay proposé par notre commanditaire, tout en révélant les déterminants de la construction d'une filière plus large autour de cette innovation.

Notre étude croise une analyse des scénarios de filières envisageables (chaîne technique et son contexte) avec une modélisation économique de ces scénarios. Nous avons pu montrer qu'une diversité de scénarios était possible, sans qu'un scénario particulier rencontre toutes les logiques d'acteurs révélées lors de notre entretien. Néanmoins, au niveau local, les interlocuteurs sont favorables à la réflexion autour de cette innovation et ouverts à l'expérimentation d'un projet-pilote. Celui-ci doit d'après les acteurs permettre de créer une relation de confiance entre les différentes parties, dans un contexte local tendu entre mondes urbain et rural, tout en ayant pour objet de résoudre deux questions principales : l'impact sanitaire de l'utilisation des urines humaines ou de ses dérivés sur la qualité des sols et des produits agricoles, et l'intérêt d'utiliser ce type de substances dans les pratiques agricoles (intérêt agronomique, insertion dans les pratiques, opportunité économique). Ce projet-pilote aurait pour cadre un programme de recherche, sollicité notamment par nos interlocuteurs du monde agricole.

Construire l'acceptabilité des différentes parties, et notamment des usagers et des agriculteurs, tout en portant une évolution réglementaire encadrant l'utilisation des urines seront des déterminants essentiels de l'émergence d'une volonté des acteurs locaux de développer la filière de collecte des urines.

Si nous avons pu retenir plusieurs scénarios de filières parmi la gamme explorée dans notre étude, plusieurs questions requièrent néanmoins des travaux complémentaires en lien étroit avec les acteurs. Il s'agit notamment, sur la base des connaissances accumulées par les travaux préalables et les résultats des expérimentations, de construire une démarche de conception collective afin de définir les substances répondant aux besoins des acteurs de valorisation tout en se conditionnant aux possibilités techniques et économiques des acteurs en amont de la filière. Mettre en place une gouvernance représentant les différentes parties prenantes permettra aussi de répondre aux attentes des acteurs subissant les impacts potentiels de cette innovation (consommateurs, riverains) dans le cadre du

débat public.

Le cas de l'assainissement écologique au travers de la collecte séparée des urines illustre la difficulté à sortir des paradigmes établis et questionne la capacité des politiques publiques à porter des innovations sociotechniques de cet ordre. Bien que le contexte favorable du plateau de Saclay puisse aboutir à une phase d'expérimentations, le passage à une échelle supérieure d'ici 2030 permettant d'améliorer le gain environnemental reste selon nous sujet à de nombreuses interrogations.

Annexe A

Questionnaire destinés aux usagers - réponses d'une étudiante suédoise

Us : Have you ever used urine-diversion toilets on a regular basis ?

Student : Yes

Us : Were you reluctant at first to live in a place equipped with an urine-diversion toilet ?

Student : Yes

Us : Could the fact that a place is equipped with an urine-diversion toilet influence your choice to live there ?

Student : Yes

Us : Do you have anything to add about your choice to live in a place equipped with an urine-diversion toilet ?

Student : It feels good that you can do something good for the environment without having to actually do something.

Us : Do this kind of toilets produce nuisances, e.g. unpleasant smells ?

Student : I've only used dry-toilets and they don't smell worse, in fact the separativ dry-toilets smell better.

Us : To what extent this kind of toilets oblige users to change their habits ?

Student : No I believe.

Us : Are you male or female ?

Student : Female

Us : Are these toilets convenient to wash ? Is it constraining not to use water to wash the urine collection area ?

Student : As previously stated this toilet was dry

Annexe B

Recueil des jeux d'acteurs

Dans cette annexe sont rassemblés la transcription des 5 jeux d'acteurs réalisés aux cours de nos entretiens.

B.A Le Sommer Environnement

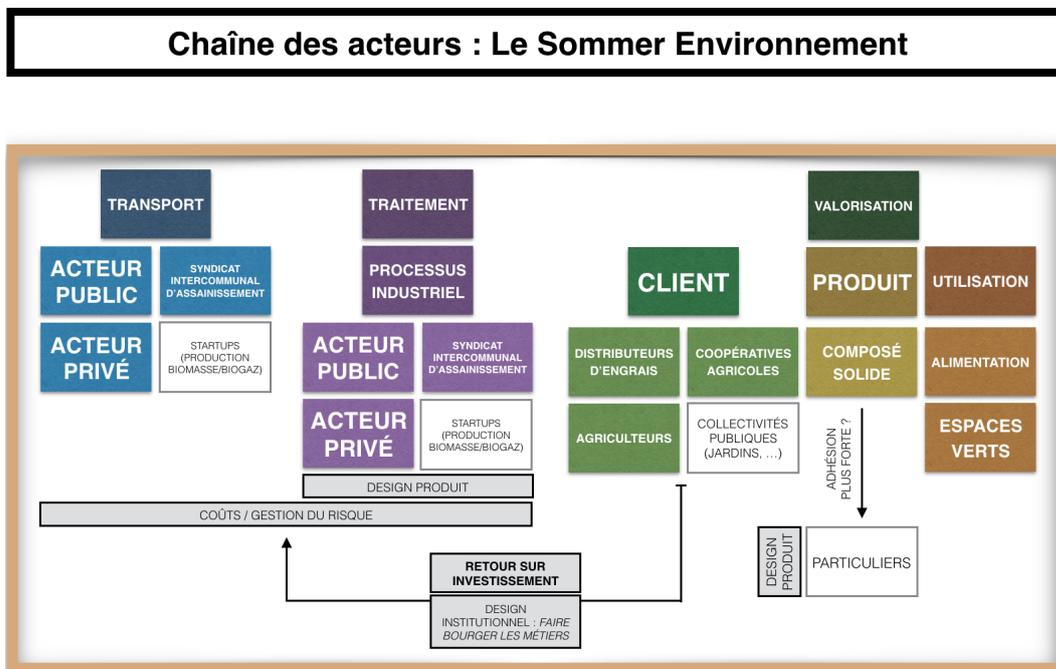


FIGURE B.1 – Chaîne d'acteurs établie par Le Sommer Environnement

B.B SEDE Environnement

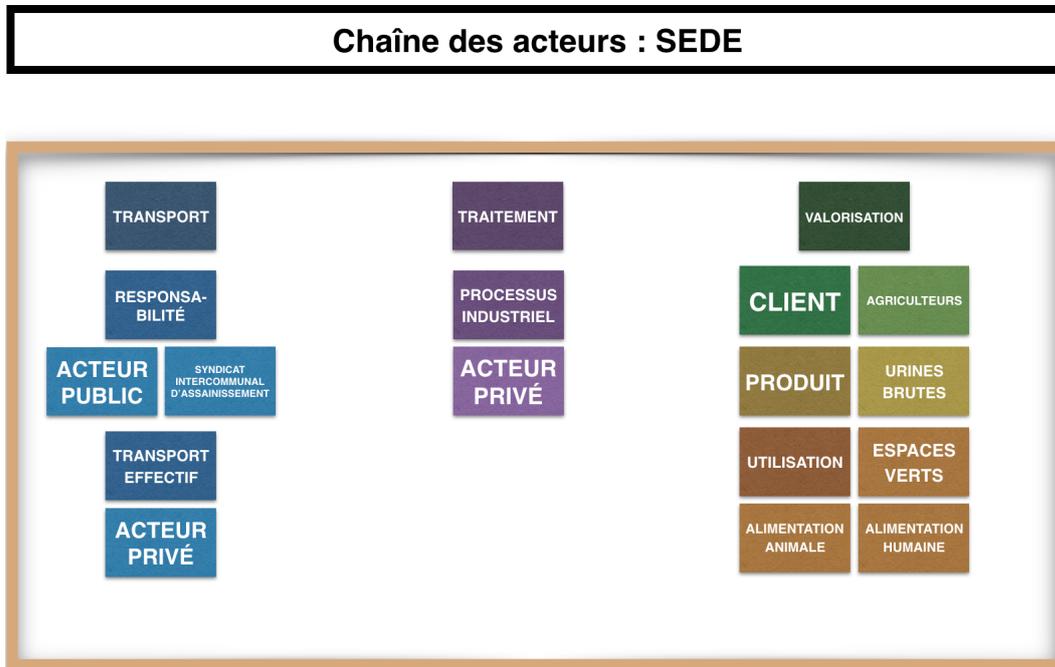


FIGURE B.2 – Chaîne d'acteurs établie par la SEDE Environnement

B.C SIAVB

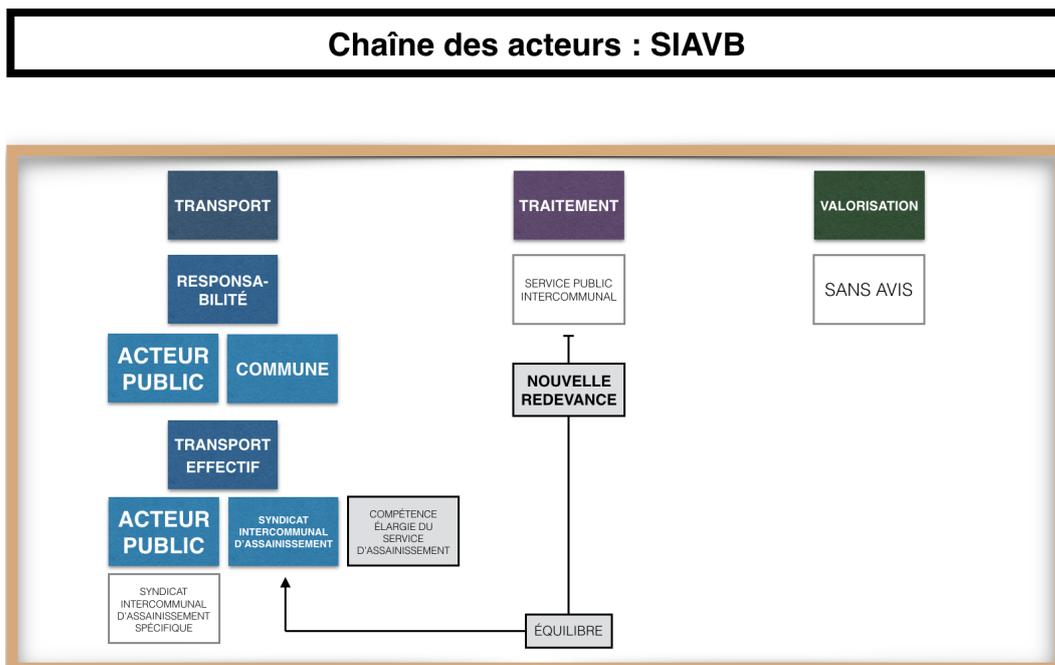


FIGURE B.3 – Chaîne d'acteurs établie par le SIAVB

B.D Veolia

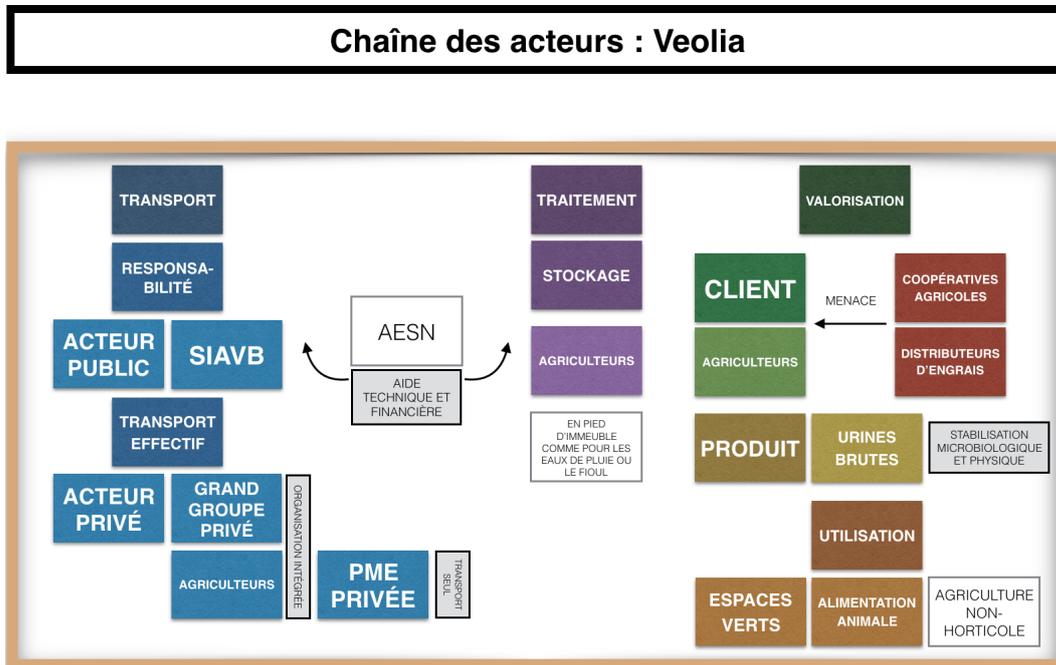


FIGURE B.4 – Chaîne d'acteurs établie par Veolia

B.E Un agriculteur

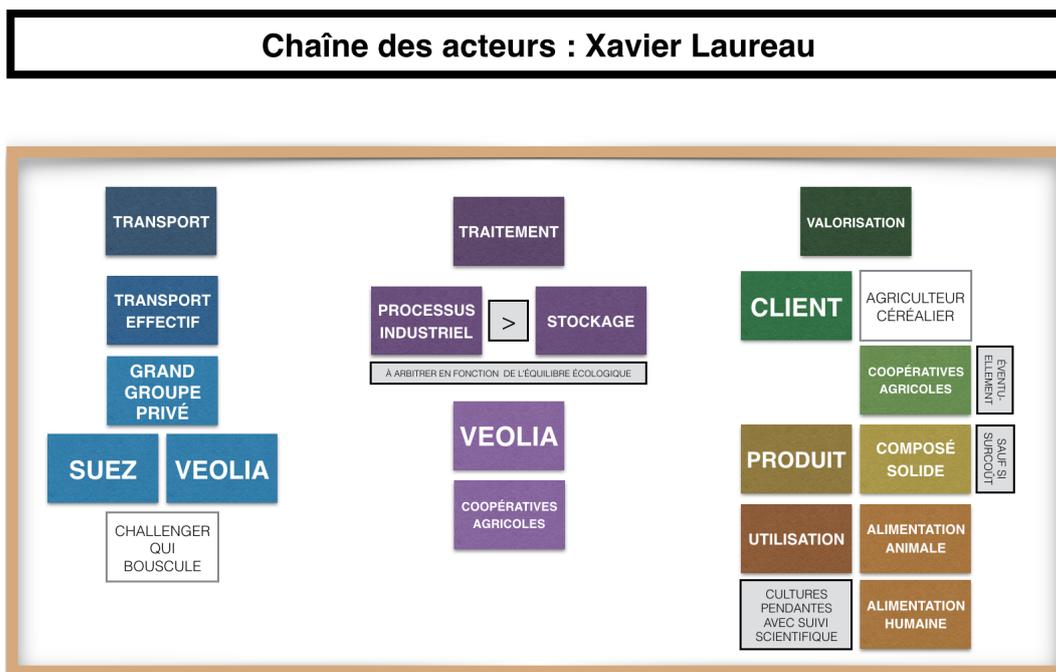


FIGURE B.5 – Chaîne d'acteurs établie par un agriculteur

Annexe C

Modélisation économique

Considérons un territoire dont les bâtiments habités se répartissent en deux secteurs, celui du « Résidentiel », dans lequel N_R personnes habitent, et celui du « Tertiaire » avec ses N_T travailleurs. Dans toute la suite de cette étude, pour une grandeur X considérée, nous noterons X_R sa part tirant son origine du secteur « Résidentiel » et X_T sa part tirant son origine du secteur « Tertiaire ».

C.A Production

Chacune de ces personnes produit par jour une quantité q^j d'urine brute non-diluée. Dans la suite de cette étude, pour une grandeur produite X , nous noterons X^j sa production journalière, X^h sa production hebdomadaire, X^m sa production mensuelle et X^a sa production annuelle. La valeur de q^j est évaluée à 1,25L, production d'urine considérée en médecine [Besson, 2015]. Toutefois la production journalière réelle d'une personne de ce territoire n'est pas égale à q^j . Une telle personne peut habiter (ou travailler) dans une installation non-équipée de toilettes à collecte sélective d'urines, habiter dans une installation non-équipée mais visiter un ami non-équipé ou encore ne pas faire l'effort de s'asseoir pour uriner et diminuer l'efficacité du système. Enfin, lorsque l'on tire la chasse d'eau dans les modèles existants de toilettes à collecte séparée des urines, une partie de l'eau part dans le trou réservé aux urines, entraînant une dilution partielle des urines. Ainsi le volume d'urines produit dans le secteur $S \in \{R, T\}$, la quantité journalière d'urine q_S^j produite est corrigée par :

- un facteur d'installation, i_S , qui quantifie la part des installations du secteur S disposant d'équipements de collecte sélective des urines. Il varie entre 0 et 1 et permet de modéliser correctement un territoire donné ;
- un facteur d'utilisation, u_S , qui quantifie l'utilisation des personnes équipées de leurs équipements. Si une personne, qui dispose de toilettes à collecte sélective d'urines chez elle, vient à sortir de chez elle et urine dans un bâtiment non-équipé, cette urine est perdue. Le facteur u_S prend aussi en compte les vacances, les déplacements du travail, ... Il varie entre 0 et 1. Il est majoritairement plus élevé dans le secteur du « Tertiaire » que dans le secteur des Résidentiel ($u_T \geq u_R$), puisque les gens ont davantage tendance à sortir de chez eux que d'être en déplacement au travail. Dans notre étude, nous prendrons $u_T = 90\%$, soit une demi-journée par

semaine et $u_R = 80\%$;

- un facteur d'efficacité, e_S , qui quantifie l'efficacité de la collecte des urines. Elle peut être affectée par le design des toilettes ou les efforts que font les hommes pour s'asseoir par exemple. L'installation d'urinoirs secs, dans le tertiaire notamment, permet d'augmenter l'efficacité de la collecte. Une étude [Besson, 2015] a montré qu'une population très consciencieuse a une efficacité de 80% pour des toilettes installées dans les logements. Nous prendrons cette valeur pour l'efficacité tertiaire, où les urinoirs secs permettent de compenser la mauvaise volonté de certains, $e_T = 80\%$ et nous prendrons $e_R = 70\%$, 10% des résultats en dessous d'une population consciencieuse ;
- un facteur de dilution, d_S , qui est dû à l'introduction d'eau dans le trou réservé aux urines. Cette dilution peut être involontaire et due uniquement au design des toilettes ou par le déversement volontaire d'eau dans les toilettes (eau de serpillière par exemple). Une valeur de $d_R = 130\%$ a été déterminée expérimentalement [Besson, 2015]. Nous prendrons $d_T = 115\%$, cette baisse étant justifiée par l'installation d'urinoirs secs chez les hommes.

Il faut prendre aussi en compte que, dans notre modèle, une personne évolue entre deux secteurs, celui du « Tertiaire » et celui du « Résidentiel ». Il urine donc une part x_T de q^j dans le secteur « Tertiaire » et une part x_R dans le secteur « Résidentiel ». En supposant qu'une personne urine une fois chez elle le matin, 2 fois au travail, et 2 fois chez elle le soir, nous obtenons $x_T = 29\%$ et $x_R = 71\%$. Finalement, la production réelle journalière d'une personne du secteur S vaut :

$$q_S^j = i_S u_S e_S d_S x_S q^j \quad (\text{C.1})$$

Le principe de la modélisation de la production et le recueil d'urines est présenté en FIGURE C.1. La production totale du secteur S s'évalue alors à :

$$Q_S^j = N_S q_S^j \quad (\text{C.2})$$

La production journalière vaut donc :

$$Q^j = \sum_S Q_S^j = \sum_S N_S q_S^j \quad (\text{C.3})$$

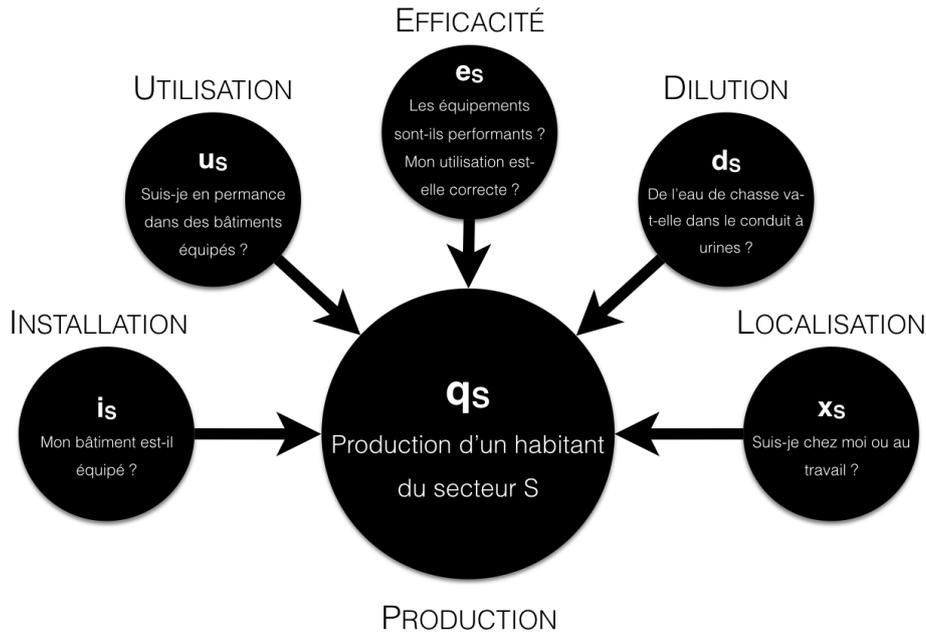


FIGURE C.1 – Principe du calcul de la production et du recueil des urines

C.B Collecte

C.B.1 Immeubles

Nous considérons que les personnes du territoire habitent dans des immeubles, de contenance $m_{im,R} = 250$ personnes (typique d'une résidence étudiante R5) pour le secteur « Résidentiel » et de contenance $m_{im,T} = 1000$ personnes pour le secteur « Tertiaire ». En notant $N_{im,S}$ le nombre d'immeubles équipés dans le secteur S, on obtient :

$$N_{im,S} = \frac{N_S}{m_{im,S}} \quad (C.4)$$

C.B.2 Toilettes

Dans les immeubles « Résidentiel », le degré de mutualisation des toilettes, D_{toi} , est fixé à $D_{toi,R} = 2$ dans les logements et $D_{toi,T} = 20$ dans le tertiaire en accord avec l'article R4228-10 du code du travail. En notant $N_{toi,S}$ le nombre de toilettes installées dans le secteur S, on obtient :

$$N_{toi,S} = N_{im,S} D_{toi,S} \quad (C.5)$$

Le prix unitaire de ces toilettes est $p_{toi} = K_{toi}^{LT/CT} p_{toi,base}$ où $p_{toi,base}$ est le prix actuel des toilettes, $p_{toi,base} = 800e$ (modèle WC Dubbletten suédois à 700€ auquel on rajoute 100€ pour le transport) et $K_{toi}^{LT/CT}$ est le facteur de réduction du prix de ces toilettes à long terme. On évalue ce facteur à $K_{toi}^{LT/CT} = \frac{1}{2}$, puisque le coût important de ces toilettes

est dû au faible marché existant. Ainsi, en supposant une croissance de la filière de collecte sélective des urines, l'hypothèse d'une toilette à collecte séparée des urines au prix 2 fois supérieur à une toilette classique paraît raisonnable. Le coût total de l'installation des toilettes sur le territoire est alors :

$$P_{toi} = \sum_S N_{toi,S} p_{toi} \quad (C.6)$$

C.B.3 Canalisation

Une fois l'urine recueillie dans ces toilettes, elle passe par des tuyaux pour arriver dans une cuve. Le nombre de mètres de tuyaux, D_{tuy} , qui relie l'ensemble des toilettes à la cuve pour un immeuble de « Résidentiel » est de $D_{tuy,R} = 250 m$ et de $D_{tuy,T} = 250 m$ pour un immeuble « Tertiaire ». En notant $N_{tuy,S}$ le nombre de mètres de tuyaux installés dans le secteur S, on obtient :

$$N_{tuy,S} = N_{im,S} D_{tuy,S} \quad (C.7)$$

Le prix unitaire d'un mètre linéaire de tuyaux est construit sur le même principe que celui des toilettes $p_{tuy,base} = 10e/m$ et un facteur de réduction des coûts à long terme $K_{tuy}^{LT/CT} = 1$, puisqu'il est peu probable que ce prix varie de façon significative. Le coût total du raccord des toilettes aux cuves est alors :

$$P_{tuy} = \sum_S N_{tuy,S} p_{tuy} \quad (C.8)$$

Ce prix est purement fictif dans la mesure où SODEARIF n'a pas pu nous répondre quant aux surcoûts des tuyaux dans les bâtiments équipés d'une collecte sélective d'urines. Les résultats qui en découlent doivent être pris avec toute la prudence nécessaire. Toutefois, ces coûts sont dans les ordres de grandeur du marché.

C.B.4 Cuve

La cuve, elle, est supposée partagée par un nombre fixé de personnes $m_{cuv} = m_{cuv,R} = m_{cuv,T} = 1000$ personnes. Nous pouvons alors calculer le degré de mutualisation des cuves $D_{cuv,S} = \frac{m_{cuv}}{m_{im}}$, qui représente le nombre de cuve par immeuble. En notant $N_{im,S}$ le nombre d'immeubles équipés dans le secteur S, on obtient :

$$N_{cuv,S} = N_{im,S} D_{cuv,S} = \frac{N_S}{m_{cuv}} \quad (C.9)$$

Cette cuve est de volume V_{cuv} , ici fixé à $V_{cuv} = 10 m^3$. En supposant que la vidange de cette cuve est réalisée lorsque le volume d'urine atteint un taux r_{cuv} du volume de la

cuve, supposé donné à $r_{cuv} = 90\%$ pour des raisons de sécurité. On en déduit le nombre de jours au bout desquels la cuve doit être vidée :

$$\tau_{cuv,S} = \frac{r_{cuv} V_{cuv}}{n_{cuv} q_S^j} \quad (C.10)$$

Le prix volumique $p_{cuv,base}^V$ de la cuve est estimé dans le rapport Besson [Besson, 2015] à $p_{cuv,base}^V = 500e/m^3$. Un facteur de coût associé $K_{cuv}^{LT/CT} = \frac{2}{3}$, dû à des réductions d'échelle. À ces coûts s'ajoutent le coût du terrassement supposé fixé et évalué à $p_{ter,base} = 2000e$ et son facteur de coût associé $K_{cuv}^{LT/CT} = 1$, ces coûts étant peu susceptibles d'évoluer à long terme. Finalement le coût unitaire d'une cuve vaut :

$$p_{cuv} = V_{cuv} p_{cuv}^V + p_{ter} \quad (C.11)$$

Le coût total des cuves s'élève à :

$$P_{cuv} = \sum_S N_{cuv,S} p_{cuv} \quad (C.12)$$

Le coût final de l'investissement dans le bâtiment est de :

$$P_{bat} = P_{toi} + P_{tuy} + P_{cuv} \quad (C.13)$$

C.C Transport

Une fois les urines stockées dans la cuve, il faut mettre en place un système de collecte et de transport de ces urines jusqu'aux espaces de traitement. Dans notre étude, nous avons considéré que la collecte en cuve et le transport des urines brutes se feraient par camion. Nous supposons que cette collecte est mutualisée pour tous les secteurs, autrement dit qu'une seule société effectue ce service ou que plusieurs sociétés offrent le même service au même prix (et sont donc parfaitement interchangeables).

C.C.1 Vidange des cuves

En sachant que nos cuves sont de volume V_{cuv} et sont à vider une fois qu'elles atteignent le taux de remplissage r_{cu} , le nombre de cuve total à vider par jour n_{cuv}^j :

$$n_{cuv}^j = \frac{\sum_S q_S^j}{r_{cu} V_{cuv}} \quad (C.14)$$

Nous considérons des camions de volume V_{cam} , ici pris à $V_{cam} = 10 m^3$ pour un camion hydrocureur 26t récent. Pour un produit liquide comme l'urine, nous pouvons considérer que tout le volume disponible peut être occupé sans être en surcharge (informations

données par notre contact chez Veolia). Le nombre de vidanges quotidiennes à effectuer est alors :

$$n_{vid}^j = n_{cuv}^j \cdot \frac{V_{cuv}}{V_{cam}} \quad (C.15)$$

Nous ne prenons pas en compte le taux de remplissage dans ce calcul dans la mesure où ce dernier est un facteur de sécurité.

Nous allons maintenant déterminer la durée d'une vidange. Nous allons considérer que notre territoire est un disque. Pour évaluer le rayon de ce disque, nous allons considérer la densité d_{popu} , égale à $d_{popu} = 685 \text{ hab}/\text{km}^2$ en Essonne (INSEE). Alors la surface moyenne de notre territoire est donnée par $S_{popu} = \frac{\sum_S N_S}{d_{popu}}$. Notre territoire a pour rayon :

$$R_{popu} = \frac{1}{\pi} \sqrt{S_{popu}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sum_S N_S}{d_{popu}}} \quad (C.16)$$

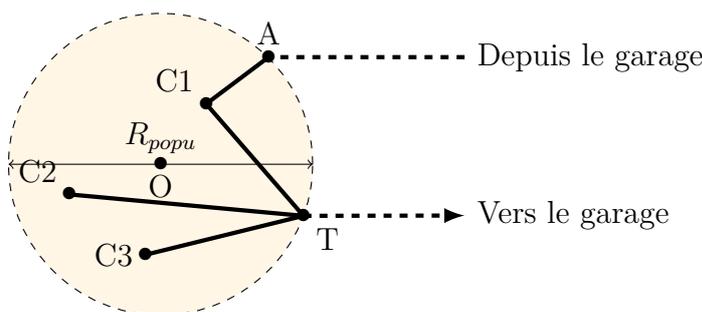


FIGURE C.2 – Schéma d'une collecte sur le territoire

Notre territoire est représenté en FIGURE C.2. Nous supposons que le camion est déjà sur le territoire de collecte et qu'il a mis un temps t_{dep} pour arriver de sa zone de stationnement à la zone considérée. Une fois entré sur le territoire (point A), il va devoir se rendre à la première cuve (point C1). Il va donc effectuer une distance d'au plus $2R_{popu}$ à une vitesse v_{popu} que nous supposons égale à $v_{vil} = 35 \text{ km}/\text{h}$, vitesse de circulation en ville. La durée de déplacement moyenne est alors de $t_{vil} = \frac{16R_{popu}}{9v_{vil}}$ [Dunbar, 1997]. Plus la population est élevée, plus l'estimation de t_{vil} est mauvaise, par excès, dans la mesure où de petites zones se formeront avec chacune leur système de collecte plutôt qu'un énorme pôle.

Notre camion dispose d'un débit de pompage d_{pomp} , dont la valeur varie entre 160 et 400 L/min pour un camion hydrocureur classique. Dans la mesure où les urines brutes sont peu visqueuses, nous prenons une valeur $d_{pomp} = 300 \text{ L}/\text{min}$ proche de la borne supérieur du débit de pompage du camion. Nous supposons que la manutention nécessaire au pompage (installation/désinstallation) prend un temps t_{manu} , que nous fixerons à $t_{manu} = 10 \text{ min}$. La durée totale d'un pompage s'élève à $t_{pomp} = \frac{r_{cuv} V_{cuv}}{d_{pomp}} + t_{manu}$.

Une fois la cuve vidée, le camion va se déplacer jusqu'au site de traitement (point T) que nous supposons en périphérie de la zone sous l'hypothèse qu'une mini-station de nitrification/distillation ou de grandes cuves de stockage ne seraient pas installées en centre ville. Il va donc effectuer une nouvelle fois une distance d'au plus $2R_{popu}$ à une vitesse v_{vil} en un temps t_{vil} . Une fois sur place, il mettra un temps t_{pomp} à vider le contenu du camion sur zone de traitement. Le camion se retrouvera alors en périphérie de la ville pour un nouveau pompage comme à son arrivée sur site (point A). La durée d'une vidange, pompage, transport et stockage compris, est donc :

$$t_{vid} = 2t_{vil} + 2t_{pomp} \quad (C.17)$$

C.C.2 Service en régie

C.C.2.a Matériel

En considérant qu'un employé peut travailler une durée t_{trav}^j par jour. En supposant nos employés travaillent par semaine $t_{trav}^h = 35 h$, nous prenons une durée journalière de travail $t_{trav}^j = 7 h$. Alors un employé peut effectuer un nombre de vidanges par jour égal à son temps de travail t_{trav}^j diminué du temps de déplacement sur site t_{dep} divisé par la durée d'une vidange t_{vid} :

$$n_{vid/emp}^j = \frac{t_{trav}^j - 2t_{dep}}{t_{vid}} \quad (C.18)$$

Dans l'optique d'un service en régie le nombre de camions nécessaires pour assurer le ramassage des urines est alors le rapport entre le nombre de vidanges à effectuer par jour par le nombre de vidanges possibles par jour, le tout ramené à l'entier supérieur :

$$N_{cam} = \text{ceil} \left(\frac{n_{vid}^j}{n_{vid/emp}^j} \right) \quad (C.19)$$

Le prix unitaire d'un camion donné par Veolia est $p_{cam,base} = 260ke$ et un facteur de réduction des coûts à long terme $K_{cam}^{LT/CT} = \frac{5}{6}$, puisque ce prix est susceptible de baisser avec la création de camions davantage adaptés au pompage d'un fluide comme l'urine. L'investissement matériel à effectuer pour un service en régie est de :

$$inv_{mat} = N_{cam} p_{cam} \quad (C.20)$$

À cela s'ajoute les frais de garage du camion. Pour cela, nous allons considérer la surface occupée en garage par un camion, calculée sur la base de la surface du camion et d'un espace d'1m autour de lui. Cette surface est évaluée à $S_{cam} = 52 m^2$. Une étude de marché sur les offres trouvées sur internet permet d'évaluer le prix du mètre carré de

garage dans les environs de Saclay à $p_{gar,uni}^a = 90e$. Les coûts de fonctionnement annuel matériel d'un service en régie est de :

$$p_{mat}^a = N_{cam} S_{cam} p_{gar,uni}^a \quad (C.21)$$

C.C.2.b Humains

Prendre en charge le service de collecte des urines induit des coûts humains. Il faut tout d'abord employer des conducteurs de camions. Le nombre de conducteurs nécessaires est, comme pour le nombre de camions nécessaires, le rapport entre le nombre de cuves à vider par jour par le nombre de vidanges possibles par jour. Toutefois, ce service doit être disponible 365 jours par an et, au contraire d'un camion, un homme n'est pas disponible toute l'année, il a des jours de congés hebdomadaires, des RTT, bénéficie des jours fériés, etc. En 2015, le nombre de jours moyens travaillés s'élève à $t_{trav}^a = 218 \text{ jours}$. Le nombre d'employés nécessaires pour effectuer la conduite des camions est donc :

$$N_{emp,c} = \text{ceil} \left(\frac{n_{vid}^j}{n_{vid/emp}^j} \cdot \frac{365, 25}{t_{trav}^a} \right) \quad (C.22)$$

En notant p_{SMIC}^a le coût annuel pour une entreprise d'un salarié au SMIC, on introduit $c_{emp,c}$, le facteur correctif du salaire d'un employé « conduite », ici pris $c_{emp,c} = 1,3$. Le coût annuel d'un employé dédié à la collecte des urines est alors :

$$p_{emp,c}^a = c_{emp,c} p_{SMIC}^a \quad (C.23)$$

Les camions demandent aussi de l'entretien pour la maintenance classique mais aussi pour l'entretien des cuves et des pompes de ces camions. Nous considérons qu'un technicien garagiste peut s'occuper de $n_{cam,g} = 5$ camions. Alors le nombre d'employés nécessaires pour effectuer la maintenance des camions est :

$$N_{emp,g} = \text{ceil} \left(\frac{N_{cam}}{n_{cam,g}} \cdot \frac{365, 25}{t_{trav}^a} \right) \quad (C.24)$$

On introduit $c_{emp,g}$, le facteur correctif du salaire d'un employé « garage », ici pris $c_{emp,g} = 1,2$. Le coût annuel d'un employé dédié à la maintenance des camions est alors :

$$p_{emp,g}^a = c_{emp,g} p_{SMIC}^a \quad (C.25)$$

Un tel service demande des chefs d'opérations. Nous considérons que les services de collecte se répartissent en groupes de $n_{srv,sup} = 25$ personnes, nombre de personnes moyen évalué pour la gestion de 10 camions. À chaque groupe est assigné un chef, sauf si le groupe est en dessous d'une taille critique estimée à $n_{srv,inf} = 10$ personnes. Le nombre de chef des opérations est donné par :

$$\begin{cases} N_{emp,c} = \text{floor} \left(\frac{N_{emp,c} + N_{emp,g}}{n_{srv,sup}} \cdot \frac{365,25}{t_{trav}^a} \right) & , \text{ si } (N_{emp,g} + N_{emp,c} \bmod n_{srv,sup}) < n_{srv,inf} \\ N_{emp,c} = \text{ceil} \left(\frac{N_{emp,c} + N_{emp,g}}{n_{srv,sup}} \cdot \frac{365,25}{t_{trav}^a} \right) & , \text{ si } (N_{emp,g} + N_{emp,c} \bmod n_{srv,sup}) > n_{srv,inf} \end{cases}$$

On introduit $c_{emp,d}$, le facteur correctif du salaire d'un chef d'opérations, ici pris $c_{emp,d} = 2$. Le coût annuel d'un employé dédié à la conduite des opérations est alors :

$$p_{emp,d}^a = c_{emp,d} p_{SMIC}^a \quad (\text{C.26})$$

Le coût total humain d'un service en régie s'élève à :

$$P_{hum}^a = N_{emp,c} p_{emp,c}^a + N_{emp,g} p_{emp,g}^a + N_{emp,d} p_{emp,d}^a \quad (\text{C.27})$$

C.C.3 Service délégué à une entreprise de transport

Pour un service délégué à une entreprise de transport, le service sera facturé à l'heure travaillée. Pour estimer le nombre d'heures travaillées, nous allons considérer le nombre d'hommes mobilisés par jour à l'aide du rapport du nombre de vidanges à effectuer par jour, n_{vid}^j , et du nombre de vidanges réalisables par un employé par jour, $n_{vid/emp}^j$, le tout par le temps de travail journalier t_{trav}^j . En notant, $p_{cie,h}$ le prix horaire du service d'une entreprise de transport de déchets, évalué entre 120€ et 150€ par Veolia, et son facteur de réduction $K_{cie}^{LT/CT}$, évalué à 1, nous obtenons :

$$p_{cie} = t_{trav}^j \cdot 365,25 \cdot \frac{n_{vid}^j}{n_{vid/emp}^j} \cdot p_{cie,h} \quad (\text{C.28})$$

C.D Traitement

C.D.1 Stockage

Nous considérons ici un traitement par simple stockage hygiénisant des urines. Pour stocker les urines, il faut disposer de cuves de stockage de volume V_{sto} plus grand que celles en bas d'immeuble. Ce volume peut aller de $50m^3$ à $500m^3$ selon SEDE Environnement, nous prendrons $V_{sto} = 200m^3$. Le nombre de ces cuves doit être suffisant pour contenir 6 mois de production d'urines, durée au bout de laquelle on pourra fermer la cuve et laisser reposer les urines 6 mois pour un stockage sanitaire. Il en faudra donc le double au total pour pouvoir tourner à temps plein entre la moitié des cuves en remplissage et la moitié

en stockage sanitaire. Le nombre des cuves N_{sto} est finalement :

$$N_{sto} = 2 \cdot \frac{6Q^m}{V_{sto}} \quad (\text{C.29})$$

Sur la base du calcul effectué en partie collective, le coût unitaire d'une cuve de stockage vaut :

$$p_{sto} = V_{sto} pV_{cuv} + p_{ter} \quad (\text{C.30})$$

Le coût total des cuves s'élève à :

$$P_{sto} = N_{sto} p_{sto} \quad (\text{C.31})$$

C.D.2 Nitrification/Distillation

Nous considérons ici un traitement des urines par nitrification suivie d'une distillation, sur le principe du traitement réalisé par l'EAWAG.

C.D.2.a Machines

Pour stabiliser les urines collectées, il faut les nitrifier. Nous supposons qu'un nitrificateur est associé à une population m_{nit} , ici prise à $m_{nit} = 5000$ habitants. On en déduit alors le nombre de nitrificateurs nécessaires pour assurer le traitement des urines sur le territoire :

$$N_{nit} = \text{ceil} \left(\frac{\sum_S N_S}{m_{nit}} \right) \quad (\text{C.32})$$

On peut alors calculer la quantité journalière d'urine, q_{nit}^j , que chaque nitrificateur doit traiter :

$$q_{nit}^j = \frac{Q^j}{N_{nit}} \quad (\text{C.33})$$

Dans la mesure où la construction d'un nitrificateur ne bénéficie pas de coûts d'échelles conséquents, nous supposons que le prix de nos nitrificateurs sont indexés sur un nitrificateur pouvant traiter 1 m^3 d'urines par jour, on prend $p_{nit,base}^V = 70 \text{ ke}$, puisqu'il est estimé par un bureau d'ingénieur en Afrique du Sud pour une station de traitement avec une capacité de $10 \text{ m}^3/\text{j}$ est de 700 k€ (données EAWAG). Dans la mesure où la filière de traitement des urines n'a pas encore vu le jour industriellement, nous imaginons un facteur de réduction $K_{nit}^{LT/CT} = \frac{1}{7}$, qui est basé sur le fait que l'EAWAG tente actuellement de développer des nitrificateurs de $100\text{L}/\text{jour}$ à 1000€ . Alors l'investissement dans

les nitrificateurs sera de :

$$P_{nit} = N_{nit} q_{nit}^j p_{nit}^V \quad (\text{C.34})$$

Pour faciliter le transport du produit vers les zones de valorisation, il faut distiller les urines nitrifiées. En notant q_{dis}^j , la capacité journalière d'un distillateur, évaluée à $q_{dis}^j = 0,6 m^3$ (modèle KLC Eco 25 de l'EAWAG), nous en déduisons le nombre de distillateurs à installer :

$$N_{dis} = \text{ceil} \left(\frac{Q^j}{q_{dis}^j} \right) \quad (\text{C.35})$$

Nous en déduisons que l'investissement dans les distillateurs, pour un prix unitaire de $p_{dis,base} = 40 ke$ et un facteur de réduction $K_{dis}^{LT/CT} = 1$, la filière étant déjà existante, s'élèvera à :

$$P_{dis} = N_{dis} p_{dis} \quad (\text{C.36})$$

C.D.2.b Énergie

De telles machines sont extrêmement énergivores avec une consommation électrique $c_{elec,nit} = 50 kWh/m^3$ par mètre cube d'urines traité pour le nitrificateur et $c_{elec,dis} = 80 kWh/m^3$ pour le distillateur [Etter et al., 2015]. La consommation électrique annuelle s'élève alors à :

$$c_{elec}^a = Q^a \cdot c_{elec,nit} + c_{elec,dis} \quad (\text{C.37})$$

En notant p_{kWh} , le prix du kilowattheure évalué en France à $p_{kWh} = 0,1467e$, la consommation d'énergie des centres de traitement des urines coûte :

$$p_{elec}^a = c_{elec}^a p_{kWh} \quad (\text{C.38})$$

C.D.2.c Humains

Ces machines vont être réparties dans des centres de traitement, contenant $d_{nit} = 1$ nitrificateurs. Le territoire comportera donc N_{trt} donc le nombre s'élève à :

$$N_{trt} = \frac{N_{nit}}{d_{nit}} \quad (\text{C.39})$$

Il faut ensuite, pour distiller la totalité de l'urine nitrifiée, un nombre d_{dis} distillateurs par centre de traitement :

$$d_{dis} = \text{ceil} \left(\frac{q_{nit}^j}{q_{dis}^j} \right) \quad (\text{C.40})$$

Le nombre total de machines présentes dans les centres de traitement s'élève alors à :

$$d_{mach} = d_{nit} + d_{dis} \quad (C.41)$$

Ces centres de traitements, répartis en périphérie de la zone (FIGURE C.3). La durée de transport entre ces sites, t_{mnt} , vaut $2R\sin\left(\frac{\pi}{N_{trt}}\right)$, qui correspond au chemin le plus court entre deux points du cercle pour des centres équirépartis. En supposant constante la durée d'intervention moyenne par machine, $t_{mach} = 5$ minutes, en une journée de travail, le nombre d'employés nécessaires pour effectuer une surveillance et la maintenance des centres de traitement s'élève à :

$$N_{emp,m} = \text{ceil} \left(\frac{t_{mnt} + d_{mach} t_{mach}}{t_{trav}^j} N_{trt} \cdot \frac{365,25}{t_{trav}^a} \right) \quad (C.42)$$

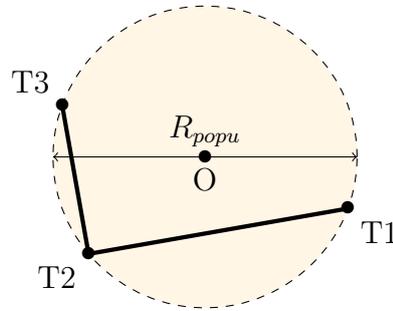


FIGURE C.3 – Schéma d'une maintenance des centres de traitement sur le territoire

On introduit $c_{emp,m}$, le facteur correctif du salaire d'un employé dédié à la maintenance des centres de traitement, ici pris $c_{emp,m} = 1,5$. Le coût annuel d'un employé dédié à la maintenance est alors :

$$p_{emp,m}^a = c_{emp,m} p_{SMIC}^a \quad (C.43)$$

Le coût total humain d'un service de traitement s'élève à :

$$P_{hum}^a = N_{emp,m} p_{emp,m}^a \quad (C.44)$$

C.E Valorisation

En supposant une valorisation en agriculture sous forme d'engrais, nous allons devoir mesurer les quantités de minéraux à forte valeur agronomique présents dans les urines, à savoir l'azote, le phosphore et le potassium. Les urines contiennent en moyenne pour l'azote $C_N = 8,8 g/L$, pour le phosphore $C_P = 0,8 g/L$ et pour le potassium $C_K = 2 g/L$.

Dans notre modélisation de la production, nous faisons une distinction entre la production dans le secteur « Tertiaire » et celui du « Résidentiel » avec le facteur x_S dans la mesure où nous urinons en partie au travail et en partie chez nous. Dans le cas du décompte minéral, il faut prendre en compte le fait que les urines du matin sont deux fois plus concentrées que les urines du reste de la journée. En dose équivalente urine (DEU), nous urinons, selon le même principe, 1x2 DEU le matin chez nous, 2x1 DEU au travail et 2x1 DEU le soir. En conséquence, en notant m_S le facteur d'enrichissement des urines, équivalent de x_S en partie Production, nous obtenons pour un minéral M :

$$q_M^a = \sum_S i_S u_S e_S m_S \cdot 365,25 q^j \cdot C_M \quad (\text{C.45})$$

Nous avons enlevé ici le facteur de dilution puisque les concentrations en minéraux sont données pour des urines brutes.

En sachant qu'un hectare de culture a besoin d'un apport moyen de $q_{N,cible}^a = 100 \text{ kg}$ d'azote par an, la collecte des urines permet d'apporter les nutriments azotés d'une surface :

$$S_{val} = \frac{q_N^a}{q_{N,cible}^a} \quad (\text{C.46})$$

En supposant que nous pouvons vendre ces urines au prix d'une solution azotée sur le marché $p_N = 180e/t$, avec toutefois un discount $r_{dechet} = 30\%$, qui pour des déchets agricoles ou urbains oscille entre 20% et 50% de réduction, la vente des engrais permet de dégager :

$$P_N = (1 - r_{dechet}) p_N \cdot q_M^a \quad (\text{C.47})$$

C.F Comparaison à la filière d'assainissement en STEP

En l'absence de réponse du SIAAP sur le coût du traitement de l'azote en station d'épuration, nous avons décidé d'approximer ce coût de la façon suivante sur les conseils de notre tuteur. Sur les zones où le SIAAP gère le transport et la traitement des eaux usées, la redevance s'élève à 0,91€/m³ en 2014 [SIAAP, 2014]. Dans la mesure où il s'agit du coût SIAAP, il comprend essentiellement les coûts de traitement plus que ceux de gestion du réseau. La redevance de l'AESN pour sa partie « Pollution » s'élève à 0,40 €/m³. On doit rajouter à ces frais, une TVA de 10% sur les eaux usées. Notre parti pris sera d'évaluer la part de ces coûts de traitement imputables à l'azote à 33%. Or, en 2011, le SIAAP a traité 124,2 tonnes d'azote par jour, pour un volume d'eaux usées de 2'075'000 m³ [Caby, 2013]. Sur chaque kilo d'azote entrant, 600g d'azote est rejeté en rivière. La

coût de traitement d'une tonne d'azote, $p^{step}_{trt,N}$, s'élève alors à :

$$p^{step}_{trt,N} = (0,91 + 0,40) \cdot 0,33 \cdot 1,1 \cdot \frac{2075000}{0,4 \cdot 124,2} = 20 \text{ ke/tN} \quad (\text{C.48})$$

On peut donc évaluer le coût évité, $P^{step}_{trt,N}$ du traitement de l'azote de ces urines. Ce coût n'est pas réellement évité à l'heure actuelle puisque les STEP tourneront toujours mais dans le cas où, à grande échelle, la collecte sélective des urines empêche la construction de nouvelles STEP, ce coût sera bien évité (sans compter les coûts de construction évités).

$$P^{step}_{trt,N} = q_N^a p^{step}_{trt,N} \quad (\text{C.49})$$

De la même façon, le SIAAP a consommé 1TWh pour le transport et le traitement des eaux usées en 2014 [SIAAP, 2014]. Le coût énergétique de traitement d'une tonne d'azote, $c^{step}_{trt,N}$, s'élève à :

$$c^{step}_{trt,N} = \frac{10^6}{0,4 \cdot 124,2 \cdot 365,25} \cdot 0,33 = 18 \text{ MWh/tN} \quad (\text{C.50})$$

Nous ne considérerons pas dans notre modèle les coûts dus au traitement du phosphore, puisque, dans nos hypothèses, l'azote est le facteur dimensionnant des STEPs.

Annexe D

Analyse réglementaire

Au niveau européen, deux directives encadrent l'assainissement au sein de l'Union :

- la directive n°91/271 du 21/05/91 relative au traitement des eaux résiduaires urbaines (dite DERU). Elle fixe notamment les teneurs en polluants des rejets sortant des stations d'épuration ;
- la directive cadre sur l'eau n°2000/60/CE (DCE). Elle impose aux Etats membres des objectifs de bon état écologique et chimique des masses d'eaux de surface et souterraines. Au niveau national, la DCE a été transposée à travers la loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques qui a depuis été intégrée pour partie au code de l'environnement, pour partie au code de la santé publique et au code général des collectivités territoriales.

La collecte sélective de l'urine est confrontée à différents problématiques juridiques qu'il convient d'examiner :

1. Les conditions à respecter pour l'installation d'un tel système dans un projet de construction. Ce point doit être analysé du point de vue du code de l'urbanisme (CU) s'agissant de l'obtention du permis de construire ou d'aménager, ainsi que du code de la santé publique (CSP) et du code général des collectivités territoriales (CGCT), pour ce qui a trait à l'encadrement de l'assainissement (collectif ou non collectif) ;
2. La responsabilité de l'installation de collecte sélective des urines et de son exploitation (CGCT) ;
3. Les conditions d'utilisation de ces effluents en agriculture, et notamment la classification en produit ou déchet de l'urine.

D.A Installation d'un système de collecte sélective

D.A.1 Système d'assainissement collectif ou non collectif ?

Le code de l'urbanisme regroupe les dispositions législatives et réglementaires visant à obtenir un aménagement de l'espace et d'utilisation des sols conforme à l'objectif d'aménagement des collectivités et de l'intérêt général. À cet effet, l'article L. 421-6 du CU dispose que « *le permis de construire ou d'aménager ne peut être accordé que si les travaux projetés sont conformes aux dispositions législatives et réglementaires relatives à l'utilisation des sols, à l'implantation, la destination, la nature, l'architecture, les dimensions, l'assainissement des constructions et à l'aménagement de leurs abords et s'ils ne sont pas incompatibles avec une déclaration d'utilité publique.* »

En outre, l'article R. 111-8 du CU dispose que « *l'alimentation en eau potable et l'assainissement des eaux domestiques usées, la collecte et l'écoulement des eaux pluviales et de ruissellement ainsi que l'évacuation, l'épuration et le rejet des eaux résiduaires industrielles, doivent être assurés dans des conditions conformes aux règlements en vigueur* ». Dans le cas présent, la question de la réglementation en vigueur se pose. Actuellement, deux systèmes d'assainissement sont prévus dans les CU et CGCT :

- L'assainissement collectif avec un réseau d'assainissement public recevant les eaux usées et une épuration soumise à l'obligation de résultats ;
- L'assainissement non collectif : « *Peuvent être placées en zones d'assainissement non collectif les parties du territoire d'une commune dans lesquelles l'installation d'un système de collecte des eaux usées ne se justifie pas, soit parce qu'elle ne présente pas d'intérêt pour l'environnement et la salubrité publique, soit parce que son coût serait excessif.* » mis en place par les propriétaires avec une épuration soumise à l'obligation de moyens.

Aux termes de l'article L. 2224-10 du CGCT, il est précisé que les communes ou EPCI délimitent, après enquête publique les zones d'assainissement collectif (où ils sont tenus d'assurer la collecte des eaux usées domestiques et le stockage, l'épuration et le rejet ou la réutilisation de l'ensemble des eaux collectées) et les zones relevant de l'assainissement non collectif (où elles sont tenues d'assurer le contrôle de ces installations et, si elles le décident, le traitement des matières de vidange et, à la demande des propriétaires, l'entretien et les travaux de réalisation et de réhabilitation des installations d'assainissement non collectif). Cette délimitation peut être réalisée par le biais du règlement du plan local d'urbanisme (PLU) (art. L. 123-1-5 du CU).

Article R. 2224-7 du CGCT

Pour une habitation ne disposant pas de réseau de collecte, l'article R. 111-10 du CU impose à l'assainissement non collectif de respecter le R. 2224-17 du CGCT qui dispose que le système doit permettre la préservation de la qualité des eaux et que les prescriptions techniques qui leur sont applicables sont définies par des arrêtés ministériels différents par rapport à un seuil portant sur la charge brute de pollution organique fixé à 1,2kg/j :

- Arrêté du 7 mars 2009 des ministres de la santé, de l'environnement et du logement pour charge inférieure ou égale à 1,2kg modifié par l'arrêté du 7 mars 2012 ;
- Arrêté des ministres de la santé et de l'environnement en application de l'article R. 2224-11 du CGCT qui fixe les prescriptions techniques minimales qui permettent de garantir l'efficacité de l'épuration des eaux usées notamment les paramètres suivants : DBO, MES, phosphore et azote. Il s'agit de l'arrêté du 21 juillet 2015 *relatif à la collecte, au transport, au traitement des eaux usées des agglomérations d'assainissement ainsi qu'à la surveillance de leur fonctionnement et de leur efficacité et aux dispositifs d'assainissement non collectif, recevant une charge brute de pollution organique supérieure à 1.2 kg/j de DBO* qui fixe les règles techniques qui régissent le fonctionnement des systèmes d'assainissement en France.

L'article R.2224-10 du CGCT impose en outre que chaque agglomération d'assainissement, dont la charge brute de pollution organique est supérieure à 120kg doit être équipée d'un système de collecte des eaux usées qui respecte les prescriptions techniques d'un arrêté ministériel. En outre, l'article R. 2224-13 du CGCT définit que ce traitement doit être « *biologique avec décantation secondaire ou un traitement ayant un pouvoir épuratoire équivalent* ».

La question se pose de savoir si la collecte sélective de l'urine est une installation relevant de l'assainissement collectif ou non collectif. Dans le cas d'espèce, la collecte sélective de l'urine ne rentre *a priori* pas dans les catégories prévues par la législation. En effet, le bâtiment sera bien raccordé au réseau d'assainissement collectif pour l'ensemble des effluents mais pas pour l'urine qui sera stockée sur place avant d'être vidangée et transportée pour être valorisée. La collecte de l'urine serait donc plus proche d'un assainissement non collectif. Néanmoins, la valorisation des produits de l'assainissement non collectif doit être réalisée sur le lieu de production, sur la « parcelle » au sens de la réglementation, ce qui ne serait pas le cas pour la collecte de l'urine. Ces dispositions démontrent que la collecte de l'urine ne fait l'objet aujourd'hui d'aucun encadrement réglementaire. Toutefois, il est à noter que l'installation de système non collectif, comme des toilettes sèches, est autorisée dans les zones d'assainissement collectif conformément à la réponse du ministre chargé du

La notion de « parcelle », qui apparaît dans l'arrêté du 7 mars 2009 pour encadrer l'évacuation des eaux usées traitées (article 11 et 12), le traitement par le sol (art. 6) ou les sous-produits des toilettes sèches (art. 17) n'est pas clairement définie. Il paraît réaliste de l'entendre au sens de la parcelle cadastrale.

développement durable à une question écrite à l'Assemblée nationale en 2010.

Nonobstant ces éléments, dans une phase d'émergence d'un système de collecte de l'urine, ce vide juridique ne semble pas interdire le développement de projets si ces derniers respectent l'esprit et les principes qui régissent les textes législatifs et réglementaires. L'objectif est d'éviter tout risque sanitaire et de pollution des milieux naturels par les effluents domestiques. À cet effet, le système de collecte sélective des urines doit faire l'objet de garanties équivalentes à celles imposées notamment aux systèmes d'assainissement non collectif pour ce qui concerne plus particulièrement la cuve, la protection contre les pollutions, la traçabilité, l'entretien du système. Toutefois, une évolution des textes réglementaires doit être envisagée pour permettre le développement de ce système à plus grande échelle. Pour le premier projet pilote, un dossier devrait être préalablement transmis à la DDT afin de définir les caractéristiques techniques du projet et définir si une dérogation à titre expérimentale est nécessaire. L'Agence régionale de la santé (ARS) et les collectivités chargées de l'assainissement devront également être interrogées.

D.A.2 La valorisation de la l'urine collectée au regard de la loi sur l'eau

Conformément à l'analyse de notre tuteur, la valorisation de l'urine issue d'un système de collecte sélective semble relever des dispositions de l'article R. 214-1 et suivants du code de l'environnement qui définissent les projets qui sont soumis aux prescriptions de la loi sur l'eau et déterminent le régime dont ils relèvent. Aux termes de ces articles, la collecte sélective de l'urine semble entrer dans la rubrique 2.1.4.0 de la nomenclature eau : « épandage d'effluents ou de boues, à l'exception de celles visées à la rubrique 2.1.3.0 (boues issues du traitement des eaux usées) » :

- si l'azote total est supérieur à 10 t/an ou le volume annuel est supérieur à 500 000 m³/an ou DBO5 est supérieure à 5 t/an alors le projet est soumis à autorisation ;
- si l'azote total est compris entre 1 t/an et 10 t/an ou le volume annuel est compris entre 50 000 et 500 000 m³/an ou le DBO5 est comprise entre 500 kg et 5 t/an alors le projet soumis à déclaration.

Au regard des caractéristiques du projet pilote, avec une production annuelle projetée de 1,5 t/an (cf. PARTIE III.C), le projet d'installation de collecte sélective de l'urine serait soumis à déclaration. Un dossier de déclaration devra donc être réalisé dans ce cadre et transmis à la DDT. Ce dossier devrait permettre de lever les incertitudes juridiques liées à l'absence d'encadrement réglementaire de ce type de système d'assainissement.

Question écrite n°73941 dont la réponse a été publiée au Journal officiel le 19 avril 2011

Il ressort de ces éléments que le projet ne pourrait être en conformité avec la réglementation d'urbanisme que dès lors qu'il assure et garantit le respect de l'environnement dans lequel il est mis en place. Autrement dit, il s'agira de démontrer que le système de collecte et de valorisation ne représente pas un danger pour les sols. Ces éléments pourront être élaborés en collaboration avec les services de l'Etat chargés d'instruire la déclaration au titre de la loi sur l'eau.

D.B Responsabilité du système de collecte sélective des urines et de son fonctionnement

La qualification du système en assainissement collectif ou assainissement non collectif a une influence déterminante sur la répartition des responsabilités de l'ensemble du système.

En effet, si le système est considéré comme un assainissement non collectif, aux termes de l'article L. 1331-1-1 du CSP, le propriétaire est responsable de l'installation et de son entretien. La collectivité doit en outre assurer le contrôle de ce bon entretien conformément aux dispositions de l'article L. 2224-8 du CGCT qui dispose que « *pour les immeubles non raccordés au réseau public de collecte, la commune assure le contrôle des installations d'assainissement non collectif* ». Aussi, dans ces conditions, la cuve serait sous la seule responsabilité du propriétaire du bâtiment, ce qui pourrait complexifier l'exploitation du système et freiner son développement si une solution exploitée par un syndicat d'assainissement était retenue. Néanmoins, le CGCT prévoit la possibilité pour la commune de prendre en charge « *le traitement des matières de vidanges issues des installations d'assainissement non collectif* » et « *à la demande des propriétaires, l'entretien et les travaux de réalisation et de réhabilitation des installations d'assainissement non collectif* ». Par analogie et en considérant cet article de manière extensive, il apparaît juridiquement réaliste de prévoir que la collectivité se charge ensuite de la gestion des urines collectées dans les cuves.

Néanmoins, il pourrait apparaître plus pratique de considérer ce système comme un assainissement collectif au sens où la collectivité assure la responsabilité de la collecte à partir de la cuve de stockage en pied de bâtiment. Une telle solution présente l'avantage de lever les freins qui pourraient exister dans le cas d'une gestion du système par les propriétaires des bâtiments qui seraient obligés d'assurer l'entretien des cuves. Dans cette optique cela conduirait à prévoir l'installation de la cuve dans le domaine public pour permettre de considérer que l'assainissement est collectif.

Article L. 2224-8 du CGCT
2° de l'art. L. 2224-10 du CGCT) ».

On voit ici que la classification du système de collecte peut jouer un rôle important dans les conditions de réussite d'un tel projet. Pour un projet pilote il pourrait être envisagé qu'une convention puisse être conclue entre le propriétaire et le service public d'assainissement en cas de classification en assainissement non collectif afin que ce dernier prenne en charge l'entretien de la cuve.

Pour la suite du processus, dans les deux cas de figure, la vidange et le transport sera à la charge de la collectivité et de son syndicat d'assainissement. Les investissements et les charges attachés à la collecte sélective des urines pourraient ensuite être financés au travers de la redevance d'assainissement conformément à l'article L. 2224-12-3 du CGCT.

S'agissant de l'entretien du système, si aucun texte n'encadre aujourd'hui ce type de système, un travail avec la DDT, la DDPP et l'ARS devrait être entamé pour définir les modalités selon lesquelles celui-ci pourrait être réalisé. *A priori*, il semble possible de s'appuyer sur les conditions d'entretiens définies pour les installations d'assainissement non collectif prévues :

- soit par l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5 ;
- soit par l'arrêté du 7 mars 2012 modifiant l'arrêté du 7 septembre 2009 fixant les prescriptions techniques applicables aux installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5. Ces éléments devront faire l'objet d'un travail entre le porteur du projet, le syndicat d'assainissement, la commune et les services de l'État chargés de l'application de la réglementation.

Bien que demeure un aléa juridique quant à la faisabilité juridique d'un système de collecte sélective des urines, à la catégorie d'assainissement correspondant et à leur valorisation en agriculture, essentiellement en raison du fait qu'un tel système n'a jusqu'alors pas été envisagé dans les lois et réglementations applicables, la lecture des textes existants conduisent à penser que ce système ne rencontre pas d'obstacles juridiques majeurs, dès lors qu'il se destine à être réalisé dans le strict respect des dispositions encadrant l'assainissement et la protection des milieux aquatiques et en les considérant de manière extensive. Il apparaît néanmoins important que les services de l'Etat soient associés dès le démarrage du projet afin de permettre son émergence bien que rien ne soit prévu dans le droit positif. Pour une phase de généralisation, il sera nécessaire que le corpus juridique soit modifié en conséquence pour encadrer spécifiquement ce type de système d'assainissement écologique.

D.C Les conditions de valorisation de l'urine collectée : la question du statut de l'urine.

Juridiquement l'urine doit aujourd'hui être considérée comme un déchet. Aux termes de l'article L. 541-1-1 du code de l'environnement, un déchet est « *toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire* ». Cette notion et toutes les garanties qui y sont attachées ont été fondées juridiquement dans l'objectif de prévenir les atteintes à la santé publique et à l'environnement. Le statut juridique de déchet issu du code de l'environnement permet d'appliquer les principes qui y sont associés : principe pollueur-payeur, principe de prévention, principe de responsabilité élargie du producteur, principe de proximité et traçabilité. Néanmoins, le statut de déchet peut-être un frein, notamment économique et juridique, à la valorisation de substances telles que les urines qui pourraient constituer des ressources *in fine*.

C'est dans ce cadre que la classification en produit apparaît intéressante. La notion de produit relève du code de la consommation. Un produit peut être commercialisé et utilisé librement sans demande d'autorisation, contrairement au déchet. Dans le cas de l'urine, le statut de produit permettrait de la vendre au même titre que tous les engrais industriels et d'éviter la mise en place d'un plan d'épandage par le fournisseur et sous sa responsabilité.

La directive cadre déchets 2008/08/CE du 19 novembre 2008 permet d'envisager la sortie du statut de déchet d'une substance sous conditions. En droit national, cette possibilité a été intégrée au code de l'environnement notamment par l'article L. 541-4-3 qui fixe les critères à satisfaire pour qu'une substance cesse d'être un déchet. Le décret n°2012-602 du 30 avril 2012 relatif à la procédure de sortie du statut de déchet est venu en préciser les modalités concrètes d'application, complété ensuite par les arrêtés du 19 juin 2015 relatif aux principes du système de gestion de la qualité et du 3 octobre 2012 relatif au contenu du dossier de demande de sortie du statut de déchet.

En pratique, pour qu'un déchet perde cette qualification et devienne un produit, il doit avoir subi une opération de valorisation le rendant utilisable sans danger pour la santé humaine et l'environnement. Chaque dossier doit faire l'objet d'un avis formulé par la Commission consultative sur le statut de déchet.

D'un point de vue purement technique, l'urine semble pouvoir répondre aux exigences liées à la qualification de produit notamment au regard des éléments présentés dans le rapport de l'Organisation nationale de la santé (OMS) relatif à l'utilisation sans risque

des excréta[OMS, 2012], aujourd'hui seul encadrement international sur la réutilisation de l'urine. Ce rapport indique que le stockage des urines est une opération de valorisation des urines suffisante pour permettre de les rendre utilisables sans danger pour la santé humaine (avec des conditions de temps de stockage selon la température et une logique multi-barrières). Le stockage pourrait donc constituer une opération de valorisation permettant à l'urine d'acquérir un statut de produit. En outre, selon des éléments échangés avec l'EAWAG, les urines nitrifiées et distillées suivant le procédé VUNA viendraient d'obtenir en Suisse l'agrément pour devenir un produit, avec restriction d'usage aux cultures non alimentaires et une étude de trois ans demandée par l'Etat avant de pouvoir statuer sur la possibilité et les conditions d'extension à l'usage pour les cultures alimentaires.

Ainsi, les démarches pourraient être menées pour modifier le statut de l'urine pour faire passer la substance de déchet à produit et ainsi faciliter sa valorisation. Néanmoins, l'expérience actuelle en France des boues des stations d'épuration ou des digestats de méthaniseurs avec les difficultés rencontrées pour obtenir le statut de produit conduit à rester extrêmement prudent sur cette possibilité pour l'urine à moyen terme. Néanmoins, il serait intéressant que des démarches soient engagées dès le développement du projet pilote afin d'initier le processus de demande. Ce dernier nécessitera des données scientifiques relatives à l'utilisation de l'urine et à l'effet sur les sols. Dès lors, il paraît intéressant d'accumuler les données nécessaires pour la démarche de qualification en produit de l'urine dès le suivi scientifique qui pourrait être mis en place pour le projet pilote. En outre si l'utilisation de l'urine devait être envisagée sur des plates-formes de compostage, il serait nécessaire que l'urine soit positionnée dans la liste des déchets fixées à l'annexe II de l'article R. 541-8 du code de l'environnement. Cette démarche est actuellement à l'étude dans un groupe de travail qui regroupe l'association Toilettes du Monde, le Réseau d'Assainissement Écologique et l'ADEME. L'objectif est de mener des analyses microbiologiques, physico-chimiques et agronomiques afin d'estimer les potentiels impacts sanitaires et environnementaux et permettre la classification de l'urine dans la liste et ainsi permettre l'utilisation de l'urine par exemple sur des plates-formes de compostage.

Si pour le développement du système d'assainissement et la valorisation de l'urine le statut de produit présenterait un avantage indéniable, notamment d'un point de vue économique et pour apporter des garanties de qualité pour les agriculteurs, il paraît illusoire de considérer cette hypothèse comme réaliste à moyen terme. L'urine doit être examinée comme un déchet pour le développement du système. Toutefois, les démarches doivent être entreprises dès le démarrage du projet pilote pour faire évoluer l'urine collectée en produit à plus long terme.

Table des figures

I.1	Répartition de l'azote et du phosphore dans les urines et les fèces	7
I.2	Une évolution des stations d'épuration dictée par le traitement de l'azote (adapté d'un schéma de l'EAWAG)	10
I.3	Eutrophisation d'une rivière française (Source : http://www.cpepesc.org)	11
I.4	Algues vertes sur une plage bretonne (Source : http://www.plancton-du-monde.org)	11
I.5	Répartition de la charge volumique, de l'azote et du phosphore dans les eaux usées [Caby, 2013]	12
I.6	Principe de fonctionnement de toilettes à séparation d'urines [Caby, 2013]	15
I.7	Modèle de la firme allemande Roediger de toilettes à séparation (Source : www.green-talk.fr)	15
I.8	Système technique de la séparation des urines à la source (Schéma adapté de [Schönning, 2001])	16
I.9	La bande plus verte du milieu a reçu un traitement à l'urine alors que les bandes adjacentes n'ont rien reçu (Source : http://news.nationalgeographic.com/news/2014/02/140202-peecycling-urine-human-waste-compost-fertilizer/)	28
I.10	Résultats des tests de pouvoir agronomique réalisés par le projet VUNA, en comparaison de fertilisants azotés et phosphorés [Etter et al., 2015]	29
I.11	Part de surfaces en grandes cultures recevant du phosphate minéral [Agreste, 2014]	31
I.12	Part des surfaces fertilisées avec de l'azote minéral [Agreste, 2014]	31
I.13	Fertilisation azotée en grande culture [Agreste, 2014]	31
I.14	Évolution du prix d'achat des engrais en France entre 1970 et 1990 (indice moyen annuel base 100 en 2005) (Source : Agreste 2013 tiré de EscoMafor)	32
I.15	Bilan azote des "sols agricoles" 2010 - 2050 [Couturier et al., 2014]	33
I.16	Teneurs en cadmium dans les boues d'Achères (Seine-Aval) [Baize et al., 2006]	34
I.17	Le projet Paris-Saclay au sein du Grand Paris (Source EPPS)	37
I.18	Les six piliers de l'éco-territoire de Paris-Saclay (Source EPPS)	37
I.19	Les chiffres clés du projet urbain du Moulon (Source EPPS)	39
I.20	Plans de l'îlot proposé pour étude (Source EPPS)	40
II.1	Résumé des différentes étapes de la méthodologie employée	44
II.2	Catégories d'acteurs identifiées dans la chaîne technique	45
II.3	Contexte d'inscription de la chaîne technique	46
II.4	Reproduction d'un tableau d'acteurs potentiels	49

II.5	Ensemble des choix de notre jeu d'acteurs	50
II.6	Exemple d'un jeu d'acteurs au cours d'un entretien avec un agriculteur . .	51
III.1	Teneur en azote de différents intrants organiques : coefficients forfaitaires .	84
III.2	La courbe en S de diffusion des innovations	86
III.3	Scénario 1 – la filière de base d'hygiénisation des urines	89
III.4	Scénario S1a – Hygiénisation avec collecte par l'agriculteur et stockage dans l'exploitation agricole	89
III.5	Scénario S1b – Hygiénisation avec transport en régie ou DSP puis stockage dans l'exploitation agricole	90
III.6	Scénario S1c – Hygiénisation mutualisée à l'échelle du territoire	91
III.7	Scénario S2 – La filière de compostage de déchets verts	92
III.8	Scénario S3 – La filière d'engrais liquide azoté	93
III.9	Scénario S3a – La filière d'engrais liquide azoté à l'échelle de l'îlot (décent- ralisé)	94
III.10	Scénario S3b – La filière d'engrais liquide azoté à l'échelle du territoire . .	95
III.11	Scénario S3c – La filière d'engrais liquide azoté à l'échelle régionale	96
III.12	Emplacement des stations d'épuration en Ile-de-France (Source : www.siaap.fr)	96
III.13	Scénario S4 – La filière d'engrais solide phosphaté	97
III.14	Scénario S4a – La filière d'engrais solide phosphaté à l'échelle de l'îlot . .	97
III.15	Scénario S4b – La filière d'engrais solide phosphaté à l'échelle du territoire	98
III.16	Scénario S4c – La filière d'engrais solide phosphaté à l'échelle régionale . .	98
III.17	Scénario S5 – Un traitement des urines dans les STEPs existantes	99
IV.1	Synthèse de la filière imaginée pour un prototype	138
IV.2	Synthèse de la filière imaginée à long terme	140
IV.3	Représentation du processus de la théorie C-K (Sophie Colasse et Michel Nakhla)	141
B.1	Chaîne d'acteurs établie par Le Sommer Environnement	153
B.2	Chaîne d'acteurs établie par la SEDE Environnement	154
B.3	Chaîne d'acteurs établie par le SIAVB	154
B.4	Chaîne d'acteurs établie par Veolia	155
B.5	Chaîne d'acteurs établie par un agriculteur	155
C.1	Principe du calcul de la production et du recueil des urines	158
C.2	Schéma d'une collecte sur le territoire	161
C.3	Schéma d'une maintenance des centres de traitement sur le territoire . . .	167

Table des tableaux

I.1	Performances des procédés de traitement des urines en fonction des objectifs poursuivis	25
I.2	Composition des urines	26
II.1	Liste des acteurs contactés au cours de notre étude	47
III.1	Production d'azote et de phosphore par la collecte des urines d'1 million de personnes	82
III.2	Livraisons annuelles en azote et en phosphore déclarés par l'UNIFA	82
III.3	Modélisation d'un prototype - Caractéristiques principales	107
III.4	Modélisation d'un prototype - Production	107
III.5	Modélisation d'un prototype - Filière du bâtiment	108
III.6	Modélisation d'un prototype - Filière du transport	109
III.7	Modélisation d'un prototype - Filière du traitement	110
III.8	Modélisation d'un prototype - Valorisation	111
III.9	Modélisation d'un prototype - Comparaison à la filière d'assainissement actuel	112
III.10	Modélisation d'une collecte à grande échelle - Caractéristiques principales	113
III.11	Modélisation d'une collecte à grande échelle - Production	113
III.12	Modélisation d'une collecte à grande échelle - Filière du bâtiment	114
III.13	Modélisation d'une collecte à grande échelle - Filière du transport	115
III.14	Modélisation d'une collecte à grande échelle - Filière du traitement	116
III.15	Modélisation d'une collecte à grande échelle - Valorisation	117
III.16	Modélisation d'une collecte à grande échelle - Comparaison à la filière d'assainissement actuel	118

Bibliographie

- [Abitbol et al., 2014] Abitbol, L., Blavot, C., Duret, B., Georgeault, G., Mat, N., Rault, M., and Vallius, C. (2014). *Écologie industrielle et territoriale : le guide pour agir dans les territoires*. Technical report, CGDD.
- [Agreste, 2014] Agreste (2014). *La fertilisation*. Technical report, Agreste.
- [Ajzen, 1991] Ajzen, I. (1991). *The theory of planned behavior. Organizational Behavior and Human Decision Processes*. Harvard University Press.
- [Aubry et al., 2014] Aubry, C., Barbier, R., Lupton, S., and Pradel, M. (2014). *Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduelles sur les sols à usage agricole et forestier*. Technical report, Expertise scientifique collective INRA, CNRS, IRSTEA,.
- [Baize et al., 2006] Baize, D., Courbe, C., Suc, O., Schwartz, C., Tercé, M., Bispo, A., Sterckman, T., and Ciesielski, H. (2006). *Épandages de boues d'Épuration urbaines sur des terres agricoles*.
- [Barbier, 2002] Barbier, R. (2002). *La fabrique de l'utilisateur. Le cas de la collecte sélective des déchets. Flux n° 48/49*.
- [Berne, 2009] Berne, B. (2009). *Compte-rendu de voyage d'étude - Eco-assainissement - l'expérience suédoise*. Technical report, Toilettes du Monde.
- [Berthet et al., 2014] Berthet, E., Bretagnolle, V., and Segrestin, B. (2014). *Surmonter un blocage de l'innovation par la conception collective. Cas de la réintroduction de luzerne dans une plaine céréalière. Fourrages, 217 :13–21*.
- [Besson, 2015] Besson, M. (2015). *Étude des réalisations internationales et simulation d'un scénario de séparation à la source*. PhD thesis, INSA Toulouse.
- [Bidaud, 2013] Bidaud, F. (2013). *Transitions vers la double performance : quelques approches sociologiques de la diffusion des pratiques agroécologiques*. Technical report, Centre d'études et de prospective.
- [Billen and Garnier, 2008] Billen, G. and Garnier, J. (2008). *Eutrophication des cours d'eau du bassin de la Seine*. Technical report, AESN.
- [Blume and Winker, 2011] Blume, S. and Winker, M. (2011). *Three years of operation of the urine-diversion system in GTZ headquarters in Germany; user opinions and maintenance challenges. Water Sci Technol*.
- [Caby, 2013] Caby, A. (2013). *Quel intérêt et quelle opportunité de mettre en place une collecte sélective des urines en milieu urbain dense ? Étude sur le territoire du SIAAP*. PhD thesis, École des Ponts ParisTech & AgroParisTech.

- [Couturier et al., 2014] Couturier, C., Doublet, S., Devauchelle, E., Charru, M., and Pointerau, P. (2014). *Afterres 2050 : Un scénario soutenable pour l'agriculture et l'utilisation des terres en France à l'horizon 2050*. Technical report, Solagro.
- [Crozier, 1977] Crozier, M. (1977). *L'acteur et le système*. Seuil.
- [Dunbar, 1997] Dunbar, S. (1997). The average distance between points in geometric figures. *The College Mathematics Journal*.
- [EPPS, 2012] EPPS (2012). *Etablissement public Paris-Saclay – Schéma de développement territorial*. Technical report, EPPS.
- [EPPS, 2014] EPPS (2014). *Le projet urbain de Moulon*. Technical report, EPPS.
- [Esculier et al., 2014] Esculier, F., Tabuchi, J., and Créno, B., editors (2014). *Nutrient and energy flows related to wastewater management in the Greater Paris : the potential of urine source separation under global change constraints*. International conference on Water, Megacities and global change.
- [Etter et al., 2015] Etter, B., Udert, K., and Gounden, T. (2015). *VUNA Final Report*. Technical report, Eawag.
- [Fishbein and Ajzen, 2010] Fishbein, M. and Ajzen, I. (2010). *Predicting and changing behavior : The reasoned action approach*. New York : Psychology Press.
- [Grenier and Guitton-Philippe, 2010] Grenier, C. and Guitton-Philippe, S. (2010). Politiques publiques et innovation : proposition d'un modèle d'agir de l'innovation dans le champ sanitaire et social. *Management & Avenir 5/2010 n° 35*.
- [Grégoire and Chaussénéry, 2008] Grégoire, P. and Chaussénéry, R. (2008). *Le service d'assainissement en France : principales données*. Technical report, CGDD.
- [Hatchuel and Weil, 2009] Hatchuel, A. and Weil, B. (2009). C-K design theory : an advanced formulation. *Research in Engineering Design*, 19 :181–192.
- [Héduit et al., 2001] Héduit, A. et al. (2001). *Traitement de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités*. Technical report, CEMAGREF.
- [Jönsson, 2001] Jönsson, H. (2001). *Urine separation - Swedish experiences*. *EcoEng Newsletter*.
- [Kvarnström et al., 2006] Kvarnström, E., Emilsson, K., Richert Stintzing, A., Johansson, M., Jönsson, H., af Petersens, E., Schönning, C., Christensen, J., Hellström, D., Qvarnström, L., Ridderstolpe, P., and Drangert, J. (2006). *Urine diversion : one step towards sustainable sanitation*. Technical report, EcoSanRes.
- [Larsen and Lienert, 2007] Larsen, T. and Lienert, J. (2007). *NoMix - A new approach to urban water management*. Technical report, Novaquatis & EAWAG.
- [Larsen et al., 2013] Larsen, T., Udert, K., and Lienert, P. (2013). *Source separation and decentralization for wastewater management*. Technical report, IWA.

- [Maksimovic et al., 2001] Maksimovic, C., Tejada-Guibert, J., and Roche, P. (2001). *Les nouvelles frontières de la gestion urbaine de l'eau - Impasse ou espoir ?* Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [Melquiot, 2003] Melquiot, P. (2003). *1.001 mots et abréviations de l'environnement et du développement durable*. Recyconsult.
- [OMS, 2012] OMS (2012). Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères-Chap IV Utilisation des excréta et des eaux ménagères en agriculture. Technical report, OMS.
- [Oural, 2015] Oural, A. (2015). L'innovation au pouvoir ! Pour une action publique réinventée au service des Territoires. Technical report, Ministère de la Décentralisation et de la Fonction publique.
- [Pasquier, 2012] Pasquier, H. (2012). *Définir l'acceptabilité sociale dans les modèles d'usage : vers l'introduction de la valeur sociale dans la prédiction du comportement d'utilisation*. PhD thesis, Université Rennes 2.
- [Pronk, 2007] Pronk, W. (2007). Traitement de l'urine : de l'expérimentation à la pratique. Technical report, EAWAG.
- [Roethlisberger and Dickson, 1939] Roethlisberger, F. and Dickson, W. (1939). *Management and the Worker*. Harvard University Press.
- [Schönning, 2001] Schönning, C. (2001). Urine diversion – hygienic risks and microbial guidelines for reuse. Technical report, Swedish Institute for Infectious Disease Control.
- [SIAAP, 2014] SIAAP (2014). Rapport d'activité et de développement durable - Les indicateurs techniques, financiers et de développement durable. Technical report, SIAAP.
- [Spångberg et al., 2014] Spångberg, J., Tidåker, P., and Jönsson, H. (2014). Environmental impact of recycling nutrients in human excreta to agriculture compared with enhanced wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 493 :209–219.
- [Steffen et al., 2015] Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S., de Vries, W., de Wit, C., and al. (2015). Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223) :1259855.
- [Terrade et al., 2009] Terrade, F., Pasquier, H., Reerinck-Boulanger, J., Guingouain, G., and Somat, A. (2009). L'acceptabilité sociale : la prise en compte des déterminants sociaux dans l'analyse de l'acceptabilité des systèmes. *Le travail humain 2009/4 (Vol. 72)*.
- [Tilley et al., 2014] Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., and Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of sanitation systems and technologies*. Eawag.
- [UNIFA, 2005] UNIFA (2005). Parlons fertilisation : Les principaux éléments fertilisants. Technical report, UNIFA.

- [van Enk and al., 2011] van Enk, R. and al. (2011). The phosphate balance : current developments and future outlook. Technical report, InnovationNetwork and Courage and Kiemkracht.
- [Weick and Roberts, 1993] Weick, K. and Roberts, K. (1993). Collective Mind in Organizations : HEedfull Interrelating on Flight Decks. *Administrative Science Quaterly* n° 38.
- [Winker and Tettenborn, 2011] Winker, M. and Tettenborn, F., editors (2011). *Urine separation accomplished, what comes next ? - Newest experiences of on-site treatment and transport by pipe or truck*. SWITCH Paris Conference.