

Perspectives de transition du secteur de l'assainissement individuel en Wallonie.

YANNIS GOVAERTS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADEMIQUE 2021 - 2022

ENCADRANTS : ANGELIQUE LEONARD, LUC MINNE ET PHILIPPE HEBERT

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique * de Gembloux Agro-Bio Tech.
Le présent document n'engage que son auteur.

© Any reproduction of this document, by any means whatsoever, may only be made with the authorization of the author and the academic authority of † Gembloux Agro-Bio Tech.
This document is the soleresponsibility of its author

*. L'autorité académique est représentée par les promoteurs, membres du personnel enseignant de GxABT (Angélique Léonard et Luc Minne)

†. The academic authority is represented by the thesis supervisors, members of the GxABT teaching staff (Angélique Léonard and Luc Minne)

Perspectives de transition du secteur de l'assainissement individuel en Wallonie.

YANNIS GOVAERTS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADEMIQUE 2021 - 2022

ENCADRANTS : ANGELIQUE LEONARD, LUC MINNE ET PHILIPPE HEBERT

Remerciements

Ce Travail de Fin d'Études n'aurait jamais pu aboutir sans le concours de diverses personnes à qui je souhaite témoigner toute ma gratitude :

Manu, tu m'as apporté l'inspiration de me lancer dans l'étude de cette thématique.

Luc Minne et *Angélique Léonard*, sans votre soutien, ma démarche n'aurait pu aboutir, merci pour votre ouverture et vos conseils avisés.

Philippe Hebert et l'équipe de *Hellow*, vous avez contribué à me donner la foi en la pertinence de ma démarche, merci aussi pour votre accueil à l'atelier.

Philippe Morier-Genou et *Ivo Guilherme*, vous m'avez fait entrevoir la convivialité qui existe au sein du secteur de l'assainissement écologique. J'espère que nous pourrons nous rencontrer et éventuellement collaborer à l'avenir. . .

Joost Wellens et *Eric Lefevre*, merci pour l'intérêt que vous avez témoigné pour mon travail.

La team *Liroux*, *Max* et *Alain*, vous avez contribué avec le fruit de vos entrailles à la conduite de mes divers essais.

Matthieu, *Hugo*, *Valentin*, *Diego*, *Victor*, *Lara*, vous êtes une source d'inspiration précieuse, j'espère que nous continuerons à nous tirer ainsi mutuellement vers le haut.

Hugo, ton concours pour l'érection de la toilette a été une aide très appréciable.

Ruud, tu m'as permis d'évoluer dans un cadre inspirant pour mener toute cette aventure.

Lara, ton intérêt et ton enthousiasme m'ont fait beaucoup de bien et tes commentaires avisés m'ont permis de rehausser notablement la qualité de ma rédaction.

Alain, ton soutien indéfectible en tout temps m'est extrêmement précieux. Tu es pour moi un phare en tout temps.

Audrey, ta sollicitude et ta présence sont toujours appréciables, je te souhaite force et courage dans tes épreuves à venir.

Christophe, ton intérêt pour mon projet à ses prémices m'a mis en confiance et m'a poussé à tenir bon sur le long terme, tes leçons de plomberie m'ont aussi été bien utiles.

Morgane, ta présence, ton soutien, ton écoute sont irremplaçables.

Michèle et *Jérémie*, vous m'offrez la possibilité de m'engager dans une voie qui me plaît et où je pense trouver du sens, j'espère que notre collaboration sera longue et fructueuse.

- Yannis

RÉSUMÉ L'état actuel du secteur de l'assainissement découle d'un choix politique passé de placer la maîtrise du risque sanitaire comme priorité. Dans un deuxième temps apparurent des préoccupations quant à l'impact du déversement des effluents dans l'environnement. Enfin, plus récemment a émergé une volonté de revalorisation agricole des effluents afin d'exploiter une partie du potentiel fertilisant de ceux-ci.

Ainsi, le modèle du tout à l'égout se développe dans le courant du 19^{ième} siècle avec comme unique vocation la collecte des eaux usées et leur canalisation hors des centres urbains. Plus tard, des infrastructures de traitement furent développées afin de limiter l'impact environnemental de l'assainissement. La revalorisation agricole des effluents n'est apparue que très récemment, principalement par le biais de l'épandage des boues générées par les stations d'épuration sur les surfaces cultivées.

L'héritage de cette approche initialement orientée *déchets* est l'impossibilité de valoriser de façon optimale les nutriments présents dans les eaux usées. Cette question est cependant primordiale car la soutenabilité du cycle de l'azote et du phosphore au sein des systèmes agricoles en dépend. Une refonte des modèles de gestion des eaux usées permettrait de réduire notre dépendance aux ressources fossiles et minières et d'accroître la souveraineté alimentaire dans nos régions.

Cette étude porte principalement sur le secteur de l'assainissement autonome qui nous semble être le domaine de prédilection pour une transition car ses infrastructures sont moins imposantes. Il nous semble aussi qu'un modèle décentralisé soit plus à même de répondre aux enjeux identifiés.

Nous nous intéressons à la situation wallonne en analysant le cadre légal et la marge de liberté qu'il permet pour mettre en place des systèmes nouveaux. Il apparaît que les prescriptions techniques imposées sont relativement strictes et incompatible avec les enjeux identifiés. Cependant le régime en vigueur passant par l'agrégation d'entreprises privées est favorable à l'émergence de systèmes novateurs qui pourrait bénéficier d'un régime de dérogation.

Dans un deuxième temps, cette étude s'intéresse aux solutions techniques envisageables comme alternatives au modèle actuel. En particulier, nous étudions les alternatives à la toilette à chasse d'eau qui est très contraignante pour la valorisation des nutriments contenus dans les excréments humains. Nous constatons que les solutions alternatives sont multiples et qu'une prise en considération des circonstances particulières de chaque situation est nécessaire pour choisir la bonne pratique. En effet, selon le type d'implantation, les différentes options techniques sont plus ou moins adaptées. L'état du bâti concerné (neuf ou existant), le profil des utilisateurs (réguliers ou hétéroclites) et le type d'implantation (rurale ou urbaine) sont les principales caractéristiques à observer afin de choisir le modèle d'assainissement écologique approprié.

ABSTRACT The current state of the sanitation sector is the result of a past political choice to place the control of sanitary risk as a priority. In a second time, concerns appeared about the impact of effluent discharge in the environment. Finally, more recently, a desire to reuse effluents for agricultural purposes has emerged in order to exploit part of their fertilizing potential.

Thus, the sewerage model was developed in the 19th century with the sole purpose of collecting wastewater and channelling it out of urban centers. Later, treatment infrastructures were developed to limit the environmental impact of sanitation. Agricultural reuse of effluents has only recently appeared, mainly through the spreading of sludge generated by wastewater treatment plants on cultivated surfaces.

The legacy of this initially waste-oriented approach is the impossibility of optimally valorizing the nutrients contained in wastewater. However, this issue is of paramount importance because the sustainability of the nitrogen and phosphorus cycle within agricultural systems depends on it. An overhaul of wastewater management models would reduce our dependence on fossil and mineral resources and increase food sovereignty in our regions.

This study focuses on the on-site sanitation sector, which seems to us to be the preferred area for a transition because its infrastructure is less imposing. It also seems to us that a decentralized model is more likely to respond to the issues identified.

We focus on the Walloon situation by analyzing the legal framework and the room for manoeuvre it allows to set up new systems. It appears that the technical requirements imposed are relatively strict and incompatible with the issues identified. However, the current system, which involves the aggregation of private companies, is favorable to the emergence of innovative systems that could benefit from an exemption system.

In a second step, this study focuses on the technical solutions that could be considered as alternatives to the current model. In particular, we study alternatives to the flush toilet, which is very restrictive for the valorization of nutrients contained in human excreta. We note that there are many alternatives and that the particular circumstances of each situation must be taken into consideration in order to choose the right practice. Indeed, according to the type of implantation, the various technical options are adapted to a variable degree. The condition of the building concerned (new or existing), the profile of the users (regular or heterogeneous) and the type of location (rural or urban) are the main characteristics to be observed in order to choose the appropriate ecological sanitation model.

Table des matières

Remerciements	vii
Résumé	viii
Abstract	ix
Table des matières	x
Liste des abréviations	xv
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Échelle d'analyse et objectifs	2
CONTEXTE SOCIO-TECHNIQUE ET ENJEUX LIÉS À L'ASSAINISSEMENT	4
2 Définitions et caractéristiques	5
2.1 Assainissement	5
2.2 Typologie des effluents	5
2.3 Épuration des eaux	6
2.4 Assainissement écologique	7
2.5 Toilette sèche	8
3 État des lieux du secteur de l'eau en Wallonie	9
3.1 Assainissement	9
3.2 Eaux de surface	9
3.3 Eaux souterraines	10
4 Enjeux liés à l'assainissement	11
4.1 Santé publique	11
4.2 Pollution environnementale	11
4.3 Disponibilité en eau potable	12
4.4 Cycles biogéochimiques	13
4.5 Consommation d'énergie	14
4.6 Conclusion	15
5 Cadre légal	16
5.1 L'assainissement en Wallonie	16

5.2	Épuration des eaux	16
5.2.1	Assainissement collectif	16
5.2.2	Régime transitoire	17
5.2.3	Assainissement autonome	17
5.3	Toilette sèche	19
5.4	Le cas de l'habitat léger	20
5.5	Valorisation des effluents	20
5.5.1	Excréments humains	20
5.5.2	Boues des STEP	21
5.6	Bilan et perspectives	21
 NOUVEAUX MODÈLES D'ASSAINISSEMENT		22
6	Revue technique des solutions d'assainissement	23
6.1	Systèmes <i>conventionnels</i>	23
6.1.1	Systèmes d'assainissement centralisés	23
6.1.2	Systèmes d'assainissement décentralisés	23
6.2	Classification des systèmes	25
6.3	Propriétés des filières	26
6.3.1	Transport des effluents	26
6.3.2	Séparation des excréments	26
6.3.3	Types de toilettes	26
6.3.4	Traitements	27
6.4	Présentation des filières	32
6.4.1	Filière unique	32
6.4.2	Filière combinée : <i>urine et fèces</i>	35
6.4.3	Filière <i>unitaire</i> : eaux grises	38
6.4.4	Filière <i>unitaire</i> : urine	40
6.4.5	Filière <i>unitaire</i> : fèces	45
6.4.6	Filière <i>combinée</i> : eaux grises et urine	47
6.4.7	Filière <i>combinée</i> : eaux grises et fèces	48
6.5	Récapitulatif	49
 CONCLUSION		51
A	Annexe	54
A.1	Mise en place d'une toilette extérieure à composteur relié	54
 BIBLIOGRAPHIE		63

Table des figures

2.1	Station d'épuration de Basse-Wavre en Brabant Wallon. (Source : inbw.)	5
2.2	Schématisme conceptuelle de la classification des eaux usées.	5
2.3	Eaux grises à la sortie d'une habitation : la coloration témoigne de leur appellation. (Source personnelle.)	5
2.4	Principales caractéristiques des eaux usées domestiques et répartition entre les différentes fractions. (Source données [1].)	6
3.1	Énergie électrique et thermique valorisée au sein des STEP équipées de biométhaniseurs. (Source données [2].)	9
3.2	Pollution agricole : lixiviats provenant d'un stockage de fumier probablement très chargés en nitrates. (Source personnelle.)	9
3.3	Apport de carbone, azote et phosphore dans les cours d'eau en Wallonie. (Source [3], modèle <i>PEGASE</i> .)	10
4.1	Cascade des flux d'azote dans les niveaux imbriqués d'un système alimentation/excrétion. Exemple-type d'un blé cultivé pour du pain dans l'agglomération parisienne au début du XXIe siècle. En vert : diazote. En bleu : azote réactif. (Source [4].)	13
4.2	Évolution des prix des fertilisants azotés et phosphatés en 2021. (Source : www.terre-net.fr .)	14
5.1	Répartition des 3 régime d'assainissement en Wallonie. (Source données [5].)	16
5.2	Typologie des SEI et contraintes associées.	17
5.3	schématisation des spécifications technique des SEI. (Inspiré de [6].)	19
6.1	Collecteur d'égout en cours d'installation. (Source : inBW.)	23
6.2	Principe de fonctionnement de la fosse septique. (Inspiré de [7].)	24
6.3	(a) Schématisation du concept de chaîne de systèmes au sein d'une filière de traitement, (b) application du concept au cas de la TLB.	25
6.4	Présentation des 7 filières de traitement.	25
6.5	Présentation des 5 modèles de gestion.	26
6.6	Système d'assainissement autonome sans fosse septique de Aquatiris. (Dessin inspiré de <i>Aquatiris</i> .)	32
6.7	Filtre de pré-compostage. (Inspiré de [8].)	33
6.8	Principe du lombri-filtre.	33
6.9	Vers <i>Eisenia fetida</i>, espèce communément utilisée pour le compostage des déchets de cuisine.	33
6.10	Essais de lombri-filtre.	34
6.11	Composteur maçonné à la base du bâtiment. (Source : Pierre & Terre.)	36
6.12	Composteur rotatif manufacturé commercialisé par <i>Ekolet</i> . Le composteur pivote sur son axe quand une pile de matière suffisante s'est accumulée sous le tuyau de chute. (Source : <i>Ekolet</i> .)	36
6.13	Schéma d'une toilette à lombri-composteur relié.	36
6.14	Lombri-compostage d'excréments humains. Le mouvement des vers assure le brassage de celui-ci. (Source personnelle.)	37
6.15	Schéma d'un composteur manufacturé. (Inspiré de <i>Clivus Muntrum</i> .)	37

6.16 Toilette à recyclage de la coopérative <i>Équilibre</i> . (Inspiré de [9].)	38
6.17 Maquette de biodigester relié à une latrine en Inde. (Source : SuSanA.)	38
6.18 Biodigester en cours de construction au Viêt Nam. (Source : SuSanA.)	38
6.19 Installation pour le traitement, stockage et réutilisation pour l'irrigation des eaux grises au sein d'un projet de maraîchage en Wallonie. (Source personnelle, image aérienne : <i>WalOnMap</i> .)	39
6.20 Système de pédo-épuration. (Dessin inspiré de Pierre & Terre.)	40
6.21 Filtre à eaux grises manufacturé. (Source : <i>Biolan</i> .)	40
6.22 Siphon sec à membrane. (Source : SuSanA.)	42
6.23 Schéma de principe d'un dispositif de lacto-fermentation par <i>batch</i> de l'urine collectée.	44
6.24 Urinoir masculin auto-construit permettant de réaliser une lacto-fermentation des urines. La torsion dans le conduit d'urine fait office de siphon.	44
6.25 Réalisation de la cabine de toilette extérieure.	45
6.26 Modification d'une cuve IBC en composteur.	46
6.27 Plan de la cabine de toilette extérieure auto-construite.	46
6.28 Schéma de la toilette à composteur rotation cacarousel de Philippe Morier- Genoud. (Inspiré de [9].)	47
6.29 Habitat participatif <i>Au clair quartier</i> : Bâtiment. (Source : <i>Floriant Golay</i> <i>Architecte</i> .)	47
6.30 Toilette à séparation du fournisseur <i>Separett®</i> installée dans l'habitat parti- cipatif <i>Au clair quartier</i> . (Source [10].)	47
6.31 Descriptif des 5 modèles de gestion des effluents domestiques	49
6.32 Caractéristiques des principaux dispositifs d'assainissement domestique	50
A.1 Vue du siège de toilette et du composteur.	54
A.2 Vue générale de la toilette.	55
A.3 Vue du siège de toilette avec trappe de maintenance ouverte.	56
A.4 Liner et crépine d'aération du composteur.	57
A.5 Implantation de la toilette.	58
A.6 Siège de toilette avec son séparateur d'urine et le conduit pour les fèces	59
A.7 Mise en fonction du composteur	59
A.8 Plaquette explicative affichée dans la toilette : présentation du principe de la toilette	60
A.9 Plaquette explicative affichée dans la toilette : explication de l'utilisation de la cuvette séparatrice	61
A.10 Plaquette explicative affichée dans la toilette : description de l'entretien	62

Liste des tableaux

2.1 Masses excrétées et contenu en nutriments. (Source [11].)	6
6.1 Présentation des modes de transport des excréments.	28
6.2 Présentation des méthodes de séparation des excréments à la source.	29
6.3 Présentation des méthodes de séparation des excréments après émission.	29
6.4 Présentation des différents modèles de dispositifs de séparation des excréments.	30
6.5 Classification des différents types des toilettes selon le mode de transport des effluents et le type de séparation.	31

6.6 Estimation des émissions globale de NH₃ provenant de diverses sources. (Adapté de [12].)	43
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Liste des abréviations

DBO ₅	Demande biololgoque en oxygène après 5 jours
DCO	Demande chimique en oxygène
EH	Équivalent habitant
ETM	Élément trace métallique
GPAA	Gestion Publique de l'Assainissement Autonome
HAP	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
MES	Matières en suspension
MS	Matière sèche
OAA	Organisme d'assainissement agréé
PASH	Plan d'assainissement par sous-bassin hydrographique
PE	Polyéthylène
PE-HD	Polyéthylène haute densité
PP	Polypropylène
SEI	Système d'épuration individuel
SPGE	Société Publique de Gestion des Eaux
STEP	Station d'épuration
TLB	Toilette à litière bio-maîtrisée

1.1 | Contexte

Le modèle de gestion des eaux usées domestiques en Occident est celui du *tout-à-l'égout*. L'ensemble des eaux usées - en ce compris les excréments humains - est collectée et traitée conjointement, scellant ainsi le destin des eaux souillées par les activités domestiques à celui de nos déjections vers un devenir commun. L'assainissement était inexistant il y a moins d'un siècle. Les progrès réalisés depuis lors sont indéniables mais l'état actuel du secteur n'est pas intégralement soutenable d'un point de vue environnemental.

Ce paradigme d'*unicité* en matière d'assainissement a des conséquences majeures sur la dégradation des milieux aquatiques et sur le cycle des nutriments dans le système agricole. Nos excréments contiennent en effet une partie des éléments nutritifs (principalement l'azote et le phosphore) qui ont été amenés aux plantes pour leur croissance. Leur rejet dans l'égout puis le déversement des eaux traitées dans l'environnement provoque un dérèglement des écosystèmes aquatiques. Lors de leur traitement, la minéralisation d'une partie de ces nutriments provoque aussi une ouverture des cycles naturels associés à ces flux de matière, rendant nécessaire la production d'engrais de synthèse pour combler un déficit de fertilité.

Par ailleurs, les préoccupations du grand public à propos de la gestion de l'eau vont croissant. Les enjeux qui y sont liés semblent toutefois mal compris et réduits à la seule question de l'utilisation d'eau potable pour la chasse des toilettes. De ce fait, une initiative partant d'intentions louables peut facilement se solder par un bilan totalement neutre au niveau environnemental, voire perdre toute cohérence de ce point de vue.

Les systèmes alternatifs à ce modèle unitaire couramment proposés présentent un certain nombre de contraintes techniques et de freins culturels. En l'état actuel du secteur, ces contraintes rendent peu plausible leur développement à grande échelle en substitution des systèmes actuellement répandus, particulièrement en milieu urbain.

Concernant les contraintes techniques, les infrastructures d'assainissement actuellement en place sont un frein majeur à une transition des systèmes d'assainissement. Elles sont conçues pour traiter un certain flux d'eau avec une certaine charge. Des changements dans la politique d'assainissement entraîneraient une modification de la nature des influents et pourraient rendre les stations d'épuration (STEP) obsolètes et les investissements qui y furent alloués, vains. Une transition dans le bâti en place est une autre contrainte forte, l'installation de nouvelles canalisations et autres éléments pouvant être compliquée et coûteuse.

1.1 Contexte

1.2 Échelle d'analyse et objectifs

Dans l'hypothèse d'une volonté politique de changement et de la planification d'une transition, le bâti neuf pourrait être conçu en prévision de celle-ci.

Le frein culturel concerne principalement la toilette qui est un point très sensible. Les excréments restent un tabou dans nos sociétés. Ils sont perçus comme particulièrement dangereux et leur manipulation, si elle n'est pas évitable, doit être faite avec le plus grand soin. Leur gestion actuelle peut être assimilée à une amnésie collective : sitôt la chasse d'eau enclenchée, les excréments cessent d'exister. De plus, les enjeux qui leur sont liés sont largement méconnus. A cela s'ajoute une législation entravant les possibilités de changement.

Ce verrouillage socio-technique n'empêche pas de se questionner quant aux possibilités d'évolution sur la question et de concevoir des scénarios de transition. L'ambition de la présente étude est d'être une modeste participation à cette démarche déjà adoptée par d'autres.

1.2 | Choix d'une échelle d'analyse et objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude est de constituer une synthèse des possibilités techniques en matière d'assainissement à petite échelle (habitat individuel ou petits collectifs). Le choix de ce niveau d'analyse fait suite au raisonnement suivant : l'ampleur des infrastructures liées à l'assainissement ainsi que les enjeux qui leur sont liés sont d'une telle envergure qu'une transition nécessiterait une réorganisation à un niveau macroscopique de la filière. Les politiques et le grand public n'y sont pas prêts. En conséquence, le développement de projets pilotes et démonstrateurs sont nécessaires pour vérifier la viabilité de modèles alternatifs et surmonter le verrouillage socio-technique auquel est sujet la filière de l'assainissement.

C'est pourquoi nous nous intéressons dans cette étude aux solutions techniques liées à l'assainissement applicables dans des situations particulières où les habitants ont une motivation personnelle à effectuer cette transition à l'échelle de leur logement.

La réalisation de cette étude a donc pris la forme d'une grande enquête combinant recherches bibliographiques, expérimentations, rencontres de terrain, discussions, recueil de témoignages, . . .

Le document est structuré de la façon suivante : après avoir défini le champ lexical utilisé dans ce document (Chapitre 2) et fait le bilan de l'état de la situation Wallonne (Chapitre 3), nous identifierons certains des enjeux qui sont liés à l'assainissement et qui nous semblent être pertinent d'exposer (Chapitre 4). Ensuite, le cadre légal Wallon relatif à ces thématiques sera présenté (Chapitre 5). Enfin, nous ferons une revue des solutions techniques identifiées en réalisant une enquête sur les pratiques et les dispositifs plus ou moins expérimentaux qui ont pu être mis au point en Europe (Chapitre 6). Nous évaluerons succinctement la cohérence de leur mise en place par rapport aux enjeux identifiés.

Par cette synthèse, nous espérons inspirer des recherches et expérimentation futures et éventuellement guider le néophyte dans ses choix dans le cadre de la mise en place d'un dispositif d'assainissement.

**CONTEXTE SOCIO-TECHNIQUE ET ENJEUX LIÉS
À L'ASSAINISSEMENT**

Définitions et caractéristiques

2

2.1 | Assainissement

L'assainissement consiste en la collecte, le traitement et le rejet des excréments et des eaux usées issues des activités humaines. Historiquement motivé par des questions de santé publique, l'assainissement a aujourd'hui aussi une grande part de sa raison d'être dans la protection des milieux aquatiques. Il concerne donc la gestion des pollutions industrielles et domestiques, chimiques et biologiques, ayant l'eau comme réceptacle. Nous retrouverons dans ces eaux usées des éléments traces métalliques (ETM), une charge organique, une charge en nutriments, des composés organiques persistants ainsi que des micro-organismes pathogènes.

Les infrastructures liées à l'assainissement sont composées des éléments suivants :

- dispositifs de collecte domestiques : évier, douches, toilettes,...
- systèmes et réseaux de transport : égouts, collecteurs, camion-vidangeurs,...
- dispositifs de stockage et/ou traitement : systèmes d'épuration (Figure 2.1), fosses septiques, bassins tampons,...

Les sous-produits de ces processus sont directement rejetés dans le milieu naturel (eaux épurées) ou revalorisés au sein d'activités agricoles (épandage de boues d'épurations, compostage de matières solides,...) ou encore incinérées (boues d'épuration).

2.2 | Typologie des effluents domestiques

Les **eaux usées** ou eaux résiduaires sont les eaux polluées par une activité humaine. Nous qualifions ici cette pollution par le fait que leur déversement dans le milieu naturel induirait des déséquilibres pour l'écosystème récepteur, causerait d'éventuels dommages à certains organismes qui y vivent ou présente un risque sanitaire pour l'humain. Les eaux usées sont de natures diverses et peuvent être classifiées en plusieurs sous-catégories (voir Figure 2.2) :

- Les **eaux usées domestiques** sont l'ensemble des eaux souillées par la vie humaine, soit le mélange des eaux grises et noires.
- Les **eaux noires** (ou eaux vannes) sont les eaux souillées exclusivement par les matières fécales, l'urine et le papier toilette. Elles sont donc issues de toilettes à eau.
- Les **eaux grises** (ou eaux ménagères) sont les eaux domestiques à l'exclusion des eaux de toilettes et d'urinoirs (Figure 2.3). Elles proviennent de différentes sources d'émission : évier, douches, machines à laver,...
- Les **excréments** sont le mélange des urines et des fèces (et du papier toilette).

2.1 Assainissement

2.2 Typologie des effluents

2.3 Épuration des eaux

2.4 Assainissement écologique

2.5 Toilette sèche



FIGURE 2.1 – Station d'épuration de Basse-Wavre en Brabant Wallon. (Source : inbw.)

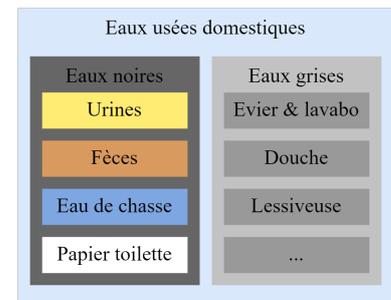


FIGURE 2.2 – Schématisation conceptuelle de la classification des eaux usées.



FIGURE 2.3 – Eaux grises à la sortie d'une habitation : la coloration témoigne de leur appellation. (Source personnelle.)

Les eaux usées domestiques peuvent être caractérisées par leur composition, leur volumes et proportions dans les rejets domestiques. Leur caractérisation n'est pas évidente car elle est variable selon les habitudes des usagers [1]. Les données sont donc variables d'une étude à l'autre mais les ordres de grandeur restent constants. La **Figure 2.4** résume les principales caractéristiques des eaux usées domestiques en répartition entre ses différentes fractions. Le **Tableau 2.1** donne en outre une idée des volumes d'excréments produits et des quantités de nutriments qui s'y trouvent. Ces données suffiront pour comprendre les enjeux liés aux eaux usées domestiques.

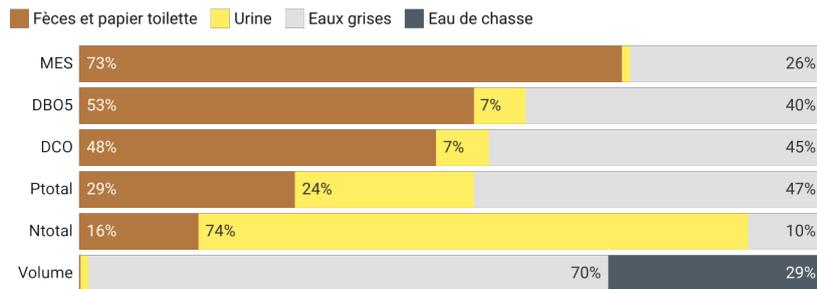


FIGURE 2.4 – Principales caractéristiques des eaux usées domestiques et répartition entre les différentes fractions. (Source données [1].)

Quelques observations peuvent être formulées à partir de ces données. Tout d'abord, les eaux grises représentent ~70 % du volume total des eaux usées domestiques alors qu'elles concentrent moins de la moitié de la pollution. Les excréments représentent un volume minime des eaux usées domestiques (~1 % pour les urines et ~1 ‰ pour les fèces) et concentrent le reste de celle-ci. L'apport des chasses des toilettes provoque une dilution de la pollution des eaux usées domestiques.

TABLE 2.1 – Masses excrétées et contenu en nutriments. (Source [11].)

Paramètre		Fèces	Urine
Masse hum.	kg/hab.an	51	550
Masse sec	kg _{sec} /hab.an	11	21
Azote	g/hab.an	550	4000
Phosphore	g/hab.an	183	356

Ce constat quant à la différence de nature entre les eaux grises et les excréments est le fondement de l'idée qu'une collecte séparative et une gestion différenciée des effluents pourrait être bien plus performante que le classique *tout-à-l'égout*. La maxime suivante résume cette idée :

« La valorisation des eaux ménagères [grises] est avant tout une valorisation d'un volume d'eau et non d'un potentiel fertilisant, ce dernier étant concentré majoritairement dans les excréments. »-[13]

2.3 | Épuration des eaux

L'épuration des eaux englobe un ensemble de techniques très diverses visant la neutralisation des micro-organismes pathogènes et de certains solutés qui peuvent présenter un risque pour l'humain ou l'environnement. Cela inclut des traitements allant du simple tamisage ou dégraissage à des processus biologiques et/ou physico-chimiques complexes.

En l'état actuel du secteur, l'épuration des eaux usées domestiques consiste donc principalement à en « extraire les éléments provenant des urines, des matières fécales et du papier toilette dans le but de préserver les milieux récepteurs et avec une logique de valorisation de ces éléments secondaire, voire inexistante ». [4] Cette affirmation est particulièrement vraie pour l'azote dont le taux de recyclage est estimé à ~5 % à l'échelle de l'agglomération parisienne dans les années 2010. Dans le cas du

phosphore, le bilan est moins déplorable avec un taux de recyclage estimé à ~40 % . [4]

2.4 | Assainissement écologique

Il existe un écosystème de mouvements et de groupes de travail ayant vocation à promouvoir le développement de l'assainissement et qui revendiquent une démarche écologique et/ou durable. Nous présentons ci-dessous un aperçu non exhaustif de ce à quoi ressemble ce paysage.

Le réseau SusAnA¹ est un acteur majeur dans le domaine de l'assainissement. Il définit un assainissement durable comme étant :

- respectueux de l'environnement et de ses ressources ;
- une réponse aux défis liés à l'hygiène et la santé humaine ;
- compatible avec les us locaux ;
- légalement acceptable ;
- accessible financièrement par les populations ;
- cohérent avec les technologies disponibles localement.

Ce réseau regroupe un ensemble de groupes de travail autonomes répartis sur toute la planète, une base de données de projets, une librairie en ligne et un forum de discussions. [14]

Le mouvement EcoSan² s'inscrit au sein de la démarche plus globale de SuSanA et est axé plus spécifiquement sur la protection de l'environnement et la gestion durable des ressources naturelles. Il est axé principalement sur une démarche de développement dans les régions émergentes. Sa mission est motivée par le constat qu'au moins 2,5 milliards de personnes dans le monde qui n'ont pas accès à des dispositifs d'assainissement performants [15]. Ce mouvement est actif principalement dans le monde anglophone.

Le mouvement francophone SAINECO se positionne à l'opposé du mouvement EcoSan qu'il qualifie d'anthropocentrique en mettant l'accent sur la réduction des impacts environnementaux de l'assainissement. Cette démarche est qualifiée de bio-centrique car elle ne prend plus comme considération centrale les conséquences pour l'humain d'une mauvaise gestion des eaux usées. Le mouvement a été fondé par le chercheur montois József Orzagh.³ À travers le site web *Eautarcie*,⁴ il promeut le développement d'un assainissement qui intègre les « *interdépendances entre la gestion de l'eau, celle de la biomasse animale et végétale et leurs influences sur les changements climatiques* ». Le mouvement SAINECO ambitionne la diffusion d'une réflexion technique mais aussi philosophique autour de la question des eaux usées domestiques en questionnant notre rapport aux ressources naturelles dans notre culture.

En France, un autre acteur majeur est le Réseau Assainissement Écologique.⁵ Il a pour objectif « *la défense de l'intérêt général en matière d'assainissement* » en s'inscrivant dans une démarche de « *préservation de l'environnement par la gestion responsable des ressources naturelles ainsi que la prévention et réduction de la pollution organique domestique* ». Pour ce dernier, l'assainissement écologique se base sur les principes suivants :

- réduire la pollution en amont ;
- réduire le risque sanitaire et environnemental ;

1: Sustainable Sanitation Alliance
www.susana.org

2: Ecological Sanitation
www.ecosanres.org

3: József Orzagh (1937 – 2020), Université de Mons-Hainaut

4: Eautarcie
www.eautarcie.org

5: Réseau Assainissement Écologique
reseau-assainissement-ecologique.org

- être accessible à tous, culturellement, socialement, techniquement et économiquement ;
- responsabiliser l'individu.

Toujours dans le monde francophone, le programme de recherche et action OCAPI⁶ ambitionne d'étudier et accompagner les « *évolutions possibles des systèmes alimentation/excrétion urbains* » et est particulièrement actif sur la question de la revalorisation agricole des excréments humains et le développement des filières associées.

Quelle que soit leur définition et leur vision de l'assainissement écologique, chacun de ces mouvements remet en question le modèle du *tout-à-l'égout* associé à la toilette à chasse d'eau. Nous ne voulons pas aborder ici les questions éthiques et philosophiques que sous-tend le modèle occidental de gestion de l'eau ni nous positionner par rapport à celui-ci. Notre seule ambition est de dresser un état des lieux des solutions existantes ou à tester pour un assainissement non-centralisé et plus durable.

2.5 | Toilette sèche

La **toilette sèche** est souvent placée au cœur des démarches d'assainissement écologique. Le terme fait référence à des systèmes assez divers. Dans le contexte Wallon, ce mot désigne en général la toilette à litière bio-maîtrisée⁷ (TLB), qui est de loin la plus courante dans nos régions.

Nous utilisons dans ce document la désignation toilette sèche au sens de la législation française qui la définit comme une toilette « *sans apport d'eau de dilution ou de transport* » [16]. Toutefois, au vu du flou que ce mot engendre, nous préférons utiliser autant que possible une dénomination plus explicite.

Le terme *toilette à compost* serait dans bien des cas beaucoup plus explicite et moins restrictif pour désigner des dispositifs différents de la classique toilette à l'eau et pas forcément *sèches*.

6: Organisation des cycles Carbone, Azote, Phosphore dans les territoires www.leesu.fr/ocapi/presentation/

7: Toilette sans eau, avec collecte conjointe de l'urine et des fèces et apport de matière carbonée (voir § 6.4.2).

État des lieux du secteur de l'eau en Wallonie

3

3.1 | Assainissement

La Wallonie compte 431 stations d'épuration collectives pour une capacité de traitement totale de 4 085 217 EH soit env. 400 000 m³/jour (données 2017). Les eaux usées domestiques sont canalisées vers les STEP grâce à un réseau de 19 980 km d'égouts et de collecteurs. La quantité totale de boues générées par les STEP s'élève à 50 500 T_{ms}

Une partie des boues de STEP est épandue sur les terres agricoles. Le taux de valorisation agricole est en forte croissance. Il est passé de 50 à 65 % entre 2015 et 2020 [3]. Le reste est « valorisé énergétiquement » principalement par incinération. Une petite fraction est par ailleurs valorisée par méthanisation. 5 STEP sont équipées de biométhaniseurs, dont les productions servent à l'alimentation des sites (Figure 3.1) [2].

Entre 2013 et 2017, 160 millions d'€ sont investis annuellement pour la seule gestion des eaux usées domestiques (principalement pour l'épuration et la collecte). Ceci représente 80€/hab.an uniquement pour l'assainissement auquel 122 millions d'€ annuels sont à ajouter pour la production et distribution d'eau potable. [5]

Les frais d'exploitation liés à l'assainissement s'élèvent à 23 €/EH (donnée 2016). Environ 45 % de ces coûts servent à couvrir les frais de personnel. La facture énergétique de l'assainissement représente 18 % de ceux-ci. [5]

3.2 | Eaux de surface [3]

Bien qu'une lente amélioration de leur l'état écologique aie été observé ces dernières années, l'état des eaux de surface Wallonnes est globalement mauvais. En effet, l'état biologique de 27 % de ces masses d'eau est qualifié de moyen à mauvais et 14,6 % sont en outre sujets à eutrophisation (période 2016-2018). Les paramètres suivants liés à leur état chimique sont à incriminer :

- les teneurs en azote et phosphore d'origine anthropique sous leurs différentes formes;
- la teneur en polluants organiques (10 % des cours d'eau ont une DBO₅ > 10 mg O₂/L, état qualifié de mauvais à très mauvais);
- la présence de micro-polluants (principalement d'ETM, de composés organochlorés, de pesticides et d'HAP);

Bien que ces pollutions soient majoritairement liées aux activités agricoles (particulièrement en ce qui concerne les nitrates, Figure 3.2), l'assainissement insuffisant des eaux usées domestiques avant leur rejet est aussi à incriminer. Une estimation issue du modèle PEGASE indique que 56 200 T de carbone, 36 400 T d'azote et 1 780 T de phosphore auraient été

3.1 Assainissement 3.2 Eaux de surface 3.3 Eaux souterraines

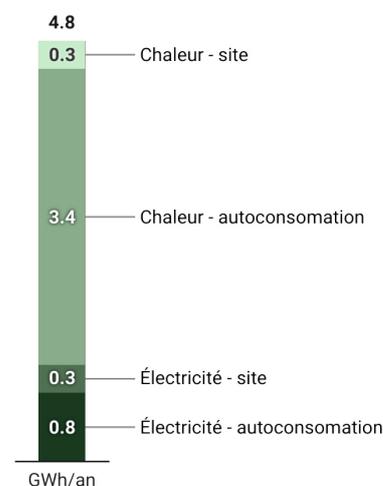
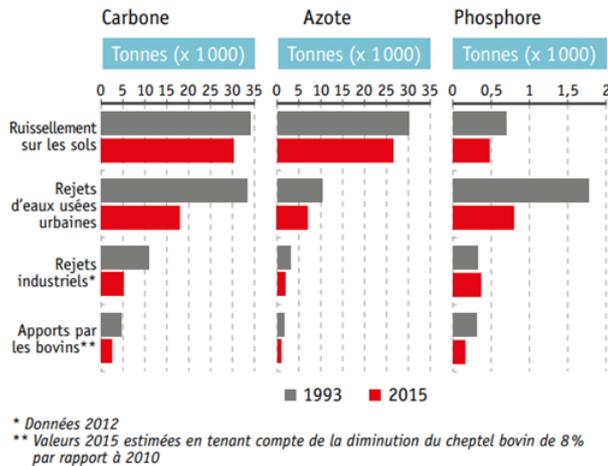


FIGURE 3.1 – Énergie électrique et thermique valorisée au sein des STEP équipées de biométhaniseurs. (Source données [2].)



FIGURE 3.2 – Pollution agricole : lixiviats provenant d'un stockage de fumier probablement très chargés en nitrates. (Source personnelle.)

déversé dans les eaux de surface en 2015, dont 27 % provenaient du rejet d'eaux usées urbaines.¹ Ces paramètres seraient toutefois en baisse (diminution de respectivement 46 %, 31 % et 55 % entre 1993 et 2015 (Figure 3.3). Cette diminution serait due principalement au développement du traitement tertiaire de dénitrification et déphosphatation et à la suppression des phosphates des détergents et lessives.



1: Eaux usées urbaines : mélange des eaux usées domestiques avec les eaux usées industrielles et/ou des eaux de ruissellement.

FIGURE 3.3 – Apport de carbone, azote et phosphore dans les cours d'eau en Wallonie. (Source [3], modèle PEGASE.)

3.3 | Eaux souterraines

Les prélèvements d'eau souterraine en Wallonie s'élevaient à 370,5 millions de m³ en 2018 dont 80,5 % étaient destinés au réseau de distribution [17]. Les ressources en eaux souterraines Wallonnes sont actuellement suffisantes pour assurer l'approvisionnement de la région, de Bruxelles et d'une partie de la Flandre. En effet, entre 2000 et 2018, les prélèvements dans les aquifères représentaient en moyenne au maximum 22 % (383 millions m³/an) des volumes renouvelés annuellement par la recharge pluviométrique.² Ceci n'exclut cependant pas des problèmes de surexploitation ou de pénuries à une échelle locale [3].

2: Estimation d'après le modèle hydrologique sol et zone vadose EPICgrid.

4.1 | Santé publique

Dans les régions du monde en voie de développement, l'enjeu de salubrité reste une préoccupation majeure alors que dans les pays occidentaux, la mise en place des systèmes d'assainissement que nous connaissons aujourd'hui permet une bonne maîtrise de ces risques.

Toutefois, dans le cas d'une revalorisation agricole des excréments humains, la question des risques liés aux pathogènes refait surface mais s'avère tout à fait surmontable. L'OMS recommande le respect d'un ensemble de mesures de protection afin d'éviter les risques de contamination.

Tout d'abord, un traitement assurant une réduction des pathogènes de 8 à 9 unités logarithmiques est recommandée pour les excréments. A échelle domestique, le traitement le plus courant est un compostage thermophile. Pour les urines seules séparées à la source, 3 à 5 unités logarithmiques suffisent. Un traitement hygiénisant simple consiste à les stocker pendant au moins un mois dans un récipient hermétique [18]. L'étude de *Martin et al.* [19] présente un aperçu des différents modes de traitement des urines possibles en vue de leur valorisation agricole. D'autre part, des restrictions particulières sont applicables selon les parties de la plante qui sont consommées : mode d'épandage, décalage temporel entre épandage et récolte, préparation des aliments, . . . Enfin, une protection appropriée lors des opérations de manutention des excréments est requise [18]. Sous couvert de respect de ces mesures, la valorisation agricole des excréments ne présente pas de risque d'un point de vue des pathogènes.

4.2 | Pollution environnementale

Les eaux usées (traitées ou non) sont déversées en surface ou infiltrées et les effluents solides (boues de STEP ou éventuellement excréments humains à l'échelle domestique) sont parfois épandues sur les terres agricoles comme fertilisant. Ceci peut potentiellement être à l'origine de dégradations environnementales.

D'une part, un dérèglement écosystémique dû à la présence de nutriments dans l'effluent peut avoir lieu. Il concerne principalement le déversement des eaux traitées dans les eaux de surface provoquant l'eutrophisation de ces milieux. Nous avons vu à ce propos à la **Section 3.2** l'impact en termes de dégradation biologique qu'il pouvait engendrer.

D'autre part, la dissémination de micro-polluants (ETM et les composés organiques persistants) présente des effets éco-toxicologiques. Cette dissémination concerne le déversement des eaux traitées mais aussi l'épandage agricole. Dans ce second cas se pose également la question de l'éventuel transfert à l'humain des micro-polluants.

4.1 Santé publique

4.2 Pollution environnementale

4.3 Disponibilité en eau potable

4.4 Cycles biogéochimiques

4.5 Consommation d'énergie

4.6 Conclusion

Les possibilités de transfert des ETM à l'humain est limité. L'impact des ETM « apparaît généralement au niveau de la microbiologie des sols avant d'être observé au niveau des plantes ou chez l'Homme ». En effet, la mobilité des ETM dans le sol est faible et dépend de paramètres physico-chimiques (pH, teneur en matière organique). Même en cas de mobilité, leur assimilation par les plantes est très restreinte sauf dans le cas du cadmium qui est cependant peu présent dans les eaux usées domestiques. [18]

Les composés organiques persistants sont eux aussi relativement peu mobiles dans le sol - et donc peu assimilables par les plantes - du fait de leur taille importante. Ils seraient en outre en grande partie dégradés grâce à l'activité microbiologique intense des sols ou absorbés aux particules de ceux-ci. [18]

Cependant, nous ne disposons pas d'un recul suffisant et l'impact sur les sols et sur la santé humaine de la dissémination de micro-polluants est encore mal connu. Pour les composés organiques persistants, l'OMS suppose simplement que leurs « effets négatifs sur la quantité ou la qualité des produits agricoles sont négligeables ». [18]

Toutefois, une mise en perspective s'impose. En effet, tant pour les composés organiques que pour les ETM, les concentrations sont plus élevées dans les fumiers d'élevage que dans les excréments humains [18]. D'autre part, les fertilisants et produits phytosanitaires utilisés en agriculture sont aussi une source importante de micro-pollution [20] dont les impacts environnementaux sont probablement bien plus importants que ceux liés à la revalorisation agricole des effluents. Ce sont peut-être les pratiques agricoles qui doivent être remises en question afin de limiter les sources d'émissions plutôt que de remédier à la pollution.

Enfin, concernant l'épandage des boues, cette pratique en Wallonie est soumise à une législation stricte (*cf* § 5.5.2) imposant un suivi et des analyses poussées qui garantissent en principe l'absence de tout risque de dommages environnementaux.

Nous concluons en soulignant que les réponses possibles à cette problématique sont soit d'intensifier les procédés utilisés pour le traitement des eaux usées domestiques avant leur rejet, soit de travailler en amont pour modifier la nature des eaux usées.¹ Enfin, la collecte séparative des différents effluents domestiques permettrait de mieux gérer les différentes formes de pollution auxquelles ils sont liés.

1: C'est précisément ce qui s'est passé pour les phosphates avec leur suppression des détergents et lessives, voir **Section 3.2**

4.3 | Disponibilité en eau potable

Vu l'absence présumée de stress hydrique en Wallonie (**Section 3.3**), il n'y a pas de problème de disponibilité en eau potable et il ne devrait *à priori* pas y en avoir dans le futur. Les enjeux liés à l'approvisionnement en eau potable se situent donc plutôt au niveau de l'exploitation de la ressource (coûts d'extraction et de potabilisation) et de la prévention de la pollution souterraine (liés principalement à l'agriculture - *cf* **Section 3.3**).

Une des réponses à l'enjeu du coût de l'eau de distribution réside dans l'assainissement. Les chasses d'eau des toilettes représentent 30 % des consommations d'eau des ménages et ce poste de consommation pourrait être réduit grâce à l'utilisation de systèmes alternatifs à la toilette à chasse d'eau.

4.4 | Cycles biogéochimiques et gestion des nutriments au sein des systèmes agricoles

L'assainissement des eaux usées domestiques a un lien fort avec le cycle des nutriments dans le système agricole. La quantité d'éléments nutritifs présents dans le corps humain restant constante, l'ensemble des nutriments présents dans les aliments ingérés finissent donc tôt ou tard dans nos excréments. S'ils ne sont pas retournés vers les terres agricoles, une ouverture des cycles biogéochimiques en question est provoquée. Dans leur rapport sur les limites planétaires, *Steffen et al. (2015)* ont estimé que l'ouverture des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore est d'une telle ampleur qu'elle est susceptible d'induire une déstabilisation des équilibres environnementaux drastique mettant en péril les conditions de vie de l'humanité. [21, 4]

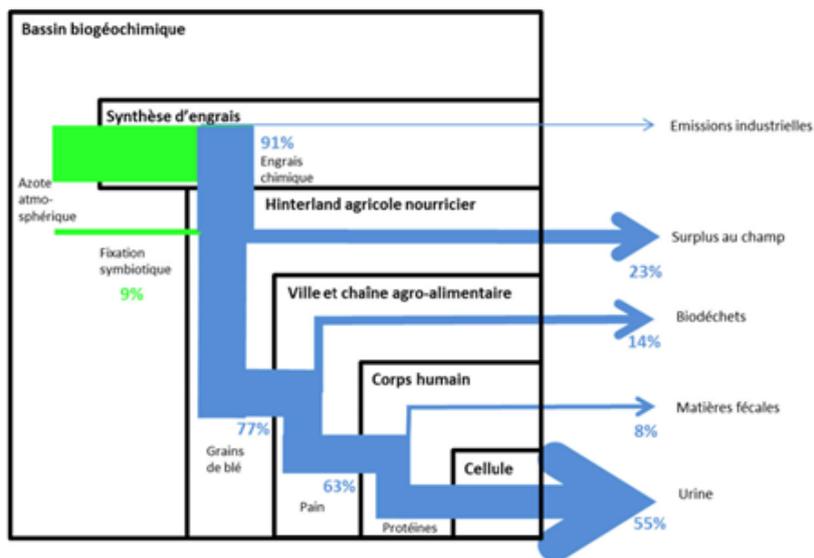


FIGURE 4.1 – Cascade des flux d'azote dans les niveaux imbriqués d'un système alimentation/excrétion. Exemple-type d'un blé cultivé pour du pain dans l'agglomération parisienne au début du XXIe siècle. En vert : diazote. En bleu : azote réactif. (Source [4].)

L'azote a une place centrale en agriculture : à l'exception de l'eau dans les régions où elle est rare, l'azote est l'élément le plus limitant pour la croissance des plantes. En Wallonie, un apport d'engrais azotés minéraux moyen d'un ordre grandeur de 100 à 200 kg de N/ha est effectué chaque année. Dans une forêt tempérée, la fixation d'azote atmosphérique est un phénomène très minoritaire (5 %) par rapport aux flux d'azote réactif entre les différents organismes [4]. En renonçant à cette circularité, nos modèles agricoles ne sont soutenables qu'au prix de l'injection de ressources fossiles et minières dans le système.

L'ouverture du cycle biogéochimique de l'azote mobilise des ressources énergétiques conséquentes (voir **Section 4.5**) et est responsable d'une pollution des eaux de surface et souterraine (**Sections 3.2 et 3.3**). La gestion des flux d'azote est particulièrement critique du fait de la facilité de transition entre les différentes formes chimiques de cet élément [4]. Une fraction importante de l'azote entrant dans le système agricole sous forme bio-assimilable se retrouve dans les seules urines (**Figure 4.1**).

Le phosphore est quant à lui plus problématique en termes de stocks car il s'agit d'une ressource minérale limitée et dont la répartition géographique est très inégale : 70 % des réserves mondiales se trouvent au Maroc [22]. Il y a donc un enjeu géopolitique et économique fort lié à cette ressource.

Bien que déjà partiellement recyclé,² une meilleure revalorisation de celui-ci au sein de nos filières d'assainissement se révèle nécessaire pour assurer la pérennité des activités agricoles dans le futur.

Le contexte actuel de crise planétaire lié à la pandémie de SARS-CoV-2 confirme la fragilité des filières d'approvisionnement en fertilisants. Ils ont en effet atteint des niveaux de prix historiques. La **Figure 4.2** présente le cours des fertilisants azotés et phosphatés : leur prix a triplé au cours de l'année 2021. L'augmentation du prix de l'énergie et la paralysie du transport maritime sont probablement les facteurs principaux à incriminer dans cette évolution.

2: Le recyclage partiel du phosphore (de l'ordre de 40 % [4]) est assuré grâce à l'épandage des boues de STEP et la précipitation de P lors de la déphosphatation des effluents

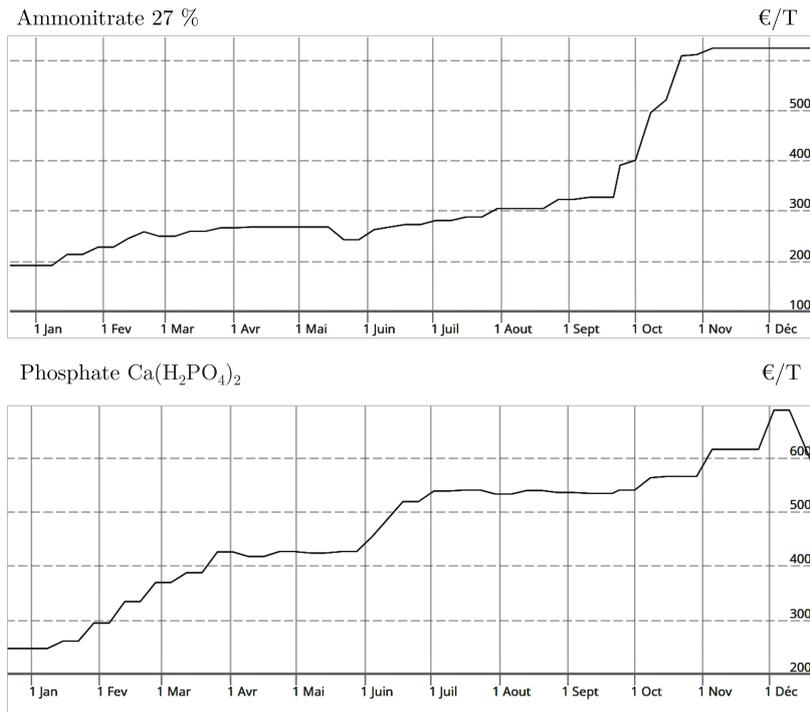


FIGURE 4.2 – Évolution des prix des fertilisants azotés et phosphatés en 2021.
(Source : www.terre-net.fr.)

4.5 | Consommation d'énergie

L'épuration des eaux est basée sur un non-sens en matière d'allocation de ressources énergétiques. D'un point de vue thermodynamique, la pollution qui doit être extraite des eaux usées domestiques est de la matière organique réduite qui a une valeur énergétique avoisinant les 13 à 15 MJ par kg de DCO [23]. Cette pollution est éliminée par des moyens techniques énergivores. En France cette consommation varie entre 15 et 20 MJ par kg de DBO₅ éliminé selon la technologie épuratoire. La moitié de cette consommation sert à l'aération des bassins. [24] Cette énergie est dépensée pour oxyder de la matière organique qui a par ailleurs un potentiel de fertilisation en agriculture. La synthèse de fertilisants est alors nécessaire pour combler le déficit et assurer la pérennité de la production agricole. La production d'engrais azotés de synthèse requiert 40 MJ par kg d'azote produit [23].

4.6 | Conclusion

Pour le grand public, les préoccupations liées à l'assainissement se limitent souvent à la remise en question du système de la toilette à chasse d'eau potable. Il apparaît que les enjeux liés à l'assainissement sont en réalité bien plus larges et complexes.

Les enjeux présentés ci-dessus – dont la liste n'est par ailleurs pas exhaustive - démontrent une nécessité de remettre en question certains acquis en matière d'assainissement. C'est en particulier le cas des enjeux liés aux cycles biogéochimiques et ceux de consommation d'énergie qui nous semblent être majeurs. La maxime suivante résume la nature de la problématique :

« L'utilisation de chasses d'eau pour le transport des excréments vers un système de traitement partagé avec les eaux grises provoque une connexion entre le cycle de l'eau et celui des nutriments. Les nutriments contenus dans les excréments sont dilués dans l'eau pour en être extraits ensuite au prix d'un développement technique important. » -d'après [25]

Les investissements énormes réalisés dans le cadre de la politique de gestion des eaux usées domestiques, l'état actuel du bâti, les aspects culturels et psychologiques ainsi que le cadre législatif en place sont les freins majeurs à une transition du modèle. Dans le chapitre suivant, nous abordons les aspects légaux liés à la thématique.

5.1 | L'assainissement en Wallonie

La collecte et le traitement des eaux usées domestiques en Wallonie est répartie entre différents acteurs [26] :

- les **communes**, qui sont responsables de l'égouttage;
- les **organismes d'assainissement agréés** (OAA) qui ont la charge de la réalisation et de l'exploitation des infrastructures d'épuration (tous les OAA sont des intercommunales);
- la **Société Publique de Gestion de l'Eau** (SPGE) qui « coordonne les actions des différents opérateurs et assure le financement de l'épuration collective, de l'égouttage prioritaire et de la protection des captages d'eau souterraine ».

D'après un acteur du secteur, beaucoup du pouvoir décisionnel quant aux choix techniques en matière d'assainissement collectif réside au sein des OAA.

La législation prévoit 3 régimes d'assainissement [26] :

- **Collectif** : obligation de collecte des eaux usées et le traitement de celles-ci dans des stations d'épuration publiques. Ce régime s'applique dans les zones densément peuplées.
- **Autonome** : obligation d'installation de systèmes d'épuration individuelle (SEI) ou groupée. Ce régime s'applique dans les zones faiblement habitées.
- **Transitoire** : où des études complémentaires sont nécessaires pour déterminer l'affectation finale. Il est donc destiné à évoluer vers un régime collectif ou autonome. Il concerne les zones présentant une hétérogénéité de la densité de l'habitat ou dont l'évolution est incertaine [27].

L'assainissement autonome concerne près de 12 % de la population (soit environ 130 000 habitations ou 400 000 personnes, voir **Figure 5.1**) [26].

5.2 | Épuration des eaux

La politique régionale en matière de traitement des eaux résiduaires est régie par une directive européenne contraignante (91/271/CEE) [26]. En Wallonie, on trouvera les prescriptions en vigueur dans le Code de l'eau qui constitue le *LIVRE II* du Code de l'Environnement.

5.2.1 - Assainissement collectif

En zone d'assainissement collectif, les habitants n'ont aucune possibilité d'implication dans le choix des moyens d'assainissements en œuvre. Ces décisions sont donc à la charge de la SPGE et des OAA. Les agglomérations doivent être équipées de systèmes de collecte et traitement et les

5.1 L'assainissement en Wallonie

5.2 Épuration des eaux

5.3 Toilette sèche

5.4 Le cas de l'habitat léger

5.5 Valorisation des effluents

5.6 Bilan et perspectives

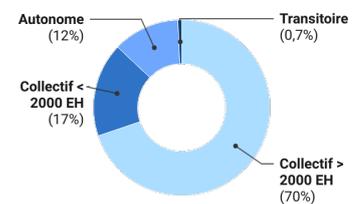


FIGURE 5.1 – Répartition des 3 régime d'assainissement en Wallonie. (Source données [5].)

habitations doivent y être raccordées. Les eaux traitées et rejetées par les STEP doivent respecter les prescriptions en vigueur quant à leur qualité physico-chimique. [28]

5.2.2 - Régime transitoire

Les zones en régime d'assainissement transitoire étant destinées à évoluer vers un régime collectif ou autonome, les habitations doivent y être équipées d'un système de pré-traitement (fosse septique) tout en gardant la possibilité de mise en place future d'un SEI ou d'un raccordement à l'égout. [28]

5.2.3 - Assainissement autonome

Cadre

La gestion de l'assainissement autonome est assurée par la SPGE via la Gestion Publique de l'Assainissement Autonome (GPAA). Son objectif principal est d'assurer le bon fonctionnement des SEI à travers l'accompagnement des particuliers [29].

Cet objectif est atteint en appliquant un ensemble de mesures [29, 30]. Premièrement, tout nouveau SEI installé doit être agréé. L'agrément d'un SEI est délivré suite à l'évaluation de celui-ci par un comité d'experts. Deuxièmement, l'installateur a l'obligation de transmettre à la SPGE un rapport relatif à l'installation du SEI. Une attestation de contrôle est délivrée par la SPGE. Troisièmement, le SEI doit être entretenu. Cet entretien est couvert par un contrat d'entretien et est assuré par un prestataire de services agréé. Enfin, l'installation d'un SEI est sujet à déclaration ou nécessite un permis (selon sa capacité) [31]. La **Figure 5.2** résume la typologie des SEI et les principales contraintes qui y sont associées.

Le financement de la GPAA se fait par le biais du CVA¹. En contrepartie, une prime pour l'installation d'un SEI peut être obtenue. Elle est calculée sur base du coût d'installation et d'un ensemble de critères contextuels. Elle est de l'ordre de 1000 à 12000 €. Une participation au paiement des entretiens (~ 100 €) est aussi de mise.

La capacité d'épuration du SEI est déterminée en fonction du nombre d'EH associés à la/les habitation(s) desservie(s) par le système. La charge polluante (exprimé en EH) est proportionnelle au nombre d'occupants et varie selon le type d'implantation (logement ou autres installations). Le SEI doit néanmoins avoir une capacité minimale de 5 EH. Dans les faits, cette contrainte est parfois contournée si les autorités communales le tolèrent. Ce contournement peut être justifié par la directive européenne 91/271/CEE qui impose des normes de rejet et non de dimensionnement des installations.

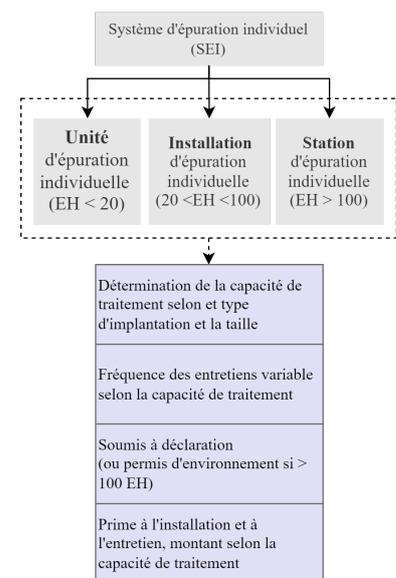


FIGURE 5.2 – Typologie des SEI et contraintes associées.

1: CVA : redevance donc s'acquitte le citoyen sur base de sa consommation d'eau et qui vise une répartition équitable et solidaire des coûts liés à l'épuration des eaux usées domestiques. Depuis le 1er juillet 2017, le CVA est de 2,365 €/m³, soit 40 % du coût de l'eau de distribution [32].

Spécification techniques

Les SEI intègrent un dispositif de prétraitement, de traitement et d'évacuation. La **Figure 5.3** résume ces éléments. Le premier assure à minima le stockage des boues primaires, et ce avec un volume croissant avec la capacité d'épuration (EH). Pour une capacité de 5 à 10 EH : 320 L/EH avec un minimum de 3 m³. [6, 31]

Vient ensuite le dispositif de traitement en lui-même. Il peut s'agir d'un système de lit bactérien, de boues activées, de biomasse fixée, de lagunage ou une combinaison de ceux-ci. La législation distingue les systèmes intensifs, au sein desquels les processus de dégradation naturels sont intensifiés par un équipement électromécanique permettant le traitement sur des surfaces/volumes restreints et les systèmes extensifs (pas d'équipement électromécanique autre qu'un dispositif de relevage). [31]

L'évacuation des eaux usées traitées doit se faire préférentiellement par infiltration (drains dispersants, filtres à sable, . . .), à défaut, par déversement dans les eaux de surface et en dernier recours par puits perdant [6]. Le dimensionnement de ce dispositif doit être conforme aux spécification reprises dans l'arrêté [31]. Les eaux pluviales ne doivent pas transiter par le SEI.

Les eaux traitées doivent être conformes à des normes de rejet spécifiées dans l'arrêté [31]. Ces normes concernent les paramètres physico-chimiques (DBO₅, DCO, et MES). Des normes plus strictes doivent être respectées pour les zones de baignade et les zones de protection de captage.

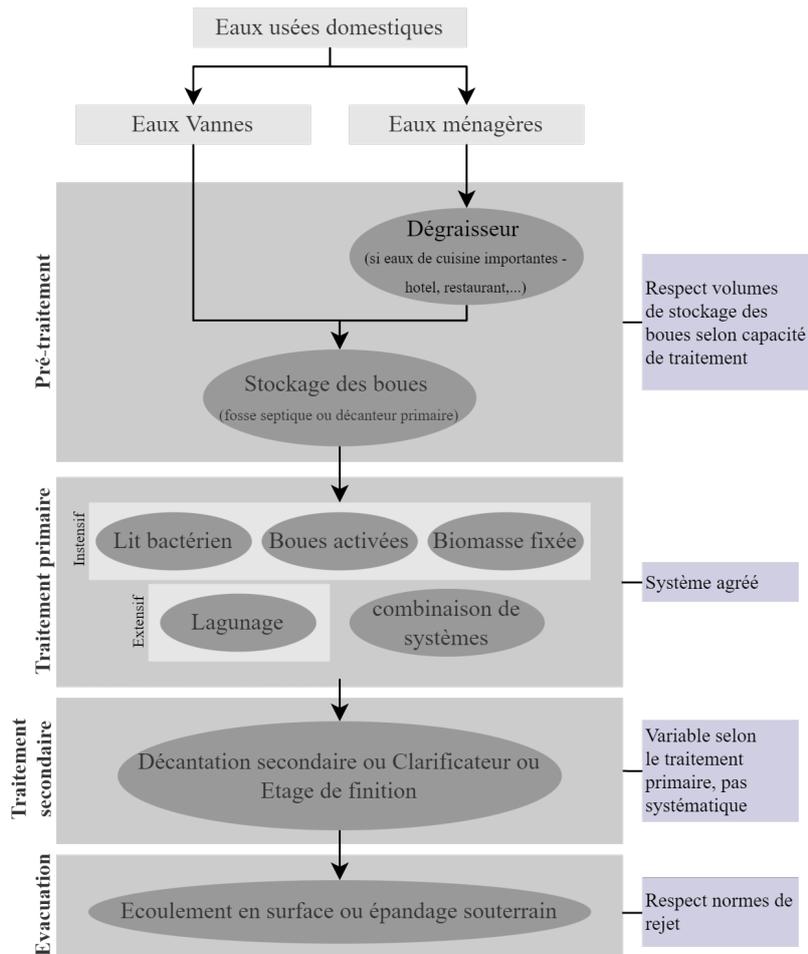


FIGURE 5.3 – schématisation des spécifications technique des SEI. (Inspiré de [6].)

5.3 | Toilette sèche

En Belgique, il n'existe pas de cadre juridique encadrant la gestion des toilettes sèches. Il n'existe en outre pas de définition légale des eaux noires ni des toilettes. Nous trouvons toutefois parmi les *critères minimaux de salubrité des logements* du *Code wallon de l'habitation durable* quelques éléments liés aux toilettes. Pour être salubre, un logement doit être équipé d'une toilette à chasse d'eau [33]. Sans interdire l'usage de toilettes sèches, cette disposition empêche toute réalisation de logement qui ne compte pas une toilette à l'eau conventionnelle.

Contrairement, en France, un chapitre relatif à l'utilisation des toilettes sèches a été intégré dans les textes relatifs à l'assainissement autonome et dicte son cadre d'implantation (voir encadré ci-dessous).

Arrêté du 07/2009 - Chapitre V (France) [16]

Par dérogation, les toilettes dites sèches (sans apport d'eau de dilution ou de transport) sont autorisées, à la condition qu'elles ne génèrent aucune nuisance pour le voisinage ni rejet liquide en dehors de la parcelle, ni pollution des eaux superficielles ou souterraines.

Les toilettes sèches sont mises en œuvre :

- soit pour traiter en commun les urines et les fèces. Dans ce cas, ils

- sont mélangés à un matériau organique pour produire un compost ;
 — soit pour traiter les fèces par séchage. Dans ce cas, les urines doivent rejoindre le dispositif de traitement prévu pour les eaux ménagères [eaux grises], conforme aux dispositions des articles 6 et 7.

Les toilettes sèches sont composées d'une cuve étanche recevant les fèces ou les urines. La cuve est régulièrement vidée sur une aire étanche conçue de façon à éviter tout écoulement et à l'abri des intempéries.

Les sous-produits issus de l'utilisation de toilettes sèches et après compostage doivent être valorisés sur la parcelle et ne générer aucune nuisance pour le voisinage, ni pollution.

En cas d'utilisation de toilettes sèches, l'immeuble doit être équipé d'une installation conforme au présent arrêté afin de traiter les eaux ménagères [eaux grises]. Le dimensionnement de cette installation est adapté au flux estimé des eaux ménagères [eaux grises].

Cette disposition légale est toutefois strictement limitée à la toilette et ne reconnaît pas qu'en conséquence de l'utilisation d'une toilette sèche, les eaux usées domestiques sont nettement moins chargées et que le dimensionnement du système de traitement des eaux peut être revu à la baisse [34]. Or, il a été démontré que pour le traitement des eaux grises seules, une capacité de traitement réduite de moitié est suffisante pour atteindre les normes de rejet (voir § 6.4.3) [35].

5.4 | Le cas de l'habitat léger

Le cadre légal relatif à l'habitat léger² semble un peu plus favorable à l'utilisation de toilettes sèches. L'arrêté du 3/12/2020 concernant les habitations légères ne spécifie pas que les toilettes d'un habitat léger doivent être munies d'une chasse d'eau [33]. En outre, la fiche logement concernant l'habitation légère en Wallonie [36] éditée par le SPW et qui résume les dispositions de l'arrêté du 3/12/2020 spécifie concernant les toilettes qu'il « peut s'agir d'une toilette sèche » sans toutefois la définir plus précisément. En matière d'épuration des eaux, l'habitat léger doit se plier aux mêmes directives que tout autre implantation (Section 5.2).

2: Habitat léger : habitat caractérisé par « le poids léger de l'habitation (et donc son absence de fondation), sa petite taille, son moindre coût et la possibilité de le construire par ses propres moyens ». Depuis 2020, le Code du Logement Wallon intègre des directives pour l'encadrement de ce type d'implantations. Voir à ce sujet <https://www.habiterleger.be>.

5.5 | Valorisation des effluents

5.5.1 - Excréments humains

Juridiquement, les excréments humains sont considérés comme des déchets biodégradables et combustibles [37]. La directive Européenne 2008/98/CE définit le déchet comme « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se débarrasser ». Le statut juridique de déchet implique l'application des principes qui y sont associés, à savoir, le principe du pollueur-payeur, le principe de prévention, le principe de responsabilité élargie du producteur et le principe de proximité et traçabilité. Ce statut constitue un grand frein à la valorisation de ces substances notamment à cause de la répartition des responsabilités qu'il implique [38].

5.5.2 - Boues des STEP

La revalorisation agricole des boues de STEP est légale en Wallonie moyennant le respect d'un cadre légal strict. Elles sont l'objet d'une certification d'utilisation qui nécessite l'identification de l'origine des boues et des procédés amenant à leur génération. Une analyse des paramètres physico-chimiques et biologiques est obligatoire. Elle permet d'identifier la qualité agronomique des boues ainsi que les teneurs en ETM. La législation ne prévoit pas une analyse des autres polluants mais dans les faits, le contrôle des teneurs en HAP, BTEX, hydrocarbures, . . . est presque systématique et est imposé par le biais de la délivrance des autorisations et dérogations. Leur épandage ne peut pas entraîner de dépassement des normes de teneur en ETM [39]. Il est intéressant de noter que cette possibilité d'épandage des boues ne fait pas consensus. En Suisse par exemple, elle reste interdite.

5.6 | Bilan et perspectives

La politique en matière d'assainissement vise une dé-responsabilisation totale du citoyen vis-à-vis de ses eaux usées. Ceci est dû à une volonté de limiter au maximum les risques sanitaires et environnementaux liés à leur gestion.

Toutefois, en termes de risques pour l'environnement, les préoccupations concernent principalement les impacts directs sur les eaux de surface et les eaux souterraines. Les impacts plus globaux liés aux eaux usées domestiques comme les enjeux agricoles (**Section 4.4**) ainsi que l'empreinte énergétique de l'assainissement (**Section 4.5**) sont une préoccupation mineure.

Nous percevons peu de volonté de réduction de la génération d'eaux usées domestiques alors que la Directive Européenne 2008/98/CE encadrant la gestion des déchets stipule que « *la prévention devrait être la priorité première de la gestion des déchets, le réemploi et le recyclage devant être préférés à la valorisation énergétique des déchets, dans la mesure où ils représentent la meilleure option écologique* ». ³

En résumé, il nous semble qu'il y ait une application extrême du *principe de précaution* - qui prend la forme d'un cloisonnement entre l'individu et les eaux usées qu'il génère - incompatible avec le *principe de prévention* qui appelle à une réduction de la génération de déchets.

A l'image du tri qui est de mise pour le recyclage des déchets ménagers solides, une gestion séparative des effluents domestiques⁴ pourrait améliorer la pertinence des modèles de gestion des eaux usées domestiques en permettant à des filières de traitement adaptés aux propriétés spécifiques de chaque effluent de voir le jour. Nous défendrons cette idée dans la deuxième partie de ce document en tentant de mettre en évidence les éléments techniques qui pourrait ramener de la cohérence dans les filières d'assainissement.

3: Ce principe de hiérarchisation des priorités pour la gestion des déchets est souvent appelée *Échelle de Lansink* en référence au politicien néerlandais Adrianus Lansink.

4: Notons que le développement de l'*égouttage séparatif* pour les eaux pluviales est une prémisses de gestion différenciée.

NOUVEAUX MODÈLES D'ASSAINISSEMENT

6.1 | Systèmes d'assainissement *conventionnels*

6.1.1 - Systèmes d'assainissement centralisés

L'assainissement collectif présente un certain nombre de contraintes. Tout d'abord, il y a l'installation et l'entretien d'un réseau de collecte¹ qui représente une charge d'entretien importante (**Figure 6.1**). L'intercommunale *inBW*² stipule que « les égouts sont parfois très âgés et affaiblis par des interventions multiples ». En plus de représenter un coût important, la fiabilité des installations reste questionable. En effet, *inBW* évoque un « défi budgétaire et environnemental »... [40]

De plus, au vu des volumes concernés par l'assainissement collectif (ordre de grandeur en centaines de milliers de m³/jour, *cfr Section 3.1*), l'infiltration des effluents traités n'est pas possible. Ils sont donc déversés dans les eaux de surface alors que leur état physico-chimique n'y est pas très favorable et que leur infiltration serait préférable. Nous pouvons d'ailleurs noter que l'infiltration est priorisée en assainissement autonome (*cfr § 1*).

Enfin, il est nécessaire de gérer des volumes importants de boues générées par le processus d'épuration.³ Or celles-ci contiennent potentiellement des substances non désirées : ETM, composés organiques persistants,... qui peuvent limiter leur revalorisation agricole et mener à leur incinération alors que c'est le dernier recours en matière de revalorisation des déchets (*cfr Section 5.6*).

Toutefois, l'assainissement collectif assure la dé-responsabilisation du citoyen vis-à-vis des déchets qu'il produit. De plus, il permet un bon contrôle du rabattement de la pollution. Enfin, sa faible emprise au sol (0,5 à 2 m²/hab) en fait sans doute la solution la plus adaptée en milieu urbain [25].

6.1.2 - Systèmes d'assainissement décentralisés

Nous présentons ici les SEI extensif agréés en région wallonne. Par leur caractère extensif, ils semblent être les plus en cohérence avec les enjeux de consommation d'énergie exposés à la **Section 4.5**.

Conformément à la législation, les SEI extensifs agréés en Wallonie se composent d'une fosse septique de pré-traitement puis un traitement primaire à travers un système de filtration.

La fosse septique a pour rôle principal de séparer la fraction solide par décantation et les graisses qui forment un surnageant dans la cuve. Avec le temps, les solides qui se déposent au fond sont dégradés sous l'action de micro-organismes anaérobies. Bien que le taux de réduction des matières solides soit élevé, leur vitesse d'accumulation est plus

6.1 Systèmes *conventionnels*

6.2 Classification des systèmes

6.3 Propriétés des filières

6.4 Présentation des filières

6.5 Récapitulatif

1: Pour rappel, il représente en Wallonie un réseau de près de 20 000 km, *cfr Section 3.1*.

2: *inBW* : Intercommunale du Babant Wallon, responsable du développement économique et territorial, de la gestion du cycle de l'eau et du cycle des déchets.

3: Pour rappel, ma production de boues de STEP s'élevait à 50 000 T en Wallonie en 2020, *cfr Section 3.1*.



FIGURE 6.1 – Collecteur d'égout en cours d'installation. (Source : *inBW*.)

rapide que celle de leur décomposition et la cuve doit être régulièrement vidangée [7]. Une fosse septique bien dimensionnée ne doit être vidangée qu'à une fréquence décennale. Elle a le grand avantage de permettre un pré-traitement tout à fait passif ne nécessitant aucune pièce mécanique et aucune intervention spécifique par l'utilisateur.

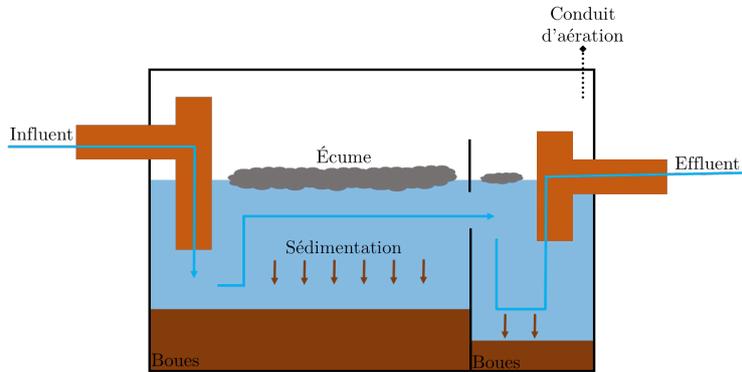


FIGURE 6.2 – Principe de fonctionnement de la fosse septique. (Inspiré de [7].)

Cependant, l'installation de la fosse septique nécessite des travaux de terrassement lourds. D'autre part, le sous-produit de la fosse est une boue difficile à manipuler qui nécessite l'intervention d'un vidangeur pour être évacuée. De plus, bien que les boues de vidange doivent en théorie être acheminées vers un centre de traitement spécialisé, elle restent, d'après un acteur du secteur, couramment déversées dans l'environnement par des vidangeurs peu scrupuleux. Enfin, l'évacuation des boues implique que leur potentiel nutritif soit exporté et ne soit pas valorisé localement.

Le traitement primaire extensif est en général réalisé en faisant percoler les eaux usées à travers un substrat filtrant dans lequel un écosystème de micro-organismes assure spontanément la minéralisation des nutriments. Ces filtres sont éventuellement plantés.

Dans le cas de filtres plantés, le substrat est généralement constitué de sable et de graviers. Les plantes améliorent la performance des filtres principalement grâce à la présence des rhizomes qui sont un support pour le développement des micro-organismes [41]. Elles permettent aussi une production de biomasse valorisable localement et les nutriments que leurs tissus contiennent - qui proviennent des eaux usées - peuvent donc retourner à la terre localement.

La majorité des SEI extensifs agréés en Wallonie sont des filtres plantés. L'eau transite à travers un massif filtrant plutôt qu'un plan d'eau. Ce système de massif filtrant est apparu dans les années 80 et est préférable aux systèmes de cultures libres constitué de grands plans d'eau artificiels qui prévalaient précédemment. En effet, les performances épuratoires sont meilleures car le substrat constitue un support physique pour le développement des micro-organismes. De plus, le substrat limite les risques de noyade puisque le niveau d'eau est sous la surface du substrat.

Dans le cas de filtres sans plantes, les substrats sont des granulats d'argile expansée ou des fibres de xylit.⁴

La surface nécessaire pour assurer le traitement primaire avec un système extensif est de l'ordre de 2 à 5 m²/EH [42].

4: Fibre de xylit : résidu revalorisé obtenu lors de l'extraction du lignite, utilisé dans les systèmes X-perco® de la firme Eloy Water.

6.2 | Classification des systèmes et filières

Nous proposons ici une grille d'analyse des différentes options possibles pour l'assainissement. Nous nous basons sur une distinction des 3 effluents domestiques (à savoir les urines, les fèces et les eaux grises) et les différentes combinaisons possibles pour une gestion conjointe ou différenciée de ceux-ci. L'objectif est de mettre en avant la modularité des différentes solutions techniques possibles et les possibilités de diversification des systèmes d'assainissement. Nous espérons donner un aperçu le plus vaste possible de ce qui est possible pour inspirer des projets expérimentaux.

Nous identifions ci-dessous un ensemble de **filières de traitement** possibles. Nous définissons une filière de traitement comme un système au sein duquel *le ou les effluent(s) partage(nt) une partie ou l'intégralité des infrastructures de transport, de traitement et de valorisation*.

Les filières de traitement prennent la forme d'une chaîne de systèmes de transport, de stockage et/ou de traitement des effluents entre leur collecte et leur destination finale (**Figure 6.3**).

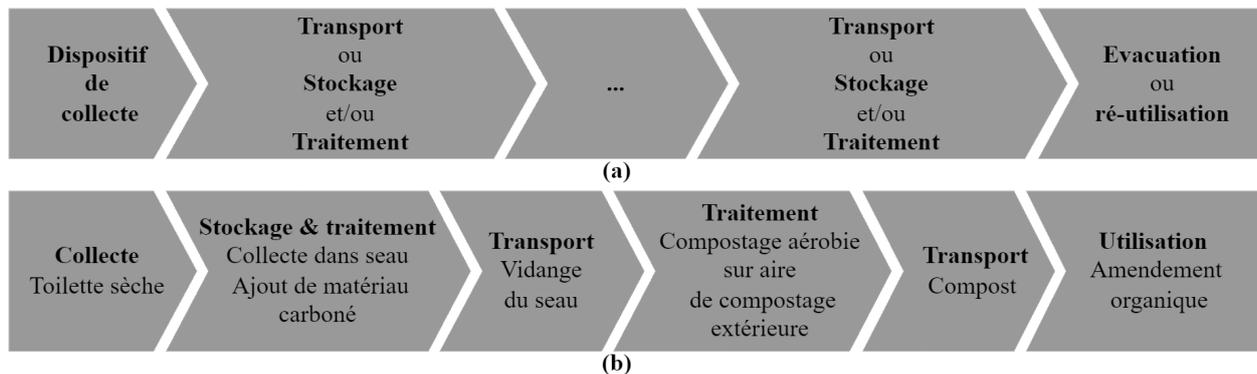


FIGURE 6.3 – (a) Schématisation du concept de *chaîne de systèmes* au sein d'une filière de traitement, (b) application du concept au cas de la TLB.

La combinaison des différents effluents domestiques (seuls, par paires ou en trio) permet d'identifier 7 filières de traitement possibles. Elles sont conceptualisées à la **Figure 6.4**. Dans la **Section 6.4**, nous présentons les formes que peuvent prendre les filières et les raisons qui peuvent motiver leur mise en œuvre.

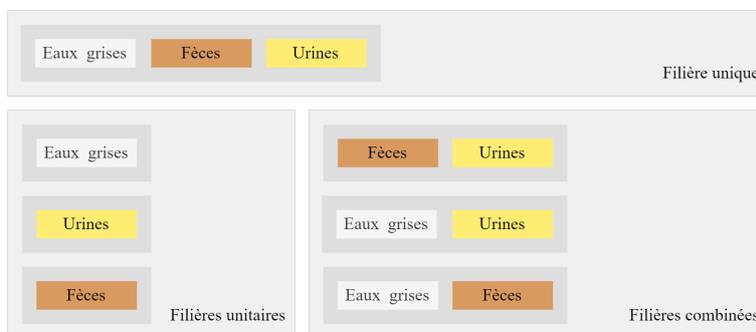


FIGURE 6.4 – Présentation des 7 filières de traitement.

Ces filières sont éventuellement combinées pour assurer la gestion de l'ensemble des effluents de l'habitation. Nous nommerons ces combinaisons les **modèles de gestion des effluents**. Cinq modèles de gestion

sont possibles pour assurer le traitement des 3 effluents domestiques (Figure 6.5).

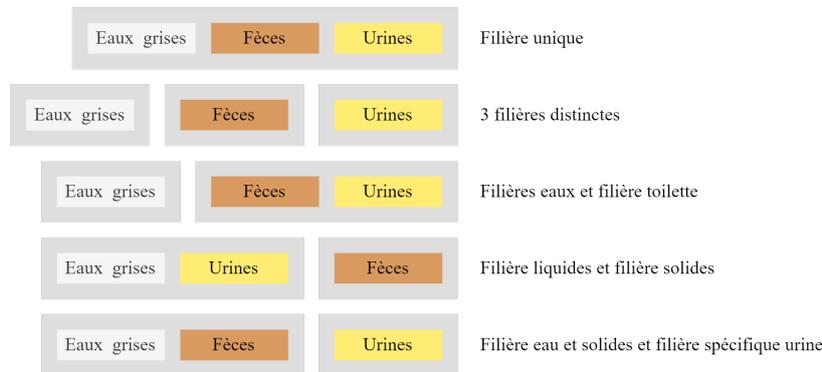


FIGURE 6.5 – Présentation des 5 modèles de gestion.

6.3 | Propriétés des filières

6.3.1 - Transport des effluents

Différents dispositifs sont possibles pour assurer le transport des fractions solides et liquides des effluents. Le **Tableau 6.1** présente les différentes options identifiées.

6.3.2 - Séparation des excréments

Une filière de traitement peut nécessiter une séparation avant ou après collecte de la fraction solide (fèces) et liquide (urine et/ou eau de chasse) des excréments. Nous avons recensé un ensemble de dispositifs permettant cette séparation.

Dans le cas de la séparation de l'urine, le mode de séparation influence sa qualité micro-biologique. En effet son contact avec les fèces implique une contamination des urines par les micro-organismes fécaux. Le **Tableau 6.2** présente les méthodes de séparation *à la source*, pour lesquelles il n'y a pas de contact entre urines et fèces et le **Tableau 6.3** présente les méthodes de séparation *après émission* pour lesquelles il y a contamination. Dans ces cas là, un traitement hygiénisant plus strict de l'urine peut être nécessaire si elle est destinée à une revalorisation agricole (*cf* **Section 4.1**). Enfin, le **Tableau 6.4** illustre certains des systèmes présentés.

6.3.3 - Types de toilettes

Les différentes filières de traitement requièrent l'utilisation de toilettes spécifiques. À partir de la diversité de toilettes existantes, nous avons établi une classification en 6 types de toilettes qui varient par leur caractère *séparatif* ou non et par l'apport éventuel d'eau. L'apport d'eau sert à assurer le transport et éventuellement le nettoyage de la cuvette. Le **Tableau 6.5** présente cette classification.

6.3.4 - Traitements

Les possibilités de traitements des effluents sont multiples :

- physiques :
 - apports de substances (matériau carboné, agents chimiques, micro-organismes,...);
 - dessiccation ou humidification;
 - décantation;
- biologiques :
 - aérobie (compostage, lombri-compostage, biofiltration,...);
 - anaérobie (fermentation, bio-méthanisation).

TABLE 6.1 – Présentation des modes de transport des excréments.

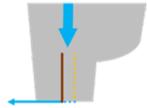
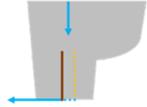
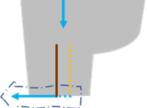
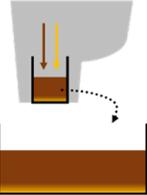
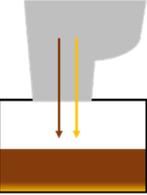
Liquides : EM et urines	Réseau de canalisations	
	Transport de cuve ou récipients	
Solides : Fèces et papier toilette	Apport d'eau important : chasse conventionnelle ~10 L	
	Réseau de canalisations	
	Apport d'eau modéré : micro-chasse ~1 L	
	Réseau de canalisations	
	Apport d'eau minime : micro-chasse ~1 L	
	Réseau de canalisations avec système d'aspiration	
	Chute dans un récipient intermédiaire Transport du récipient	
	Chute dans une cuve située directement sous la toilette où a lieu leur traitement	
Légende	Urines	
	Fèces	
	Eau de transport	

TABLE 6.2 – Présentation des méthodes de séparation des excréments à la source.

Mode de séparation	Description	Ergonomie	
Lunette séparative	Séparateur placé au-dessus de la cuvette et qui canalise les solides et les liquides dès leur émission	- Pas adapté pour uriner debout - Nécessite une lunette spécifique pour les enfants	
Cuvette de toilette compartimentée	Cuvette avec 2 sorties et qui canalise les solides et les liquides dès leur émission	- Potentiellement moins ergonomique pour les femmes	
Cuvette exploitant la tension superficielle	Cuvette exploitant la tension superficielle lors de l'écoulement d'un liquide pour canaliser l'urine*	- Peu contraignant pour l'utilisateur - Pas adapté pour uriner debout	
Urinoir	Cuvette pour la collecte des urines seules	- Très ergonomique pour les hommes - Moins courant et ergonomique pour les femmes	

* Modèle *Save!* de *Laufen Bathroom*

TABLE 6.3 – Présentation des méthodes de séparation des excréments après émission.

Mode de séparation	Description	Ergonomie	
Gravitaire*	Séparation par percolation des liquides à travers le substrat solide.	- Aucune implication pour l'utilisateur	
Tapis roulant	Écoulement des liquides sur un tapis roulant incliné. Les solides sont entraînés vers le haut du tapis.**	- Pédale à actionner pour la rotation du tapis roulant	
Effet centrifuge	Séparation des solides grâce au transit des eaux chargées à travers un dispositif centrifugeur ***	- Aucune implication pour l'utilisateur - Chasse d'eau normale	

* Perte d'une partie importante de la fraction liquide par évaporation

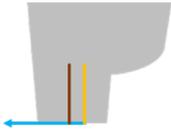
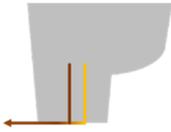
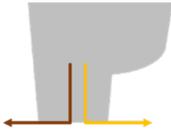
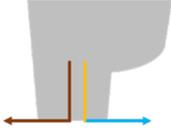
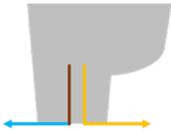
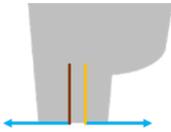
** Proposé exclusivement par *Ecodomeo* ®

*** Proposé exclusivement par *Aquatron* ®

TABLE 6.4 – Présentation des différents modèles de dispositifs de séparation des excréments.

Mode de séparation	Commentaire
Lunette séparative	Disponible chez de multiples fournisseurs Plastique ou porcelaine Auto-construction facile
	Source : Trobolo ®
Cuvette de toilette compartimentée	Disponible chez de multiples fournisseurs
	Source : Wostman ®
Tapis roulant	Exclusivement chez Ecodomeo
	Source : Ecodomeo ®
Effet centrifuge	Exclusivement chez Aquatron
	Source Aquatron ®
Cuvette exploitant la tension superficielle	Exclusivement chez Laufen
	Source : Laufen ®

TABLE 6.5 – Classification des différents types des toilettes selon le mode de transport des effluents et le type de séparation.

		Transport des effluents	Type de séparation
Toilette unitaire		Chasse conventionnelle Micro-chasse Micro-chasse avec aspiration	/
		Cuve sous la toilette Récipient intermédiaire	/
Toilette séparative		<i>Fèces :</i> Cuve sous la toilette Récipient intermédiaire <i>Urine :</i> Canalisation Récipient intermédiaire	Lunette séparative Cuvette compartimentée Gravitaire Tapis roulant
		<i>Fèces :</i> Cuve sous la toilette Récipient intermédiaire <i>Urine :</i> Micro-chasse et canalisation	Cuvette compartimentée Gravitaire
		<i>Fèces :</i> Chasse conventionnelle Micro-chasse Micro-chasse avec aspiration <i>Urine :</i> Canalisation Récipient intermédiaire	Lunette séparative Cuvette compartimentée Cuvette à tension superficielle
		<i>Fèces :</i> Chasse conventionnelle Micro-chasse Micro-chasse avec aspiration <i>Urine :</i> Micro-chasse et canalisation	Cuvette compartimentée

6.4 | Présentation des filières

6.4.1 - Filière unique :

Eaux grises Fèces Urines

Une filière de traitement *unique* pour le traitement de tous les effluents domestiques conjointement est le modèle le plus courant dans les pays occidentaux. Dans son appareillage le plus courant, urines et fèces sont évacuées grâce à un apport d'eau puis l'ensemble des eaux usées domestiques sont canalisées soit vers le réseau d'égouttage soit vers le SEI de l'habitation. Nous n'investiguerons pas ici le cas de l'assainissement collectif qui dépasse le cadre de cette étude.

Dans le cas de l'assainissement autonome, il existe en marge des SEI agréés en Wallonie d'autres solutions techniques possibles. Comme spécifié plus haut, nous nous intéressons ici uniquement aux systèmes extensifs car nous considérons les systèmes intensifs comme n'étant pas une réponse satisfaisante aux enjeux exposés au **Chapitre 4**.

Les SEI extensifs agréés en Wallonie sont décrits au § 6.1.2. La législation impose la présence d'une fosse septique pour le pré-traitement avec les avantages et les inconvénients que cela comporte (*cfr* § 6.1.2). Bien que ses avantages soient indéniables, les procédés alternatifs existants méritent d'être examinés. En effet, il nous semble que la fosse septique soit une solution technique reflétant une approche orientée *déchet* de la gestion des eaux usées domestiques. Elle permet la gestion de la fraction solide des eaux usées endéans une charge de maintenance minimale mais n'est pas optimale pour la revalorisation des effluents traités.

Les systèmes de la gamme *Jardi-Assainissement FV + FH* proposés par Aquatiris⁵ en France sont des systèmes de filtres plantés sans fosse septique. Leur système est composé d'un filtre vertical et d'un filtre horizontal en série. Le premier filtre la fraction solide. Il est divisé en 2 lits qui sont alimentés en alternance (**Figure 6.6**). Cette alternance garantit le maintien de conditions de traitement aérobies assurant un bon taux de réduction de la matière. Nous suggérons aussi que ce traitement aérobie avec activité micro-biologique intense est probablement plus propice à une dégradation des composés organiques persistants. Cette hypothèse est d'ailleurs valable pour tous les systèmes de pré-traitement aérobies. Aquatiris promet aussi, grâce aux conditions aérobies, une absence de mauvaises odeurs. Dans les fait, il semblerait que ce ne soit pas vraiment le cas.

Contrairement à la fosse septique, le sous-produit généré est un terreau facile à manipuler qu'il faudra extraire du filtre tous les 10 ans environ. La production est d'environ 20 L/habitant/an et la surface de ce premier filtre est de 2 m²/EH. L'alternance entre les 2 lits s'effectue manuellement à l'aide d'un dispositif de vannes à une fréquence hebdomadaire. L'installation d'électrovannes programmables ou d'augets automatisés permet éventuellement d'assurer l'alternance de façon autonome.

La chambre de pré-compostage est un autre système possible. Dans celle-ci, les eaux usées brutes sont filtrées à travers une couche de paille et/ou par un filet en matière synthétique. Les 2 filtres sont aussi alimentés alternativement pour assurer une dégradation aérobie [43]. Ce système semble cependant requérir un entretien important. Il semblerait

5: Jardins d'assainissement de Aquatiris, voir <https://www.aquatiris.fr/>

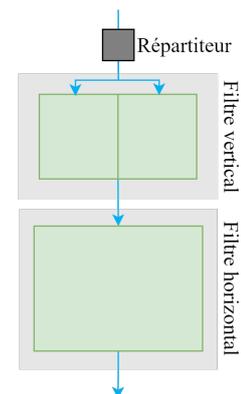


FIGURE 6.6 – Système d'assainissement autonome sans fosse septique de Aquatiris. (Dessin inspiré de Aquatiris.)

également qu'il soit nécessaire d'ajouter fréquemment un matériau absorbant (paille, copeaux) dans le filtre [44]. La forme d'un tel dispositif est présentée à la **Figure 6.7**.

Enfin, nous finirons ce tour d'horizon par les techniques de lombrifiltration qui représentent une technique de pré-traitement et/ou traitement primaire encore peu développée mais prometteuse. La technique est présentée dans l'encadré suivant.

L'utilisation de vers à fumier *Eisenia fetida* pour le traitement des eaux

La lombrifiltration est un système de traitement à lit bactérien. Il s'agit d'un filtre composé d'un médium organique poreux à travers lequel les eaux à traiter percolent (**Figure 6.8**). Le médium est colonisé par des vers *Eisenia fetida* (**Figure 6.9**).

Eisenia fetida, appelé couramment *vers à compost* ou *vers à fumier*, est une espèce épigée endémique du sous-ordre *Lumbricina*. On la trouve relativement peu dans les sols non perturbés. L'espèce affectionne plutôt les milieux organiques riches comme les tas de fumier et est communément utilisée pour le compostage de déchets de cuisine. Son développement est optimal à 25°C, 50 à 90 % d'humidité, un pH ~5 et un ratio C/N de 25 à 30. Une concentration en ammonium supérieure à 1 mg/g est létale [45].

Dans un lombrifiltre, les vers *Eisenia fetida* assurent trois fonctions notables exposées ci-dessous.

D'une part, ils assurent le maintien de conditions aérobies en assurant par leur mouvements un brassage du substrat et une oxygénation de l'eau. Le développement optimal de la flore microbienne responsable de la dégradation de la matière organique présente dans l'eau est ainsi assuré.

D'autre part, ils assurent le maintien de la conductivité hydraulique et une porosité adéquate du milieu, assurant ainsi qu'il n'y a pas de colmatage du filtre et que ses propriétés drainantes restent suffisantes pour assurer le passage du flux d'eau.

Enfin, les vers vont réguler la biomasse bactérienne et son activité en se nourrissant du biofilm bactérien formé sur le médium filtrant [46]. Une partie de la matière organique contenue dans l'eau à traiter est ainsi convertie en matière organique insoluble stable.

Nous suggérons que le pré-traitement pourrait aussi être amélioré par l'utilisation des vers *Eisenia fetida*, par exemple par leur introduction dans une chambre de pré-compostage ou dans un filtre de pré-traitement comme celui d'Aquatiris. Les avantages engendrés seraient alors similaires à ceux du lombricompostage présenté ci-après (§ 6.4.2).

À échelle individuelle, un tel système est difficile à maintenir en fonctionnement. Dans le cadre de ce travail, nous avons tenté de mettre en fonction un lombrifiltre expérimental avec des moyens techniques simples. Il a été réalisé à partir d'une cuve en PE-HD de 30 L perforée sur sa face inférieure. Une eau chargée en nutriments transitant en circuit fermé par bâchées réalisées avec une pompe péristaltique et déclenchées

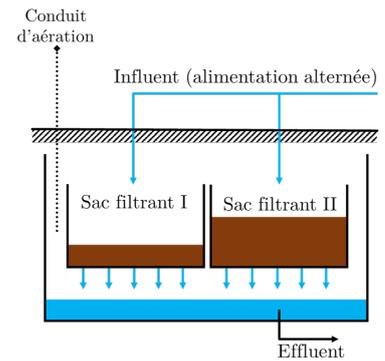


FIGURE 6.7 – Filtre de pré-compostage. (Inspiré de [8].)

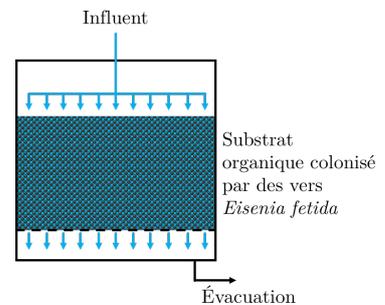


FIGURE 6.8 – Principe du lombrifiltre.



FIGURE 6.9 – Vers *Eisenia fetida*, espèce communément utilisée pour le compostage des déchets de cuisine.

par un minuteur. L'eau chargée était obtenue à partir de macération de végétaux et était changée régulièrement.

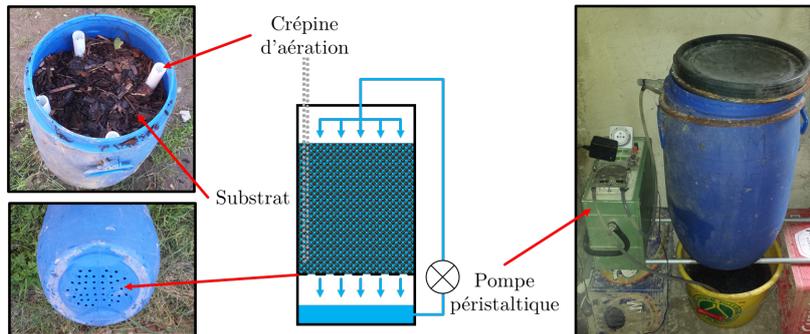


FIGURE 6.10 – Essais de lombri-filtre.

L'essai s'est soldé par un échec. Il fut difficile de trouver le bon régime de pompage pour maintenir les conditions hydriques adéquates et les différentes tentatives d'inoculation du substrat avec *Eisenia fetida* n'aboutirent pas. Il nous a toutefois semblé qu'avec un matériel sensiblement plus spécifique, un système performant reste réalisable. La difficulté semble résider dans le maintien d'une performance épuratoire constante. L'automatisation du système semble indispensable pour y parvenir (éléments de pompage, injection d'air). Le choix du substrat est peut-être également un point à investiguer. De l'écorce de pin de été utilisée pour l'essai en raison de sa faible biodégradabilité et sa facilité d'approvisionnement. La réalisation d'essais plus systématiques avec différents types de substrats s'avère nécessaire.

Pour une petite collectivité ou en tout cas avec des moyens techniques plus conséquents, le système est très prometteur et pourrait se révéler intéressant d'un point de vue économique. Le village de Combaillaux dans le Sud-Ouest de la France a été équipé d'un tel système pour une population de 2500 habitants. En 2005, le coût du dispositif était estimé de 30 à 40 % moins cher qu'un système équivalent plus classique, différence attribuée à « l'absence de déshuilage-dégraissage (les matières grasses sont absorbées par les vers), l'absence de décanteur-digesteur anaérobie ou/et de bassin de traitement aérobie avant filtrage et l'absence de décanteur ou clarificateur après la lombri-filtration ». [47]

Au § 6.4.2, nous verrons un dispositif apparenté à un lombri-filtre permettant le recyclage de l'eau de chasse pour une filière combinée urines et fèces.

Pour conclure, nous dirons qu'une filière de traitement unitaire est le modèle qui semble *à priori* le plus facile à installer dans du bâti existant puisqu'elle ne nécessite pas de mise en place de conduites supplémentaires et ne demande pas ou peu d'interventions de la part l'utilisateur. Cependant, elle ne permet pas une revalorisation optimale des nutriments et l'ampleur des installations peut rendre le système très coûteux. Par ailleurs, la législation wallonne est restrictive en termes de solutions techniques possibles et des essais pilotes seraient bénéfiques pour mettre en évidence l'intérêt de pratiques nouvelles facilitant la revalorisation et étant potentiellement moins coûteuses.

6.4.2 - Filière combinée :



Nous distinguons deux grandes catégories de filières de traitement combinant *urines et fèces* selon que les excréments sont transportés avec de l'eau ou non. Nous voyons ci-dessous les deux formes que peuvent prendre cette filières. Finalement, nous discutons de l'intérêt d'une filière avec un traitement anaérobie des excréments.

Filière combinée urines et fèces sans apport d'eau de transport

Le système le plus courant dans ce cas est la TLB déjà évoqué à la **Section 2.5** et pour laquelle la filière de traitement associée est détaillée à la **Figure 6.3**.

Dans une TLB, les excréments sont collectés puis subissent un compostage thermophile pour produire un terreau sain et riche en nutriments. Pour être traités, soit ils sont transportés jusqu'à un composteur distant de la toilette, soit le composteur est situé directement sous cette dernière.

Le mélange des excréments à une litière carbonée (sciure ou copeaux de bois la plupart du temps) est appréciable pour plusieurs raisons. D'une part, il permet de contrebalancer la haute teneur en azote de l'urine⁶ et permet ainsi obtenir un milieu propice à l'activité des micro-organismes. D'autre part, la litière permet de garder le substrat aéré (notamment en absorbant les urines) assurant ainsi un processus de compostage aérobie et inodore. Cet ajout de matière a cependant le désagrément de mener à la génération d'un volume plus important de matière solide à manipuler. S'approvisionner en copeaux ou sciure peut en outre être compliqué ou coûteux.

L'atout principal de la TLB est qu'elle constitue un moyen de gestion des excréments qui nécessite très peu de moyens techniques. En effet, dans sa forme la plus élémentaire, la TLB est un simple seau placé sous une lunette de toilette associé à une aire de compostage extérieure. La TLB est donc sans conteste la solution la plus économique et aisée à mettre en place pour la gestion des excréments, notamment dans du bâti existant. Elle est en outre facilement réversible.

Cependant, elle représente une charge domestique importante dans le cas d'un composteur non relié (vidange régulière du récipient intermédiaire⁷ dans une aire de compostage extérieure et entretien de ce compost). Elle nécessite aussi une bonne maîtrise de la technique de compostage qui fait souvent défaut. À travers une enquête réalisée en Wallonie, *Leyh et al. (2021) [50]* ont montré que le compostage pratiqué par les usagers de TLB est souvent peu satisfaisant, en particulier en ce qui concerne la maîtrise du traitement thermophile nécessaire à la réduction des pathogènes qui est particulièrement difficile à atteindre avec des petits volumes de matière.

Dans le cas d'un composteur relié à la toilette, la configuration permet d'espacer les opérations de maintenance. Cependant cela implique des aménagements particuliers et n'est souvent pas possible dans un bâtiment existant. Le composteur est souvent équipé d'une ventilation forcée pour éviter les remontées d'odeurs et assurer la bonne oxygénation et déshydratation du substrat. Il se situe généralement en sous-sol ou

6: Un ratio C/N de ~60 est nécessaire, or celui des excréments humains est de ~8 [48].

7: Le poids moyen de vidange pour une famille de 4 personnes (2 adultes et 2 enfants) ayant un rythme de vie normal (membres de la famille absent en journée une partie de la semaine) est de ~2,6 kg/jour [49].

demi-sous-sol et bénéficier d'un accès aisé pour faciliter les opérations de maintenance. Cela présente l'avantage de maintenir le compost dans une gamme de températures propice à l'activité microbienne, même en hiver. Le composteur peut être maçonné sur place (Figure 6.11), mais il existe aussi des solutions commerciales comme les composteurs des marques *Clivusmultrum* ou *Ekolet* (Figure 6.12).

Le compostage aérobique limite les possibilités de revalorisation des nutriments. Il n'est en effet pas propice à une revalorisation de l'azote excrété dont une bonne partie est perdue dans le processus (volatilisation et lixiviation). Des pertes allant jusqu'à 97 % ont été mesurées selon les études. [51] Dans le cas des composteurs reliés, le souci technique principal est de limiter les opérations de maintenance et la question des nutriments est en général absente. [4]

Qu'il s'agisse d'un composteur relié ou non, l'introduction de vers à fumier *Eisenia fetida*, pratique encore relativement peu courante, est très bénéfique au processus de compostage. L'encadré ci-dessous résume ses caractéristiques et la Figure 6.13 présente un schéma du principe d'une toilette à lombri-composteur relié.

Le lombri-compostage des excréments

Le lombri-compostage (Figure 6.14) est une alternative au compostage thermophile qui présente de grands avantages. En premier lieu, il nécessite une maintenance moindre. En effet, il n'est pas nécessaire de retourner le tas de compost ni de l'aérer. Les vers permettent le maintien de conditions aérobies en assurant par leurs mouvements un brassage du substrat. Ceci réduit en plus les risques de contamination présent lors de ces opérations.

Il est comparativement bien plus complexe d'assurer un traitement thermophile optimal à petite échelle : la pile de compost de dimensions restreintes limite la montée en température. Il en résulte une très grande variabilité dans la performance du traitement réalisé par les particuliers [50]. Le lombri-compostage permet d'atteindre un très bon taux de réduction de la matière (allant jusqu'à 95 % d'après *Furlong et al.* [46]), de sorte que la vidange du composteur n'est nécessaire qu'après de très nombreuses années.

De plus, le lombri-compostage des excréments est un traitement hygiénisant malgré l'absence de phase thermophile. Plusieurs études ont montré la réduction des coliformes, entérocoques, streptocoques, salmonella, shigella et helminthes après lombri-compostage des excréments (réduction avoisinant les 95 à 100 % selon les études [52, 53, 54, 55, 56]).

Cette réduction est attribuée à la relation proie-prédateur qui s'installe entre les vers et les micro-organismes avec lesquels ils ne sont pas en symbiose. Les vers auraient un impact majeur sur l'écosystème microbien lors du compostage et nos micro-organismes fécaux n'y trouveraient pas leur place [57].

Notons cependant qu'un excès d'azote dans le composteur est nuisible au bon développement des vers [45]. De meilleures performances de compostage seront atteintes s'il y a une bonne lixiviation du



FIGURE 6.11 – Composteur maçonné à la base du bâtiment. (Source : Pierre & Terre.)



FIGURE 6.12 – Composteur rotatif manufacturé commercialisé par Ekolet. Le composteur pivote sur son axe quand une pile de matière suffisante s'est accumulée sous le tuyau de chute. (Source : Ekolet.)

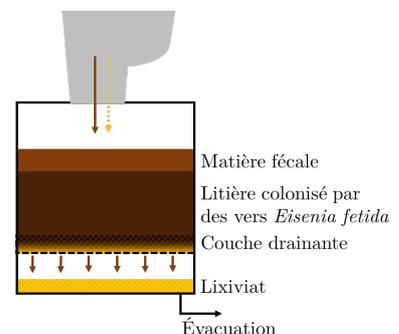


FIGURE 6.13 – Schéma d'une toilette à lombri-composteur relié.

compost, ou une séparation des urines. Au § 6.4.5 nous présentons une réalisation de lombricompostage avec séparation des urines.

Filière combinée urines et fèces avec apport d'eau de transport

Une filière combinée *urine et fèces* sèche avec un composteur relié comme décrite ci-dessus est souvent limitée par des contraintes architecturales. Le composteur doit en effet être situé à proximité immédiate des toilettes. Il est possible de contourner cette limitation avec un système de chasse ou (micro-)chasse pour le transport des solides. L'eau de chasse est alors collectée à la base du composteur et prend la forme d'un lixiviat riche en nutriments qui peut être revalorisé comme engrais. Un exemple commercial est celui de *Clivusmultrum* qui propose des modèles de cuvette à micro-chasse (0,5 L) ou micro-chasse et système d'aspiration qui permettent d'éloigner les toilettes du composteur (Figure 6.15).

Toutefois, la qualité microbiologique de l'effluent n'est pas claire ni sa teneur en nutriments. Il nous semble que les précautions suivantes pourraient permettre la valorisation agricole des lixiviats sans risques sanitaires : d'une part respecter un taux d'application similaire à ce qui est recommandé pour des lisiers d'élevage ou l'urine humaine⁸ et d'autre part, effectuer un traitement aux UV si les effluents sont appliqués sur des cultures maraîchères.

Un autre système notable est celui qui a été développé en Suisse par la coopérative d'habitat *Equilibre*.⁹ Les excréments broyés et l'eau de chasse sont canalisés vers un système de lombrifiltre (cfr encadré Section 6.4.1). Le matériau filtrant utilisé est du charbon couvert d'une épaisse couche de paille. La densité de *Eisenia fetida* est de ~4 kg de vers/hab. Les solides sont dégradés au sein du filtre et l'eau, après avoir subi un traitement supplémentaire dans un filtre minéral, est réinjectée dans le circuit de chasses d'eau (cfr Figure 6.16). Nous renvoyons le lecteur vers le document publié par la coopérative qui présente le dispositif [9].

Traitement anaérobie des excréments

Les systèmes qui ont été présentés ci-dessus pour une filière de gestion des urines et des fèces impliquent tous un traitement aérobie des effluents. Nous pouvons questionner la pertinence d'un traitement anaérobie de ceux-ci en vue d'une production de biogaz.

La production de biogaz à partir des excréments est en effet une pratique fréquente dans certaines régions du monde où le climat chaud est favorable à la biométhanisation. Le gaz produit est fréquemment valorisé pour la cuisson des aliments ou pour l'éclairage. Il s'agit en général de systèmes simples, auto-construits et gérés par les utilisateurs (Figures 6.17 et 6.18). Ces systèmes pourraient dès lors très bien correspondre au contexte que nous étudions ici.

Il apparaît que, bien que le biogaz produit à partir des excréments humains soit relativement riche en méthane (jusqu'à 70%), les excréments d'une personne ne permettraient de produire que 10 à 30 L de biogaz par jour [59, 60]. Au vu des besoins de combustible pour la cuisson des



FIGURE 6.14 – Lombricompostage d'excréments humains. Le mouvement des vers assure le brassage de celui-ci. (Source personnelle.)

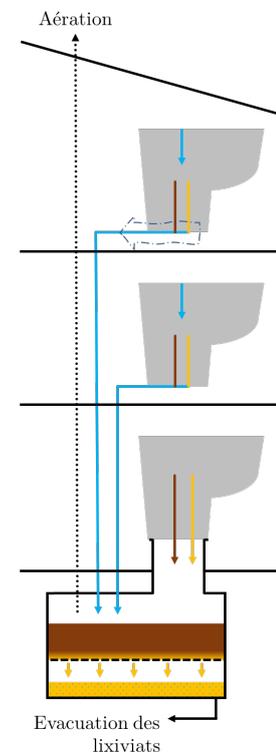


FIGURE 6.15 – Schéma d'un composteur manufacturé. (Inspiré de *Clivus Muntrum*.)

8: De telles prescriptions peuvent être trouvées dans les travaux de *Stintzing et al* [58] et dans le Chapitre IV du Code de l'eau [28].

9: *Equilibre*
www.cooperative-equilibre.ch

aliments (300 L de gaz pour la cuisson d'un repas pour 5 à 6 personnes), la biométhanisation des excréments humains seule ne semble pas pertinente car les ne permet pas de combler le besoin en gaz.

En outre, les processus anaérobies sont très sensibles et difficiles à maîtriser. Ils nécessitent une bonne organisation et des compétences spécifiques pour garder une unité opérationnelle. A l'échelle d'un ou de quelques ménage(s), cela semble représenter une charge de travail de maintenance trop importante.

Enfin, le traitement anaérobie ne permet pas la destruction des micro-organismes d'origine fécale de l'effluent [59].

Il nous semble donc que, mis à part des contextes spécifiques où d'autres déchets biologiques sont disponibles - particulièrement des effluents d'élevage - et seraient traités conjointement aux excréments humains, la biométhanisation ne présente pas un grand potentiel pour le traitement des effluents à l'échelle domestique dans nos régions.

6.4.3 - Filière unitaire : Eaux grises

Comme nous l'avons vu plus haut, les eaux grises représentent avant tout un volume d'eau à valoriser. Étant relativement peu chargées, elles ne nécessitent pas un traitement très poussé pour pouvoir être revalorisées ou rejetées dans l'environnement. Des dispositifs relativement modestes, simples et économes peuvent donc suffire à leur traitement.

Nous avons visité un projet maraîcher revalorisant les eaux grises provenant du magasin et d'un logement attenant pour l'irrigation. Environ 600 L d'eaux grises sont collectés quotidiennement, traités au sein d'un filtre planté puis stockés dans un étang artificiel. Avant d'être utilisés pour l'irrigation, l'eau passe par un bassin de décantation pour réduire la charge de matières en suspension. La **Figure 6.19** présente la géographie de l'installation.

Nous pouvons tirer plusieurs enseignements de cette expérience. Tout d'abord, sans surprise, le colmatage des équipements d'irrigation reste la contrainte technique principale. D'autre part, en saison sèche, cette source d'approvisionnement n'est pas suffisante alors que, théoriquement, il y a un *gisement* d'eaux usées énorme à exploiter dans les habitations avoisinantes... Ensuite, sans être illégale, cette installation est en marge de la légalité et l'installation d'un tel système est dépendante des autorités locales. Enfin, un système de filtration sans plantes permettrait probablement de récupérer une bien plus grande quantité d'eau. En effet, durant les périodes sèches, l'évapotranspiration représente une perte d'eau importante.

Le système de traitement primaire des eaux grises utilisé pour cet implantation est un filtre planté comme présenté au § 6.4.1. En tenant compte d'une charge polluante nettement moindre dans le cas des eaux grises seules, le dispositif de traitement peut être dimensionnés sur base d'une surface filtrante réduite à 1 m²/EH, ce qui a été démontré suffisant vu la faible charge des eaux grises [35].

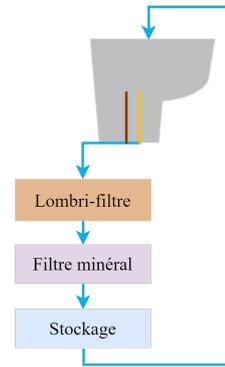


FIGURE 6.16 – Toilette à recyclage de la coopérative Équilibre. (Inspiré de [9].)

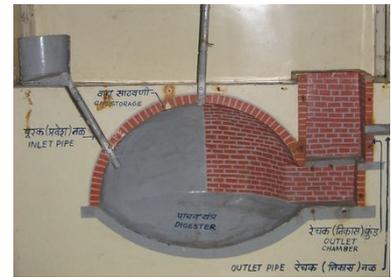


FIGURE 6.17 – Maquette de biodigesteur relié à une latrine en Inde. (Source : Su-SanA.)



FIGURE 6.18 – Biodigesteur en cours de construction au Vietnam. (Source : Su-SanA.)



FIGURE 6.19 – Installation pour le traitement, stockage et réutilisation pour l'irrigation des eaux grises au sein d'un projet de maraîchage en Wallonie. (Source personnelle, image aérienne : WalOnMap.)

Une technique alternative au filtre planté est la pédo-épuration. Il s'agit d'un filtre à biomasse fixée qui consiste en une tranchée non imperméabilisée et remplie de broyat de végétaux qui fait office de support pour les micro-organismes (**Figure 6.20**). Plusieurs installations de ce type sont à l'essai en France.

Plusieurs filtres sont installés en parallèle et alimentés en alternance grâce à un répartiteur. L'alternance permet l'aération du substrat et le maintien de conditions aérobies tout en régulant la croissance de la biomasse microbienne.

Les eaux traitées sont infiltrées directement au bas du filtre qui est réalisé sans étanchéité. Ce dispositif permet donc une valorisation aisée des eaux traitées s'il est installé à proximité de plantations (arbres fruitiers, haies,...).

Ce système est d'une extrême simplicité et ne requiert que très peu de moyens techniques. Il est aussi particulièrement économe. Il ne permet cependant pas de collecter ou stocker l'eau traitée pour une valorisation spécifique et il n'est pas applicable sur des sites où la pédologie ne permet pas une infiltration directe des eaux ou si la topographie ne permet pas son écoulement. Le contrôle de la qualité de l'eau épuré n'est pas évident. L'entretien qu'il requiert est simple et peu contraignant (nettoyage des regards répartiteurs, aération au niveau de la surverse, alternance d'utilisation des filtres et renouvellement ponctuel du broyat).

Une autre solution technique possible est la lombri-filtration comme

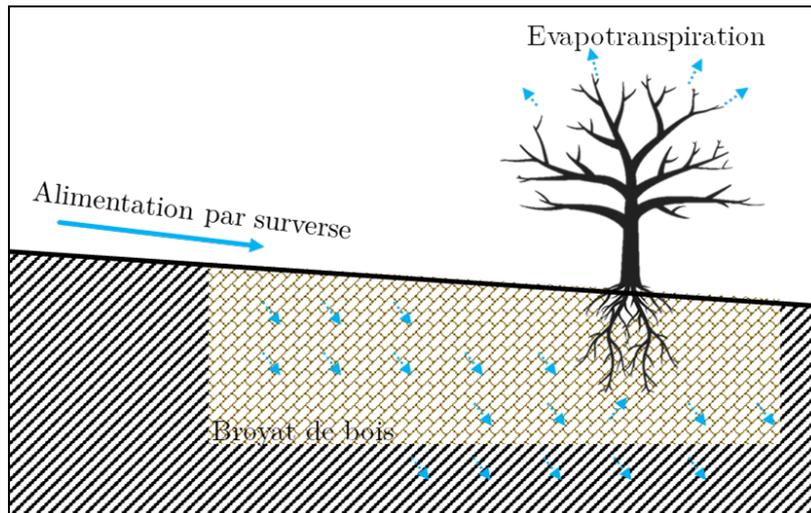


FIGURE 6.20 – Système de pédo-épuration. (Dessin inspiré de Pierre & Terre.)

présenté pour une filière de traitement *unique* à la **Section 6.4.1**. Cette solution pourrait être plus adaptée que le filtre planté pour une revalorisation agricole de l'eau en région sèche car il n'y a pas de pertes par évapotranspiration.

Enfin, il existe aussi des filtres à eaux grises manufacturés dans lesquels l'eau transite à travers un médium filtrant qu'il faut remplacer périodiquement. La **Figure 6.21** présente le système *Greywater filter Light* (capacité 300 L/h) proposé par la firme *Biolan*.



FIGURE 6.21 – Filtre à eaux grises manufacturé. (Source : *Biolan*.)

6.4.4 - Filière unitaire : Urines

L'intérêt principal d'une filière de traitement unitaire pour les urines est qu'elle permet la revalorisation optimale des nutriments contenus dans les urines. À grande échelle, la collecte des urines et leur utilisation pour la fertilisation permettrait de répondre aux enjeux liés aux cycles bio-géo-chimiques en assurant un retour à la terre agricole des nutriments excrétés par le métabolisme humain. Elle permet donc également une réduction de la consommation d'énergie des secteurs de l'assainissement et de l'agriculture.

La collecte sélective de l'urine, si elle est associée à un stockage adéquat, est en effet la méthode qui permet la revalorisation la plus complète des nutriments qu'elle contient (de l'ordre de 95 % pour l'azote [4]).

Esculier et al. (2018) [4] notent par ailleurs que « si l'on conserve le tout-à-l'égout pour les eaux grises et les matières fécales, outre la baisse globale de charge induite, la séparation à la source de l'urine rapproche la composition des eaux usées des ratios $DBO_5 : N : P$ optimaux de l'assimilation bactérienne ». Les coûts et la complexité des traitements effectués dans les STEP seraient ainsi réduits.

Les techniques et infrastructures associées à une valorisation à grande échelle de l'urine ne sont pas encore matures mais le secteur est en évolution. En Belgique, différents projets de revalorisation des urines collectées en milieu urbain sont en cours de développement mais le cadre légal y est peu favorable. La recherche académique sur le sujet est très active en France;¹⁰ en Suisse, quelques dispositifs ont été mis en

10: Voir par exemple les travaux du programme de recherche action OCAP www.leesu.fr/ocapi

œuvre en conditions réelles d'habitat.¹¹ En Suède, la séparation d'urine est courante et depuis les années 80 : de nombreux projets d'habitat l'intègrent [4].

À l'échelle individuelle, une filière de traitement de l'urine permet de mettre en place une filière *fèces* unitaire avec les avantages qu'elle engendre, notamment en termes de manutention et de volume de composteur (cfr § 6.4.5), tout en pouvant éventuellement valoriser l'urine localement comme engrais.

L'urine peut être utilisée directement sur place, par exemple pour un potager domestique. Des usages agronomiques moins évidents de l'urine sont aussi envisageables et mériteraient d'être explorés, pour une activité d'hydroponie¹² ou une culture de spiruline par exemple. Une valorisation avec des agriculteurs locaux dans le cadre d'une collaboration est aussi envisageable, bien que le cadre légal à ce sujet ne soit pas clair à ce jour. Nous renvoyons le lecteur désireux d'un aperçu plus complet de cette éventualité vers l'étude intitulée *L'or Liquide* [38] réalisée au sein de l'École des Ponts ParisTech.

Dans un cadre domestique, un ordre de grandeur de ce qui peut être appliqué pour la fertilisation est que « l'urine d'une personne produite en une journée peut être épandue sur 1 m² chaque année » [58] (soit 40 à 110 kg_N/ha). Il faut donc compter une surface extérieure de 300 à 400 m² pour pouvoir épandre toute l'urine produite par une personne en toute inocuité.

Cet épandage peut être un moyen de rejeter dans l'environnement l'effluent sans dommages pour celui-ci. Cette prescription d'épandage est tout à fait conforme aux textes de loi¹³ et même très largement sécuritaire par rapport au risque de pollution des eaux souterraines. En effet, l'apport azoté total maximal admis sur une année en agriculture est de 250 kg/an sur terre arable et de 350 kg/ha en prairie limité à des périodes spécifiques de l'année, à l'exception des restitutions directes au sol par les animaux en pâture, auquel pourrait être assimilé notre épandage d'urines humaines.

En l'état actuel du secteur, il est peu vraisemblable que le particulier, même disposant d'une surface suffisante, épande ses urines. Cependant, il est réaliste qu'il en collecte une partie pour une valorisation au jardin. La pratique participerait à une prise de conscience sur le sujet et ouvrirait la voie à des solutions plus complètes. D'autre part, s'il y a un contexte favorable à une valorisation comme engrais (projet agricole sur le site ou à proximité), la collecte séparative de l'urine semble pouvoir être une solution à elle seule.

D'un point de vue technique, une filière de traitement unitaire *urine* nécessite un dispositif de collecte séparatif (cfr Tableaux 6.2 et 6.3). Les urines sont ensuite soit transportées via un réseau de canalisations soit collectées dans un récipient intermédiaire. Deux grandes contraintes compliquent cette collecte : d'une part, la volatilisation de l'azote sous forme ammoniacale qui est responsable des mauvaises odeurs associée à l'urine et engendre d'une pollution atmosphérique importante (cfr encadré ci-après) et qui représente une perte d'une grande partie du potentiel fertilisant ; d'autre part, la formation de précipité qui entraîne l'obstruction des canalisations, le dysfonctionnement de certains éléments du système (siphon, vannes, coudes,...) et qui peut aussi représenter une

11: Notamment les projets portés par la coopérative d'habitat *Equilibre* ou l'association *aneco*
www.cooperative-equilibre.ch
www.an-eco.ch

12: Désignée en anglais *pee-ponics* ou *anthroponics*, termes sous lesquels le lecteur trouvera de la documentation sur le net.

13: Directives reprises au Chapitre IV du Code de l'Eau intitulé *Gestion durable de l'azote en agriculture* [28]

perte importante du potentiel fertilisant (principalement du phosphore) s'il n'est pas récupéré.

Des impératifs techniques sont à respecter pour éviter ces désagréments :

- Il est important d'assurer une séparation physique entre l'exutoire du séparateur et le réseau ou récipient de collecte afin d'éviter les remontées d'odeurs. Ceci peut être fait par exemple avec un siphon sec (**Figure 6.22**). Des dispositifs nécessitant un matériel moins spécifique sont aussi envisageables (préservatif, ampoule ou balle de ping-pong dans un entonnoir. [61])
- L'urne doit être stockée dans une enceinte close afin d'éviter la volatilisation de l'ammoniac. Ceci est réalisable à l'aide d'une vanne, d'un siphon sec ou hydraulique. La volatilisation peut aussi être évitée en stabilisant l'urine par changement de son pH (*cfr infra*).
- Pour limiter l'accumulation du précipité, le réseau de collecte doit donc respecter une géométrie adaptée (pentes suffisantes, diamètres adaptés, angles obtus, points de visite, . . .), ce qui peut rendre son installation très contraignante. Le système doit subir un nettoyage régulier et spécifique qui requiert une bonne connaissance du système. [61]

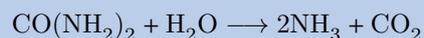
En outre, les toilettes à séparation d'urine nécessitent une attention particulière de la part des utilisateurs. L'évacuation d'urines dans le réceptacle des matières fécales ou l'inverse peuvent amener des problèmes tels que la contamination des urines en bactéries et en matières solides, bouchage de l'orifice ou du siphon, le déséquilibre du ratio C/N qui nuit au processus de compostage des fèces ou l'émanation d'odeurs désagréables.

L'utilisation des toilettes séparatives par les enfants peut être problématique. Leur petite taille induit un positionnement de l'anus à l'avant des toilettes. L'utilisation d'un réducteur de toilette permet d'éviter ce désagrément. [4]

La note de Brun (2019) [61] sur la conception des réseaux de collecte d'urine est un bon résumé de l'état de l'art en la matière.

La volatilisation ammoniacale

L'urée contenue dans l'urine subit une hydrolyse ammoniacale à température ambiante grâce au pouvoir catalytique de l'uréase.



L'uréase est sécrétée par les micro-organismes dans l'environnement mais peut être présente et active dans un milieu, même en l'absence de ceux-ci [4]. Elle s'accumule notamment dans les conduits des réseaux de collecte [11]. Dans les conditions usuelles de collecte d'urine, l'hydrolyse de l'urée peut être complète après une longueur de tuyau de l'ordre de 1 m [4].

En l'absence d'uréase, l'hydrolyse est très lente (la demi-vie de l'urée,



FIGURE 6.22 – Siphon sec à membrane. (Source : SuSanA.)

à pH neutre et à 25 °C, est de quarante ans, elle passe à 0,02 s en présence d'urée). L'azote ammoniacal formé ne restera pas dissous dans la phase liquide au pH de stockage (pH 9,1) et sera volatilisé si le volume de stockage n'est pas clos. [4]

La volatilisation de l'ammoniac dans l'atmosphère a des impacts environnementaux majeurs. Étant le seul gaz alcalin présent dans l'atmosphère, le NH_3 joue un rôle majeur dans la régulation de l'acidité des pluies et sur les flux d'eau dans l'atmosphère. Il est responsable de la formation de particules en suspension. Son dépôt dans les milieux aquatiques induit leur eutrophisation. Les enjeux sont donc environnementaux, climatiques et de santé publique. [62]

La volatilisation ammoniacale issue de l'excrétion humaine, d'environ ~ 3 à $5 \cdot 10^6 \text{ T}_{\text{NH}_3\text{-N}}/\text{an}$, reste cependant marginale au regard d'autres sources d'émissions, en particulier provenant de l'élevage (Tableau 6.6).

Si l'ensemble de l'azote excrété par le métabolisme humain était rejeté dans l'atmosphère sous forme de NH_3 , cela représenterait une émission de l'ordre de $28 \cdot 10^6 \text{ T}_{\text{NH}_3\text{-N}}/\text{an}$,¹⁴ ce qui est non négligeable par rapport aux émissions totales.

Nous pouvons donc conclure que, bien que l'assainissement ait son rôle à jouer pour mitiger cette pollution, elle reste marginale comparée aux effets que l'on peut attendre par des changements de pratiques au niveau agricole.

La problématique liée à la volatilisation ammoniacale questionne l'ensemble des techniques d'assainissement. Selon le procédé d'assainissement, quelle est la quantité de NH_3 volatilisée? Ce paramètre pourrait être un élément pris en compte pour l'évaluation environnementale d'un système d'assainissement.

14: En considérant une excrétion de 4 kg/-pers.an (cfr Tableau 2.1) pour $7 \cdot 10^9$ humains

Volatilisation de l'ammoniac dans l'atmosphère [$\cdot 10^6 \text{ T}_{\text{NH}_3\text{-N}}/\text{an}$]			
	Schlesinger and Hartley (1992)	Dentener and Crutzen (1994)	Bouwman et al. (1997)
Bovins	19.9	14.2	14.0
Porcs	2.0	2.8	3.4
Chevaux	1.8	1.2	0.5
Chèvres et moutons	4.1	2.5	1.5
Volaille	2.4	1.3	1.9
Animaux sauvages	— ^d	2.5	0.1
Total animaux	32.3	24.5	21.7
Fertilisant de synthèse	8.5	6.4	9.0
Ecosystèmes non perturbés	10.0	5.1	2.4
Terres cultivées	— ^d	— ^d	3.6
Combustion de biomasse	5.0	2.0	5.7
Excréments humains	4.0	d	2.6
Surface des mers	13.0	7.0	8.2
Combustibles fossiles	2.2	— ^d	0.1
Industrie	— ^d	— ^d	0.2
Émission totales	75.0	45.0	53.6

—^d Données non disponibles

TABLE 6.6 – Estimation des émissions globale de NH_3 provenant de diverses sources. (Adapté de [12].)

Notons que les techniques de séparation à la source (cfr Tableaux 6.2) permettront une bien meilleure conservation de l'azote car le temps de séjour des urines dans une enceinte non-hermétique est minimal.

Une possibilité pour la stabilisation de l'urine consiste à augmenter ou abaisser fortement son pH ($\text{pH} < 4$ ou > 10) dès la collecte pour empêcher l'hydrolyse de l'urée [63]. Ceci est réalisé par exemple grâce à un ajout d'acide citrique, d'acide acétique [64] ou de chaux (10 g/L, soit 5 kg/-hab.an) mais ceci provoque alors la précipitation du phosphore [65].

L'acidification de l'urine après hydrolyse permettrait aussi de maintenir l'azote ammoniacal sous sa forme NH_4^+ soluble mais ceci nécessite des quantités d'acide 10 fois plus importantes [4].

Une solution intermédiaire semble celle de la fermentation lactique des urines [64, 66]. L'ajout de bactéries lactique et d'une source de sucres fermentescibles permet d'atteindre un $\text{pH} < 4$ à moindre coût [67]. L'urine semble en effet être un médium adéquat pour cette fermentation car elle contient les éléments nécessaires au développement de ces bactéries [68]. Le procédé n'est en outre pas trop complexe à mettre en oeuvre et ressemble à la préparation d'une choucroute.

Nous pourrions imaginer d'utilisation d'un substrat solide ou liquide source de sucres et inoculé de bactéries lactiques. Il serait introduit dans le réservoir d'urine et permettrait une fermentation par *batches*. Avec 2 réservoirs en parallèle, pendant que l'un est en cours de remplissage, l'autre fini sa fermentation. Lorsque le premier est plein, le deuxième a fini sa fermentation et l'urine qu'il contient est prête à être utilisée. Le produit formé serait en théorie stable (absence de volatilisation ammoniacale), sans odeur désagréable et il serait un fertilisant de première qualité car biologiquement actif.

La **Figure 6.24** schématise un tel dispositif et la **Figure 6.24** présente une telle réalisation pour un urinoir masculin.

Nous avons réalisé un test simple pour vérifier les possibilités de mise en oeuvre d'un tel système. Nous avons utilisé le complexe de micro-organismes Active-EM® *Microferm* commercialisé par Agriton¹⁵ riche en bactéries lactiques ainsi que du sirop de sucre pour réaliser une fermentation. Les Active-EM® sont un bon candidat pour la fermentation lactique domestique des urines car déjà commercialisés et disponibles facilement sur le net ou dans certaines grandes surfaces.

La solution de micro-organismes et le sirop ont été placés dans un récipient hermétique avec de l'urine fraîche séparée à la source. Un contrôle du pH est effectué après 5 jours. Malheureusement le pH atteint avoisine 4.5 - valeur aussi atteinte par le témoin sans urine - trop élevé pour stabiliser l'azote. Le mélange a cependant pris une odeur neutre, qui rappelle celle de l'urine sans être désagréable.

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par *Yemaneh et al.* [67] avec la même solution de micro-organismes. Cette équipe de chercheurs a par ailleurs atteint un pH inférieur à 4 avec des bactéries lactiques sélectionnées en laboratoire.

Il semble donc que la technique présentée ici puisse faire ses preuves et permettre de réaliser facilement une lacto-fermentation des urines pour une toilette domestique à séparation. Il manque toutefois sur le marché un produit accessible au grand public pour la réaliser.

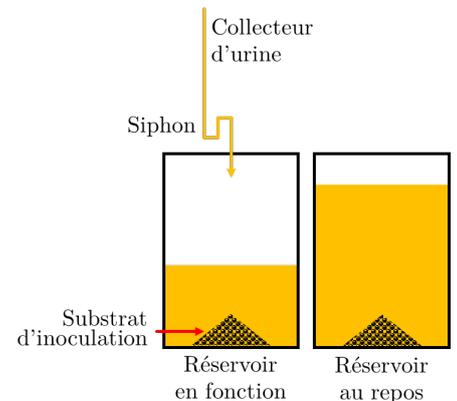


FIGURE 6.23 – Schéma de principe d'un dispositif de lacto-fermentation par batch de l'urine collectée.



FIGURE 6.24 – Urinoir masculin auto-construit permettant de réaliser une lacto-fermentation des urines. La torsion dans le conduit d'urine fait office de siphon.

15: www.agriton.com/fr/sol/5-microferm-871767720118.html

6.4.5 - Filière unitaire : Fèces

Nous distinguons deux types de filières *unitaires* pour les fèces selon qu'elles soient traitées de façon aérobie ou anaérobie. En cas de traitement anaérobie, le dispositif s'apparente à priori à une fosse septique ou à un bio-digester. Nous renvoyons le lecteur aux § 6.4.1 et 6.4.2.

Un traitement aérobie se fera en général dans ou à proximité du logement - proche du lieu d'émission - dans une cuve ou une aire de compostage. En l'absence d'urine, il n'est pas nécessaire d'ajouter une litière carbonée pour le compostage, ce qui réduit les volumes de solide à manipuler tout en se libérant de la nécessité de s'approvisionner en copeaux ou sciure.

La production de fèces seules est de l'ordre de 40 à 50 kg/pers.an [69] alors que celle des urines est bien plus importante (1,2 L/pers.jour [1]). En outre, la déshydratation des fèces permet de réduire considérablement leur volume. Elles ont en effet une teneur en eau élevée (env. 75 % [69]).

En conséquence, si les urines peuvent être collectées séparément et évacuées facilement, avec un réseau de canalisations par exemple, il reste très peu de matière solide à traiter. Les dimensions du composteur peuvent alors être fortement réduites et son installation à l'intérieur du bâtiment est dans ce cas-là bien moins contraignante et le composteur peut plus facilement être relié à la toilette.

Un composteur bien ventilé permettra un traitement *in-situ* efficace des fèces et sans odeur dans le bâtiment. Si le compostage est efficace, le taux de réduction de la matière par minéralisation peut être très élevé, en particulier en présence de vers à fumier *Eisenia fetida* (cfr encadré § 6.4.2). La séparation de l'urine permet en outre d'éviter le risque d'intoxication des vers dû à de fortes concentrations en ammonium.

Une toilette expérimentale a été conçue et implantée pour tester certaines techniques présentées dans ce document (**Figure 6.25**). Pour limiter le plus possible les opérations de maintenance et de manutention, une toilette à composteur relié, lombri-compostage et séparation des urines à la source nous a semblé être la solution la plus adéquate. Nous avons donc conçu la toilette sur le principe schématisé à la **Figure 6.13**.

L'objectif était de développer un système de composteur auto-constructible et bon marché à partir de matériaux manufacturés existants. Nous avons donc opté pour l'utilisation d'une cuve IBC.¹⁶

La toilette a été installée en extérieur pour une habitation de 4 personnes (sans enfants). Ce choix résulte des contraintes liées aux bâti existant. Cela a l'avantage d'être réalisable dans pratiquement toutes les situations et permet de s'affranchir d'éventuels problèmes d'émanations d'odeurs dans l'habitation. Cela comporte cependant une contrainte liée aux faibles températures en hiver : les vers ne supporteraient pas de température sous les négatifs.

La toilette est destinée à être utilisée plus intensivement à la belle saison. En effet, une TLB intérieure, plus confortable la nuit et durant la saison froide, est installée en complément. Le pic d'utilisation de la toilette est donc concomitant de celui de l'activité biologique du composteur.

La **Figure 6.26** détaille comment la cuve IBC a été modifiée pour en faire un composteur. La poche en PE-HD a été découpée pour former le corps



FIGURE 6.25 – Réalisation de la cabine de toilette extérieure.

16: Cuve ICB (pour *intermediate bulk container*) est un contenant utilisé pour la manutention de produits liquides, son utilisation très courante dans l'industrie et pour le transport en fait un produit bon marché et facile à acquérir. Pour du matériel reconditionné, le budget est de 50 à 150€.

du composteur et le réceptacle des lixiviats. La **Figure 6.27** montre le design de la cabine de toilette. Après 6 mois d'utilisation, nous pouvons affirmer que le design est concluant à quelques détails techniques près. Le lecteur trouvera à l'**Annexe A** le détail technique de la réalisation du projet et les éléments de conception à améliorer.



FIGURE 6.26 – Modification d'une cuve IBC en composteur.

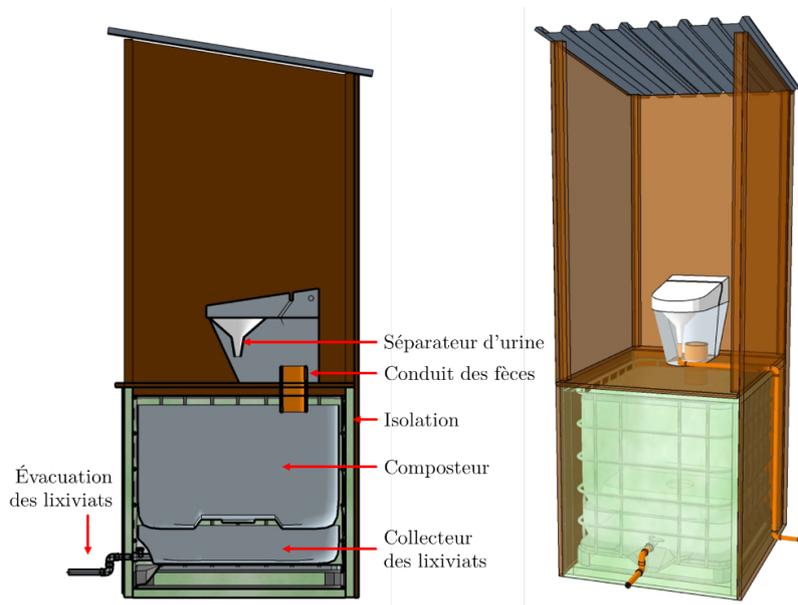


FIGURE 6.27 – Plan de la cabine de toilette extérieure auto-construite.

Enfin, nous avons voulu tester le système de composteur rotatif conçu par Philippe Morier-Genoud pour la coopérative *Equilibre* et baptisé *cacaroussel*. Il s'agit à nouveau d'une toilette à séparation à la source et lombri-compostage. Le composteur cylindrique tourne sur lui-même et une rotation est effectuée à chaque fois qu'un cône d'accumulation de matière est formé sous le siège de toilette (**Figure 6.28**). Cette disposition compacte permet son installation dans un cabinet de toilette de dimensions habituelles. C'est donc une solution qui peut être mise en place dans du bâti existant car elle ne nécessite pas forcément l'installation de conduites supplémentaires. Dans ce cas, les urines devront toutefois être transportées à la main. Nous avons construit et mis en fonction un tel dispositif dans une habitation urbaine.

La toilette a été en fonction pour une durée de 6 mois avec un résultat relativement concluant. Il subsistait une odeur dans la pièce qui serait toutefois évitée si le composteur était relié à la ventilation du local. Le développement de mouchettes dans le compost est un autre problème qui est partiellement résolu par la présence d'une lampe UV anti-insectes dans l'habitacle du composteur.

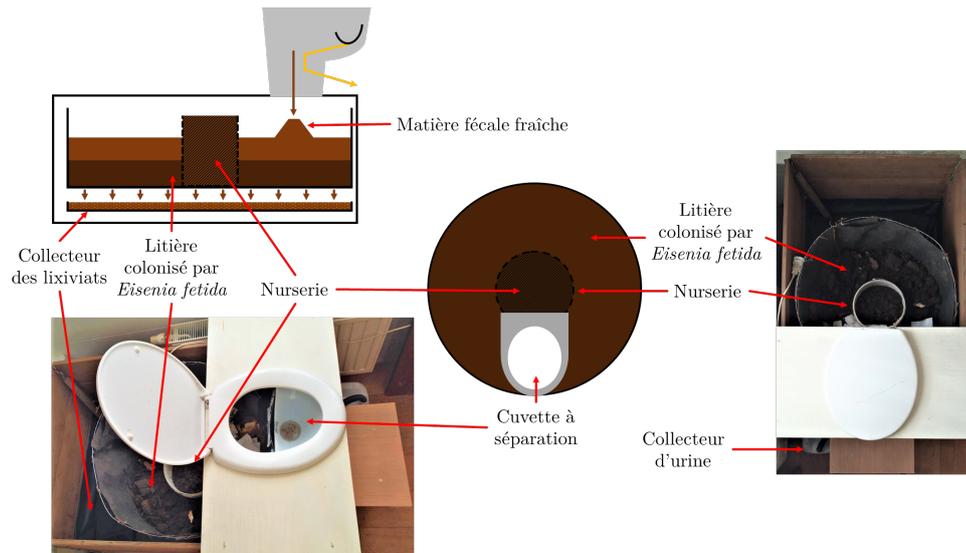


FIGURE 6.28 – Schéma de la toilette à composteur rotation cacarousel de Philippe Morier-Genoud. (Inspiré de [9].)

La charge de maintenance est assez limitée et se réduit à la rotation du composteur et à un arrosage ponctuel (en plus de l'évacuation des urines). Le volume de la litière n'a pas notablement augmenté durant la période d'utilisation de 6 mois. Ceci confirme que la vidange du composteur ne sera nécessaire qu'après plusieurs années de fonctionnement. Au quotidien, l'entretien de la toilette n'est donc pas plus contraignant que celui d'une plante d'intérieur. Il nécessite toutefois une certaine connaissance de la biologie des vers et implique de porter une attention particulière à la dégradation de ses excréments que tout le monde ne serait pas prêt assurer.

Le frein culturel semble être l'entrave principale à ce type de dispositif. Nous avons pu le tester chez des personnes sensibilisées à la thématique et prêtes à participer à cette démarche expérimentale. Ils ont toutefois estimé inconvenable de proposer cette toilette à des visiteurs.

6.4.6 - Filière combinée :

Eaux grises Urines

L'implantation d'une filière de traitement combinée *urine et eaux grises* permet d'avoir parallèlement une filière unitaire *fèces* avec les avantages associés. Les urines et eaux grises sont alors soit envoyées vers l'égout ou le SEI du logement, soit revalorisées conjointement.

Au vu de la répartition des nutriments entre urines et fèces, le rejet à l'égout ne semble pas être très pertinent, le ratio $DBO_5 : N : P$ du mélange *urine + eau grises* étant nettement moins propice à la dégradation de la pollution que celui du mélange *fèces + urines + eaux grises* ou *fèces + eaux grises*. À grande échelle dans un contexte d'assainissement collectif, ceci rendrait les STEP bien moins performantes.

Ceci reflète bien la complexité dont relève la question de l'assainissement. La mécompréhension de ses enjeux peut amener à des pratiques qui n'ont aucun intérêt sur le plan écologique/environnemental comparé à un système *conventionnel*. Une bonne intention de départ et en investissement humain et matériel conséquent peuvent facilement se solder par un bilan



FIGURE 6.29 – Habitat participatif Au clair quartier : Bâtiment. (Source : Florient Golay Architecte.)



FIGURE 6.30 – Toilette à séparation du fournisseur Separett® installée dans l'habitat participatif Au clair quartier. (Source [10].)

environnemental tout à fait neutre. Par exemple, l'habitat participatif *Au Clair du Quartier* à Grenoble (**Figure 6.29**) a opté pour une telle filière. Des toilettes à séparation sont installées dans les logements individuels, les fèces sont compostées sur place alors que les urines sont canalisées vers l'égout (**Figure 6.30**).

L'article publié par *Joveniaux et al. (2021) [10]* présente la démarche qui a été adoptée et les motivations sous-jacentes. Les aspirations sociales, environnementales et citoyennes des habitants les ont motivés dans ce projet avec une volonté de « *préserver et économiser la ressource en eau* » et « *réduire ses déchets et réutiliser ce qui peut l'être* ». L'article précise aussi que « *l'objectif de retour des excréments humains à la terre semble avoir été secondaire* » et que le choix de rejeter les urines à l'égout provient du fait que cela permet de réduire les volumes à manipuler et traiter.

Le choix du projet *Au Clair du Quartier* n'est pas étonnant. Les possibilités de revalorisation du mélange *urines + eaux grises* sont très limitées. Le contenu en résidus de détergents et autres produits ménagers des eaux grises rend le mélange brut inutilisable pour une irrigation-fertilisation. Une épuration de celui-ci impliquerait la perte d'une fraction importante des nutriments contenus dans les urines et donc un bien moins grand retour à la terre de ceux-ci.

En cas d'assainissement individuel avec un système extensif, le bilan est plus favorable à une telle filière puisqu'elle devrait permettre de réduire la taille du SEI et potentiellement de supprimer la fosse septique.

Pour conclure, les intérêts que nous identifions pour une telle filière de traitement sont les suivants : d'une part, l'économie d'eau de chasse; d'autre part, en milieu urbain, un dispositif comme celui de l'habitat *Au Clair du Quartier* est une solution transitoire pertinente car elle permet d'anticiper le développement futur de filières de revalorisation agricole pour l'urine; enfin, pour une implantation en zone d'assainissement individuel, une telle installation présente un intérêt certain et représente un intermédiaire intéressant entre un modèle unique *conventionnel* et un modèle unitaire avec 2 filières distinctes.

6.4.7 - Filière combinée :



Comme évoqué au § 6.4.4, l'acheminement des fèces et eaux grises sans l'urine vers la STEP ou le SEI permet d'obtenir une eau usée à traiter d'une qualité physico-chimique proche de l'optimum pour la dégradation biologique. Une telle filière de traitement serait complémentaire d'une filière unitaire *urines*.

Techniquement, c'est une solution relativement simple à implémenter, même dans un bâtiment existant. La cuvette de toilette serait remplacée par une cuvette à séparation et l'urine collectée dans un récipient intermédiaire puis acheminée vers son lieu de stockage, traitement et/ou valorisation.

6.5 | Récapitulatif

Une synthèse des éléments présentés dans les sections précédentes est proposée au **Tableau 6.31**. Ce dernier résume les différents systèmes possibles pour chacun des 5 modèles de gestion des effluents.

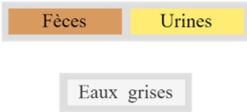
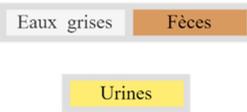
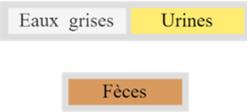
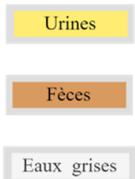
	Filière(s)	Dispositif	Transport des excréments	Traitement des effluents
Non séparatif	Unique	Toilette conventionnelle	Canalisations	Système d'épuration
	Mixte (I) 	Composteur extérieur	Manutention de récipients pour les matières fraîches	Ajout de litière carbonée, aire de compostage extérieure
		Composteur relié	Manutention de matières compostées	Ajout de litière carbonée, compostage en intérieur
		Avec chasse à recyclage	Canalisations	Excréments : système de compostage déporté Eau de chasse : système d'épuration
Séparatif	Mixte (II) 	Séparation par cuvette à tension superficielle	Fèces : canalisations Urines : canalisations ou manutention de récipients	Fèces : système d'épuration Urines : valorisation
		ou par cuvette compartimentée Chasse d'eau pour les fèces		
	Mixte (III) 	Toilette à tapis ou lunette séparative Composteur relié	Fèces : manutention de matières compostées Urines : canalisations	Compostage en intérieur
		Toilette à tapis ou lunette séparative Composteur extérieur	Fèces : manutention de matières fraîches Urines : canalisations	Excréments : aire de compostage extérieure Eau grises et urines : système d'épuration
		Toilette conventionnelle Dispositif de séparation centrifuge	Urines : canalisations Fèces : manutention de matières compostées	Eau grises et urines : système d'épuration Fèces : compostage en intérieur
	Unitaires 	Toilette à tapis ou lunette séparative Composteur relié	Fèces : manutention de matières compostées Urines : canalisations ou manutention de récipients	Fèces : compostage en intérieur Urines : valorisation
		Toilette à tapis ou lunette séparative Composteur extérieur	Fèces : manutention de matières fraîches Urines : canalisations ou manutention de récipients	Fèces : aire de compostage extérieure Urines : valorisation ou épandage

FIGURE 6.31 – Descriptif des 5 modèles de gestion des effluents domestiques

Ce dernier est complété par le **Tableau 6.32**. Il présente les caractéristiques principales des différents dispositifs exposés dans les sections

précédentes. Il s'agit de balises à adapter aux circonstances particulières de chaque cas. Concernant les différents critères exposés, nous noterons que :

- les possibilités d'installations de certains dispositifs en milieu urbain sont conditionnées par l'accès à une aire extérieure de compostage ;
- dans du bâti existant, l'accès aux canalisations et leurs possibilités de transformations sont déterminants ;
- les possibilités d'implantations dépendent du type de public qui y passe : usagers réguliers ou hétéroclites.

Enfin, un score relatif est attribué à chaque dispositif afin de les qualifier par rapport aux 3 critères suivants : ampleur de la maintenance requise, possibilité de valorisation des effluents traités et coût.

Ce score situe des dispositifs homologues les uns par rapport aux autres et est attribué sans méthodologie particulière, une analyse spécifique de chaque situation étant nécessaire pour départager avec plus d'exactitude les différentes options. Il s'agit d'une ébauche d'outil d'aide à la décision pour guider le choix d'un modèle d'assainissement qui gagnerait à être développé dans la prolongation de cette étude.

Dispositif	Implantation		Bâti		Implantation		Maintenance	Valorisation	Coût
	Rural	Urbain	Existant	Neuf	Espace public	Logement/ Privé			
Toilette conventionnelle	V	V	V	V	V	V	+	+	+
Epuration extensive	V	X	V	V	V	V	+	++	+++
Composteur relié	V	V	X	V	V	V	++	+	++
Compostage extérieur	V	X	V	V	X	V	+++	+	+
Lombri-compostage	V	V	V	V	V	V	++	++	+
Chasse à recyclage	V	V	X	V	V	V	+	+	+++
Cuvette à tension superficielle	V	V	X	V	V	V	+	++	+++
Cuvette compartimentée	V	V	X	V	X	V	+	++	++
Toilette à tapis	V	V	X	V	V	V	+	+	+++
Lunette séparative	V	V	V	V	X	V	+	+++	+
Séparateur centrifuge	V	V	X	V	V	V	++	+	+++
Canalisation d'urine	V	V	X	V	V	V	++	+++	++

FIGURE 6.32 – Caractéristiques des principaux dispositifs d'assainissement domestique

CONCLUSION

Conclusion

Le secteur de l'assainissement a énormément évolué depuis sa genèse. Alors qu'il était pratiquement inexistant il y a moins d'un siècle, les performances épuratoires des installations n'ont cessé de croître depuis lors. La trajectoire de l'évolution technologique que le secteur a suivie n'est toutefois pas tout à fait rationnelle. Son état actuel résulte d'une longue évolution et la situation actuelle, sans être catastrophique, présente un certain nombre d'incohérences qui appellent à une refonte des systèmes en place.

Cette irrationalité réside principalement dans le fait que les systèmes sont pensés en rupture totale avec l'environnement et ses cycles naturels qui sont pourtant le théâtre au sein duquel ils prennent place. De ce fait, il subsiste un ensemble d'enjeux à surmonter pour assurer la soutenabilité de ces systèmes.

Ainsi que nous l'avons vu, le secteur est caractérisé par une inertie technique et administrative. En ce qui concerne l'aspect technique, l'ampleur des infrastructures en place empêche une transition radicale. Concernant l'aspect administratif, en Wallonie, le système d'agrégation pour les SEI offre un cadre favorable au développement d'initiatives novatrices. En assainissement collectif, les choix techniques dépendent d'acteurs variés dont les intérêts sont discutables.

Les freins au changement restent néanmoins en grande partie dus au facteur humain. Nous avons cité l'inertie administrative mais les aspects socio-culturels sont aussi des éléments majeurs de verrouillage. Les préoccupations du grand public à ce sujet se limitent souvent à la question des consommations d'eau. Une évolution des mentalités est nécessaire pour assurer une transition or la sensibilisation sur cette thématique est rare. En particulier, les notions de tri des effluents et de responsabilité individuelle vis-à-vis de sa production d'excréments sont à développer. Un tabou sur ces derniers reste aussi à lever.

La problématique de la présence de (micro-)polluants dans nos effluents n'est pas inhérente à l'assainissement. Elle découle de la nature de nos outils de production et de nos modes de vie et s'avère donc systémique. Nous questionnons la pertinence de l'intensification des procédés d'épuration qui découlent de cette prise de conscience. Une réduction à la source de ces pollutions serait bénéfique à tous les échelons de notre société.

Une part de la soutenabilité des systèmes de production agricole dépend de l'assainissement et en l'état actuel, le secteur ne répond pas à ce défi. Un développement technique important apparaît nécessaire pour assurer une meilleure revalorisation des effluents. En parallèle, une évolution des pratiques agricoles et du secteur de la construction reste nécessaire. Il semble important de redéfinir le rôle des systèmes d'assainissement et d'y intégrer une dimension relative à la mise en circulation des nutriments entre la sphère agricole et celle de l'habitat.

L'état du bâti existant reste un frein important à une évolution des procédés d'assainissement. Il nous semble qu'une évolution progressive du secteur au rythme du renouvellement du parc immobilier est un scénario plausible pour une transition. Ceci a notamment été démontré par les travaux de Fabien Esculier [4] à l'échelle du bassin parisien. En Wallonie, le secteur n'est pas tout à fait immobile mais les initiatives sont d'avantage citoyennes et ne semblent pas découler d'une réelle volonté politique.

Nous avons présenté dans ce document un ensemble de solutions techniques envisageables pour mieux répondre à ces enjeux. La plupart de ces techniques semblent relativement contraignantes à la fois à l'installation et à l'utilisation. Certaines d'entre elles peuvent sembler tout à fait idéalistes. Toutefois, au vu de l'ampleur des infrastructures en place et des budgets concernés, nous pensons que certaines des celles-ci comportent un réel potentiel.

Le développement de projets pilotes portés par les Universités serait bénéfique. La faculté de *Gembloux Agro-Bio Tech* se positionne au carrefour entre la (bio-)ingénierie et le monde agricole. Elle possède ainsi une influence certaine sur le secteur agricole, celui de l'assainissement et celui de la construction et pourrait se révéler un terreau favorable à l'émergence de pratiques nouvelles.

Les réponses aux défis environnementaux de l'assainissement sont certainement multiples et polymorphes. Il nous semble qu'une diversification des procédés et infrastructures d'assainissement serait prolifique.

Enfin, les projets d'habitats participatifs et/ou écologiques qui incluent souvent une démarche de réappropriation de l'habitat représentent un cadre propice à ces expérimentations. Il est important que des dérogations puissent être délivrées pour mettre en place des systèmes pilotes non entièrement conforme à la législation actuelle pour que des solutions alternatives puissent faire leur preuves comme c'est le cas en Suisse francophone ou des expérimentations intéressantes ont été rendues possibles.

Annexe

A.1 | Mise en place d'une toilette extérieure à composteur relié

Cette annexe présente la réalisation de la toilette à compostage conçue dans le cadre de cette étude. C'est une toilette à séparation des urines à la source. Elle est munie d'un lombri-composteur relié directement au siège de toilette et est réalisée avec des fournitures courantes afin qu'elle puisse être facilement répliquée.

Le siège de toilette est installé au-dessus d'une cuve IBC modifiée en composteur. Pour ce faire, la poche en PE-HD a été découpée de façon à obtenir 2 récipients de hauteurs différentes, un grand qui sera le composteur et un petit qui sera le collecteur pour les lixiviats. Ils ont été placés l'un au-dessus de l'autre dans la structure en acier galvanisé de la cuve, le récipient supérieur reposant sur des profilés en acier en T insérés sur la structure de la cuve. Le composteur a été perforé de façon à permettre le drainage des lixiviats. Ceux-ci s'écoulent alors dans le récipient inférieur sur lequel se trouve la vanne d'origine de la cuve IBC et qui permettra de réaliser la vidange. (Figures A.1 et 6.26)

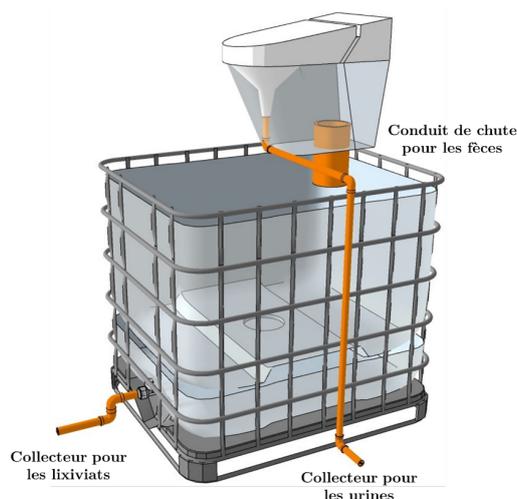


FIGURE A.1 – Vue du siège de toilette et du composteur.

La cabine de toilette est construite au dessus de la structure de la cuve. Une telle structure est prévue pour supporter une charge de 2 tonnes, il n'y a donc aucun risque de déformation de celle-ci à cause du poids de la cabine. Le composteur est isolé avec des panneaux rigides en mousse de polyuréthane de 8 cm d'épaisseur. En outre, à la fois pour des raisons d'inertie thermique et d'esthétique, le composteur est entouré d'un terre-plein.

La cabine juchée sur la cuve forme une structure relativement haute et imposante (Figure A.2). Ceci a toutefois l'avantage de permettre la collecte gravitaire des urines facilement dans un bidon placé en bas du conduit d'urine. Un réservoir de grande dimension pourrait être installé à côté du composteur. Il pourrait s'agir d'une autre cuve IBC qui pourrait alors facilement être transportée avec un chariot élévateur dans un scénario de filière de revalorisation pour les urines.



FIGURE A.2 – Vue générale de la toilette.

Une trappe d'accès couvrant la moitié de la surface du composteur a été aménagée (**Figure A.3**). Elle servira pour les opérations de maintenance et pour la vidange.

Le composteur est couvert d'un *liner* qui permettra de retenir les matières solides dans le compartiment supérieur. Un voile d'ombrage en PP a été utilisé à cette fin (**Figure A.5 (a)**). Pour assurer une bonne oxygénation du compost même dans les couches inférieures, des conduits d'aération ont été disposés à intervalles réguliers le long des parois (**Figure A.5 (b)**). (Ici nous avons utilisé des crépines en PE vendu pour l'équipement de piézomètres mais un simple tuyau en PVC de petit diamètre et percé à intervalles réguliers conviendrait également.)

La séparation des urines est réalisée avec un simple séparateur en plastique. Ici, nous avons utilisé un entonnoir de grande dimension découpé afin de convenir à cet usage. Il existe sur le marché différents modèles de séparateurs manufacturés en plastique moulé ou en céramique. Le conduit de chute pour les fèces est réalisé avec une corbeille en plastique découpée achetée en grande surface de bricolage (**Figure A.6**).

Pour éviter la volatilisation ammoniacale de l'azote et valoriser au mieux le potentiel fertilisant de l'urine, un conduit hermétique entre le collecteur d'urine et la cuve de stockage est nécessaire ainsi que la présence d'un siphon hydraulique ou siphon sec.

Lors de la mise en fonction de la toilette, un lit d'écorces de pin de 15 cm d'épaisseur a été disposé au fond du composteur. Celui-ci est surmonté d'une couche de litière pour accueillir les vers. Cette litière est composée de compost mature et d'un compost de TBL en cours de décomposition (**Figure A.7**), ceci permettant d'acclimater les vers progressivement à leur nouvel environnement de vie. Le composteur est laissé au repos pendant 2 semaines afin de permettre cette acclimatation.

La densité de vers apportés initialement était d'environ $1,5 \text{ kg/m}^2$, toutefois ce paramètre semble d'une importance relative. Leur population s'adapte à la quantité de matière entrant dans le composteur avec un délai de réaction de quelques semaines (correspondant à la durée du cycle de reproduction). Les vers sont issus d'un élevage qui a été mis en place pour l'étude. Nous avons monté cet élevage sur un fumier équestre qui est un substrat que les vers affectionnent particulièrement. La population initiale de vers a été récupérée dans un compost de quartier bruxellois, sans certitude quant à l'espèce dont il s'agit.

Les opérations de maintenance sont limitées. Il s'agit de rabattre le cône d'accumulation de solides toutes les 3 semaines environ. Il est apparu qu'une humidification du compost est nécessaire pour assurer le maintien de conditions hydriques adéquates au développement des vers. Un arrosage ponctuel est donc nécessaire. Enfin, il convient d'assurer l'évacuation des urines.



FIGURE A.3 – Vue du siège de toilette avec trappe de maintenance ouverte.

Pour cet essai, les urines sont simplement utilisées pour la fertilisation des cultures domestiques ou épandues sur le terrain de l'expérimentation, celui-ci étant assez grand pour les répandre intégralement sans nuisances (cfr § 6.4.4). Une filière plus élaborée pour la gestion des urines serait nécessaire.

Les plaquettes explicatives présentées aux **Figures A.8, A.9 et A.10** ont été réalisées et affichées dans les toilettes.



(a)

(b)

FIGURE A.4 – Liner et crépine d'aération du composteur.



FIGURE A.5 – Implantation de la toilette.



FIGURE A.6 – Siège de toilette avec son séparateur d’urine et le conduit pour les fèces



FIGURE A.7 – Mise en fonction du composteur

CECI N'EST PAS UNE TOILETTE CONVENTIONNELLE

Sous votre gracieux postérieur se tiennent des vers à fumier qui se délectent du fruit de vos entrailles

Cette toilette à **séparation d'urine** permet une valorisation facile et peu contraignante des excréments

L'**urine** est stockée puis utilisée diluée pour la fertilisation, comparable à un **engrais liquide NPK**, c'est un produit hautement valorisable

Le **caca** tombe sous vos pieds dans une cuve où il est composté avec le concours de **vers à fumier** qui facilitent grandement le processus de **dégradation**.

La dégradation est telle qu'il ne faudra vider la cuve que tout les 5 ans environ !

FIGURE A.8 – Plaquette explicative affichée dans la toilette : présentation du principe de la toilette

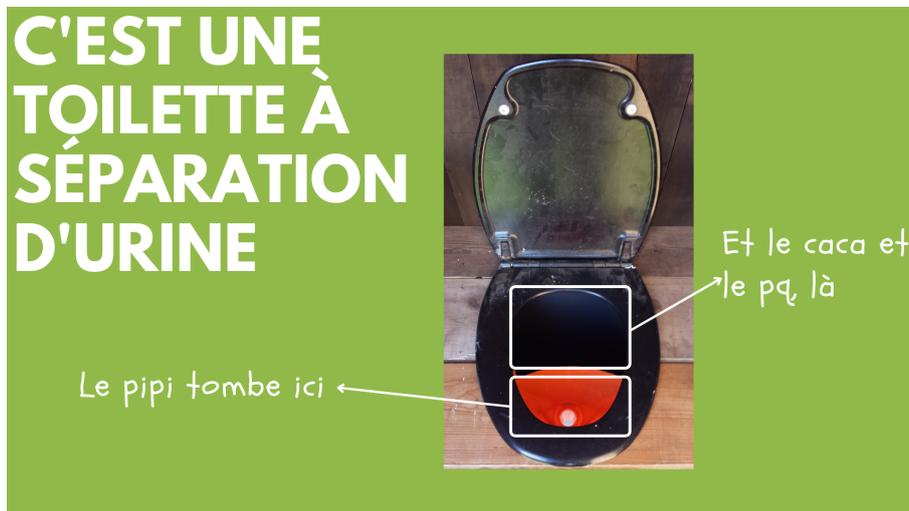


FIGURE A.9 – Plaquette explicative affichée dans la toilette : explication de l'utilisation de la cuvette séparatrice

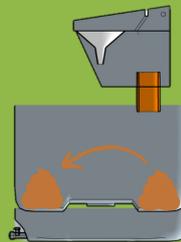
ENTRETIEN



COMPOSTEUR :



Ramener la matière à l'avant du composteur avec un binette



Arrosage à l'eau (~1x/sem.) : les vers aiment 80 % d'humidité

URINE :

Dilution 1/10 & fertilisation potager/fruitiers
ou
Epandage direct (emplacement différent à chaque fois)



FIGURE A.10 – Plaquette explicative affichée dans la toilette : description de l'entretien

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Claire Eme and Catherine Boutin. *Composition des eaux usées domestiques par source d'émission à l'échelle de l'habitation*. 2015. ONEMA.
- [2] *Panorama de la filière biométhanisation en Wallonie*. <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/valbiom-panorama-biomethanisation-wallonie-20107?IDR=40449>, 2017. Valbiom. (En ligne le 12/23/2021).
- [3] *Rapport sur l'état de l'environnement wallon 2017*. <http://etat.environnement.wallonie.be/files/Publications/REEW2016/DGRNE-16-16716-REEW%202016-sl-051217-prod%20-%20basse%20r%20a9solution.pdf>, 2017. SPW, (En ligne le 12/15/2021).
- [4] Fabien Esculier. *Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques*. PhD thesis, Université Paris Est, 2018.
- [5] *Statistiques de l'eau potable et de l'assainissement des eaux usées en Wallonie*. <http://etat.environnement.wallonie.be/files/indicateurs/MEN/MEN%203/Statistiques%20de%20l'eau%20potable%20et%20de%20l'assainissement%20des%20eaux%20us%C3%A9es%20en%20Wallonie%20-%20Rapport%202018.pdf>, 2018. Aquawal. (En ligne le 12/14/2021).
- [6] *Les filières de l'assainissement individuel autorisées en région wallonne*. http://environnement.wallonie.be/publi/de/eaux_usees/assainissement5.htm. SPGE. (En ligne le 11/26/2021).
- [7] Elizabeth Tilley, Lukas Ulrich, Christoph Luthi, Philippe Reymond, and Christian Zurbrügg. *Compendium des systèmes et technologies d'assainissement - 2e édition actualisée*, Janvier 2016. Eawag.
- [8] Deepak R Gajurel, Zifu Li, and Ralf Otterpohl. *Investigation of the effectiveness of source control sanitation concepts including pre-treatment with Rottebehalter*. *Water science and technology*, 48(1) :111–118, 2003.
- [9] Benoît Molineaux, Pauline Dayer, Philippe Morier-Genoud, Ralph Thielen, Olivier Krumm, and Uli Amos. *Des toilettes à compost en milieu urbain? C'est possible - Notice à l'intention des maîtres d'ouvrage*. <https://www.cooperative-equilibre.ch/wp/wp-content/uploads/2021/06/DOC-SANITAIRES-EQUILIBRE.pdf>, Mai 2021. Coopérative d'Habitation Equilibre. (En ligne le 12/29/2021).
- [10] Aurélie Joveniaux, Bernard De Gouvello, and Marine Legrand. *L'émergence d'un commun en matière d'assainissement urbain : les toilettes sèches séparatives en habitat participatif*. *Flux*, (2) :27–40, 2021.
- [11] Björn Vinnerås. *Possibilities for sustainable nutrient recycling by faecal separation combined with urine*, volume 353. 2002.
- [12] AF Bouwman, DS Lee, WAH Asman, FJ Dentener, KW Van Der Hoek, and JGJ Olivier. *A global high-resolution emission inventory for ammonia*. *Global biogeochemical cycles*, 11(4) :561–587, 1997.
- [13] Benjamin Berne. *Les toilettes sèches familiales - État de l'art, état des lieux dans plusieurs pays et propositions pour un accompagnement en France*. <https://reseau-assainissement-ecologique.org/wp-content/uploads/2020/04/toilettes-seches-familiales-rapport.pdf>, Octobre 2010. (En ligne le 12/20/2021).
- [14] *Food security & productive sanitation systems*. https://www.susana.org/_resources/documents/default/3-267-7-1452594644.pdf. Sustainable Sanitation Alliance. (En ligne le 11/22/2021).
- [15] *The EcoSanRes Programme*. https://ecosanres.org/pdf_files/ESR-basefactsheet-lowres.pdf. EcoSanRes. (En ligne le 11/22/2021).

- [16] 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. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000021125886/>, Septembre 2009. Légifrance. (En ligne le 11/26/2021).
- [17] État des nappes d'eau souterraine de Wallonie. <http://environnement.wallonie.be/frameset.cfm?page=http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/>, 2021. SPW. (En ligne le 12/14/2021).
- [18] Guide OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux résiduaires. 2012. Organisation mondiale de la Santé.
- [19] Tristan MP Martin, Fabien Esculier, Florent Levavasseur, and Sabine Houot. *Human urine-based fertilizers : A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, pages 1–47, 2020.
- [20] Anaïs Goulas, Marjolaine Deschamps, Sabine Houot, Marine Legrand, and Fabien Esculier. *Principaux enjeux liés à la présence de micropolluants organiques dans les urino-fertilisants (résidus pharmaceutiques, hormonaux et de soins personnels)*. https://www.leesu.fr/ocapi/wp-content/uploads/2020/04/AGROCAPI_note_pharma_200420.pdf, 2020. AGROCAPI. (En ligne le 01/11/2022).
- [21] Will Steffen, Katherine Richardson, Johan Rockström, Sarah E. Cornell, Ingo Fetzer, Elena M. Bennett, Reinette Biggs, Stephen R. Carpenter, Wim de Vries, Cynthia A. de Wit, Carl Folke, Dieter Gerten, Jens Heinke, Georgina M. Mace, Linn M. Persson, Veerabhadran Ramanathan, Belinda Reyers, and Sverker Sörlin. Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223) : 1259855, 2015.
- [22] Arno Rosemarin. Global Status of Phosphorus. https://dakofa.com/fileadmin/user_upload/1600_Arno_Rosemarin_Stockholm_Environment_Institute.pdf, Octobre 2016. (En ligne le 12/16/2021).
- [23] Karl Svardal and Helmut Kroiss. *Energy requirements for waste water treatment. Water Science and Technology*, 64(6) :1355–1361, 2011.
- [24] *Consommations énergétiques des stations d'épuration françaises - état des lieux et recommandations*. https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2018-02/2017-synthese-nrj-pour_web.pdf, Janvier 2018. (En ligne le 12/17/2021).
- [25] Christopher Azaah Buzie-Fru. *Development of a continuous single chamber vermicomposting toilet with urine diversion for on-site application*. Technische Universität Hamburg, 2010.
- [26] Vincent Brahy et Didier Cadelli. *La collecte et l'épuration des eaux usées*. http://etat.environnement.wallonie.be/files/live/sites/eew/files/Publications/Rapport%20analytique%202006-2007/Chap10/2_CollecteEpuratEauxUsees/EAU_01.pdf. SPW. (En ligne le 11/23/2021).
- [27] *La collecte et le traitement des eaux usées en Région wallonne*. http://environnement.wallonie.be/publi/de/eaux_usees/assainissement1.htm. SPW. (En ligne le 11/25/2021).
- [28] *Code de l'environnement - Livre II - Code de l'Eau Coordonné*. environnement.wallonie.be/legis/Codeenvironnement/codeeaucoordonneR.html. (En ligne le 12/16/2021).
- [29] *La Gestion Publique de l'Assainissement Autonome*. <https://www.aide.be/services-aux-particuliers/documents-utiles/1-brochure-gpaa/file>, Novembre 2017. SPGE. (En ligne le 11/26/2021).
- [30] *Brochure Generale sur la Gestion Publique de l'assainissement autonome*. <https://sigpaa.spge.be/getattachment/355eeb4c-eea5-4ae4-86fa-3fc0e0cf8832/Brochure-Generale-sur-la-Gestion-Publique-de-l-Ass.aspx>, Juin 2019. SPGE. (En ligne le 12/16/2021).
- [31] Arrêté du Gouvernement wallon fixant les conditions intégrales et sectorielles relatives aux systèmes d'épuration individuelle. <http://environnement.wallonie.be/legis/pe/pesecteau022.htm>, Décembre 2016. (En ligne le 11/26/2021).
- [32] *Votre eau au coût-vérité*. <https://espaceclient.inasep.be/votre-eau-au-cout-verite>. INASEP. (En ligne le 11/26/2021).

- [33] *Arrêté du Gouvernement wallon déterminant les critères minimaux de salubrité, les critères de surpeuplement et portant les définitions visées à l'article 1er, 19° à 22° bis, du Code wallon (de l'habitation durable - AGW du 3 décembre 2020).* <https://wallex.wallonie.be/eli/arrrete/2007/08/30/2007203235/2008/01/01?doc=6235>, Décembre 2020. (En ligne le 11/26/2021).
- [34] *Guide d'Accompagnement participatif sur la Précarité Sanitaire en France : Contexte réglementaire et argumentaire assainissement écologique.* <http://reseau-assainissement-ecologique.org/wp-content/uploads/2020/05/Contexte-reglementaire-et-argumentaire-assainissement-ecologique.pdf>. (En ligne le 12/17/2021).
- [35] Florent Brun, Christophe Merotto, Bastien Torrent, and Célia Campan. *Caractérisation des Eaux Ménagères domestiques et de 3 filières de traitement associées Rapport d'étude de suivi in situ.* https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01803150/file/Rapport%20de%20caract%C3%A9risation%20des%20eaux%20m%C3%A9nag%C3%A8res_VF.pdf, Septembre 2017. Réseau de l'Assainissement Ecologique.
- [36] *Les fiches logement - Habitation légère en Wallonie.* http://lampspw.wallonie.be/dgo4/tinymvc/apps/logement/views/documents/infos/Habitation-legere_DEF.pdf. (En ligne le 12/17/2021).
- [37] *Arrêté du Gouvernement wallon établissant un catalogue des déchets.* <http://environnement.wallonie.be/legis/dechets/decat026.htm>. (En ligne le 11/26/2021).
- [38] A Crolais, M Lebihain, A Le Gal, and E Maysonnave. *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.* 2016. École des Ponts ParisTech,.
- [39] *Législation/Boues d'épuration et gadoues de fosses septiques.* <http://environnement.wallonie.be/legis/solsoussol/sol002.htm>, Janvier 1995. (En ligne le 01/13/2022).
- [40] *L'entretien des égouts - Cadastre et endoscopie des égouts.* <https://www.inbw.be/lentretien-des-egouts.inBW>. (En ligne le 12/23/2021).
- [41] Florent Brun, Vivien Dubois, and Catherine Boutin. *Note sur le filtre planté à flux vertical pour le traitement des eaux ménagères.* PhD thesis, 2019.
- [42] Robert H Kadlec and Scott Wallace. *Treatment wetlands.* CRC press, 2008.
- [43] *Compte rendu du voyage d'étude en Allemagne - Les nouvelles technologies de l'éco-assainissement.* <https://reseau-assainissement-ecologique.org/wp-content/uploads/2020/04/voyage-allemande.pdf>, Mai 2008. Association Toilettes Du Monde. (En ligne le 11/30/2021).
- [44] Samir Alnahhal. *Contribution to the Development of Sustainable Sanitation in Emerging Countries.* PhD thesis, 04 2017.
- [45] J Dominguez and CA Edwards. *Vermicomposting organic wastes : A review. Soil zoology for sustainable development in the 21st century, Cairo,* pages 369–395, 2004.
- [46] Claire Furlong, MR Templeton, and WT Gibson. *Processing of human faeces by wet vermifiltration for improved on-site sanitation. Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development,* 4(2) :231–239, 2014.
- [47] Pierre Arragon. *Combaillaux choisit le vers...* http://www.recyclaqua.agropolis.fr/dossier_presse/lom01.html, 2005. Mairie de Combaillaux / CIHEAM-IAMM. (En ligne le 01/10/2022).
- [48] Marco Bertaglia, Jutta Roosen, Jozsef Országh, and Patrick Gerin. *Economic and Environmental Analysis of Domestic Water Systems : A Comparison of Centralised and On-site Options for the Walloon Region, Belgium.* Université de Mons-Hainaut, Université catholique de Louvain, 2002.
- [49] Florent Brun, Stéphane Leguen, Laurent Oxarango, Anne Delmaire, Isabelle Déportes, Laure Gran-Aymerich, Lysanne Bour, sylvie Jousse, Denis Mazaud, Philippe agenet, Sandra Parisi, Anne Marie Pourcher, Charlotte Rambert, Jessica Lambert, Anne Trémier, Benjamin Berne, Annie Guernion, and Mathieu Rolland. *Gestion des sous-produits de toilettes sèches familiales : étude sur le traitement des*

matieres par compostage. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01803047/file/rapport%20TDM_Complet2.pdf, Juin 2014. Association Toilettes Du Monde.

- [50] Emmanuelle Leyh. *BioLitter Toilet as a valorisation and management strategy for human excreta : Practices, challenges and opportunities*. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/11008>, November 2021. Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. (En ligne le 12/11/2021).
- [51] Chirjiv K Anand and Defne S Apul. *Composting toilets as a sustainable alternative to urban sanitation - A review*. *Waste management*, 34(2) :329–343, 2014.
- [52] Meena Khwairakpam and Renu Bhargava. *Vermitechnology for Sewage Sludge Recycling*. *Journal of hazardous materials*, 161 :948–54, 05 2008. doi : 10.1016/j.jhazmat.2008.04.088.
- [53] Kunwar D Yadav, Vinod Tare, and M Mansoor Ahammed. *Vermicomposting of source-separated human faeces for nutrient recycling*. *Waste Management*, 30(1) :50–56, 2010.
- [54] Kunwar D Yadav, Vinod Tare, and M Mansoor Ahammed. *Vermicomposting of source-separated human faeces by Eisenia fetida : effect of stocking density on feed consumption rate, growth characteristics and vermicompost production*. *Waste management*, 31(6) :1162–1168, 2011.
- [55] Geoffrey B Hill and Susan A Baldwin. *Vermicomposting toilets, an alternative to latrine style microbial composting toilets, prove far superior in mass reduction, pathogen destruction, compost quality, and operational cost*. *Waste Management*, 32(10) :1811–1820, 2012.
- [56] Kunwar D Yadav, Vinod Tare, and M Mansoor Ahammed. *Integrated composting - vermicomposting process for stabilization of human faecal slurry*. *Ecological Engineering*, 47 :24–29, 2012.
- [57] Ankita Swati and Subrata Hait. *A comprehensive review of the fate of pathogens during vermicomposting of organic wastes*. *Journal of environmental quality*, 47(1) :16–29, 2018.
- [58] Anna Stintzing, Håkan Jönsson, Björn Vinnerås, and Eva Salomon. *Guidelines on the use of urine and faeces in crop production*. *J Indian Water Works Assoc*, 37, 01 2004.
- [59] Dian Andriani, Arini Wresta, Aep Saepudin, and Budi Prawara. *A review of recycling of human excreta to energy through biogas generation : Indonesia case*. *Energy Procedia*, 68 :219–225, 2015.
- [60] PK Jha. *Sustainable Technologies for On-site Human Waste and Wastewater Management : Sulabh Experience*. 2005.
- [61] Florent Brun. *Note pour concevoir et exploiter les réseaux de collecte de l'urine humaine*, Février 2019.
- [62] Sailesh N Behera, Mukesh Sharma, Viney P Aneja, and Rajasekhar Balasubramanian. *Ammonia in the atmosphere : a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies*. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11) :8092–8131, 2013.
- [63] Marc A Boncz, Edinéia L Formagini, Felipe XC Arima, and Paula L Paulo. *Methods for stabilising and concentrating human urine for use as a fertilizer*. In *Proceedings of 5th IWA Specialized Conference on Resources-Oriented Sanitation*. National Technical University of Athens/Hellenic Water Association Athens, 2016.
- [64] Zerihun Getaneh, Nancy G Love, Adey Desta, and Agizew Nigussie. *Lactic acid from food waste enhances pathogen inactivation and urea stabilization in human urine*. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 13(3) :196–205, 2021.
- [65] Tristan Martin. *L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable*. PhD thesis, Université Paris Saclay, 2020.
- [66] Nadejda Andreev. *Lactic acid fermentation of human excreta for agricultural application*. CRC Press, 2017.
- [67] Asrat Yemaneh, M Bulbo, H Factura, C Buzie, and R Otterpohl. *Development of System for Waterless Collection of Human Excreta by Application of Lactic Acid Fermentation Process in Terra Preta Sanitation System*. In *4th International Dry Toilet Conference*. Citeseer, 2012.

- [68] KM Udert, Tove A Larsen, and Willi Gujer. *Fate of major compounds in source-separated urine*. *Water Science and Technology*, 54(11-12) :413–420, 2006.
- [69] C Rose, Alison Parker, Bruce Jefferson, and Elise Cartmell. *The characterization of feces and urine : a review of the literature to inform advanced treatment technology*. *Critical reviews in environmental science and technology*, 45(17) :1827–1879, 2015.