

Conditions pour la mise en place durable d'une filière d'assainissement par toilettes sèches à litière bio-maîtrisée dans les zones rurales des pays en développement. Application au contexte haïtien

Gaston Jean

► To cite this version:

Gaston Jean. Conditions pour la mise en place durable d'une filière d'assainissement par toilettes sèches à litière bio-maîtrisée dans les zones rurales des pays en développement. Application au contexte haïtien. Environnement et Société. Université de Lyon; Université Quisqueya (Port-au-Prince), 2018. Français. NNT : 2018LYSEI126 . tel-02124599

HAL Id: tel-02124599

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02124599>

Submitted on 9 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université
QUISQUEYA

N° d'ordre NNT : 2018LYSEI126

THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

opérée à
L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
En cotutelle internationale avec
L'Université Quisqueya

Ecole Doctorale N° 206
Chimie de Lyon

Spécialité / discipline de doctorat : Environnement

Soutenue publiquement le 21/12/2018, par :

Gaston JEAN

**Conditions pour la mise en place durable d'une
filiale d'assainissement par toilettes sèches à litière
bio-maîtrisée dans les zones rurales des pays en
développement. Application au contexte haïtien.**

Devant le jury composé de :

BARBIER, Rémi	Professeur (ENGEES)	Rapporteur
BAYARD, Rémy	Maître de conférences HDR (INSA Lyon)	Directeur de thèse
EMMANUEL, Evens	Professeur HDR (Université Quisqueya)	Examineur
LACOUR, Joaneson	Enseignant chercheur, Docteur (Université Quisqueya)	Co-directeur de thèse
LECOMTE, Chloé	Docteur	Examinatrice
TASSIN, Bruno	Professeur (ENPC)	Rapporteur

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 ^e etage secretariat@edchimie-lyon.fr Insa : R. GOURDON	M. Stéphane DANIELE Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 avenue Albert Einstein 69626 Villeurbanne cedex directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://eдея.ec-lyon.fr Sec : M.C. HAVGOUDOUKIAN Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60.97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Sec : Sylvie ROBERJOT Bât Atrium - UCB Lyon 1 04.72.44.83.62 Insa : H. CHARLES secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	M. Fabrice CORDEY CNRS UMR 5276 Lab. de géologie de Lyon Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Géode 2 rue Raphaël Dubois 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 cordey@univ-lyon1.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE http://www.ediss-lyon.fr Sec : Sylvie ROBERJOT Bât Atrium - UCB Lyon 1 04.72.44.83.62 Insa : M. LAGARDE secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 avenue Jean Capelle INSA de Lyon 696621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax : 04 72 68 49 16 Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES http://edinfomaths.universite-lyon.fr Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal, 3 ^e étage Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax : 04.72.43.16.87 infomaths@univ-lyon1.fr	M. Luca ZAMBONI Bâtiment Braconnier 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04 26 23 45 52 zamboni@maths.univ-lyon1.fr
Matériaux	MATERIAUX DE LYON http://ed34.universite-lyon.fr Sec : Marion COMBE Tél: 04-72-43-71-70 -Fax : 87.12 Bat. Direction ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 71.70 Fax 04 72 43 85 28 Ed.materiaux@insa-lyon.fr
MEGA	MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE http://edmega.universite-lyon.fr/ Sec : Marion COMBE Tél: 04-72-43-71-70 -Fax : 87.12 Bat. Direction mega@insa-lyon.fr	M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72 .43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr
ScSo	ScSo* http://ed483.univ-lyon2.fr/ Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04 78 69 72 76 viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr	M. Christian MONTES Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Christian.montes@univ-lyon2.fr

*ScSo: Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Dédicace



A ma feu mère, Marie Immaculée Saintil, qui ne savait pas lire mais m'a toujours poussé à aller plus loin dans mes études.

A ma femme Wisnande et à mes 3 enfants Mirlouse, Laurent et Clarice, qui m'ont supporté pendant toutes ces années.

Remerciements

Il m'est difficile de remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, de quelque manière que ce fût, car c'est grâce à l'aide de très nombreuses personnes et institutions, et malgré de nombreuses difficultés, que j'ai pu mener à bout cette thèse. Toutefois, ce serait une erreur grave de ma part que de ne pas citer au moins ceux sans qui ce travail n'aurait pas été possible.

Pour commencer, je tiens à remercier les responsables du Laboratoire Déchets, Environnement, Eau et Pollution (DEEP) de l'INSA de Lyon et du Laboratoire de la Qualité de l'Eau et de l'Environnement (LAQUE) de l'Université Quisqueya, pour avoir accepté de m'accueillir en thèse en co-tutelle au sein de leurs équipes respectives. J'espère que ma présence n'a pas trop bouleversé l'ordre établi.

J'adresse également mes remerciements au Dr HDR Rémy BAYARD, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait bénéficier de sa rigueur scientifique. Je le remercie aussi pour son humanité, son sens de l'écoute, sa reconnaissance et son respect des valeurs des autres. Au Dr Joaneson LACOUR, qui a accepté de codiriger ma thèse dans des conditions difficiles, je dis aussi un grand merci.

Je ne trouve pas de termes appropriés pour remercier le Professeur Evens EMMANUEL, en sa qualité de Directeur de l'Ecole doctorale « Société et Environnement » de l'Université Quisqueya et Directeur du Collège Doctoral Haïtien, pour son appui et sa contribution à la promotion de la recherche en Haïti.

Mes remerciements vont aussi au Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l'Assainissement, les Déchets et l'Environnement (CEFREPARE), via sa Directrice le Dr Pascale MARTEL-NAQUIN, qui m'a accueilli en stage en 2012 et qui a vu l'intérêt d'appuyer les efforts de notre association l'AOG de Grande Plaine après une 1^{ère} visite en juillet 2012. Sans l'appui du CEFREPARE et son envie d'apprendre des autres, il aurait été très difficile de mener à bout ce travail.

Je prie sa Directrice de transmettre mes sincères remerciements aux partenaires financiers de ce programme, la Guilde Européenne du Raid et la fondation SUEZ, mais aussi indirectement le programme Re-Sources auquel j'ai contribué en parallèle pendant toutes ces années. Un grand merci également à LABOCEA – Site de Fougères pour les analyses agronomiques et microbiologiques effectuées gracieusement sur les composts.

Mes séjours de mobilité en France n'auraient pas été possibles sans le soutien financier du bureau Caraïbes de l'Agence Universitaire de la Francophonie. Qu'il soit remercié ici pour son aide.

Je remercie également nos partenaires de longue date : la FOKAL, dont sa Présidente et amie chère, Michèle Duvivier Pierre-Louis, et l'association allemande Haïti Hilfe Falkenstein, qui ont supporté eux aussi indirectement mon travail.

Merci enfin aux Professeurs Barbier et Tassin d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse et au Dr Chloé Lecomte d'être membre de mon jury.

Préambule

On ne fait pas une thèse à 50 ans comme on en fait une à 23 ans, ni pour les mêmes raisons. On ne fait pas une thèse en Haïti comme on en fait une en France, ni pour les mêmes raisons non plus. Le travail que vous allez découvrir ici est le fruit d'un doctorant au parcours très atypique, qui a souhaité réorienter sa vie professionnelle d'enseignant du secondaire vers un travail plus concret au service de la communauté qui l'a aidé à se forger. Sans doute en partie pour montrer à tous les jeunes qui suivent que l'on peut arriver à tout dès lors qu'on en a la volonté, qu'on prend sa vie en main. Pour montrer aussi aux parents qu'en envoyant leurs enfants à l'école ils peuvent les aider à améliorer leur niveau de vie et contribuer à améliorer celui de leur communauté. Un doctorant qui s'est laissé entraîner vers une thèse mais qui aujourd'hui ne regrette pas la chance qui lui a été donnée de travailler pendant quatre ans de sa vie sur un sujet qui lui tient à cœur : l'amélioration des conditions de vie de personnes vivant dans des conditions inacceptables au 21^{ème} siècle, au sein de sa propre communauté, celle du village de Grande Plaine en Haïti et de l'AOG, l'association communautaire paysanne qu'il a contribué à créer... et si possible, bien au-delà dans le monde.

Qui dit doctorant atypique dit aussi mémoire de doctorat atypique. Peut-être pas assez d'équations compliquées, de courbes et de tableaux remplis de chiffres pour une thèse scientifique. Peut-être pas assez non plus de citations de grands penseurs pour une thèse de sociologie. Mais quand il faut mêler science et conscience, il faut trouver un compromis qui satisfasse chacun. J'espère l'avoir trouvé...

Résumé

Ce travail vise à proposer une solution d'assainissement durable, digne, sécurisante, accessible à tous, permettant de réduire les maladies à transmission hydrique, adaptée aux populations vivant dans des conditions précaires en zones rurales de pays en développement. Il contribue ainsi à la lutte contre la défécation à l'air libre, une des cibles de l'Objectif de Développement Durable n°6 concernant l'eau et l'assainissement.

Le choix s'est porté sur des toilettes sèches individuelles à litière biomaîtrisée et un mode de gestion communautaire des résidus, en lien avec une association paysanne locale. La mise en place s'est faite avec un accompagnement scientifique qui a donné lieu aux travaux présentés ici.

Dans un premier temps, nous avons opéré selon une approche participative, visant à s'assurer de l'adhésion des utilisateurs. Puis nous avons mené un programme scientifique pour identifier les conditions permettant l'hygiénisation des résidus traités. Après 3 ans d'expérimentation, la filière d'assainissement mise en place est totalement adoptée par les ménages, qui apportent régulièrement leurs résidus sur le site de compostage. Une enquête a fait ressortir que les familles sont très satisfaites de ce mode d'assainissement à domicile et se sentent moins sujettes à des maladies féco-orales. Ces ménages se sont constitués en un groupe qui procède à présent à l'appui à la réplication.

Les litières absorbantes utilisées, les résidus avant et après traitement par compostage ont été caractérisés. Des essais en pilotes ont permis de déterminer les conditions permettant de garantir une hygiénisation rapide, ce qui était un de nos principaux objectifs, afin de réduire les risques sanitaires.

Nous sommes à présent à même de définir les « bonnes pratiques » pour que la filière d'assainissement par toilettes sèches à litière biomaîtrisée dans une zone rurale de pays en développement soit sûre et durable, sur les aspects sociaux, techniques, économiques, environnementaux et sanitaires.

Mots-clés : assainissement, pays en développement, Haïti, rural, ODD, toilette sèche, TLB, pathogène, hygiénisation, risque sanitaire, compostage, gestion communautaire.

Abstract

This work aims at proposing a sustainable, dignified, safe, accessible to everyone sanitation solution, allowing to reduce water-borne diseases, adapted to populations living in precarious conditions in rural areas of developing countries. It thus contributes to the fight against open defecation, one of the targets of the Sustainable Development Goal n ° 6 concerning water and sanitation.

The choice fell on individual dry toilets with biocontrolled litter and a way of community management of residues, in connection with a local peasant association. The implementation was done with a scientific accompaniment which gave rise to the work presented here.

Firstly, we operated according to a participatory approach, aiming to ensure the adhesion of the users. Then we conducted a scientific program to identify the conditions allowing the sanitizing of treated residues.

After 3 years of experimentation, the sanitation system set up is totally adopted by the households, who regularly bring their residues to the composting site. One survey found that the families are very satisfied with this type of home sanitation and feel less prone to disease. These households have formed into a group that now supports replication of the system.

The absorbent litter used, the residues before and after composting were characterized. Pilot tests were conducted to determine conditions to ensure rapid sanitizing, which was one of our main objectives, in order to reduce health risks.

We are now in position to assure safe and sustainable practices so that the sanitation by dry biocontrolled litter toilets in rural areas of developing countries satisfy social; technical; economical, environmental and health criteria.

Keywords: sanitation, developing country, Haiti, rural, SDG, dry toilet, TLB, pathogen, sanitizing, health risk, composting, community management.

Table des matières

Dédicace	iv
Remerciements	v
Préambule	vi
Résumé	vii
Abstract	viii
Table des matières	ix
Glossaire	xiii
Abréviations	xv
Liste des figures	xvi
Liste des tableaux	xviii
Publications et communications	xix
Introduction générale.....	1
A. Partie bibliographique.....	6
A.1 Généralités sur l'assainissement	7
A.1.1 Petite Histoire de l'assainissement dans le monde.....	7
A.1.2 Les enjeux de l'assainissement.....	10
A.1.2.1 Enjeux socioculturels	10
A.1.2.2 Enjeux économiques	11
A.1.2.3 Enjeux environnementaux	12
A.1.2.4 Enjeux sanitaires.....	13
A.1.3 Définition et principes de l'assainissement.....	14
A.1.3.1 Collecte et transport des excréta.....	15
A.1.3.2 Le traitement des excréta	16
A.1.3.3 La valorisation des excréta.....	18
A.1.3.3.1 Quantité et composition des excréta	18
A.1.3.3.2 Les filières de valorisation des excréta.....	19
A.1.4 Assainissement et hygiénisation	20

A.1.4.1	Agents pathogènes présents, modes de transmission et maladies liées.....	21
A.1.4.2	Hygiénisation des excréta.....	24
A.1.5	Le compostage comme mode de traitement des résidus d’assainissement	27
A.1.5.1	Le déroulement du compostage	27
A.1.5.2	Les paramètres de contrôle du processus de compostage.....	28
A.1.6	Conclusion	30
A.2	Modes d’assainissement dans les PED	31
A.2.1	Assainissement collectif	32
A.2.1.1	Contexte	32
A.2.1.2	Typologie du territoire concerné.....	33
A.2.1.3	Techniques déployées	33
A.2.1.4	Avantages et inconvénients au niveau des différents maillons de la filière	34
A.2.2	Assainissement non collectif	35
A.2.2.1	Contexte	35
A.2.2.2	Typologie de territoire concerné.....	36
A.2.2.3	Techniques déployées	36
A.2.2.4	Avantages et inconvénients au niveau des différents maillons de la filière	39
A.2.3	Conclusion	41
A.3	L’assainissement en Haïti	42
A.3.1	Les pratiques	42
A.3.2	La situation	43
A.3.3	Contexte réglementaire et organisationnel	46
A.4	Comment mettre en place une filière d’assainissement durable dans un contexte de grande précarité ?	49
A.4.1	Introduction.....	49
A.4.2	Faire accepter une innovation sociale.....	50
A.4.2.1	Facteurs d’influence pour la diffusion d’une innovation	51
A.4.2.2	Caractéristiques d’une innovation	51
A.4.2.3	Les catégories d’adoptants d’une innovation	52
A.4.2.4	Les différentes phases vers l’adoption d’une innovation	53
A.4.2.5	Vers une acceptation communautaire d’une innovation.....	54

A.4.3	Durabilité d'une filière d'assainissement	54
A.4.3.1	Les conditions nécessaires	54
A.4.3.2	Retour d'expérience sur l'assainissement par TLB dans les PED.....	56
A.4.3.2.1	Retour d'expérience de l'ONG GiveLove	58
A.4.3.2.2	Retour d'expérience de l'ONG SOIL	61
A.4.3.2.3	Comparaison des exemples présentés	67
A.4.4	Conclusion	68
A.5	Conclusion de la bibliographie	69
B.	Partie expérimentale.....	70
B.1	Introduction.....	70
B.2	L'approche sociale et économique.....	72
B.2.1	Sensibilisation et choix des ménages test	72
B.2.1.1	Réunion de présentation du projet des TSLB aux commissions de l'AOG.	72
B.2.1.2	Invitation des ménages à participer à des réunions d'information	73
B.2.1.3	Recherche de litières	74
B.2.1.4	Sélection des foyers pilotes.....	76
B.2.2	Mise en place de la filière d'assainissement	77
B.2.2.1	Aménagement du site de traitement.....	78
B.2.2.2	Fabrication des TSLB.....	80
B.2.2.3	Démarrage de l'action	82
B.2.2.4	Suivi des apports (année 1)	83
B.2.2.5	Enquête après 1 an de fonctionnement.....	87
B.2.2.5.1	Enquête auprès des ménages utilisateurs	87
B.2.2.5.2	Enquête auprès des enfants de l'école équipée de TSLB.....	88
B.2.2.6	Tentatives de réplcation.....	89
B.3	Étude relative au traitement des résidus	92
B.3.1	Matériel et méthodes.....	92
B.3.1.1	Méthodes d'échantillonnage	93
B.3.1.1.1	Échantillonnage des litières	93
B.3.1.1.2	Échantillonnage des résidus frais.....	94
B.3.1.1.3	Échantillonnage des résidus en pilotes	94

B.3.1.1.1	Échantillonnage du compost.....	95
B.3.1.2	Protocoles d'analyse.....	95
B.3.1.2.1	Mesure de la masse volumique apparente.....	95
B.3.1.2.2	Mesure de la teneur en matière sèche.....	96
B.3.1.2.3	Mesure de la matière organique totale et du taux de cendres.....	96
B.3.1.2.4	Mesure de la Capacité de Rétention en Eau (CRE).....	96
B.3.1.2.5	Mesure de la Capacité d'Auto-Echauffement (CAE).....	97
B.3.1.2.6	Test de lixiviation sur échantillon solide pour analyse de la phase liquide.....	98
B.3.1.2.7	Mesure du pH et de la conductivité de la solution.....	98
B.3.1.2.8	Mesure de la fraction soluble ou résidu sec.....	98
B.3.1.2.9	Mesure de la DCO soluble.....	98
B.3.1.2.10	Mesure de la DBO soluble.....	99
B.3.1.2.11	Mesure du nombre de colonies d' <i>Escherichia coli</i>	100
B.3.1.2.12	Analyse microbiologique approfondie des résidus solides.....	101
B.3.1.2.13	Analyses agronomiques des résidus solides.....	102
B.3.1.3	Suivi de la température dans les bacs et pilotes de compostage.....	103
B.3.1.4	Etude en pilotes.....	104
B.3.1.4.1	Étude en pilotes de 100 litres.....	105
B.3.1.4.2	Étude en pilotes de 300 litres.....	106
B.3.2	Résultats et discussion.....	108
B.3.2.1.1	Caractérisation des litières et des résidus solides frais.....	108
B.3.2.2	Étude en bacs.....	112
B.3.2.3	Etude en pilotes.....	113
B.3.2.3.1	Etude en pilotes de 100 litres.....	113
B.3.2.3.2	Essais en pilotes de 300 litres.....	115
B.3.2.3.3	Analyse du compost.....	117
B.4	Conclusion de la partie expérimentale.....	123
Conclusion générale.....		126
Références Bibliographiques.....		129

Glossaire

Les définitions indiquées ci-dessous sont celles que nous utiliserons dans ce document.

Assainissement

Ensemble d’installations et de services permettant de collecter et de traiter les eaux usées et excréta issus des habitations et autres établissements accueillant des personnes.

Assainissement écologique

Dit d’un mode d’assainissement qui permet la valorisation agricole des résidus et réduit fortement la consommation d’eau et d’énergie.

Assainissement collectif

Système d’assainissement où les usagers sont connectés à un réseau d’égout pour évacuer et traiter les déchets liquides.

Assainissement non collectif ou assainissement autonome

Système d’assainissement où les équipements sanitaires (latrines, toilettes à chasse, éviers, douches, etc.) ne sont pas reliés à un réseau d’égout, mais aboutissent à des fosses ou des puisards qui nécessitent des solutions d’évacuation et de traitement spécifiques.

Bayakou

Nom donné aux opérateurs d’assainissement traditionnel en Haïti qui pratiquent la vidange manuelle tard dans la nuit.

Défécation

Expulsion des matières fécales hors d’un organisme.

Défécation à l’air libre (DAL)

Fait de déféquer en plein air, à même le sol ou dans l’eau.

Eau grise

Eau usée provenant de l’utilisation des points d’eau d’une habitation, hors toilettes.

Eau noire ou eau vanne

Eau usée provenant de l’utilisation des toilettes.

Excreta ou excréta

Résidus issus de la digestion des aliments, rejetés hors de l'organisme. Les excréta regroupent les fèces et l'urine.

Fèces

Résidus solides de la digestion mélangés à des sécrétions et à des bactéries, rejetés du tube digestif par l'anus.

Fécophile

Pour lequel la discussion et la manipulation concernant les fèces humaines ne sont pas tabous.

Fécophobe

Pour lequel d'importants tabous existent pour la discussion et la manipulation concernant les fèces humaines.

Latrine

Espace clos, extérieur à l'habitation, réservé à la défécation.

Toilette à diversion d'urine

Toilette où l'urine est séparée des fèces à la source, à l'aide d'un dispositif de séparation, ou par décantation.

Toilette sèche

Toilette qui n'utilise pas d'eau pour évacuer les fèces.

Toilette à décomposition

Toilette sèche dont les résidus collectés sont dans des conditions favorables à leur décomposition sur place (au niveau du stockage des résidus).

Toilette à déshydratation

Toilette sèche au sein de laquelle les conditions d'humidité ne permettent pas la décomposition des résidus.

Toilette (sèche) à litière bio-maîtrisée (TSLB)

Toilette sèche où les excréments sont recouverts lors de chaque défécation par une couche de litière absorbante de type sciure de bois.

Abréviations

ACAT :	Approche Communautaire pour l'Assainissement Total
CAE :	Capacité d'Auto-Echauffement
CEFREPADE :	Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l'Assainissement, les Déchets et l'Environnement
CNRTL :	Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales
CRE :	Capacité de Rétention en Eau
DAL :	Défécation à l'air libre
DBO :	Demande Biologique (ou Biochimique) en Oxygène
DCO :	Demande Chimique en Oxygène
DEEP :	Laboratoire Déchets, Eau, Environnement et Déchets
DINEPA :	Direction Nationale d'Eau Potable et d'Assainissement
EPA :	Eau Potable et Assainissement
FFOM :	Forces, Faiblesses, Opportunités, Menaces
INSA :	Institut National des Sciences Appliquées
LAQUE :	Laboratoire de la Qualité de l'Eau et de l'Environnement
ODD :	Objectif de développement Durable
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
PED :	Pays en développement
PEPA :	Plateforme Eau Potable et Assainissement
PS-EAU :	Programme Solidarité Eau
STEP :	Station d'épuration
T(S)LB :	Toilette (Sèche) à Litière Bio-maîtrisée
UNICEF :	Fonds des Nations Unies pour l'Enfance (United Nations International Children's Emergency Fund)

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de transmission des maladies d'origine fécale (ESREY et al., 1998)	23
Figure 2 : Barrières permettant d'éviter la transmission des maladies d'origine fécale (ESREY et al., 1998).....	23
Figure 3 : Destruction des agents pathogènes selon le couple température/temps (FEACHEM et al., 1983).....	26
Figure 4 : Les principales filières d'assainissement dans les PED (source : pS-Eau, 2012).....	32
Figure 5 : Types d'installations sanitaires utilisées par les ménages par résidence (IHE et ICF, 2018). 44	
Figure 6 : TLB abandonnées à Santo	59
Figure 7 : Plateforme SOIL de compostage de résidus de TLB (Limonade).....	65
Figure 8 : Schématisation de la démarche suivie en réponse aux questions posées.....	71
Figure 9 : Réunion des responsables de commissions de l'AOG	73
Figure 10 : Réunion de ménages intéressés.....	73
Figure 11 : Exemples de litières apportées par les ménages	75
Figure 12 : Broyeurs multi-usages	75
Figure 13 : Visite d'une délégation de Grande Plaine à Limonade (SOIL)	76
Figure 14 : Chronologie des activités de mise en place de la filière d'assainissement	77
Figure 15 : Préparation du site de compostage	79
Figure 16 : Bassin de lavage, désinfection et rinçage des seaux.....	80
Figure 17 : Atelier de fabrication des toilettes.....	80
Figure 18 : Module de TSLB.....	81
Figure 19 : Bloc de 4 TLB installé dans une école.....	82
Figure 20 : Remise des TSLB et signature des contrats d'engagement.....	83
Figure 21 : Pesée des seaux au petit matin.....	84
Figure 22 : Cumul des masses de résidus apportés par les ménages	85
Figure 23 : Répartition des usagers par âge	87
Figure 24 : Thermomètre Skywatch utilisé pour le suivi de la température.....	104
Figure 25 : Pilotes de 100 litres	105
Figure 26 : Pilotes de 300 litres.	107

Figure 27 : Exemple d'évolution de la température dans les bacs de compostage.....	113
Figure 28 : Evolution de la température au cours des essais en pilotes de 100 litres	114
Figure 29 : Evolution de la température au cours des essais en pilotes de 300 litres	116
Figure 30 : Réponses aux questions de départ.....	123

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques moyennes des excréta (source : ROSE et al., 2015).....	18
Tableau 2 : Quantité moyenne de matières fécales produites dans les pays développés et en développement (source : ROSE et al., 2015).....	19
Tableau 3 : Principales maladies à transmission féco-orale (source : WEDC, 2014).....	22
Tableau 4 : Conditions recommandées pour un compostage rapide (d'après Gotaas, 1959 ; Mustin, 1987 ; Turcot, 1999 ; Elain, 2007).....	28
Tableau 5 : Avantages potentiels et inconvénients de l'assainissement collectif dans les PED.	35
Tableau 6 : Avantages et inconvénients de l'assainissement non collectif dans les PED	40
Tableau 7 : Pratique de vidange par Département - Pourcentage de répondants ayant reconnu qu'ils éliminent la latrine (GILLES et al., 2015).	43
Tableau 8 : Analyse FFOM de la filière d'assainissement SOIL.....	66
Tableau 9 : Quantité totale de résidus et moyenne par personne et par jour	86
Tableau 10 : Résultats de la mesure sur 3 semaines des quantités de litières utilisées et de résidus produits	87
Tableau 11 : Constitution de l'échantillon pour l'enquête école	88
Tableau 12 : Raisons ayant justifié l'abandon de candidatures à la réplication	90
Tableau 13 : Liste des échantillons de compost analysés	101
Tableau 14 : Liste des indicateurs biologiques et méthodes sélectionnées pour le suivi de l'hygiénisation des résidus solides	102
Tableau 15 : Analyses agronomiques des résidus au cours et en fin de cycle de compostage	103
Tableau 16 : Masse des résidus frais dans les 6 pilotes	105
Tableau 17 : Conditions opératoires pour les 5 pilotes de 300 litres.....	107
Tableau 18 : Résultats d'analyse des matrices solides étudiées	109
Tableau 19: Résultats d'analyse des lixiviats des matrices étudiées	111
Tableau 20 : Dénombrement des UFC de E coli lors des essais en pilotes de 300 litres.....	117
Tableau 21 : Analyses effectuées en Haïti sur les échantillons de compost	117
Tableau 22 : Caractéristiques physico-chimiques des composts	119
Tableau 23: Caractéristiques microbiologiques des composts	121

Publications et communications

Jean, G., Bayard, R., Lacour, J., Naquin, P., 2017. Assainissement par toilettes sèches à litière biomaîtrisée : premiers résultats d'une expérimentation menée en milieu rural (Grande Plaine, commune de Gros-Morne, Haïti). Déchets Sciences et Techniques [En ligne], N°74, mis à jour le : 08/09/2017, URL : <http://lodel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/index.php?id=3618>, <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3618>.

Jean, G., Bayard, R., Lacour, J., Naquin, P., 2014. Les toilettes à litière biomaîtrisée : une solution de rechange à la réduction de la contamination microbiologique des eaux souterraines en Haïti. Revue Haïti-perspectives du GRAHN, Volume 4, numéro 3, 5 p.

Communications orales à des congrès internationaux (avec actes)

Jean, G., Bayard, R., Lacour, J., Naquin, P., 2018a Implementation of a dry toilet with biocontrolled litter device in an Haitian rural area [En ligne]. In: 6th International Dry Toilet Conference. Disponible sur <http://www.huussi.net/wp-content/uploads/2018/08/Jean_Gaston_DT2018.pdf>

Jean, G., Bayard, R., Lacour, J., Naquin, P., 2018b. Composting of dry toilets solid residues: evolution of the characteristics over time, In: 6th International Conference on Sustainable Solid Waste Management (NAXOS 2018).

Jean, G., Bayard, R., Lacour, J., Naquin, P., 2016. Les toilettes sèches à litière biomaîtrisée (TSLB), une solution d'assainissement écologique adaptée au contexte haïtien. Retour sur l'expérimentation menée à Grande Plaine. Ecosystèmes d'Haïti : focus sur les réalités et les espoirs de l'environnement, Haïti Studies Association, 10-12 novembre 2016, Cap Haïtien, paru dans Pédagogie Nouvelle, 2016, p. 87-91.

Jean, G., 2016a. Assainissement par toilettes sèches à litière biomaîtrisée et compostage des résidus solides : premiers résultats d'une expérimentation menée à Gros-Morne, Haïti, In : TCHANGBEDJI G. Colloque international « Eau, Déchets et Développement Durable » (E3D), 7-11 mars 2016, Lomé, p.88.

Jean, G., 2014a. Les toilettes à litière bio-maîtrisée : élément de solution pour un assainissement écologique dans les zones rurales et périurbaines d’Haïti, In : NGNIKAM E. Conférence internationale sur la maîtrise de l’assainissement dans les villes africaines, 27-30 avril 2014, PolytechYaoundé. Disponible sur CD projet MAFADY Yaoundé avril 2014.

Présentation de posters dans des conférences internationales

Jean, G., 2016b. Assainissement écologique par toilettes sèches à litière biomâtrisée pour la protection des réserves d’eau en Haïti, In : FST. Conférence « L’eau dans tous ses états », 21 juin 2016, Faculté des Sciences et Technologie de l’Université Lyon 1, p. 27.

Jean, G., 2014b. Les toilettes à litière bio-maîtrisée (TLB) : élément de solution pour un assainissement écologique dans les zones rurales et périurbaines d’Haïti ? In : 5e Rencontres nationales des acteurs de la solidarité avec Haïti : Le droit et l'accès à l'eau comme support d'un partenariat franco-haïtien durable, 9-11 novembre 2014, Lille France [En ligne]. CHF. Disponible sur <http://www.collectif-haiti.fr/rencontres-nationales-2014.php> . Consulté le 05.09.15

Introduction générale

En 2015, pour faire suite aux OMD, Objectifs du Millénaire pour le Développement, l'ONU proposait 17 Objectifs de Développement Durable (ODD) pour tenter de réduire d'ici 2030 les inégalités criantes dans le monde et garantir un avenir meilleur à tous. Parmi ces ODD, le 6ème s'intitule « **Garantir l'accès de tous à des services d'approvisionnement en eau et d'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau** ». Il compte 3 cibles :



1. « D'ici à 2030, assurer l'accès de tous, dans des conditions équitables, à des services d'assainissement et d'hygiène adéquats et **mettre fin à la défécation en plein air**, en accordant une attention particulière aux besoins des femmes et des filles et des personnes en situation vulnérable.
2. D'ici à 2030, améliorer la qualité de l'eau en réduisant la pollution, en éliminant l'immersion de déchets et en réduisant au minimum les émissions de produits chimiques et de matières dangereuses, en diminuant de moitié la proportion d'eaux usées non traitées et en augmentant considérablement à l'échelle mondiale le recyclage et la réutilisation sans danger de l'eau.
3. Appuyer et renforcer la participation de la population locale à l'amélioration de la gestion de l'eau et de l'assainissement » (ONU, 2015).

Cette prise de conscience est justifiée par la situation dramatique pour encore une trop grande partie de la population mondiale en matière d'accès à l'eau ainsi que de gestion des excréta humains et des déchets. Car même si l'accès à l'eau est vital, les villes des pays en développement manquent souvent de moyens pour le garantir de manière sûre. Quant à l'assainissement, il n'est encore que trop rarement considéré comme une priorité par les autorités locales.

En outre, les changements climatiques et l'augmentation du nombre d'habitants sur notre planète auront des conséquences désastreuses que nous commençons à entrevoir : accélération de la désertification, pénurie d'eau douce dans des zones qui jusqu'à il y a quelques années n'en manquaient pas, pollution accrue des eaux continentales et océaniques, inondations, cyclones... Autant de conséquences qui vont sans doute rendre la vie des populations les plus vulnérables encore plus difficile.

Pour que les ODD ne deviennent pas seulement des vœux pieux, il faudrait que tous les Etats du monde les prennent comme feuille de route. Ce sont les ODD qui devraient aujourd'hui guider les choix politiques, à tous les niveaux de décision : international, national, régional, municipal. Il faudrait également conscientiser chaque citoyen pour qu'il adopte des comportements plus responsables et fasse pression sur les choix politiques.

Le laboratoire Déchets Eau Environnement Pollution (DEEP) de l'INSA de Lyon et le Laboratoire de la Qualité de l'Eau et de l'Environnement (LAQUE) de l'Université Quisqueya en Haïti concentrent depuis de nombreuses années leurs activités de recherche à des thématiques centrées sur la préservation de la ressource en eau et la lutte contre les pollutions, dans un objectif sanitaire et de préservation des écosystèmes.

Le CEFREPADE, Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l'Assainissement, les Déchets et l'Environnement, est une association scientifique créée en 2010 à l'INSA de Lyon qui s'est fixée comme mission de travailler à l'amélioration des conditions de vie des populations les plus défavorisées des pays en développement. Elle intervient dans les domaines de compétence de ses membres experts, qui sont ceux de la gestion des déchets, de l'assainissement, de l'accès aux énergies renouvelables, de la protection de l'environnement, sous l'angle technique, environnemental, mais aussi économique et social.

Afin d'apporter leur contribution à la recherche de solutions d'assainissement adaptées aux populations vivant dans des conditions précaires, ces trois acteurs ont décidé de travailler ensemble à l'élaboration d'un mode d'assainissement adapté aux zones rurales haïtiennes, à la base de ce travail. L'objectif général visé est de contribuer à la lutte contre la défécation à l'air libre, en proposant un modèle d'assainissement durable, réduisant les maladies à transmission hydrique.

Haïti est le pays le plus pauvre de la région caribéenne et parmi les plus pauvres au monde. Il a été estimé à environ 69% la proportion de la population n'ayant pas accès à des systèmes d'assainissement corrects (IHE et ICF, 2018) et la défécation à l'air libre serait pratiquée par 36% des habitants vivant dans les milieux ruraux, 10% en milieux urbains (WHO and UNICEF, 2013).

L'État haïtien peine à trouver des solutions, au-delà des projets ponctuels des organisations internationales, des ONG, qui n'arrivent que trop rarement à rencontrer les conditions de leur pérennité. Désorganisation au niveau des instances gouvernantes, manque de volonté politique, manque de compétences, manque de moyens... Les explications peuvent être nombreuses, leur hiérarchisation discutée.

Aucun réseau d'égout en état de fonctionnement n'existe dans ce pays de plus de 10 millions d'habitants. En ville, les excréta sont collectés dans des fosses, vidangées de manière le plus souvent manuelle par des « *bayakous* », travaillant dans des conditions effroyables. Le produit de ces vidanges est ensuite transporté jusqu'à des lagunes dédiées à cet effet, fonctionnant par déshydratation, ou, le plus souvent, vidé dans le premier canal d'évacuation des eaux pluviales accessible, en bordure de mer ou sur des terrains non utilisés. En milieu rural, les fosses sont en général creusées dans le sol, non bétonnées, vidangées par les propriétaires ou fermées lorsqu'elles sont pleines pour passer à une autre.

Devant cette carence, de plus en plus nombreux sont ceux qui prennent le parti de s'organiser par eux-mêmes, avec des moyens souvent limités mais qui justement peuvent plus facilement garantir la pérennité, d'autant plus si les principaux intéressés sont impliqués dès l'amont. Car en effet, il est bien connu que l'appropriation, le changement de comportement, l'adhésion à une nouveauté, tout aussi simple, peu coûteuse et source de nombreux avantages qu'elle soit, ne peut s'obtenir, à titre individuel, qu'en impliquant le plus en amont possible les personnes concernées dans les choix qui sont faits, en sensibilisant et en éduquant.

C'est ainsi que les choses ont commencé à Grande-Plaine, petite localité rurale haïtienne de 2000 habitants de la commune de Gros-Morne (département de l'Artibonite), où la communauté paysanne s'est organisée depuis bientôt 25 ans au sein d'une association

paysanne, l'AOG (Association des Originaires de Grande-Plaine), afin de prendre elle-même en main son développement. Reboisement, accès à l'éducation, à la santé, amélioration des conditions de vie, des pratiques agricoles, désenclavement, sensibilisation et implication des jeunes afin de constituer la relève : autant d'actions menées avec peu de moyens financiers, beaucoup de moyens humains bénévoles et une population très responsabilisée.

A Grande-Plaine, on ne trouve pas de belles latrines bétonnées et imperméabilisées, tout au plus de simples fosses à l'accès parfois dangereux. Mais dans la plupart des cas, c'est la défécation à l'air libre qui est pratiquée dans ce territoire rural, avec toutes les conséquences sanitaires et sociales que cela implique. Face à ce constat, l'AOG a souhaité rechercher une solution qui permettrait de résoudre ce problème de manière peu coûteuse et durable. Suite à des visites de terrain, des échanges, le choix s'est tourné vers un dispositif à base de toilettes sèches individuelles compactes dites « à litière bio-maîtrisée » et un mode d'organisation communautaire.

La mise en place de ce dispositif, sous ses aspects techniques, économiques, sociaux, sanitaires et environnementaux, s'est faite avec un accompagnement scientifique qui a donné lieu aux travaux présentés ici.

Les principales questions qui se posaient à nous, afin d'avoir des éléments de réponse à la question de savoir si les toilettes sèches à litière bio-maîtrisée pouvaient être une solution adaptée et durable en zone rurale haïtienne, étaient alors :

- Comment aborder les habitants pour les amener à accepter et adopter durablement les toilettes à litière ?
- Quel mode de gestion des résidus mettre en place ?
- Comment procéder pour garantir une filière avec une bonne maîtrise des risques sanitaires à tous les niveaux ?
- Comment étendre ce dispositif à d'autres habitants, à d'autres villages ?

Pour répondre à ces questions, il était nécessaire de bien cadrer le contexte d'intervention, d'identifier objectivement les modalités possibles d'intervention dans un tel contexte, les options envisageables, d'étudier les retours d'expériences afin d'en tirer les enseignements. Ceci nous a conduit à élaborer un programme expérimental en 2 phases :

- Phase 1 : une approche visant à sensibiliser la population, à l'impliquer, à définir avec elle les modalités de cette expérimentation et le suivi, à s'assurer de son adhésion, à tester la répliquabilité sur un autre territoire ;
- Phase 2 : un programme scientifique et technique pour identifier les meilleures conditions menant à l'hygiénisation des résidus traités.

Nous allons donc présenter en première partie l'analyse bibliographique, qui sera suivie de l'étude expérimentale menée pendant 3 ans, tant au niveau social et économique que sanitaire et environnemental.

A. Partie bibliographique

L'analyse bibliographique doit permettre d'orienter le programme de recherche. Pour cela, il est nécessaire de bien identifier au préalable les objectifs qu'elle vise.

Pour répondre correctement à notre question principale de recherche, à savoir si les toilettes sèches à litière bio-maîtrisée pouvaient être une solution adaptée et durable en zone rurale haïtienne, nous avons choisi de structurer notre analyse bibliographique selon trois étapes :

- Une synthèse sur l'assainissement en général et dans les pays en développement en particulier, afin d'apporter une vision objective sur les différentes options possibles ;
- Une synthèse sur la situation en matière d'assainissement en Haïti, afin de bien identifier le contexte et les modalités d'intervention, qui doivent notamment respecter les consignes des instances publiques concernées ;
- Une synthèse sur les conditions permettant d'assurer la durabilité d'une filière d'assainissement, de manière théorique et au travers de l'analyse de retours d'expérience assez bien renseignés.

Compte tenu de la nature de notre projet de recherche, cette analyse bibliographique a privilégié l'appui sur des documents de synthèse et de capitalisation faisant référence pour les acteurs de terrain, souvent écrits par des scientifiques individuels ou réunis en consortium, à partir de leur propre expérience et de celle d'autres acteurs, plutôt que sur des publications scientifiques issues de travaux très spécifiques.

A.1 Généralités sur l'assainissement

Nous allons présenter ici une synthèse sur l'assainissement qui s'est appuyée sur des ouvrages traitant de l'assainissement dans les pays développés mais aussi sur des documents concernant plus spécifiquement le contexte des pays en développement.

Il est toujours possible de mettre en place des solutions coûteuses en termes d'investissements, même dans des contextes précaires, avec l'aide de bailleurs internationaux. Mais ces solutions sont généralement également coûteuses en termes de coûts de fonctionnement, coûts auxquels les bailleurs ne subviennent que rarement ou pendant peu de temps. Il faut donc être vigilant sur les possibilités de transfert technologique, tant au niveau technique, économique, que social.

A.1.1 Petite Histoire de l'assainissement dans le monde

La question d'assainissement et des toilettes n'est pas récente. Elle est aussi vieille que l'humanité. L'histoire de l'assainissement remonte à l'origine de la civilisation et devait répondre au besoin d'évacuer les excréments. Des études archéologiques menées dans plusieurs villes ont permis de découvrir des vestiges de réseaux d'évacuation d'excréments et de toilettes à chasse d'eau très anciens. Par ces recherches, les archéologues ont pu identifier des vestiges de toilettes connectées à des drains couverts de briques d'argile en terre cuite, considérés comme l'ancêtre de nos réseaux d'égouts d'aujourd'hui, dans la ville d'Harappa au nord du Pakistan datant de XVI^e siècle avant Jésus Christ. Des réseaux en briques similaires ont été aussi observés en Mésopotamie et auraient également existé en Egypte et en Chine ancienne. Certaines régions au Pakistan, en Égypte et en Chine présentent les mêmes types de toilettes et des systèmes similaires d'évacuation des fèces (FARNSWORTH, 1940). Des systèmes de toilettes reliés à des drains ou égouts ont été identifiés dans des villes de la Rome antique et dans tous les sites archéologiques gallo-romains (GUERRAND, 2009). Des vestiges de ces toilettes peuvent être observés dans la région Auvergne-Rhône-Alpes, notamment au musée gallo-romain de Vienne.

Pour certains chercheurs, les plus anciennes latrines en Europe auraient été mises en place à l'époque romaine (5 premiers siècles de notre ère). Construites dans de grandes pièces

communes qui pouvaient accueillir environs 80 personnes en même temps, elles étaient considérées comme des lieux de rencontre. Ainsi, les latrines furent utilisées par les classes moyennes comme des espaces communautaires permettant d'échanger sur les sujets d'actualité et d'affaires (GUERRAND, 2009).

Le Moyen Age a été marqué par une différence entre l'Asie et l'Europe en matière d'assainissement. En Asie, des latrines ont été aménagées avec la possibilité de récupérer les excréments qui devaient être valorisés par la suite. Les excréments étaient utilisés pour amender et fertiliser les champs ; parfois, ils étaient séchés au soleil puis utilisés comme source d'énergie pour se chauffer (WINBLAD et SIMPSON-HEBERT, 2004).

Partout en Europe, les habitations n'étaient pas équipées de latrines. A Paris, la défécation à l'air libre était pratiquée et cela ne posait aucun problème aux passants. Les rues et les arrières cours étaient recouvertes de matières fécales issues surtout du déversement des pots de chambre directement dans la rue. La ville était malodorante, fétide, siège de beaucoup de maladies et d'épidémies qui rendaient très courte l'espérance de vie (VIGARELLO, 1985).

A part les châteaux forts, dotés généralement de latrines en encorbellement, rares étaient les bâtiments publics équipés de latrines. A Versailles par exemple, il n'y avait pas de latrines, les courtisans déféquant derrière les portes, sur le balcon ou dans le jardin à la vue de tous (FARNSWORTH, 1940 ; GUERRAND, 2009).

Pour faire face aux problèmes d'insalubrité et d'hygiène, certains pays ont réfléchi à des solutions. Ainsi, en Angleterre, on pouvait observer des latrines construites au-dessus des rivières, sortes de toilettes en pilotis que l'on peut observer encore aujourd'hui dans certaines villes côtières ou lacustres des pays en développement. Celles qui n'étaient pas sur les rivières étaient vidées manuellement la nuit et leur contenu séché et valorisé en agriculture (JIAYI et WANG, 2001 ; EVELEIGH, 2002). Ces types de toilettes sont fréquents dans de nombreuses communautés comme chez les populations vivant dans les mangroves à Bois des Singes à Douala au Cameroun, étudiés lors de travaux menés par une équipe de chercheurs (TOUKEP et al., 2012).

Ce sont les nuisances olfactives occasionnées par la présence de latrines malodorantes dans certains lieux qui ont parfois poussé la réflexion vers la recherche de solutions

d'amélioration. Ainsi, la première toilette à chasse d'eau en Angleterre a été créée en 1592 par John Harington, poète et filleul de la Reine Élisabeth 1^{ère} dans sa maison de Kelston. Après une visite de l'installation réalisée par son filleul, la Reine avait ordonné l'installation du même type à Richmond Palace. Contrairement aux systèmes de l'antiquité, qui évacuaient déjà les excréments avec de l'eau en utilisant des canaux en terre cuite exigeant beaucoup d'espace, la chasse d'eau de Harington pouvait tenir sans peine dans une petite pièce et déboucher sur une petite fosse d'aisance dans le jardin, tandis que les systèmes antiques étaient pour la plupart communautaires et laissaient les fèces à l'air libre (GUERRAND, 2009).

L'utilisation des rivières pour évacuer les fèces a eu de lourdes conséquences en termes de maladies et d'épidémies. Certains pays européens ont eu à faire face à des épidémies de maladies d'origine fécale (dont le choléra) et l'Angleterre n'a pas été épargnée (BARNES, 2006). Les anglais avaient vécu péniblement l'été chaud de 1858 qui avait occasionné une importante baisse de la Tamise faisant apparaître les flots d'excréments générant toutes sortes de nuisances et de maladies. Cette situation a provoqué des mouvements de protestation au niveau de la population et a forcé le parlement à voter une loi octroyant des moyens importants pour la construction des égouts. Connue sous le nom de « grande puanteur », cet événement a contribué à la révolution sanitaire en Europe en donnant naissance au système d'assainissement « tout à l'égout » durant la 2^{ème} moitié du XIX^e siècle.

En 1868, Victor Hugo faisait une promotion enthousiaste de l'utilisation des eaux usées de Paris : « *Tout l'engrais humain et animal que le monde perd, rendu à la terre au lieu d'être jeté à l'eau, suffirait à nourrir le monde* » (HUGO, 1862).

L'utilisation des excréments en agriculture n'est pas une pratique nouvelle. Rarement rendue publique, elle a été pratiquée depuis des milliers d'années et fait partie intégrante de la culture des habitants dans plusieurs pays asiatiques, particulièrement en Chine (WINBLAD et SIMPSON-HEBERT, 2004 ; OMS, 2006). En Europe et aux États-Unis, les excréments humains issus de latrines ont été utilisés en agriculture, comme c'était le cas pour Paris jusqu'à la moitié du XIX^e siècle (JIMENEZ et ASANO, 2008). En Syrie, les excréments humains sont depuis longtemps déshydratés et vendus pour amender les champs. Les excréments sont utilisés comme source de nutriments dans les pays émergents ou développés comme la

Chine, le Mexique, le Pérou, l'Égypte, le Liban, le Maroc, l'Inde et le Vietnam (MACDONALD, 2004).

Aujourd'hui, la différence entre les termes toilette et latrine n'est pas toujours très claire. Certaines personnes utilisent l'un ou l'autre pour parler de l'endroit réservé à la défécation. D'autres utilisent le terme toilette pour désigner les infrastructures modernes installées généralement à l'intérieur des maisons et latrines pour les infrastructures installées sur la cour ou au fond du jardin. Aujourd'hui, le terme toilette est généralement utilisé pour parler des dispositifs à chasse d'eau, souvent dénommés toilettes « hygiéniques » dans certains pays en développement.

A.1.2 Les enjeux de l'assainissement

Le regroupement des populations dans les villes a fait naître la nécessité d'organiser certains services indispensables dans le contexte de vie collective. Cette dernière doit se dérouler dans des espaces sains, réduisant l'exposition des habitants aux nuisances associées à la gestion des excréta. C'est ainsi que pour répondre à ce besoin de vie collective saine, les autorités interviennent avec des mesures visant l'assainissement des villes en proposant des systèmes et/ou des technologies qui prennent en compte les différents enjeux. Les principaux enjeux de l'assainissement sont de réduire les nuisances sanitaires et environnementales. Ainsi, pour être efficace, un système d'assainissement doit répondre à des enjeux sanitaires et environnementaux, mais aussi économiques et socioculturels, que nous avons tenté de résumer ici à partir de nos lectures.

A.1.2.1 Enjeux socioculturels

La question de l'assainissement n'est pas perçue de la même manière par tous. D'un pays à un autre, on peut observer d'énormes variations dans la façon de voir ou de comprendre l'assainissement. Ces variations peuvent être dues au niveau d'éducation des habitants, aux valeurs socioculturelles et économiques. Le problème de gestion des excréta et des eaux usées n'a pas la même importance partout. Si pour certaines cultures les matières fécales représentent des sources de transmission de maladies, pour d'autres ce sont les mauvais esprits qui en sont responsables.

Certaines populations sont plutôt fécopiles, c'est-à-dire sans barrières socioculturelles liées à la manipulation et à l'utilisation des excréta, alors que d'autres sont considérées

fécophobes (ESREY et al., 1998 ; WINBLAD et SIMPSON-HEBERT, 2004, BURKHARDT, 2006). Les déterminants fondamentaux de cette différence d'attitude ne sont pas vraiment identifiés, comme cela est le cas pour de nombreuses différences culturelles liées à des géographies éloignées et des civilisations n'ayant pas évolué de la même manière.

Dans les pays fécophiles, comme la Chine ou le Japon, il n'est pas gênant de vivre proche des sites de défécation en plein air. Les termes se rapportant aux excréments humains et animaux trouvent leur place facilement dans les discours, contrairement aux sociétés fécophobes où ces termes sont considérés comme des tabous. Dans les pays fécophobes, comme la plupart des pays européens, la présence des excréta humains ou simplement des odeurs rappelant les matières fécales est répugnante et peut même provoquer des réactions de protestation au sein de la population. Dans certains pays d'Afrique, l'odeur des gens et des lieux est souvent utilisée comme indicateur de pureté. En dépit du difficile travail effectué, les personnes qui travaillent dans les déchets ou pratiquent le métier de vidangeur sont perçues comme « sales » par les communautés. En Haïti, les vidangeurs traditionnels, informels, appelés « bayakous » sont considérés comme étant une catégorie de personnes non fréquentables, sales, impures, à tenir à l'écart de la société (DINEPA, 2013a).

Chaque société a sa propre représentation de l'assainissement et/ou des technologies proposées. La non prise en compte des valeurs socioculturelles et des éléments de blocages peut provoquer le rejet. Dans les pays en développement, pour être pérenne, la mise en place d'un système d'assainissement exige la participation active et l'implication de tous les secteurs, notamment les habitants, principaux bénéficiaires des services.

Il semble que cette participation peut être freinée par des barrières socioculturelles. Il devient alors indispensable que décideurs et les professionnels de l'assainissement en tiennent compte dans toute démarche visant à gérer durablement les problèmes d'assainissement.

A.1.2.2 Enjeux économiques

L'organisation des systèmes d'assainissement d'un pays demande des investissements économiques généralement importants, tant au niveau de la mobilisation des ressources humaines, que de la mise en place des infrastructures et des équipements. Parallèlement, une carence en assainissement peut avoir de graves conséquences sur l'économie des pays.

Contraints de répondre *a minima* aux exigences de certains services de base, les dirigeants de nombreux pays en développement ne sont pas en mesure d'investir dans l'assainissement, souvent considéré comme un problème non prioritaire.

Des études menées dans de nombreux pays d'Amérique Latine, d'Afrique Subsaharienne, d'Asie et d'Océanie ont permis de chiffrer les coûts estimatifs liés à un manque d'assainissement pour un pays. Une étude menée par Hutton à la demande de l'Organisation Mondiale de la santé (OMS) a montré que l'absence de systèmes d'eau potable et d'assainissement de qualité a occasionné des pertes importantes estimées à 260 milliards de dollars par an dans le monde. La part de l'assainissement serait autour de 80%. Selon l'étude, cette perte impacte très fortement les PIB des pays, à la hauteur de 1,5 % du PIB mondial, de 2,9 % du PIB pour les pays d'Asie du Sud et 4,3 % du PIB pour les pays d'Afrique subsaharienne (HUTTON, 2012).

Dans une autre étude menée dans 18 pays africains par le Programme d'eau et d'assainissement de la Banque Mondiale à la même année, on a montré que le manque d'assainissement adéquat occasionnerait des pertes estimées à 5,5 milliards de dollars à l'ensemble des pays concernés. L'impact sur le PIB a été estimé entre 1 et 2,5% selon les pays (WSP, 2012). Partant de ces constats, il semble évident que les autorités de ces pays gagneraient à investir dans l'organisation des services d'assainissement pour éviter de perdre de l'argent. Car ces mêmes études ont considéré comme étant rentables des investissements en assainissement, arguant qu'un investissement de 1€ rapporte entre 2,8 et 5,5 € respectivement en d'Afrique subsaharienne et en Asie. Le problème est que, plus un pays est pauvre, moins il a la possibilité d'investir dans la mise en place des services d'assainissement et l'entretien des infrastructures, qui ne figurent pas souvent dans la longue liste des priorités. De plus, dans les pays en développement, la majorité des populations n'est pas capable d'assumer régulièrement le coût des services.

A.1.2.3 Enjeux environnementaux

La protection de l'environnement dans son ensemble représente un enjeu important dans la définition des politiques d'assainissement. La préservation des ressources en eau se place au centre de cet enjeu. Les démarches d'assainissement doivent aider à éviter la pollution organique des cours d'eau, sièges de micro-écosystèmes animaux et végétaux.

Dans les cours d'eau où se développent des êtres vivants (animaux et végétaux), l'évacuation des eaux usées et des excréments humains ne leur est pas profitable. Or, le programme de l'environnement des Nations Unies estime à 90% les eaux usées non traitées des pays en développement, c'est-à-dire des eaux usées rejetées directement dans les cours d'eau, polluant par conséquent les ressources en eau. Plus de 200 millions de tonnes d'excréments humains seraient ainsi annuellement déversés dans les cours d'eau (GABERT, 2018).

La biodégradation de ces masses importantes de matière organique par les micro-organismes s'accompagne d'une forte consommation d'oxygène qui diminue la concentration en oxygène dissout dans les eaux, avec comme conséquence l'asphyxie du milieu et la mort des espèces. L'impact est d'autant plus fort que les nutriments amenés par les excréments (C, N, P) servent à favoriser le développement rapide des algues, phytoplanctons et autres végétaux, créant un déséquilibre dans le milieu suite à une surconsommation d'oxygène.

L'oxygène est très important pour l'oxydation de l'ammoniac et des nitrites, deux molécules écotoxiques pour les animaux, produites à partir de la décomposition des matières organiques riches en azote en les transformant en nitrates.

Tout l'enjeu aujourd'hui, dans des contextes de grande pollution, tourne autour du recyclage des molécules carbonées, azotées et phosphatées, afin de prévenir le déséquilibre des écosystèmes aquatiques et de préserver les ressources en eau.

A.1.2.4 Enjeux sanitaires

Beaucoup d'infections, notamment les maladies féco-orales, sont liées à la mauvaise gestion des eaux usées et des excréments humains. Ces derniers sont potentiellement riches en micro-organismes pathogènes susceptibles de provoquer des maladies. Quand les excréments humains ne sont pas traités ou hygiénisés correctement, les micro-organismes pathogènes peuvent polluer et contaminer l'environnement, mobilisant de nombreuses voies de contamination (l'eau, les aliments, l'air) pour produire des maladies, voire des épidémies (ESREY et al., 1998 ; ALEGBELEYE et al., 2018). La transmission des maladies féco-orales peut être accélérée par des insectes vecteurs véhiculant les agents pathogènes prélevés sur des rejets traînant dans la nature. Ceci est non seulement une menace pour la santé des populations des pays où l'assainissement est défaillant, mais aussi pour le monde

entier. En effet, la circulation des agents pathogènes d'un coin à l'autre de la planète peut se faire sans difficultés compte tenu de la masse des déplacements humains et des échanges commerciaux entre les pays (pour preuve, le choléra apporté par les agents népalais des Nations Unies en Haïti). Pour prévenir la transmission des maladies à transmission hydrique susceptibles de générer jusqu'à des pandémies, les pays, voire les instances internationales concernées par la question, ont tout intérêt à considérer comme extrêmement important et même urgent de trouver des solutions au problème d'assainissement, en cherchant à maîtriser les différentes sources et voies de contamination.

A.1.3 Définition et principes de l'assainissement

En préalable, précisons que nous ne traitons ici que de la gestion des excréta humains et non de celle des déchets solides ou liquides d'autres origines, parfois englobée également sous le terme assainissement.

On peut trouver autant de définitions de l'assainissement qu'il existe d'ouvrages pour en parler. Selon le centre national de ressources textuelles et lexicales (CNRTL), il s'agit de l'action d'assainir, du résultat de cette action, assainir signifiant rendre sain, purifier, désinfecter (CNRTL, 2016). Selon le dictionnaire Larousse, « *l'assainissement est l'ensemble des techniques d'évacuation et de traitement des eaux usées et des boues résiduaires* » (LAROUSSE, 2017). Dans son livre « Les principes d'assainissement des villes » paru en 1870, il est intéressant de voir que, déjà à cette époque, Charles Louis de Saulces de Freycinet définissait l'assainissement comme étant « *la restitution à la terre des principes fertilisants des excréments et le retour aux rivières des liquides dépouillés de leurs éléments corrupteurs* » (DE SAULCES DE FREYCINET, 1870). Le Compendium des systèmes et des technologies d'assainissement de l'EAWAG, qui fait référence dans le domaine, définit quant à lui l'assainissement comme « un processus à multiples étapes, par lequel sont gérés les excréments humains et les eaux usées, depuis le point de production jusqu'au point d'utilisation ou d'évacuation finale » (TILLEY et al., 2014). Comme on peut le voir, on parle ici avant tout de gestion et non de protection de la santé ou de l'environnement.

Ainsi, on peut dire que l'assainissement concerne les stratégies de gestion des excréta humains qui concourent à l'amélioration des conditions sanitaires et environnementales, en éliminant au mieux les causes d'insalubrité et de contamination (DRECHSEL et al., 2011).

Selon une approche systémique, l'assainissement peut se présenter sous la forme d'une succession de 3 opérations :

- La collecte et le transport des excréta ;
- Le traitement des eaux et des résidus solides ;
- La valorisation sous forme matière ou énergétique des résidus.

L'assainissement peut être géré de manière collective ou individuelle, selon les territoires et les moyens disponibles (TAYLER, 2018).

A.1.3.1 Collecte et transport des excréta

Afin de pouvoir être traités, les excréta doivent être collectés et transportés jusqu'à leur lieu de traitement.

La collecte peut se faire à l'aide de différents types d'interfaces (ABARGHAZ, 2013) :

- Un urinoir ;
- Un siège sur lequel la personne s'assied ou l'utilise en position debout, comme un urinoir ;
- Un siège dit « à la turque », au-dessus duquel la personne s'accroupie.

En l'absence d'interface, il s'agit de simples trous dans le sol ou de défécation à l'air libre qui n'est pas considérée comme un moyen de collecte. Les interfaces peuvent être placées à l'intérieur des habitations ou à l'extérieur. Elles peuvent être réservées à une seule famille ou partagées avec d'autres utilisateurs. Elles peuvent être conçues avec ou non un système permettant de séparer les urines, soit à la source soit par séparation gravitaire. L'intérêt de la séparation des urines est principalement la réduction du volume à stocker, la réduction des odeurs et des mouches, ainsi que la facilitation de la déshydratation.

Le mode de transfert des excréta de leur lieu de production vers le lieu de traitement ou de rejet est différent selon le principe choisi. Il y a deux grands principes (GABERT, 2018) :

- à chasse d'eau, où les excréta sont transportés par l'eau jusqu'à un dispositif d'assainissement non collectif ou au travers d'un réseau d'égout ou un mini-égout (assainissement collectif) ;

- à sec, où les excréta tombent généralement dans une fosse aménagée sous la toilette, avec ou sans séparation de l'urine (assainissement le plus souvent non collectif) (MORGAN, 2007).

Dans le cas de réseaux d'égouts ou de mini-égouts (assainissement dit collectif), l'écoulement se fait de manière gravitaire ou avec des pompes de relevage, jusqu'au lieu de traitement ou avec rejet direct dans le milieu naturel (PS-EAU, 2014).

En assainissement non collectif, les systèmes de stockage en fosse septique ou en fosse simple nécessitent une vidange régulière. Celle-ci se fait soit de manière formelle avec des entreprises disposant d'équipements adaptés (pompes, camions, ...), soit de manière informelle avec des vidangeurs prélevant le contenu des fosses à l'aide de seaux, s'immergeant dans celles-ci au péril de leur santé. Ils ajoutent parfois des désinfectants de type crésyl (à base de crésol), destinés surtout à masquer les odeurs, rendant impossible la valorisation ultérieure des résidus (FARLING et al., 2018). Les résidus collectés sont ensuite évacués au moyen de camions ou de charrettes jusqu'à des exutoires officiels (lagunes de déshydratation) ou clandestins (canaux, bord de mer, rivières, terrains vagues, ...).

A.1.3.2 Le traitement des excréta

Nous distinguerons ici les modes de traitement en assainissement collectif de ceux adaptés à l'assainissement non collectif.

En assainissement collectif, les eaux usées sont traitées principalement soit dans des stations d'épuration (DRECHSEL, 2011), soit par lagunage, soit au travers de filtres végétalisés.

- En station d'épuration, les traitements sont physico-chimiques et/ou biologiques : dégrillage, dessablage, dégraissage, floculation, décantation, boues activées, méthanisation, dénitrification : chaque constructeur propose une succession d'opérations unitaires de traitements dont le but est l'épuration de l'eau pour permettre son rejet dans le milieu naturel et la concentration de la pollution dans des boues, qui seront détruites par incinération, mises en décharge si la réglementation le permet ou valorisées (HARROU et al., 2018 ; MARA, 2004). Chaque étape génère ses propres sous-produits : déchets grossiers au niveau du dégrillage, sable et graisses au niveau du

dessablage et dégraissage, biogaz au niveau d'un bio-digesteur... Ces différents sous-produits doivent ensuite être eux-mêmes soit traités, soit valorisés.

- En lagunes, le traitement peut être statique ou avec aération grâce à des aérateurs placés en plusieurs points des lagunes. Selon le climat, le bilan hydrique sera positif ou négatif. S'il est positif, l'eau sera évacuée par surverse après un temps de séjour plus ou moins long dans la lagune, soit directement dans le milieu naturel, soit vers un filtre végétalisé. Le fond de la lagune devra être curé lorsque l'épaisseur de boue viendra réduire trop fortement le temps de séjour de l'eau dans la lagune.
- Avec des filtres végétalisés, les eaux usées sont épurées de manière naturelle par l'oxygène de l'air et les racines des plantes. Les plantes doivent être coupées lorsqu'elles meurent (en hiver par exemple), pour laisser la place au renouvellement de la végétation.

En assainissement non collectif, le traitement peut être centralisé ou décentralisé.

Il est **décentralisé** lorsqu'il est réalisé sur le site même de production des excréta :

- fosse septique avec rejet de l'eau partiellement épurée dans une zone d'infiltration (et vidange régulière des boues ayant sédimenté dans la fosse) ;
- filtre végétalisé, qui ne nécessite pas de vidange, les matières solides se dégradant au contact de l'air et des plantes, et l'eau traitée s'infiltrant également dans le sol ;
- compostage individuel de résidus de toilettes sèches, qui permet de réintroduire l'azote et le phosphore dans le cycle de la matière organique. Néanmoins, les faibles quantités générées à l'échelle d'une famille permettent rarement un réel compostage des résidus seuls, dans la mesure où la montée en température au sein d'un tas de faible volume est rendue difficile par les pertes de chaleur. Le co-compostage avec d'autres déchets, de jardin ou de cuisine, facilite par contre un bon traitement et une hygiénisation plus satisfaisante des résidus. Il est cependant recommandé d'attendre quelques mois avant d'utiliser un tel compost.

Lorsque le contenu de la fosse est vidangé, on se retrouve dans le même cas de figure que dans une gestion centralisée d'assainissement collectif : la vidange se fait au niveau de lagunes, de stations d'épuration ou de filtres végétalisés.

A.1.3.3 La valorisation des excréta

Les excréta contiennent des composants intéressants pour l'agriculture. Certains ont aussi testé de sécher et utiliser les résidus secs comme combustibles, mais il s'agit de cas marginaux que nous ne présenterons pas ici.

Afin de mieux comprendre l'intérêt agronomique des excréta, nous allons dans un premier temps étudier leur composition, les quantités produites et illustrer cela par quelques retours d'expérience.

A.1.3.3.1 Quantité et composition des excréta

Les excréta collectés sont constitués de matières fécales et d'urine, en mélange ou séparés, plus ou moins diluées dans de l'eau. Leur composition à l'émission a été étudiée par plusieurs auteurs. On trouve beaucoup d'informations relatives à la composition de l'urine, moins sur la composition des matières fécales.

Une importante revue bibliographique étayée d'une analyse statistique des données a été effectuée par ROSE *et al.* (2015). Celle-ci s'appuie sur différentes références bibliographiques que nous avons identifiées par ailleurs (116 valeurs moyennes). Le Tableau 1 reprend les données issues de cet état de l'art.

Tableau 1 : Caractéristiques moyennes des excréta (source : ROSE *et al.*, 2015)

Caractéristiques moyennes	Matières fécales		Urine	
	Plage de valeurs	Médiane	Plage de valeurs	Médiane
Production par jour et par personne	51 à 796 g	128 g	0,6 à 2,6 L	1,4 L
Eau (%)	63 à 86	75	91 à 96	-
Matière organique totale (% sur sec)	84 à 93	-	65 à 85	-
Carbone (% sur sec)	44 à 55	-	-	13
Azote (% sur sec)	5 à 7	-	14 à 18	
Phosphore (% sur sec)	3 à 5,4	-	-	3,7
pH	5,3 à 7,5	6,6	5,5 à 7	6,2

La quantité de fèces produite par habitant et par jour est significativement différente dans les pays développés et les pays en développement, du fait de la consommation plus importante de fibres dans les PED (Tableau 2).

Tableau 2 : Quantité moyenne de matières fécales produites dans les pays développés et en développement (source : ROSE et al., 2015)

	Pays développés		Pays en développement	
	Plage de valeurs	Médiane	Plage de valeurs	Médiane
Matières fécales (g /j. personne)	51 à 796 en MH	126 en MH	75 à 520 en MH	250 en MH
	12 à 81 en MS	28 en MS	18 à 62 en MS	38 en MS

MH : matière humide, MS : matière sèche

Comme on peut le constater, les plages de valeurs sont très importantes, ce qui montre la nécessité de les déterminer localement chaque fois que cela est rendu nécessaire, en particulier pour dimensionner une filière d'assainissement.

A.1.3.3.2 Les filières de valorisation des excréta

La valorisation consiste à tirer un avantage de la matière considérée. Dans le domaine de la gestion des résidus, deux grandes voies de valorisation existent : la **valorisation matière** et la **valorisation énergétique**.

La **valorisation énergétique** consiste à produire de l'énergie par **traitement thermochimique** (incinération, pyrolyse ou gazéification) ou **biologique** (méthanisation).

Compte tenu de la teneur élevée en eau des excréta, le traitement thermochimique avec production d'énergie n'est possible qu'après séchage préalable de la matière. Si ce séchage s'effectue de manière mécanique, il faudra s'assurer du bilan énergétique global avant de parler de valorisation. Si le séchage s'effectue au soleil, la production d'énergie à partir des résidus secs est possible. Néanmoins, les surfaces immenses nécessaires pour sécher les excréta, surtout à l'échelle de villes, rend cette filière souvent inadaptée dans les pays tropicaux.

A l'opposé, la méthanisation est un procédé biologique anaérobie qui est favorisé par une teneur en eau élevée. C'est ainsi que de nombreuses stations d'épuration européennes se sont dotées de biodigesteurs qui transforment les boues en biogaz, un mélange gazeux constitué principalement de méthane (gaz combustible) et de gaz carbonique. Le digestat,

résidu pâteux après digestion, peut ensuite être valorisé en agriculture (valorisation matière).

La **valorisation matière** vise à valoriser en agriculture les composants intéressants contenus dans l'urine et dans les matières fécales, à savoir principalement l'azote et le phosphore. Si cela n'est pas fait, ces nutriments sont perdus pour les sols agricoles d'où ils proviennent et perdus à l'échelle de la planète. Ils sont rejetés dans les eaux de surface, provoquant la prolifération d'organismes végétaux nuisant à la bonne oxygénation de l'eau (eutrophisation en particulier), en créant un déséquilibre écologique des écosystèmes aquatiques.

C'est pourquoi la valorisation matière des excréta, matières fécales et urine séparés ou non, est un véritable enjeu à l'échelle planétaire. Si l'on ne veut pas dépendre que des engrais chimiques, dont les ressources naturelles constitutives s'épuisent (phosphore en particulier), il est indispensable de développer la valorisation agricole des résidus d'assainissement.

A.1.4 Assainissement et hygiénisation

On ne peut négliger les risques sanitaires liés aux excréta, surtout dans un contexte de quasi absence de gestion comme dans les pays en développement. Les agents pathogènes présents dans les excréta, sources de contamination fécale des eaux, sont à la base d'un grand nombre de maladies à transmission hydrique. La diarrhée, causée par différents agents pathogènes (*Vibrio cholerae*, *Shigella dysenteriae*, ...) est notamment reconnue par l'OMS comme étant la deuxième cause de mortalité chez l'enfant de moins de cinq ans (OMS, 2017).

Dans les pays développés, les procédés collectifs de traitement des eaux usées imposés par les réglementations sont a priori garants de l'hygiénisation des rejets, même si cela n'est pas forcément traité de manière explicite dans les textes (pas de seuils réglementaires de rejet fixés au niveau microbiologique en France par exemple). Les traitements subis par les boues avant épandage ont, normalement, permis leur hygiénisation. Des contrôles réglementaires doivent être faits au préalable.

En revanche, cela n'est pas le cas avec les procédés d'assainissement individuels, où les résidus de latrines ou toilettes sèches sont susceptibles d'être fortement chargés en micro-

organismes pathogènes. Le risque est généralement considéré maîtrisé en préconisant des techniques qui éloignent au maximum l'utilisateur du risque en recommandant en outre le stockage des résidus de nombreux mois avant de manipuler les résidus. Cette pratique n'est cependant pas toujours possible en raison des volumes de stockage nécessaires. Il est donc important de proposer des solutions afin de réduire les risques de contamination.

Pour cela, après avoir identifié les principaux organismes pathogènes susceptibles d'être présents dans les excréta, nous analyserons les moyens permettant d'atteindre rapidement leur destruction.

A.1.4.1 Agents pathogènes présents, modes de transmission et maladies liées

Les agents pathogènes présents dans les excréta, sources de contamination fécale des eaux, sont à la base d'un grand nombre de maladies à transmission hydrique. Appelées aussi maladies féco-orales ou oro-fécales, elles se propagent suite à l'ingestion d'un micro-organisme pathogène qui, après son développement et sa prolifération dans le tube digestif, est rejeté avec les selles. Observées généralement dans les pays où la carence en assainissement est criante, ces maladies sont la cause de beaucoup de décès (COLLINS et al., 2015 ; BRATTON et NESSE, 1993). Les agents pathogènes présents dans les matières fécales peuvent être :

- des bactéries (*Salmonella typhi*, *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli*,...) ;
- des helminthes ou vers parasites (comme l'ascaris) ;
- des protozoaires (Giardia, amibes, ...) ;
- des virus (rotavirus, entérovirus).

Une fois rejetés dans l'environnement, ces agents pathogènes, très dangereux pour la santé, sont capables de provoquer des maladies comme par exemple la diarrhée, la parasitose intestinale, la gastroentérique, l'amibiase, etc. Les infections aux germes à transmissions féco-orales s'accompagnent dans la grande majorité des cas de diarrhée (Tableau 3), qui contribue à aggraver la malnutrition chez les enfants de moins de cinq ans dans les pays à forte précarité économique. Parmi ces maladies, la diarrhée est reconnue par l'OMS comme étant la deuxième cause de mortalité chez l'enfant de moins de cinq ans et elle est à l'origine de 525 000 décès d'enfants par an (OMS, 2017).

Malgré les préconisations de l'OMS et des instances sanitaires locales, il est parfois difficile voire impossible de se protéger complètement de ces infections qui peuvent évoluer en épidémie selon le niveau d'insalubrité du pays. De plus, les voies de transmission utilisées par les micro-organismes ne sont souvent pas maîtrisables. L'infection au *Vibrio cholerae* est actuellement considérée la plus grave du fait de l'intensité et de la fréquence des épisodes de diarrhée qui l'accompagne. Le Tableau 3 présente quelques maladies qui se propagent par voie féco-orale (WEDC, 2014).

Tableau 3 : Principales maladies à transmission féco-orale (source : WEDC, 2014)

Maladies	Agents pathogènes	Dose infectieuse	Impact annuel
Choléra (diarrhée aiguë et vomissements)	<i>Vibrio cholerae</i>	10^3 à 10^8	3 à 5 millions de cas, 120 000 décès
Giardase (diarrhée et crampes à l'estomac)	<i>Giardia lamblia</i>	10 à 100	200 millions de cas, décès rare
Typhoïde (fièvre)	<i>Salmonella typhi</i> <i>Salmonella paratyphi</i>	10^3 à 10^9	6 à 33 millions de cas, 216 000 décès
Hépatite A et E (inflammation du foie, jaunisse)	Virus Hépatite A et E	Faible	1,4 million de cas d'hépatite A ; taux de mortalité > 1%
Dysenterie bacillaire (diarrhée sanglante)	<i>Shigella dysenteriae</i>	10 à 100	120 millions de cas, 1,1 million de décès

Ce tableau n'est pas exhaustif mais il présente les agents pathogènes et les maladies les plus dangereux en termes de taux de morbidité et de mortalité selon l'OMS.

ESREY et ses collègues (1998) ont étudié le cycle de transmission des maladies d'origine fécale (Figure 1), en faisant des propositions pouvant aider à limiter la contamination (ESREY et al., 1998).

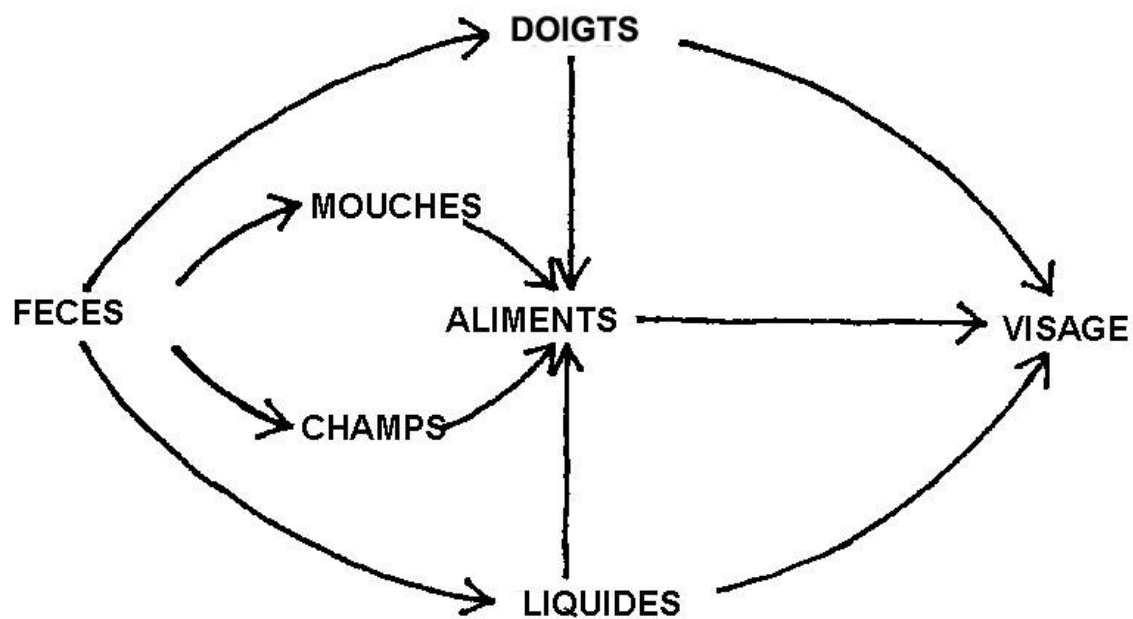


Figure 1 : Schéma de transmission des maladies d'origine fécale (ESREY et al., 1998)

L'examen des voies de transmission de ces maladies permet d'identifier les barrières qu'il est possible de mettre en place pour les éviter assez simplement (Figure 2).

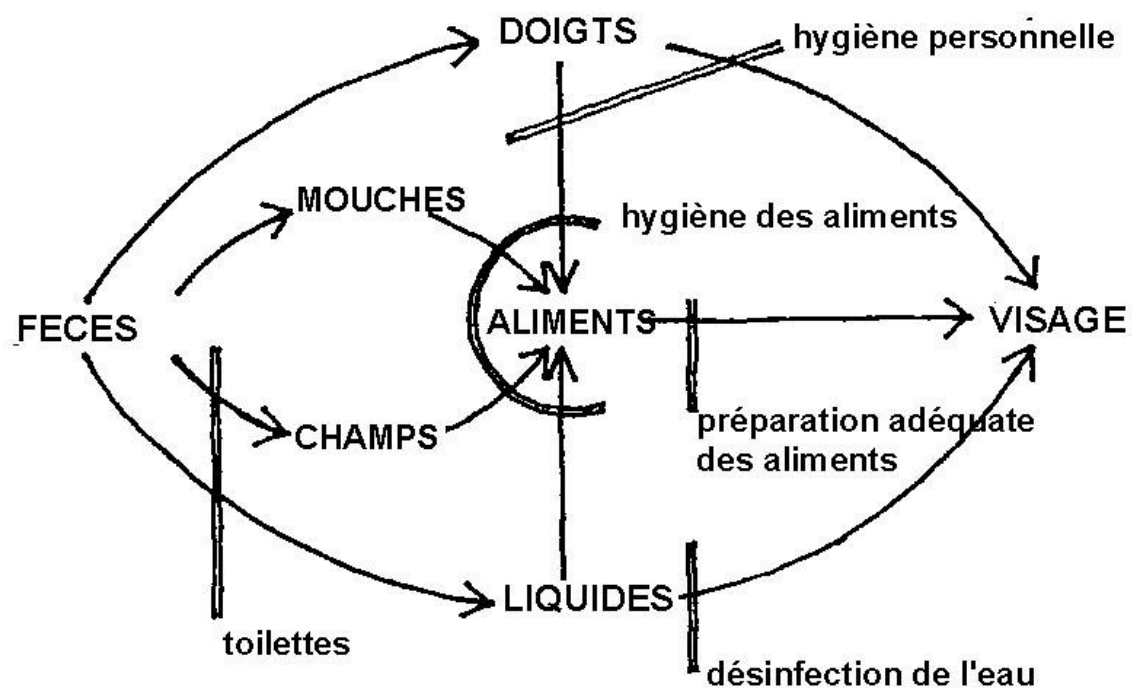


Figure 2 : Barrières permettant d'éviter la transmission des maladies d'origine fécale (ESREY et al., 1998).

Les êtres humains sont exposés, dans un environnement contaminé, à tout un ensemble de maladies à transmission hydrique. Connaissant les micro-organismes présents dans les fèces et susceptibles de provoquer des maladies et les voies de transmission, on peut prendre des mesures simples pouvant aider à prévenir la contamination. Ainsi, des **barrières primaires** évitant la contamination du sol, des mains et de l'eau sont très utiles pour prévenir la dissémination des agents pathogènes et par conséquent les maladies associées. Des **barrières secondaires**, comme le lavage des mains et la bonne cuisson des aliments, s'avèrent nécessaires pour empêcher l'exposition dans le cas où les agents pathogènes arrivent à contaminer les mains et l'eau.

Ces barrières ne sont pas toujours efficaces dans les pays où la situation en matière d'assainissement est déficiente ; il devient alors obligatoire de promouvoir l'hygiénisation des excréments avant de les retourner à la nature.

A.1.4.2 Hygiénisation des excréments

Pour lutter contre les maladies d'origine féco-orales, l'OMS recommande dans ses directives de 2006 que les excréments soient hygiénisés afin d'éviter les risques d'infection. En cas de traitement des résidus solides par compostage, la température doit être supérieure à 50°C pendant plus d'une semaine et pendant plus longtemps si cette température n'est pas atteinte (OMS, 2006).

Selon les auteurs, les conditions d'hygiénisation restent relativement proches.

La destruction des micro-organismes pathogènes intervient notamment au cours de la phase de fermentation chaude du compostage, qui peut monter à 50 - 70°C (GOTAAS, 1959 ; COUTURIER et GALTIER, 1998 ; TAYLER, 2018). Selon STRAUSS & BLUMENTHAL (1990), le traitement des excréments par digestion thermophile (50° C pendant 14 jours) et ou le traitement par compostage en tas aérés pendant un mois à 55–60° C (plus 2 à 4 mois de maturation supplémentaire) permettent de réduire considérablement les agents pathogènes et d'assurer l'hygiénisation. Mais ils ont également suggéré qu'une année de stockage pourrait suffire en conditions tropicales (28–30° C), tandis que pour des températures moyennes plus basses (17–20° C), 18 mois seraient nécessaires.

« Il n'est pas nécessaire de chercher à atteindre des températures aussi élevées que 65°C dans un tas de compost pour être certain de la destruction des pathogènes. Il peut être plus réaliste de maintenir des températures plus basses dans le tas pour de plus longues périodes de temps, par exemple 50°C pendant 24 heures ou 46°C pendant une semaine » (JENKINS, 2017). L'expérience de Germer (GERMER et al., 2009) a montré qu'une température de 55°C durant deux semaines était efficace pour réduire la concentration de *E coli*, *Enterococcus* et *Salmonella* dans des tas de compost. Et après 4 mois, la concentration de *E coli* est inférieure à 10³ UFC et indétectable pour *Salmonella*.

Selon FEACHEM et ses collègues, « l'efficacité des méthodes de traitement et d'hygiénisation des excréments dépend beaucoup des caractéristiques de temps et de température ». Ses travaux de terrain ont permis d'établir une relation entre la température de compostage et le temps requis pour l'élimination totale des *Ascaris* et micro-organismes pathogènes. Par exemple, pour des températures de 50, 55, et 60 °C, le temps nécessaire pour inactiver les œufs d'*Ascaris* seront respectivement 19 jours, 2 jours et 6 heures. La Figure 3 présente la destruction des agents pathogènes selon le couple température/temps (FEACHEM et al., 1983).

Pour s'assurer de l'hygiénisation des résidus fécaux, on recourt le plus souvent à des indicateurs biologiques de contamination. *Escherichia coli*, Entérocoques et *Clostridium perfringens* (connu comme pour être de bons indicateurs de l'hygiénisation du compost) sont utilisés pour constater le niveau d'hygiénisation en comparant le nombre de ces indicateurs au début et à la fin du cycle de compostage (OMS, 2006 ; TDM, 2015).

Escherichia coli est l'indicateur de contamination fécale recommandé par l'OMS. « La présence de *E. coli* apporte la preuve incontestable d'une contamination fécale et ce micro-organisme doit être totalement absent de l'eau de boisson ».

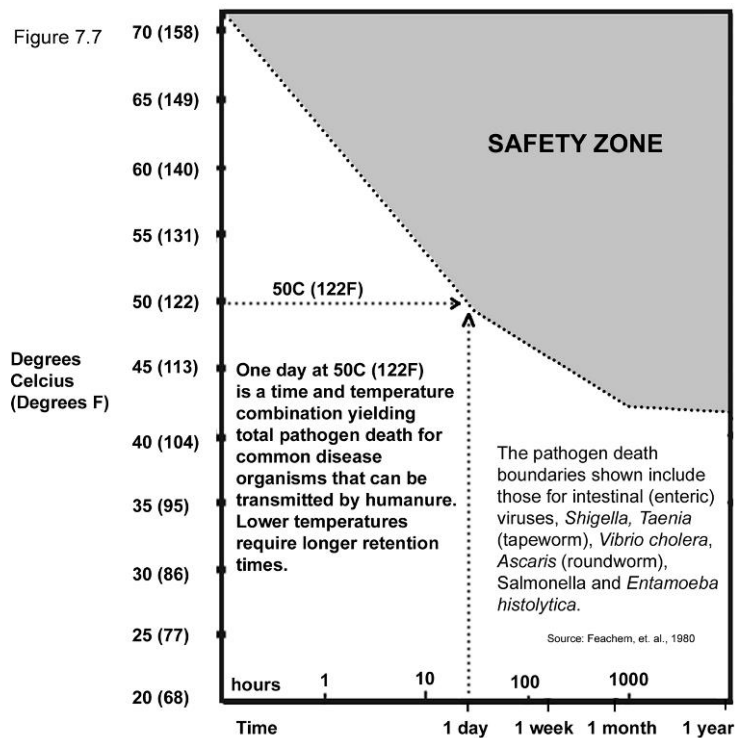


Figure 3 : Destruction des agents pathogènes selon le couple température/temps (FEACHEM et al., 1983).

Très peu d'études microbiologiques ont été effectuées sur les résidus d'assainissement par toilettes sèches. L'ONG SOIL, qui intervient en Haïti, est une des seules entités ayant publié des résultats scientifiques sur l'hygiénisation de résidus de toilettes sèches. Les analyses ont permis de constater que la concentration de *E. coli* passait, selon la localisation dans les casiers de compostage, de $10^6 - 10^7$ colonies / g de matière sèche à $10^3 - 10^5$ après 10 jours et inférieur au seuil de détection ($< 10^2$) après 75 jours (BERENDES et al., 2015 ; TAYLER, 2018). La température au cœur des casiers était de 60–70°C les deux premières semaines puis inférieure à 58°C ensuite, tandis que la température en périphérie n'était jamais montée au-delà de 51°C. La teneur initiale en eau des résidus était de 79%, puis 70% après 2 semaines et environ 45% en fin.

Ces différents résultats convergent vers le fait que le compostage thermophile est un excellent moyen d'hygiénisation des fèces.

A.1.5 Le compostage comme mode de traitement des résidus d'assainissement

Comme nous l'avons vu précédemment, une montée en température pendant plusieurs jours est un moyen parmi les plus efficaces pour permettre l'hygiénisation rapide et complète de résidus d'assainissement. Le compostage présente l'avantage de ne pas nécessiter de coûteux moyens techniques pour y parvenir, en s'appuyant sur le processus naturel et exothermique de biodégradation aérobie de la matière organique, d'autant plus efficace en termes de montée en température s'il se fait sur des matières fraîches. On peut ainsi obtenir après quelques mois un produit stable, proche d'un humus, hygiénisé, utilisable comme amendement organique pour les sols (HAUG, 1993). C'est le seul procédé de traitement qui cumule les fonctions d'hygiénisation et de stabilisation de la matière organique. Qui plus est, même si ce procédé nécessite l'action de l'Homme, il peut être effectué avec peu d'équipements et donc à faible coût financier. C'est cette filière de traitement et de valorisation que nous avons choisi de considérer dans cette revue bibliographique.

Notre objectif étant de mettre en œuvre ce procédé de traitement dans de bonnes conditions pour traiter des résidus de toilettes sèches, nous avons étudié différentes sources bibliographiques et synthétisés les informations utiles pour la maîtrise de cette filière de traitement et de valorisation des résidus solides de l'assainissement.

A.1.5.1 Le déroulement du compostage

Le compostage se déroule en 4 étapes, avec des populations microbiennes différentes (bactéries, actinomycètes, champignons) qui s'installent naturellement lorsque les conditions leur sont favorables (MUSTIN, 1987 ; JENKINS, 2017) :

- Une première phase mésophile, au cours des premiers jours, où la matière facilement biodégradable commence à se transformer en CO₂ et en eau et produit de la chaleur ;
- Une phase thermophile où la température peut monter assez vite jusqu'à 70°C et y rester plusieurs jours. La décomposition biologique de la matière organique facilement biodégradable est une réaction exothermique, conduisant à l'élévation de la température au sien de la matière. C'est la température et son maintien au de

cours de cette étape qui permettra la destruction des agents pathogène (phase d'hygiénisation) ;

- Une phase de refroidissement où la décomposition des matières plus résistantes peut se dérouler ;
- Une phase de maturation, où la matière organique réforme des complexes humiques et où l'hygiénisation peut se poursuivre.

En conditions artisanales, c'est-à-dire non industrielles, les trois premières étapes du cycle de compostage durent environ 4 à 6 mois selon les climats et la conduite optimisée ou non du procédé. Mais la maturation peut être encore plus longue, ce qui n'est que mieux si le compost est stocké à l'abri et ne se dessèche pas (CEFREPADE, 2012).

A.1.5.2 Les paramètres de contrôle du processus de compostage

Pour se dérouler dans de bonnes conditions, le compostage doit se faire en présence d'oxygène, dans un milieu ayant un taux d'humidité suffisant, dans une gamme de températures permettant l'activité des micro-organismes qui interviennent dans le processus et avec un bon équilibre carbone / azote pour leur donner une alimentation équilibrée (JENKINS, 2017 ; CEFREPADE, 2012). Le Tableau 4 résume les conditions recommandées pour un compostage rapide.

Tableau 4 : Conditions recommandées pour un compostage rapide (d'après Gotaas, 1959 ; Mustin, 1987 ; Turcot, 1999 ; Elain, 2007).

Paramètres	Niveaux acceptables	Niveaux préférentiel
<i>Rapport C/N</i>	20 à 40	25 - 30
<i>Teneur en eau</i>	40 à 65 %	50 à 60 %
<i>Teneur en O₂</i>	>5%	>>5%
<i>Diamètre des particules</i>	1/8 à 1/2 pouces	variable
<i>pH</i>	5,5 à 9	6.5 à 8
<i>Température du compost</i>	43 à 65	55 à 60

Le suivi de la température est le paramètre le plus simple du suivi du bon déroulement du processus. Après quelques jours, si les conditions d'humidité et d'aération sont favorables, la température monte très vite. Lorsqu'elle redescend, cela est souvent le signe soit d'un manque d'oxygène, soit d'un manque d'eau. C'est la raison pour laquelle il est recommandé

de retourner les tas à plusieurs reprises, généralement une fois par semaine, et d'ajouter de l'eau si nécessaire pour compenser les pertes par évaporation. Lorsqu'après plusieurs séquences de retournements la température ne remonte plus, cela signifie que la phase de biodégradation exothermique est terminée et que l'on entre en phase de maturation. A ce stade, il n'est plus nécessaire de retourner les tas mais juste d'éviter le dessèchement pour garantir la stabilisation biologique de la matière organique résiduelle.

Dans les pays en développement, les moyens manquent souvent pour faire un suivi précis des paramètres de contrôle présentés dans le Tableau 4. C'est ainsi que des méthodes simples ont été développées pour contourner les difficultés :

- Suivi de l'humidité : avec l'expérience, les techniciens connaissent les besoins en eau. Lorsque les tas sont retournés ou déplacés, un test d'écrasement de la matière avec la main (« test de la poignée ») permet de voir rapidement si elle est trop humide (nombreuses gouttes d'eau qui s'écoulent), pas assez (ne prend pas en masse) ou correcte (prend en masse, voire quelques gouttes s'écoulent).
- Suivi de la teneur en oxygène : comme nous l'avons vu, il est préconisé de manière empirique de retourner régulièrement les tas, de ménager des ouvertures, ou de mélanger les déchets avec des matériaux ajoutant des espaces libres (végétaux secs types branchages par exemple). On augmente ainsi artificiellement la porosité afin de permettre à l'air de circuler. Dans le cas des résidus d'assainissement, le co-compostage des résidus solide avec des branchages permet d'éviter de retourner les tas au cours des premières semaines, et limiter ainsi les risques de contamination.
- Suivi de la température : c'est le paramètre le plus facile à suivre, à l'aide de thermomètres à tige dont la longueur est suffisamment importante pour pénétrer au cœur des tas. Dans les pays en développement à climat plutôt aride ou en saison sèche, il faut souvent se protéger des fortes chaleurs qui peuvent accentuer la déshydratation liée à l'élévation naturelle de température lors de la biodégradation de la matière organique, par exemple en protégeant les tas de l'exposition directe au soleil (ombre naturelle, toiture ou bâche de couverture).

- Suivi du rapport C / N : les déchets végétaux secs sont plutôt riches en carbone, les déchets de cuisine plutôt riches en azote, de même que l'urine et les excréments humains. Il faut donc mélanger les résidus d'assainissement avec des végétaux secs, sciures, pour assurer le bon déroulement du compostage (JENKINS, 2017). Les résidus de TLB ont en général un bon rapport C/N du fait du mélange des excréments avec une litière absorbante.

A.1.6 Conclusion

Ce chapitre de généralités a permis de faire le point, hors contexte spécifique, sur les notions de base en matière d'assainissement, que ce soit les différents types d'enjeux et possibilités techniques, les risques associés et la manière de les maîtriser.

Néanmoins, nous travaillons dans un contexte très spécifique qui est celui d'un pays en développement parmi les plus pauvres du monde, dans un territoire parmi les plus pauvres de ce pays, territoire qui souhaite considérer son autonomie financière comme garante de la durabilité de sa filière d'assainissement. Afin de pouvoir réfléchir aux modalités d'assainissement en prenant en compte ce contexte de grande précarité et le contexte général du pays, nous allons donc nous intéresser à présent à l'assainissement dans les pays en développement et plus particulièrement en Haïti.

A.2 Modes d'assainissement dans les PED

Comme nous l'avons vu en introduction, plus de 2,4 milliards d'habitants de par le monde ne disposent pas d'un assainissement satisfaisant, principalement dans les pays les plus pauvres. Ce sont potentiellement les mêmes grandes filières techniques de gestion, moyennant quelques adaptations, qui pourraient être proposées dans les PED, surtout si des aides sont trouvées pour effectuer les investissements de départ. Cependant, force est de constater qu'il n'en va pas ainsi sur le terrain.

Nous allons analyser ici la situation en matière d'assainissement collectif et non collectif dans les PED, dont les options techniques sont schématisées Figure 4 (PS-EAU, 2012). Nous allons nous appuyer dans cette partie sur les travaux du pS-Eau (programme Solidarité Eau), organisme français qui compte parmi les plus actifs au monde en matière de capitalisation et de recommandations dans le domaine de l'eau et de l'assainissement dans les pays en développement. Nous nous appuierons également sur des ouvrages de synthèse rédigés par des consortiums de scientifiques dans le cadre de centres de recherche ou à la demande d'organismes internationaux, qui eux-mêmes s'appuient sur leurs propres travaux et sur d'autres travaux scientifiques portant sur des points très spécifiques, comme le montre leur bibliographie.

La Figure 4 synthétise les modalités d'assainissement dans les PED : assainissement collectif et non collectif (PS-EAU, 2012).

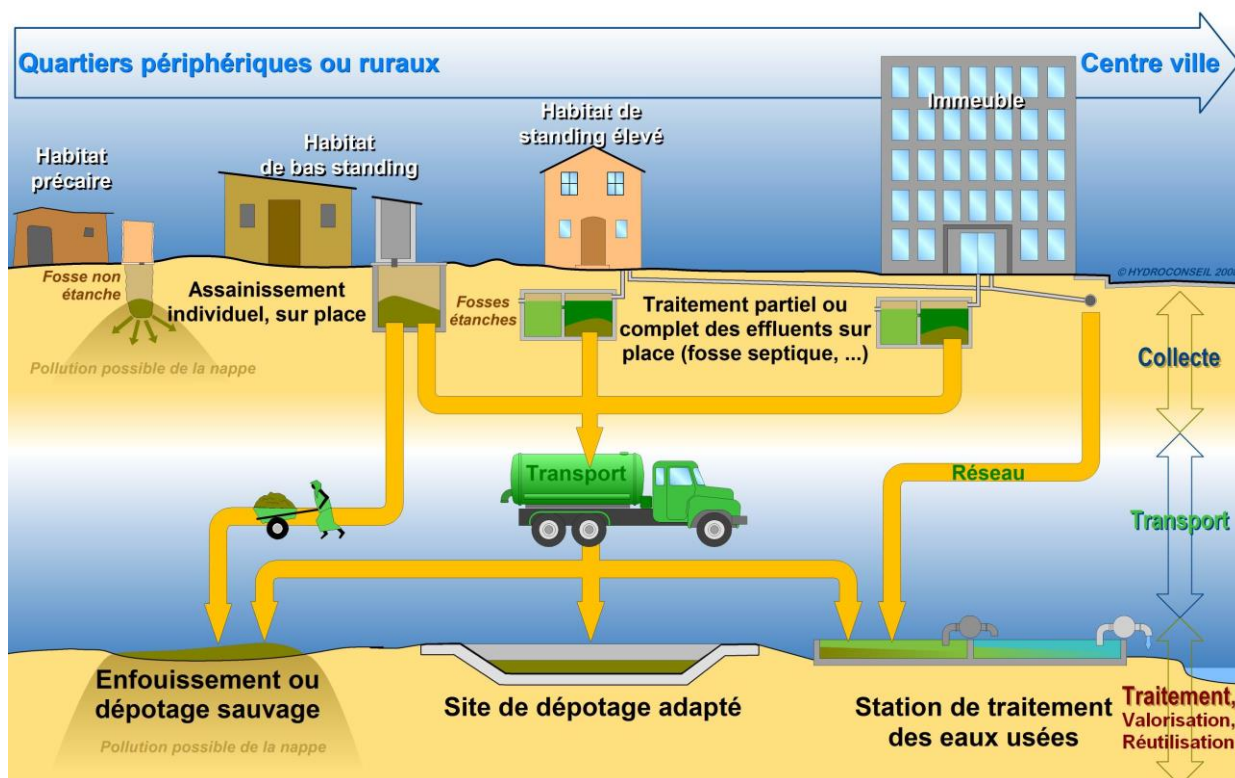


Figure 4 : Les principales filières d'assainissement dans les PED (source : pS-Eau, 2012).

A.2.1 Assainissement collectif

A.2.1.1 Contexte

Tous les organismes et bailleurs internationaux le reconnaissent : rares sont les villes de pays en développement qui disposent d'un assainissement collectif opérationnel (ONU, 2015 ; PS-EAU, 2012). Par ailleurs, la nécessité de disposer d'un système d'adduction d'eau, avec une consommation de 20 à 40 litres par personne et par jour, est également un frein à la dissémination de ce mode d'assainissement (FRANCEYS et al., 1995 ; PS-EAU et PDM, 2004). Si la généralisation des systèmes d'égouts était encouragée jusqu'à il y a peu de temps, les divers échecs et les coûts élevés en termes d'investissement et de fonctionnement, incitent aujourd'hui à plus de prudence et à réfléchir à des solutions associant plusieurs options techniques, collectives, semi-collectives et individuelles en particulier en fonction de la typologie du territoire concerné.

A.2.1.2 Typologie du territoire concerné

C'est bien-sûr en priorité aux quartiers aménagés des grandes villes que l'on pense pour mettre en place un assainissement collectif, afin d'évacuer rapidement les eaux usées pour des questions de salubrité publique (PS-EAU, 2012). L'urbanisation dense et précaire permet en effet difficilement de disposer systématiquement de fosses à vidanger, recueillant la totalité des eaux usées grises et noires produites par des millions d'habitants.

La topographie du territoire est également à prendre en compte. Il est en effet très difficile de mettre en place des réseaux d'égouts dans des villes à topographie complexe ou lorsque le niveau de la mer ou des nappes est proche de la surface.

A.2.1.3 Techniques déployées

En matière d'assainissement collectif, on distingue deux options techniques : **le réseau conventionnel** de gros diamètre et **le mini-égout** de plus petit diamètre.

Dans le premier cas, d'importants investissements sont nécessaires et rarement mobilisables sans aide internationale. Ces réseaux sont par ailleurs très souvent endommagés du fait de travaux mal réalisés (mauvaise mise en œuvre et mauvaise protection des tuyaux) ou colmatés du fait des quantités importantes de sédiments et de déchets solides qui jonchent le sol et sont entraînés par les eaux de pluie. Les stations d'épuration sont souvent mal adaptées aux caractéristiques des effluents à traiter et tombent très vite en panne. Par ailleurs, les coûts de fonctionnement, rarement pris en charge par les bailleurs et mal anticipés, conduisent vite à des dysfonctionnements (colmatages, sédimentation, problème d'aération, etc...) et souvent à l'arrêt définitif des installations, la mauvaise séparation des eaux pluviales et des eaux usées en étant l'une des causes principales.

Le mise en place de mini-égouts nécessite des infrastructures moins coûteuses et une ingénierie mieux adaptée aux villes du Sud (PS-EAU, 2012). Néanmoins, de nombreux réseaux avec « mini-égouts » ont été mis en place depuis plusieurs décennies sur divers continents, avec un succès mitigé. Ceux-ci ont fait l'objet d'un rapport d'analyse du pS-Eau (PS-EAU, 2013) et d'un guide (PS-EAU, 2014). Des mini-égouts ont été déployés au Brésil, en Afrique sub-saharienne, en Asie, mais beaucoup ont été abandonnés du fait d'un mauvais fonctionnement, lié en grande partie au colmatage des réseaux. Les moins durables sont

ceux qui ont été mis en place dans le cadre de projets, sans réelle planification stratégique de l'assainissement.

Les mini-égouts ont pour caractéristique commune d'être des réseaux constitués de tubes en PVC de faible diamètre par rapport aux réseaux conventionnels. Pour réduire les coûts d'investissement et d'installation, ainsi que faciliter leur mise en place dans des contextes difficiles, ils sont installés à faible profondeur, sur le domaine privé et public, avec des tracés directs, sur des voies parfois étroites et non praticables pour éviter leur écrasement par des véhicules lourds. Ils peuvent être opérationnels en théorie avec des pentes faibles (et utiliser la gravité du fait de leur faible diamètre), même s'ils fonctionnent mieux quand la pente est assez sensible. Ils sont parfois utilisés quand les capacités d'infiltration des eaux usées sont faibles et empêchent l'usage de puits ou en cas de présence d'eau (nappe, mer, cours d'eau) à proximité. Ils sont gérés de manière décentralisée ou non, communautaire ou non. Ces dispositifs nécessitent malgré tout un entretien régulier et donc des ressources financières souvent difficiles à obtenir : faible taux de recouvrement des redevances, manque d'abonnés, subventions non versées, sous-estimation des charges d'exploitation, problèmes techniques, sont autant de causes de dysfonctionnement.

A.2.1.4 Avantages et inconvénients au niveau des différents maillons de la filière

Les avantages potentiels et inconvénients de l'assainissement collectif dans les PED sont résumés dans le Tableau 5. Nous parlons d'avantages potentiels dans la mesure où ils ne sont presque jamais effectifs dans le contexte des PED.

Tableau 5 : Avantages potentiels et inconvénients de l'assainissement collectif dans les PED.

Maillon de la filière	Avantages potentiels	Inconvénients
Chaîne globale	Les eaux usées collectées et traitées ne présentent pas de risques pour la santé des habitants ni pour l'environnement	Très fréquents dysfonctionnements aux différents niveaux de la filière, rendus encore plus graves par la centralisation de la pollution Infrastructures coûteuses
Collecte et transport	Evacuation rapide des eaux usées hors de la ville sans nécessiter de véhicules motorisés	Fréquents problèmes de colmatage ou de rupture des tuyaux entraînant la présence des eaux usées à même les rues et les canaux ouverts d'évacuation des eaux pluviales Infrastructures coûteuses
Traitement	Réduction des coûts par un traitement centralisé	Fréquents dysfonctionnements au niveau des stations d'épuration entraînant le rejet d'importants volumes d'effluents mal traités dans le milieu naturel Infrastructures coûteuses
Valorisation	Valorisation possible des résidus par épandage agricole Economie en matière d'engrais chimiques	Peu de production de boues concentrées du fait du mauvais traitement et donc valorisation rarement possible Risques sanitaires en cas de mauvaise hygiénisation des boues

A.2.2 Assainissement non collectif

A.2.2.1 Contexte

L'autre option en matière d'assainissement dans les pays en développement concerne les possibilités d'assainissement non collectif. Beaucoup moins coûteux, ce sont de loin les choix privilégiés par les acteurs locaux, soit pour résoudre par eux-mêmes un problème non pris en charge par la collectivité, soit du fait d'une vraie stratégie municipale.

A.2.2.2 Typologie de territoire concerné

De petite dimension et non reliés entre eux, les dispositifs d'assainissement non collectif sont adaptés à tout type de territoire. Ils nécessitent par contre des infrastructures de stockage de volume plus ou moins important selon que le fonctionnement est à eau ou non, et selon la fréquence de vidange. Il faut donc disposer de l'espace nécessaire pour installer ces équipements. Ils peuvent être adaptés à des zones inondables en stockant les excréta dans des réservoirs étanches.

A.2.2.3 Techniques déployées

Il existe plusieurs manières de classer les dispositifs d'assainissement non collectif utilisés dans les PED. Nous proposons cette classification en 4 catégories, basées sur le type de gestion des excréta, qui nous semble la plus pertinente pour les comparer sur la base des critères qui nous intéressent :

- Les toilettes à eau ;
- Les toilettes à déshydratation ;
- Les toilettes à décomposition ;
- Les toilettes à litière.

Les toilettes à eau se distinguent des trois autres catégories par le fait qu'elles utilisent de l'eau (WC à chasse d'eau par exemple) pour entraîner les excréta. De l'eau doit donc être disponible pour cet usage (plusieurs litres par chasse), ce qui n'est pas toujours le cas dans les habitations des pays en développement. Elles sont la plupart du temps installées à l'intérieur des habitations, le siphon d'eau faisant barrière aux odeurs. Ce sont les mêmes types de toilettes que celles qui sont raccordées à un réseau, à la différence près que les eaux usées sont ici stockées dans une fosse, avec ou sans sortie d'eau et rejet dans le milieu naturel après décantation et biodégradation anaérobie (fosse septique). Les boues formées doivent être vidangées (manuellement ou mécaniquement) dès que leur volume nuit à la décantation.

Les trois autres catégories sont des **toilettes** dites « **sèches** », placées le plus souvent à l'extérieur des habitations (latrines) du fait de l'absence de siphon d'eau pour bloquer les

odeurs. Seules les toilettes à litière peuvent être placées à l'intérieur du fait de l'usage de la litière qui déshydrate les excréta et réduit partiellement les odeurs.

Dans les toilettes sèches, les urines et les fèces sont collectées séparément ou non et peuvent être valorisées par retour au sol. Dans ce cas, on parle parfois d'assainissement « écologique », terme que nous n'utiliserons pas du fait de son ambiguïté. En effet, la plupart des procédés de traitement d'assainissement visent la protection des écosystèmes et pourraient donc être qualifiés d'écologiques.

Des informations issues de projets pilotes en Europe ont montré que les interfaces de toilettes à séparation d'urine sont bien acceptées dans certains pays européens. Les dispositifs avec séparation des urines permettent non seulement de gérer les nuisances que pourraient occasionner les urines mélangées aux fèces mais aussi de valoriser séparément les sous-produits (ANAND et APUL, 2014 ; LIENERT et LARSEN, 2010 ; ESCULIER, 2018).

Les toilettes à déshydratation ont été introduits au Viêt Nam en 1956 par les autorités sanitaires, pour répondre au besoin de protéger la santé des populations qui utilisaient les excréta frais comme engrais pour fertiliser les rizières, pratique considérée comme dangereuse pour la santé (ESREY et al., 1998). Dans ce type de toilettes, les conditions ne sont pas réunies pour favoriser la décomposition, en particulier du fait d'un mauvais équilibre C/N (peu d'azote) et d'un faible taux d'humidité du fait de la séparation à la source des urines. On ne note pas de montée en température qui serait liée à une dégradation aérobie et l'hygiénisation n'est pas optimale. Il est recommandé d'attendre un à deux ans avant d'utiliser les résidus qui se sont desséchés dans la fosse (OMS, 2006). Il a été démontré qu'en particulier les œufs d'helminthes n'étaient pas détruits et pouvaient éclore dès que les conditions de milieu redevenaient plus favorables. Il en est de même de certaines formes bactériennes qui sporulent lorsqu'elles sont mises en condition de stress et peuvent reprendre leur développement dès que les conditions d'humidité et de température sont favorables.

La toilette à double fosse étanche (ou à *fossa alterna*) est l'exemple le plus connu de latrine à déshydratation (MORGAN, 2008). Une première fosse est utilisée jusqu'à son remplissage et on utilise ensuite la deuxième, pendant que le contenu de la première subit principalement une déshydratation (FRANCEYS et al., 1995). Très utilisé dans le Nord du Viêt

Nam, ce dispositif a été ensuite introduit notamment en Amérique Centrale, au Mexique et en Suède, et ce depuis plus de trente ans (ESREY et al., 1998).

Les toilettes à décomposition sont conçues pour favoriser un début de biodégradation *in situ* de la matière organique fermentescible, en la transformant en matière organique plus stable, pouvant être utilisée comme amendement organique pour les sols (ESREY et al., 1998). Opérées dans des conditions plus favorables d'humidité et d'un bon équilibre C/N, lié notamment à la présence de l'urine, elles permettent un début d'hygiénisation des résidus (FRANCEYS et al., 1995 ; JENKINS, 2017). Toutefois, on ne peut pas réellement parler de compostage car la montée en température est faible du fait des pertes thermiques.

Selon les pays et les améliorations apportées, on trouve plusieurs variantes comme :

- la toilette à simple fosse « Clivus Multrum » en Suède ;
- la toilette à voûtes multiples "Carousel" en Norvège ;
- la toilette « Sirdo Seco » au Mexique.

De telles toilettes, introduites en Afrique par le Centre Régional pour l'Eau Potable et l'Assainissement (CREPA) en 1988, souvent appelées « ECOSAN », sont une référence en matière d'assainissement non collectif avec valorisation des résidus en agriculture (MORGAN, 2008).

Les toilettes à litière dite bio-maitrisée (TLB) dont le principe a été proposé par Joseph Országh dans les années 80, au retour d'une mission en Afrique (ORSZAGH, 2017). Pour ces toilettes, les excréments tombent dans un seau placé juste sous le siège, ou dans des bacs situés en contrebas, et sont recouverts chaque fois d'un matériau absorbant de type sciure de bois. Le compostage des résidus se fait sur un site extérieur, après déversement du contenu des seaux.

On trouve deux catégories de TLB dans les PED : avec ou sans séparation de l'urine.

- Les TLB à diversion d'urine (ou UDDT en anglais, pour Urine Diverting Dry Toilet) présentent l'avantage de pouvoir valoriser séparément les urines et les fèces, de réduire les problèmes d'odeurs liées au mélange urine / fèces, de ralentir le

remplissage du seau de fèces en récupérant les urines dans un autre récipient (ANAND et APUL, 2014).

- Les TLB sans séparation d'urine sont de gestion simple (un seul résidu à gérer) mais doivent être souvent vidangées du fait du remplissage rapide et des nuisances olfactives.
- Les TLB compactes sous forme de siège peuvent être construites avec des matériaux locaux. Le coût d'investissement est très faible au regard de celui des autres dispositifs.

L'utilisation de telles toilettes n'est par contre envisageable que lorsqu'il est possible de disposer localement un matériau de couverture (litière) adéquat. Ce matériau doit remplir plusieurs fonctions : absorber l'humidité et réduire ainsi la biodégradation *in situ*, masquer les excréments, masquer les odeurs et apporter du carbone organique pour augmenter le rapport C/N et favoriser ensuite le compostage, surtout nécessaire quand les urines ne sont pas séparées.

A.2.2.4 Avantages et inconvénients au niveau des différents maillons de la filière

Comme pour l'assainissement collectif, nous allons résumer ici les avantages, réels cette fois, et les inconvénients de l'assainissement non collectif dans le contexte des PED (Tableau 6).

Comme on peut le voir, l'assainissement non collectif présente lui aussi ses avantages et d'inconvénients. Néanmoins, compte tenu des besoins financiers bien moindres pour la collectivité avec ce mode d'assainissement et son accessibilité technique, c'est actuellement celui qui paraît le plus réaliste et dont le développement se justifie.

Tableau 6 : Avantages et inconvénients de l'assainissement non collectif dans les PED

Maillon de la filière	Avantages	Inconvénients
Chaîne globale	Ne nécessite pas de lourdes infrastructures coûteuses en investissement et en maintenance Implique et responsabilise les habitants	Nécessite plusieurs acteurs ce qui rend une gestion de la filière plus compliquée
Collecte et transport	Possibilité d'avoir une toilette à domicile pour les TLB (sécurité, dignité) Excrétas contenus dans des réservoirs fermés Gestion communautaire et donc peu coûteuse possible pour les résidus de toilettes sèches	Risque de contamination des eaux souterraines en cas de fosses non étanches Risques sanitaires pour les vidangeurs et personnes manipulant les résidus Coût souvent important pour la construction de la fosse et la vidange Nécessite des véhicules pour la collecte et le transport Risque d'une élimination sauvage des résidus par les vidangeurs
Traitement	Possibilité de plusieurs unités décentralisées de traitement, limitant les distances à parcourir Gestion communautaire possible pour les résidus de toilettes sèches	Risques sanitaires pour les personnes manipulant les résidus
Valorisation	Possible pour tous les résidus de toilettes sèches	Risques sanitaires en cas de mauvaise hygiénisation Impossible pour les résidus auxquels les vidangeurs ajoutent des désinfectants chimiques type crésil

A.2.3 Conclusion

L'assainissement non collectif est la filière d'assainissement à privilégier dans les pays en développement, en particulier dans les villes secondaires et les zones rurales où les moyens techniques et financiers sont modestes, voire inexistants. Dans les grandes villes, la mise en place d'un réseau d'égout doit nécessairement être intégrée dans un plan de gestion des eaux urbaines (pluviales et de l'assainissement) et des déchets solides, afin d'éviter l'obstruction des tuyaux.

Qu'il soit collectif ou non collectif, l'assainissement devrait avoir pour objectif la valorisation maximale de la matière organique et des nutriments présents dans les excréta après hygiénisation, afin de limiter le recours à des intrants chimiques et enrichir les sols agricoles en matière organique.

L'analyse des filières d'assainissement possibles dans les pays en développement a permis de mettre en évidence la pertinence de la mise en place de TLB dans des zones rurales précaires. En effet, ce type de toilettes cumule de nombreux avantages :

- Coût d'investissement minime ;
- Coût de fonctionnement minime, surtout avec une gestion communautaire envisageable en zone rurale ;
- Possibilité d'avoir une toilette à domicile, ce qui présente une sécurité en particulier pour les femmes et les jeunes filles ;
- Entretien individuel facile et donc amélioration des conditions d'hygiène ;
- Possibilité de traiter les résidus dans des petites unités centralisées ou à domicile (compostage individuel).

Les seuls inconvénients de cette filière sont la nécessité de disposer d'un matériau de couverture absorbant, ce qui n'est pas toujours possible, et la proximité des usagers avec les excréta lors de la manipulation des seaux de résidus. Il reste à voir à présent comment une telle filière se situerait dans le contexte haïtien et qu'elles seraient les conditions pour assurer sa pérennité.

A.3 L'assainissement en Haïti

A.3.1 Les pratiques

Nos recherches documentaires n'ont pas permis d'obtenir d'informations sur l'histoire de l'assainissement en Haïti, confirmant le fait qu'il s'agissait d'une préoccupation récente. La question des excréta semble toujours entourée de tabous et d'idées reçues, surtout en milieu rural. Certaines croyances vaudous conduisent à cracher sur les excréments ou à les recouvrir de poussière pour éviter des rituels maléfiques. Avant l'éradication des porcs ou cochons dans les années 80, la défécation à l'air libre ne posait pas trop de problèmes. Les porcheries traditionnelles étaient utilisées comme lieu privilégié de défécation, les matières fécales étant une source de nourriture importante pour les porcs.

Pour évacuer les excréta, les habitants vivant dans les milieux urbains et plus particulièrement dans les quartiers résidentiels, font appel aux vidangeurs privés (bayakous formels) ou aux bayakous informels, *opérateurs d'assainissement traditionnels* fournissant des services de vidange manuelle (DINEPA, 2013a).

« Le « bayakou », métier à très forte connotation négative en Haïti, désigne une des classes sociales les plus basses et les moins fréquentables de la société. Les vidanges manuelles « traditionnelles » sont soumises à de fortes contraintes sociales et à un risque sanitaire élevé. Les mauvaises odeurs et l'aspect sale obligent les vidangeurs à travailler de nuit. L'absence de solution de dépotage et les faibles moyens de transport poussent généralement l'opérateur à déverser les produits de vidange dans le lieu le plus proche et le moins visible (une rivière, une mare, la mer, un trou, ...) » (DINEPA, 2013a).

Par contre, les habitants vivant dans les milieux ruraux préfèrent condamner une latrine dont la fosse est remplie pour en construire une nouvelle, de même dans les zones urbaines dont l'habitat est moins dense. Une telle approche est possible si l'espace est disponible et dépend du type d'interfaces utilisés (GILLES et al., 2015). Le Tableau 7 présente les pratiques de vidange dans les différents Départements d'Haïti. On peut constater que c'est dans les départements de l'Ouest et du Nord, où se trouvent les deux plus grandes villes du pays que cette est pratique est moins fréquente.

Tableau 7 : Pratique de vidange par Département - Pourcentage de répondants ayant reconnu qu'ils éliminent la latrine (GILLES et al., 2015).

Départements	Pourcentage (n valide)
Artibonite	62,2% (217)
Centre	69,9% (206)
Grand'Anse	56,4% (202)
Nippes	78,0% (232)
Nord	32,1% (305)
Nord-Est	63,3% (283)
Nord-Ouest	53,8% (169)
Ouest	31,7% (341)
Sud	56,9% (253)
Sud-Est	78,5% (209)
Ensemble	67,4% (2417)

A.3.2 La situation

En Haïti, il a été estimé à environ 69% la proportion de la population n'ayant pas accès à des systèmes d'assainissement corrects, c'est-à-dire des toilettes qui respectent les principes minimaux d'hygiène, à savoir un système de ventilation et une dalle étanche (IHE et ICF, 2018). La défécation à l'air libre, mauvaise pratique nuisant à la santé et à l'environnement (DINEPA, 2013a), est pratiquée par 36% des habitants vivant dans les milieux ruraux et 10% en milieux urbains (IHE et ICF, 2018). Les autres ont accès à des toilettes améliorées ou non. Suite à la déclaration des OMD (ONU, 2000), plusieurs projets de latrines ont été mis en place à travers le pays. N'ayant pas pris en compte certains paramètres géophysiques des sols, ces latrines représentent le plus souvent des sources de contamination fécales des eaux et plus particulièrement des réserves souterraines (EMMANUEL et al., 2009 ; JEAN et al., 2017). Pour des raisons principalement culturelles, les toilettes sont pour la grande majorité construites à l'extérieur et parfois à quelques mètres des maisons. Cette situation est observée dans 70% des cas dont 79% dans les régions urbaines et 59% en zones rurales.

Haïti a été classée pour 2011 au trente-deuxième rang des pays les moins fournis en matière d'assainissement pour les années 1990, 2000 et 2011. Pour ces périodes, les taux de défécation en plein air ont été estimés respectivement de 13, 11 et 8 % en milieu urbain, et 64, 55 et 41 dans les zones rurales (WHO and UNICEF, 2013).

Les données de l'enquête EMUS VI pour la période 2016-2017 montrent que, comparativement à la période précédente, le taux de défécation en plein air a augmenté de 2 points en milieu urbain tout en perdant 5 en milieu rural (IHE et ICF, 2018).

Cette enquête a permis de constater que « *le pourcentage de ménages disposant de toilettes améliorées non partagées a augmenté de 14 points de pourcentage, passant de 17 % en 2005-06 à 31 % en 2016-2017. Par contre, si de 2006 à 2012, le pourcentage de ménages utilisant des toilettes non améliorées a diminué, passant de 35 % à 25 %, il est resté inchangé de 2012 à 2016-2017 (25 %)* ».

La Figure 5 ci-après présente les types d'installations utilisées par les ménages et par milieu de résidence

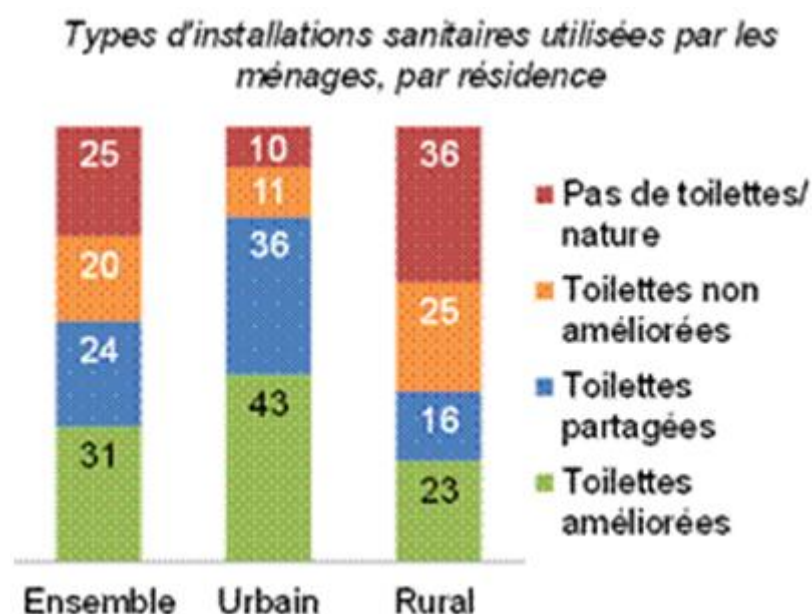


Figure 5 : Types d'installations sanitaires utilisées par les ménages par résidence (IHE et ICF, 2018)

En Haïti, il n'existe pour le moment aucun système d'égouts permettant de gérer correctement les eaux usées en zones urbaines. Par conséquent, les habitants de quelque milieu que ce soit, évacuent leurs eaux usées directement dans les caniveaux (EMMANUEL et LINDSKOG, 2000). En l'absence d'assainissement collectif, les maisons sont pour la plupart dotées de toilette raccordée à une fosse septique servant de lieu de stockage temporaire pour les excréments, situation d'assainissement autonome particulièrement observée dans les quartiers urbains de moyen et de haut standing (ESREY et al., 1998 ; GABERT, 2018).

Les données issues d'une étude menée par le Laboratoire de la Qualité de l'Eau et de l'Environnement de l'Université Quisqueya en Haïti dans 7 départements sur 10 ont montré que la « *toilette avec chasse d'eau* », appelée en Haïti « *toilette hygiénique* », « *confort moderne* », ou simplement « *WC* », est de loin le type préféré (GILLES et al., 2015). Toutefois, les latrines représentent le mode d'interface d'assainissement le plus présent dans les bidonvilles et les zones rurales.

De toutes les enquêtes concernant l'assainissement en Haïti, les zones rurales ont toujours mis clairement en évidence un fort taux de carence en matière d'assainissement. Cet état de fait a permis aux ONGs intervenant dans des projets WASH l'obtention de fonds pour aider à construire des latrines. Les projets mis en œuvre par les ONG présentent 2 grandes lacunes : (1) les bénéficiaires ne sont pas suffisamment formés, sensibilisés à l'utilisation des équipements qui sont dans la plupart des cas imposés ; (2) les toilettes construites ne permettent pas de protéger les réserves d'eau et l'environnement, malgré les prescriptions de la DINEPA. « *Toute toilette, qu'elle soit étanche ou non, ne doit pas être mise en place en amont et à moins de trente mètres d'un puits, d'un captage ou d'un point d'eau utilisé par les riverains* (DUVALIER, 1962 ; DINEPA, 2013a).

Dans sa nouvelle politique d'assainissement, la DINEPA proscrit la subvention de la construction d'ouvrage ou la donation des toilettes aux ménages afin que les habitants ne soient pas déresponsabilisés. Contrairement aux approches antérieures, les institutions (ONG, Église, ...) intervenant dans le domaine de l'assainissement devraient se conformer aux exigences de la DINEPA, la seule autorité compétente en la matière (DINEPA, 2009).

Selon les informations fournies par la DINEPA, moins de 1% des eaux usées produites sur le territoire serait traité. Les deux premières stations de traitement des excréments en Haïti ont

été mises en service dans les années 2011 et 2012. Deux nouvelles stations sont en cours de construction aux Cayes et à Saint Marc.

La DINEPA promeut la mise en place de systèmes de réseaux et de traitement semi-collectifs (mini-réseaux et fosses collectives) sous le label « Assainissement Individuel Regroupé AIR » (DINEPA, 2013b). L'ONG Solidarité Internationale a été autorisée à expérimenter 11 dispositifs de ce type dans le quartier de Christ Roi à Port au Prince (900 bénéficiaires) et 3 à St Marc (80 ménages). Le retour d'expérience après les trois premières années (2014-2017) met en évidence des difficultés liées au foncier, à l'écoulement gravitaire, au manque d'espace, à la gestion financière et au manque d'implication des usagers. Il s'ensuit des dysfonctionnements d'ordre technique et organisationnel qui doivent être réglés avant d'envisager de déployer ce type de solution. L'ONG insiste sur l'importance de la formation, d'un accompagnement sur plusieurs années et d'une approche communautaire. Elle a également été confrontée à un manque de confiance de la part des acteurs, sans doute lié à la défiance courante envers des projets d'ONG.

A Grande Plaine, localité de la sixième section communale de Gros-Morne (Haïti, Département de l'Artibonite), la situation en matière d'assainissement est très critique. Les habitants ne disposent pratiquement pas de toilettes, si ce n'est parfois un simple trou à ciel ouvert pour déféquer. Outre le fait que ces pratiques sont considérées comme étant des sources d'infection, de nombreux sites de défécation en plein air sont observés dans la communauté. Vivant dans des situations économiques précaires, les habitants n'ont pas la capacité financière de se doter de toilettes individuelles ou collectives, d'autant que les modèles de latrines généralement proposés exigent de lourds travaux de génie civil et sont économiquement inaccessibles à un fort pourcentage de la population qui vit en-dessous du seuil de pauvreté (JEAN et al., 2018a et 2018b).

A.3.3 Contexte réglementaire et organisationnel

Il n'existe pas de code de lois traitant de la question de l'assainissement en Haïti. Les articles les plus récents sur le sujet se trouvent dans le code rural du Dr François Duvalier publié en 1962 et traitant de l'hygiène rural (DUVALIER, 1962).

La question d'assainissement non collectif a été sommairement abordée dans certains arrêtés et décrets. Ainsi, on peut lire dans l'arrêté du 12 Avril 1919 en son article 20 ce qui suit :

« Toute maison d'habitation ou tout établissement commercial ou d'affaires en général, doit être pourvu de latrines ou fosses d'aisances qui devront, tant sous le rapport de leur emplacement qu'à tous les autres points de vue, satisfaire aux exigences de l'Officier Sanitaire. a) Il est interdit de répandre des matières fécales ou de l'urine sur la surface du sol. Toute personne qui aura violé l'un des règlements de ce paragraphe sera punie d'une amende de 5 gourdes ou moins et de 10 gourdes au plus, conformément à l'article 4 de la loi du 26 février 1919 sur le Service National d'hygiène publique ».

Il est interdit dans l'article 297 du code rural du Dr François Duvalier, de déverser les matières fécales humaines dans la nature : *« Il est interdit d'évacuer ou de jeter des excréments humains dans les cours d'eau, sources, étangs, réservoirs, mares ou à proximité, aussi bien que dans les cours, jardins, champs, bosquets, routes, chemins et sentiers ».*

Les textes de lois consultés ne laissent pas transparaître une quelconque démarche d'assainissement collectif. Ils ne font allusion qu'aux toilettes, latrines, de cabinets à chasse d'eau et de fosse d'aisance.

Dans le but de protéger la contamination des eaux et la santé de la population, les législateurs ont écrit dans l'article 303 du même code *« Il est interdit de creuser des puits en contre-bas et moins de 30 mètres de toute fosse d'aisances, latrines, écurie ou étable ».*

Dans ce même ordre d'idée, le décret du 2 mars 1984 réglementant les exploitations de carrière en Haïti, publié dans le journal officiel, le Moniteur No 26 du Lundi 2 Avril 1984, a fait obligation aux exploitants de carrière, dans son article 35, de mettre des latrines à la disposition de leur personnel.

A lire les différents textes, on peut constater que les législateurs ont mis du temps à encourager ou exiger la présence d'un dispositif d'assainissement pour les excréments, sans définir les règles de gestion des excréments, en dépit du fait que l'arrêté de création du site de Truitier (principale décharge située en périphérie de Port-au-Prince), dans son article 4, a placé les matières fécales ou urinaires dans la liste des déchets qui ne doivent pas être acceptés sur le site.

Le texte de loi le plus récent dans le domaine est celui de 2009 portant sur la création de la Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (DINEPA), organisme autonome de l'État, placée sous la tutelle du Ministère des Travaux Publics, Transport et Communications. Selon le Moniteur du 25 mars 2009, loi no CL 01-2009, dans ses articles 4 et 5, la DINEPA a été créée dans le but de contrôler et de réglementer les systèmes d'adduction d'eau potable et d'assainissement en Haïti. Ses attributions sont définies dans l'article 6 de la présente loi.

Depuis son installation, et constatant la carence à tous les niveaux (absence de cadre réglementaire, de propositions techniques) dans le système d'assainissement en Haïti, l'équipe de la DINEPA s'est tout de suite mise au travail. Elle a lancé un important chantier sur la mise en place de directives sur l'assainissement, établissant les principes de dimensionnement et de réalisation des ouvrages d'assainissement (toilettes, lagunages, mini-égouts) incluant des fascicules techniques pour guider les choix des systèmes, des fiches et des dossiers de consultation.

En particulier, le Guide relatif aux filières de traitement des matières de vidange (DINEPA, 2013c) traite du compostage. Il spécifie que pour leur usage en agriculture, les composts issus de résidus de toilettes sèches doivent être soit stockés à l'abri (sans précisions, supposé de la pluie et du soleil) au moins 6 à 12 mois, soit soumis à une température supérieure à 50°C (sans toutefois spécifier la durée), soit, étrangement, à un pH > 9, sans doute par ajout de chaux. Il fait référence à la norme française NFU 44 051 pour ce qui est des aspects microbiologiques : moins de 10² CFU de *E coli* par g de matière brute, 10⁴ d'entérocoques, absence d'œufs d'helminthes viables et de salmonelles dans 1,5g de matière brute.

A.4 Comment mettre en place une filière d'assainissement durable dans un contexte de grande précarité ?

A.4.1 Introduction

Pour garantir la durabilité, la pérennité d'un service de base, tout processus de choix devrait reposer sur la recherche du meilleur compromis entre les aspects sociaux, économiques, techniques, sanitaires et environnementaux.

Après avoir établi que les toilettes sèches individuelles à litière bio-maîtrisée pouvaient être une réponse technique adaptée pour les territoires ruraux auxquels nous nous intéressons, il est donc nécessaire d'étudier les conditions qui garantiront la durabilité d'une telle filière, afin d'aborder le problème de manière appropriée. Le contexte sur lequel nous travaillons est socialement très précaire, que ce soit au niveau éducatif, économique ou sanitaire, où la priorité chaque jour est de manger et de boire une eau ne générant pas trop de maladies, afin de rester en bonne santé pour pouvoir travailler et ne pas avoir à dépenser trop d'argent pour se soigner. Nous sommes aussi dans un contexte culturel particulier, où les croyances vaudou très répandues peuvent générer des réactions particulières. Enfin, nous sommes dans un pays où la population est fatiguée des projets à court terme qui n'apportent que peu d'amélioration à ses conditions de vie. De tels facteurs doivent être pris en compte pour proposer un service accepté et pérenne.

*« Ne dissimulons pas l'impression de gâchis qu'inspirent les volumes d'énergie, de temps et d'argent déversés par le passé dans ce tonneau des Danaïdes, ce cimetière de projets (sans tombes ni stèles), cet éternel retour des grandes espérances, où chaque nouveau cycle efface le précédent. **En Haïti, le taux d'échec des programmes de coopération est anormalement élevé.** Et celui du désabusement aussi, chez les promoteurs. [...] La manne financière aurait-elle été insuffisante ? Non, puisque **Haïti a longtemps figuré parmi les pays les plus aidés au monde par tête d'habitant.** C'est donc qu'elle fut pour partie inopérante. Et nous avons notre part dans cette inefficience »* (DEBRAY, 2004).

Ce n'est que récemment que certains acteurs de l'aide ont pris conscience du peu d'efficacité de leurs actions en Haïti, que les haïtiens ont pourtant constatée depuis de

nombreuses années. Pacquement et Lombard ont su le reconnaître et demander que la complexité haïtienne soit prise en compte pour repenser l'aide au développement dans ce pays (PACQUEMENT ET LOMBARD, 2017). C'est en partant des vrais besoins exprimés par les populations locales, en expérimentant avant de voir en grand, en prenant le temps, en identifiant et formant de bons acteurs locaux, qu'elle pourrait gagner en pertinence, en efficacité et en durabilité.

Nombreux sont ceux qui pensent aujourd'hui que les organisations communautaires de base de la société civile peuvent apporter de bonnes réponses. Jean-Marie Théodat a bien relevé la vivacité de la population civile haïtienne, des « *organisations sociales qui ont émergé de la base et représentent peut-être le terreau de la reconstruction d'un contrat social et d'une reviviscence de l'État* » (THÉODAT, 2017). Les organisations communautaires paysannes comme l'Association des Paysans de Papaye (APP), de Vallée (APV), l'Association des Originaires de Grande Plaine (AOG), en sont une illustration évidente. En fédérant la population autour d'actions peu coûteuses, faisant souvent appel au bénévolat, les fameux « coumbites » ou « konbit » haïtiens, elles démontrent que l'efficacité n'est pas une question de moyens financiers mais passe par une mobilisation de la population que seules les organisations de la société civile, qui ont acquis sa confiance, peuvent obtenir.

A.4.2 Faire accepter une innovation sociale

Atteindre la pérennité pour toute **innovation sociale** est toujours un challenge. Et la mise en place d'un dispositif à base de toilettes individuelles au sein d'une population qui n'a toujours pratiqué que la défécation à l'air libre ou dans de vagues trous dans un coin du jardin est bel et bien une innovation sociale, à savoir une réponse nouvelle à un besoin social nouveau ou mal satisfait, « *en impliquant la participation et la coopération des acteurs concernés, notamment des utilisateurs et des usagers* » et « *en passant par un processus en plusieurs démarches : émergence, expérimentation, diffusion, évaluation* » (CSESS, 2011).

Mais la pérennité ne sera possible que lorsque l'innovation aura été acceptée.

Les hommes ne sont pas toujours réceptifs aux idées nouvelles. Ils sont pour la plupart résistants aux modèles non encore prouvés. La réplication ou la diffusion des idées nouvelles à travers les cultures a été l'objet de préoccupations des grandes entreprises de production

et de technologie. Le processus d'adoption de nouvelles idées ou innovations par les cultures a été étudié pendant plus de 30 ans.

Le modèle d'adoption le plus populaire à date est celui décrit par Everett Rogers dans son fameux livre *Diffusion des innovations* (ROGERS, 1995).

A.4.2.1 Facteurs d'influence pour la diffusion d'une innovation

D'après Rogers, quatre principaux éléments influencent la **diffusion d'une innovation** :

- **L'innovation elle-même**, dont l'acceptation ou non dépend de la perception des individus, *via* trois étapes importantes, à savoir la connaissance, la persuasion et la décision. La manière d'introduire une innovation auprès d'un individu ou d'un groupe peut jouer un rôle important dans son adoption ou son rejet. Pour réduire l'incertitude de l'adoption de l'innovation, les individus doivent être informés des avantages et des inconvénients de façon à prendre conscience de toutes les conséquences qui peuvent être désirables ou indésirables.
- **Le réseau de communication** : il permet de créer et de partager les messages concernant l'innovation d'un individu à un autre dans le but d'obtenir une compréhension mutuelle. Les leaders d'opinion jouent un rôle important dans la circulation de ces messages en créant un important réseau de communication favorable à la diffusion de l'innovation.
- **Le temps** : c'est un paramètre important dans le processus de décision visant l'adoption ou pas d'une innovation, qui permet de suivre l'évolution de l'adoption.
- **Le système social** : il est défini comme un ensemble d'unités interdépendantes partageant un objectif commun qui se sont engagées à trouver des solutions à leurs problèmes. Les membres ou unités d'un système social peuvent être des particuliers, des groupes informels, organisations, et / ou sous-systèmes.

A.4.2.2 Caractéristiques d'une innovation

Toujours selon Rogers, les caractéristiques d'une innovation sont :

- **L'avantage relatif**, qui est le fait pour l'utilisateur potentiel de percevoir une innovation comme étant meilleure que les autres produits du même genre utilisés dans une

communauté. Il n'est pas nécessaire que cette innovation offre beaucoup plus d'avantages ou de possibilités que les autres mais ce qui est important, c'est que l'individu la perçoive comme étant avantageuse.

- **La compatibilité**, qui est une mesure du niveau d'adéquation d'une innovation avec les valeurs existantes, les expériences passées, les pratiques sociales et normes des utilisateurs. L'adoption d'une innovation sera d'autant plus difficile qu'elle est incompatible avec les valeurs et normes actuelles. L'adoption d'une innovation nécessite, dans certains cas, l'adoption au préalable d'un nouveau système de valeurs, ce qui peut prendre un temps considérable.
- **La complexité**, qui est une mesure du niveau de difficultés à comprendre et à utiliser une innovation. Plus une idée nouvelle est difficile à intégrer, plus son processus d'adoption sera compliqué et demandera du temps.
- **La testabilité**, qui est la possibilité offerte aux potentiels utilisateurs de tester une innovation et de la modifier avant de décider de son utilisation. Le test est fait pour augmenter la confiance de l'utilisateur.
- **L'observabilité**, qui est le degré auquel les résultats d'une innovation sont visibles pour les autres. L'innovation a la plus forte probabilité d'être adoptée quand les résultats sont visibles pour les utilisateurs et d'autres personnes de leur environnement. Plus les résultats de l'adoption de l'innovation seront clairs et plus les individus l'adopteront facilement.

A.4.2.3 Les catégories d'adoptants d'une innovation

Le travail de Rogers lui a permis de classer les **adoptants** d'une innovation en cinq catégories :

- **Les innovateurs** (aventureux) regroupent les individus qui ont un intérêt particulier pour les nouvelles idées, donc plus accessibles. Ils sont les premiers à présenter une innovation à l'intérieur de leur système social. Ils peuvent être comparés aux **Pionniers** ou **Mordus** (BIBEAU, 2006).

- **Les premiers adoptants** représentés par les leaders des communautés sont des références en termes d'informations pour les autres membres. Ce sont des leaders d'opinion, des dirigeants de groupes sociaux organisés. Plus intégrés à l'intérieur du système social que les innovateurs, les premiers adoptants sont très importants dans le processus de transmission de messages concernant l'innovation.
- **La première majorité** représente environ 1/3 des membres d'un système social susceptible d'adopter une innovation juste avant la moyenne du groupe. Elle joue un rôle important dans la sensibilisation des adoptants ayant besoin de beaucoup plus d'informations.
- **La majorité tardive** constitue aussi 1/3 des membres du système social intéressé par l'innovation. Elle est intéressée par une innovation juste après la moyenne du système social et généralement pour des raisons économiques. Elle attend que les incertitudes sur l'innovation soient levées avant de l'adopter.
- **Les retardataires** (ROGERS, 1995) ou **réfractaires** (BIBEAU, 2006), très fortement attachés aux valeurs traditionnelles et aux expériences du système, résistent aux idées nouvelles. Ils exigent des résultats positifs, visibles de l'innovation avant de l'adopter.

A.4.2.4 Les différentes phases vers l'adoption d'une innovation

Rogers a identifié cinq phases déterminantes dans le **processus de décision vers l'adoption** d'une innovation, qui sont :

- **La connaissance**, phase au cours de laquelle l'individu explore l'innovation, pose des questions d'éclaircissement sur son fonctionnement. Le processus de décision qui doit conduire à l'adoption ou au rejet de l'innovation commence à cette phase.
- **La persuasion** est la phase pendant laquelle un individu développe une attitude favorable ou défavorable par rapport à l'innovation.
- **La décision**, phase qui doit lui permettre d'adopter ou de rejeter l'innovation.

- **L'implantation** est l'étape au cours de laquelle un individu utilise, expérimente quotidiennement l'innovation afin d'évaluer ses avantages.
- **La confirmation** est la phase la plus décisive où un individu cherche à obtenir des informations pouvant renforcer son choix (adoption ou rejet).

A.4.2.5 Vers une acceptation communautaire d'une innovation

La théorie de Rogers s'applique avant tout à un individu, dont l'adhésion à l'innovation pourra entraîner peu à peu celle d'autres individus. Mais en ce qui nous concerne, c'est l'adhésion non pas individu par individu que nous souhaitons obtenir, mais celle de toute une communauté, au travers d'une approche collective et participative, pour aller vers une solution consensuelle. La théorie de Rogers, dont on peut difficilement réfuter la pertinence, doit donc être adaptée.

En milieu rural, une approche telle que le « diagnostic rural participatif » ou « diagnostic participatif des contraintes et des potentialités » a été proposée dans les années 90 pour les projets de développement, dans des domaines tels que l'agriculture, la sécurité alimentaire, la santé, la microfinance et l'éducation. Il est clairement précisé que les principes méthodologiques proposés doivent mener à des approches de terrain adaptées à leur contexte, approches innovantes et mettant la participation active de la population au premier plan. Un tel diagnostic permet d'identifier les contraintes et les solutions, de développer des méthodes de sensibilisation, d'identifier les points de recherche en lien avec la demande exprimée. Il faut pour cela démontrer la nécessité, faciliter le dialogue et la communication et définir ensemble les stratégies adaptées au problème spécifique (FAO, 2002 ; SCHOONMAKER FREUDENBERGER, 1999).

A.4.3 Durabilité d'une filière d'assainissement

A.4.3.1 Les conditions nécessaires

Selon l'objet d'étude, les conditions susceptibles de permettre d'atteindre la pérennité ne sont jamais les mêmes. Seuls Esrey et ses collègues à notre connaissance se sont attachés à recenser les points d'attention pour bien choisir un dispositif d'assainissement durable et

donc s'assurer de sa pérennité (ESREY et al, 1998). Ces points portent sur le climat, la topographie et le type de sol, l'abondance ou rareté de l'eau, la proximité/sensibilité d'une ressource en eau ou système aquatique, l'énergie, les conditions sociales et culturelles, les conditions économiques, la capacité technique (niveau technologique), les infrastructures, l'espace disponible et l'agriculture locale.

A partir de là, nous avons recherché les principales conditions susceptibles de garantir l'acceptation et la pérennité d'une innovation sociale telle que notre dispositif d'assainissement à base de toilettes sèches, que ce soit par l'utilisateur individuel, la communauté ou les autorités locales et nationales.

Pour garantir l'acceptation :

- l'implication des usagers le plus en amont possible de la démarche de manière pédagogique, notamment pour faire accepter un dispositif n'allant *a priori* pas dans le sens de la modernité souvent associée au développement et pour transférer des connaissances à des personnes n'ayant été que peu scolarisées, et en prenant le temps nécessaire ;
- l'existence d'un leader ou groupe leader local, d'un « sachant », qui porte le projet ;
- la confiance dans les porteurs du projet ;
- le lien établi entre santé et assainissement ;
- le dépassement des éventuels tabous ;
- l'intérêt pour des toilettes individuelles au regard de l'hygiène et la démonstration scientifique de l'innocuité ;
- l'intérêt des résidus pour l'agriculture locale ;
- la faisabilité économique en termes d'investissements.

Pour garantir la pérennité :

- la viabilité économique du dispositif (capacité de financement par l'utilisateur, par la communauté, par la collectivité ; prestation privée ou engagement bénévole, contribution active), les aspects économiques ne devant pas être un frein pour les cibles visées ;

- la qualité du service rendu au regard des contraintes ;
- l'implication des usagers dans le suivi du fonctionnement, l'évaluation et la réplication ;
- la conformité aux réglementations nationales et locales : il faut pour cela échanger en amont avec les autorités, les impliquer, les informer, pour qu'elles soient en accord avec l'approche menée et le dispositif proposé.

Tout au long de notre travail, nous avons été vigilants au respect de ces conditions, qui tout compte fait découlent du bon sens et s'expriment de manière assez naturelle lorsque l'on est dans une attitude bienfaisante, travaillant pour le bien-être de la population et financièrement désintéressé.

A.4.3.2 Retour d'expérience sur l'assainissement par TLB dans les PED

Comme nous l'avons conclu au chapitre A.2, nous avons choisi de travailler sur la filière d'assainissement par toilettes sèches à litière biomaîtrisée (TLB) compte tenu de notre contexte d'intervention. Nous allons donc ici nous intéresser au retour d'expérience de cette filière et notamment sur les critères de durabilité, ce qui nous permettra de compléter les considérations théoriques avec un retour du terrain.

Dans certains pays comme la France ou les pays du nord de l'Europe, les TSLB sont de plus en plus utilisées par des particuliers, notamment lorsque l'accès à l'eau est compliqué ou par conviction écologique, et par des professionnels : gestionnaires de gîtes nature (refuges de montagne, gîtes pour écoles vertes), organisateurs de manifestations (festivals de musique, expositions tournées vers la nature, manifestations ponctuelles). Peu d'études traitent spécifiquement des TSLB. Néanmoins, des études récentes coordonnées par l'ONG française Toilettes du Monde ont traité de l'usage des toilettes sèches familiales et de la problématique des TLB mobiles utilisées lors de manifestations, en mettant en particulier l'accent sur la gestion des résidus. Elles ont pu apporter des données intéressantes sur les pratiques, sur les caractéristiques des résidus et leur traitement (BERNE, 2010 ; TDM, 2015 ; BRUN et al., 2017 ; NASRI, 2018). Si l'on s'intéresse principalement aux données techniques, dans la mesure où les pratiques n'ont que peu de similitudes avec le contexte des PED, les études sur les conditions de traitement par compostage des résidus montrent une faible

montée en température en assainissement individuel, les conditions de compostage domestique étant peu favorables à la montée en température et, par voie de conséquence, rendant l'hygiénisation incomplète : pour *E. coli* et les Entérocoques, leur présence n'est plus décelable après 6 mois de compostage individuel (conforme à la norme NFU 44 095). La persistance de *C. perfringens* et la présence d'œufs d'helminthes viables sont révélées. Ceci conduit à des consignes de traitement de longue durée avant de pouvoir utiliser le produit final (1 an minimum). A l'issue du traitement, le produit obtenu n'est pas très intéressant en tant que matière fertilisante mais peut être considéré comme un bon amendement organique pour les sols. Il est recommandé de brasser en cours de traitement pour apporter de l'oxygène et éviter l'assèchement, malgré les risques sanitaires que ce brassage peut représenter. Pour ne pas avoir à brasser, il est recommandé d'ajouter de la matière structurante (broyats végétaux notamment) afin de ménager une bonne porosité. Les aires de compostage n'ont pas forcément besoin d'être étanches si la zone ne présente pas d'enjeu sanitaire ou environnemental.

Les TLB sont encore peu développées dans les PED, où l'on reste encore beaucoup sur des dispositifs à base de latrines extérieures aux habitations. Cela s'explique principalement par le fait que ce sont les modèles classiques de l'assainissement non collectif qui sont généralement préconisés par la plupart des opérateurs et dans les guides internationaux (TILLEY et al., 2014 ; PS-EAU, 2012). Néanmoins, nous avons identifié deux structures qui mettent en place, avec visiblement réussite, des dispositifs d'assainissement à base de TLB. Il s'agit des ONG américaines GiveLove et SOIL, dont nous allons analyser le retour d'expérience. Nous n'avons pas identifié dans la littérature d'autres expériences de ce type dans les PED. S'il y en a eu, elles n'ont *a priori* pas fait l'objet de communications rendues publiques.

Nous présentons donc ici successivement les retours d'expérience de terrain de l'ONG GiveLove, créée après le séisme en Haïti, qui a mis en place des TSLB notamment en Haïti (à Léogâne) et au Nicaragua. Nous développerons en détails celui de l'ONG américaine SOIL, qui implante des TSLB en Haïti, à Port-au-Prince et au Cap Haïtien, dans un contexte très proche du nôtre.

A.4.3.2.1 Retour d'expérience de l'ONG GiveLove

La démarche de GiveLove est intéressante car elle insiste beaucoup sur la formation et l'implication des acteurs, notamment en mettant en place des systèmes de gestion communautaires.

GiveLove à Léogâne, Haïti

GiveLove est intervenu en 2012 sur le secteur de Santo, Léogâne, après le séisme de 2010, pour remplacer un dispositif de latrines simple fosse à déshydratation et diversion d'urine, rendu inutilisable du fait du climat trop humide. Ils ont formé des charpentiers locaux, des techniciens au compostage, et aménagé un site pilote de compostage. De 30 ménages au départ, ils sont passés à 300 ménages en 2013 après vote de la communauté pour ce mode d'assainissement. Le principe se base sur l'apport des résidus deux fois par semaine par les ménages vers des plateformes de compostage tenues par des professionnels. Plus de 15 tonnes de compost ont été produites la première année, environ 20 m³ de résidus sont apportés chaque mois et un peu plus de 13 m³ de litière de bagasse sont nécessaires (JENKINS, 2015).

Le contenu des toilettes est recouvert de bagasse puis composté dans des bacs, à l'écart des toilettes et des maisons. L'urine n'est pas séparée, pas plus que le papier toilette. Les déchets alimentaires, lorsqu'ils sont disponibles sont également utilisés comme co-substrats pour le compostage. Les températures des piles de compost sont mesurées régulièrement. Le système de compostage ne nécessite aucun retournement. Les bacs sont murés à l'aide de palettes d'expédition en bois recyclé. Ils mesurent environ 2,4 mètres de large sur 3,2 mètres de long sur 1,2 mètre de profondeur. Le système de traitement des résidus repose sur la biodégradation et l'hygiénisation sous l'effet de la montée en température, l'objectif étant de créer les conditions pour atteindre une température d'au moins 55 °C, ce qui est effectivement le cas ici pendant des mois, beaucoup plus que la période requise. L'utilisation de la bagasse de canne à sucre comme matériau de couverture dans les bacs minimise la surface exposée du compost et maximise la rétention de chaleur. Ce système de confinement élimine également les odeurs et les mouches et aide à empêcher les animaux nuisibles tels que les chiens et autres animaux d'accéder au compost. Le savon et l'eau utilisés pour nettoyer les récipients de toilette sont ajoutés aux piles de compost, créant

ainsi un système fermé. Le processus repose sur la gestion locale par des Haïtiens, une formation au compostage, une équipe de gestion du compost dédiée, l'éducation du public, l'accès aux matériaux de couverture à base de carbone et leur transport vers les toilettes, ainsi qu'une utilisation du compost fini.

Au-delà de ces aspects techniques, l'absence d'indications financières sur ce projet (coût pour les ménages ? coût par tonne de compost produite ? etc.) rendaient difficile l'analyse approfondie de la filière proposée en termes de pérennité.

Une visite effectuée sur place en octobre 2018 nous a malheureusement permis de constater que le dispositif n'était plus utilisé (Figure 6). Plusieurs raisons nous ont été données par l'ancien responsable local du projet. D'une part, l'approvisionnement en poudre de bagasse (litière), qui était fait par camion venant de l'usine sucrière locale de DarBonne, moyennant indemnisation pendant le projet, s'est arrêté lorsque le financement s'est lui-même arrêté. De même, le personnel a cessé de travailler sur la plateforme de compostage après 3 mois sans salaire. Enfin, les utilisateurs ont été déçus par la qualité du compost, qui leur avait été présenté comme pouvant remplacer l'engrais qu'ils achetaient auparavant.



Figure 6 : TLB abandonnées à Santo

Les habitants ont semble-t-il été très peu associés à ce projet, où le dispositif d'assainissement leur a été pratiquement imposé. Cela a fonctionné pendant environ 20 mois au total. Depuis, chacun a creusé une fosse pour passer à un système de latrine

traditionnelle, non étanche, ce qui, dans cette région où la nappe d'eau est très proche, n'est sans doute pas sans poser de problèmes.

Cet exemple est très représentatif des projets des ONG dans les pays en développement, qui oublient de co-construire avec les personnes concernées pour garantir la pérennité au-delà de la durée du projet.

GiveLove au Nicaragua

Les TLB ont été introduites par GiveLove au Nicaragua en mai 2015. Le projet initial se déroulait dans une école de 300 élèves qui disposait auparavant d'un système de latrines à fosse, adjacente au puits d'eau potable de l'école, qui a été fermée et remplacée par des toilettes sèches. Le nouveau programme, actuellement en cours, est organisé et géré par une coopérative de femmes locale. Une grande partie de la communauté environnante pratiquait la défécation à l'air libre en raison de l'absence de système d'assainissement, du coût élevé des latrines à fosse et du manque d'eau. Les membres de la communauté ont été formés à l'utilisation des toilettes. Ils ont également participé à la construction des toilettes et des bacs à compost, et intégré les systèmes dans les ménages, 50 à la fois, à un dixième du coût des latrines à fosse (JENKINS, 2018).

Les toilettes peuvent être situées à l'intérieur, où elles sont plus confortables et sécurisées. Elles sont autogérées et utilisent principalement des coques de riz comme matériau de couverture. Avec un taux de défécation à l'air libre de 70% avant le début du projet, les ménages utilisant ces toilettes ont à présent un taux de défécation à l'air libre presque nul. Le compost résultant est utilisé pour produire de la nourriture.

Du retour d'expérience de GiveLove, il ressort que les matériaux de couverture peuvent inclure la sciure de bois, les coques de riz, la bagasse de canne à sucre, des herbes, des feuilles, le coco, le marc de café et d'autres matériaux semi-secs à grains fins dérivés de plantes ou de sous-produits végétaux tels que le papier et le carton. Un matériau de couverture bien utilisé bloque complètement les odeurs et les mouches, permettant ainsi aux toilettes d'être situées presque n'importe où, y compris, par exemple, juste à côté d'un lit. Au Nicaragua, la principale source de matériau de couverture provient d'une usine de riz

locale où des balles de riz ont été mises à la disposition, stockées à l'extérieur et exposées à la pluie pour permettre une hydratation et une augmentation de l'activité biologique.

Il apparaît cependant que certains matériaux de couverture fonctionnent mieux que d'autres. Par exemple, la bagasse de canne à sucre contient des résidus de sucre qui facilitent l'activité microbienne et la montée en température (TØNNER-KLANK et al., 2007).

La taille des particules dans le matériau de la couverture de toilette est également importante. Par exemple, les sous-produits du bois comprennent généralement de la sciure de bois et des copeaux de bois. La sciure de bois est un bon matériau de couverture en raison de sa petite taille de particule qui permet une surface maximale sur laquelle les micro-organismes peuvent se développer, en particulier lorsqu'il y a un peu d'humidité dans le matériau, comme lorsque la sciure de bois est fabriquée à partir de bûches avec sève résiduelle. L'humidité facilite le développement des biofilms autour des particules de bois où les bactéries et autres micro-organismes peuvent se multiplier. Les copeaux de bois, quant à eux, se composent de particules de bois nettement plus grosses, qui présentent donc une surface spécifique moindre et sont moins accessibles aux bactéries. Leur grande taille peut augmenter les pertes thermiques et empêcher la montée en température du compost. Dans ce cas, il est nécessaire d'ajouter davantage de matières vertes et de restes de nourriture.

GiveLove recommande d'attendre 9 à 12 mois après remplissage d'un bac avant d'utiliser le compost. La température doit être retombée à l'ambiante et des essais de germination de semences doivent montrer l'absence d'inhibition.

Mais là encore, l'absence de données financières et d'informations relatives à la pérennité de cette opération, ne permettent pas de se prononcer sur la durabilité de ce programme.

A.4.3.2.2 Retour d'expérience de l'ONG SOIL

Les informations ci-après ont été recueillies lors d'un stage d'une semaine effectué chez SOIL, lors d'entretiens avec des responsables de l'ONG, dans les ressources documentaires disponibles sur le site de internet de la structure et dans la communication présentée à la 6^{ème} International Dry Toilet Conference de Tampere (KRAMER et al., 2011 ; LLOYD, 2018).

SOIL est une ONG américaine fondée en 2006 avec pour objectif de transformer les déchets en ressources en Haïti. De par son objectif et son approche, SOIL se présente comme étant

un modèle d'entreprise sociale « révolutionnaire » qui se propose de fournir un service d'assainissement digne avec la possibilité de retour de la biomasse au sol, afin de restaurer la couche érodée du sol en HAÏTI. SOIL est présente dans les départements de l'Ouest (Delmas) et du Nord (Cap Haïtien) où, depuis 2006, ont été mises en place des activités d'assainissement écologique de type ECOSAN.

A ce jour, SOIL a installé environ 1 000 TLB à diversion d'urine (environ 900 au Cap Haïtien et 130 à Delmas) individuelles ou publiques (3 blocs de 3 toilettes, ces dernières étant gérées par des équipes de trois personnes assurant la surveillance en permanence), des équipes de deux personnes assurant la collecte des résidus (11 collecteurs au Cap, 2 à Delmas). SOIL dispose d'un camion qui aide l'équipe responsable à assurer la collecte des résidus des toilettes à litière une ou deux fois par semaine (2 fois par mois au niveau de quelques communautés).

Dans la stratégie de SOIL, on trouve 6 catégories d'intervention :

- La formation, éducation et sensibilisation ;
- La conception et la construction des toilettes ;
- La collecte et le transport des résidus ;
- Le traitement par compostage des résidus ;
- L'analyse microbiologique du compost ;
- Le jardin expérimental pour démontrer le pouvoir fertilisant du compost produit.

Formation – sensibilisation

Pour SOIL, l'éducation des utilisateurs potentiels est l'étape la plus importante dans la distribution des toilettes. Elle organise des séances de sensibilisation, d'éducation et de simulation à l'intention des clients avant même de mettre à leur disposition les modules de TLB sous forme de location. Au cours des séances réalisées, on apprend aux usagers potentiels comment utiliser et entretenir les toilettes afin d'éviter les odeurs désagréables, la prolifération des insectes, et surtout les mouches et moucherons. Une mauvaise

utilisation des toilettes peut nuire à l'acceptabilité des modèles proposés, en conduisant à une mauvaise publicité du service proposé.

Ces séances sont l'occasion pour expliquer clairement aux usagers potentiels la différence entre ce type de toilette et les autres options existant dans la communauté, en insistant sur les bénéfices et les responsabilités associés au choix et à l'utilisation des TLB. On en profite aussi pour faire la promotion des principes d'hygiène indispensables au bon fonctionnement des toilettes et à la prévention des risques sanitaires.

Conception et construction des toilettes

Au départ, SOIL a testé différents modèles existants : arborloo (on plante un arbre lorsque la fosse est pleine et on en creuse une autre), toilettes sans et avec diversion d'urine. Ce sont ces dernières qui ont été retenues, permettant de réduire les odeurs, réduire l'attraction des mouches due à l'humidité, les besoins en déchets carbonés (sciure, copeaux, ...) et la fréquence de vidange. SOIL a également expérimenté quatre modèles de toilettes à séparation d'urine :

- Les toilettes à double fosse ou à fosse alternée : L'expérience de SOIL a montré que la matière n'est pas complètement décomposée et que certains agents pathogènes résistent. En outre, cette technologie exige beaucoup de matériaux et de travaux de génie civil, et est donc très coûteuse.
- Les toilettes à litière dans des fûts de 60 litres permettant de répondre à des situations d'urgence ou à un usage extensif (écoles, toilettes publiques, ...).
- Les toilettes mobiles utilisées lors des festivals ou de fêtes patronales. Des cabines de toilettes chimiques mobiles ont été adaptées à cet effet.
- Les toilettes compactes individuelles, placées au sein des habitations, où les résidus solides sont stockés dans des seaux de 20 litres et les urines collectées dans de petits bidons de 1 gallon (3,78 litres).

A ce jour, SOIL utilise les trois derniers dispositifs. Ils achètent les toilettes à des artisans locaux préalablement formés pour la fabrication des interfaces.

Collecte et transport des résidus, mise à disposition des litières

Les résidus sont collectés en porte à porte et déposés au niveau de points de regroupement par des personnels de SOIL. Ils sont ensuite chargés sur des motos benne ou un camion pour être transportés sur plusieurs kilomètres jusqu'au site de compostage. Lorsque les résidus sont collectés, un seau propre est remis aux utilisateurs ainsi qu'un seau de litière en échange du précédent. SOIL collecte ainsi environ 37 tonnes de résidus par mois au Cap Haïtien et 5 tonnes à Delmas.

Les litières sont préparées au niveau du site de compostage, après broyage mécanique de résidus de coques d'arachide et de bagasse et mélange selon un ratio 1 : 3. Ces résidus sont donnés ou achetés à des agriculteurs locaux.

Traitement des résidus par compostage

SOIL dispose dans le Nord d'une grande plateforme de compostage avec 29 bacs de 12 m³ construits avec de palettes en bois, 5 bacs pour les résidus de Delmas, doublés de tiges de bagasses (Figure 7). Le remplissage d'un bac se fait en environ une semaine. La matière collectée, malgré la séparation de l'urine à la source, est assez liquide au départ malgré l'ajout de litière (beaucoup de diarrhées). On la recouvre d'une couche de bagasse. Les résidus restent 2 à 3 mois dans les bacs, sans manutention. Le suivi de la température est fait pendant 8 jours à plusieurs profondeurs et plusieurs points, pour s'assurer de l'hygiénisation (environ 60 à 70°C pendant 7j). Les résidus sont ensuite mis en andain sur des dalles en béton et retournés toutes les 2 semaines à 7 reprises, soit au total 6 à 7 mois de fermentation. A ce stade, le suivi de température n'est plus nécessaire compte tenu de l'expérience acquise dans la conduite du processus de compostage.

Les seaux sont rincés à l'aide d'une pompe à pression puis désinfectés dans un bassin de 560 litres contenant de l'eau à forte teneur en chlore. L'eau du bassin est évacuée vers une fosse septique. Testée à plusieurs mètres de profondeur, la nappe n'est pas contaminée.



Figure 7 : Plateforme SOIL de compostage de résidus de TLB (Limonade)

Analyse microbiologique du compost

SOIL dispose d'un laboratoire où sont testés des échantillons de compost afin de s'assurer de l'hygiénisation complète *via* la destruction des micro-organismes pathogènes. Les kits d'analyse permettent le suivi de *E. coli* (non détectable en fin de traitement) et des coliformes totaux (souvent encore détectable à l'issue du traitement). Au regard de la littérature scientifique et des résultats de suivi des agents pathogène, SOIL considère que les conditions de compostage garantissent l'hygiénisation de leurs résidus de TS. Leurs résultats ont été vérifiés par un laboratoire universitaire américain où ont été envoyés des échantillons d'ADN extraits des résidus afin de confirmer l'absence d'agents pathogènes (BERENDES et al., 2015 ; PICENO et al., 2017).

Jardin expérimental pour tester le pouvoir fertilisant du compost produit

Le compost obtenu a été appliqué à différents types de culture (maïs, haricot, fruits, ...) afin de tester et démontrer son pouvoir fertilisant.

Quel bilan peut-on faire de l'activité de SOIL ?

Malgré un important travail de marketing, l'écoulement du compost (production de 10 tonnes par mois) est encore difficile. Les principaux clients actuels sont des organismes internationaux qui achètent le compost 4 € le sac de 40 livres, soit environ 200 € la tonne, pour des projets de reboisement ou d'agriculture, ainsi que quelques maraîchers locaux.

Actuellement, l'activité est très largement déficitaire : coût d'environ 25 USD par ménage et par mois, pour des recettes de 5 USD (3 par les abonnements et 2 par la vente du compost). Le coût est pour 54 % lié au fonctionnement (2/3 pour la collecte et le transport, 1/3 pour le traitement) et pour 46 % aux investissements / amortissements / frais généraux (65 % pour la collecte et le transport et 35 % pour le traitement) (LLOYD, 2018).

SOIL vise à équilibrer le service par une réduction de ses frais généraux et une prise en charge partielle du service par des organismes internationaux puis progressivement par les collectivités et par l'achat de compost par des entreprises importantes à des fins de marketing (Heineken pour fournir du compost aux agriculteurs locaux qui sont leurs fournisseurs par exemple). L'ONG échange également avec le gouvernement haïtien et des banques internationales pour tenter d'établir un mécanisme de financement public.

A partir de notre analyse, nous avons pu synthétiser les forces, faiblesses, opportunités et menaces (matrice FFOM plus connue sous le terme d'analyse SWOT) de la filière d'assainissement SOIL (Tableau 8).

Tableau 8 : Analyse FFOM de la filière d'assainissement SOIL

FORCES	FAIBLESSES
Importants moyens. Éducation à l'hygiène. Technologie à faible coût d'investissement. Participation des employés dans les décisions.	Manque de responsabilisation des usagers. Difficulté des ménages à payer l'abonnement au service. Accès difficile aux quartiers. Forte dépendance financière.
OPPORTUNITÉS	MENACES
Mobilisation d'agences internationales et d'entreprises vers des solutions financières. Intérêt de la DINEPA qui souhaite faire évoluer le secteur assainissement.	Aggravation de la situation économique des habitants. Crise économique mondiale (réduction progressive des dons).

Quelles sont les leçons tirées par SOIL ?

Sur les chances de réussite d'un projet :

- On a beaucoup plus de chances de réussir quand la demande vient de la communauté.
- Pour changer d'échelle, il sera indispensable que l'État contribue aux investissements et aux coûts de fonctionnement.
- La réussite d'un projet d'assainissement écologique dépend du niveau de sensibilisation et d'éducation de la communauté.
- Une bonne collaboration avec les autorités locales est importante pour le bon fonctionnement de toilettes publiques.

Sur l'importance de l'entretien des toilettes :

- Les toilettes mal entretenues repoussent les usagers.
- Les toilettes publiques gérées par des bénévoles, installées dans les églises et les écoles, sont le plus souvent mal entretenues.

Sur le fonctionnement :

- Ne pas laisser la responsabilité de trouver les matières carbonées aux usagers.
- La stabilisation de la matière organique contenue dans les résidus est atteinte après 6 à 9 mois, selon le climat (humidité) et/ou la nature et la quantité de litières ajoutées.

A.4.3.2.3 Comparaison des exemples présentés

Les retours d'expérience présentés ici se différencient sur deux points importants :

- le type de toilette, avec ou sans diversion des urines ;
- le mode de gestion de la filière, communautaire ou par une entreprise privée.

Ces deux points sont pour nous fondamentaux pour choisir la filière que nous souhaitons mettre en place.

Les toilettes sans diversion d'urine obligent à une vidange assez fréquente des seaux s'il s'agit de modèles compacts, du fait du remplissage plus rapide et des problèmes d'odeurs. C'est selon nous une contrainte importante si les toilettes sont installées dans la maison et si les seaux doivent être vidés loin de celle-ci.

Le mode de gestion communautaire permet de réduire très fortement le coût de fonctionnement de la filière, ce qui est important pour les populations précaires avec lesquelles nous allons être amenés à travailler dans le cadre de ce programme. Cela est rendu possible en milieu rural où la zone de traitement peut être assez proche des habitations et où les populations ont l'habitude de travailler ensemble pour le bien de la communauté.

A.4.4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'identifier les conditions susceptibles d'assurer la durabilité d'une opération d'assainissement par toilettes sèches à litière pour une population de milieu rural vivant dans des conditions très précaires. Nous avons ainsi pu identifier, à partir de réflexions théoriques et de cas concrets menés sur le terrain, les points importants sur lesquels baser notre approche, afin que cette innovation en matière d'assainissement puisse être acceptée sur la durée.

A.5 Conclusion de la bibliographie

Cette partie bibliographique nous a mené étape par étape à définir plus précisément l'objet de notre recherche, qui à ce stade est devenu :

« Comment mettre en place de manière durable une filière d'assainissement par toilettes sèches à litière bio-maîtrisée dans une zone rurale de pays en développement, notamment dans le contexte haïtien » ?

Il est apparu clairement que cela nécessite une approche intégrée, à mener en considérant plusieurs points majeurs :

- Réglementaire (qu'ai-je le droit de proposer ?) ;
- Social (comment aborder cela avec la population à laquelle j'ai affaire) ;
- Technique (quel choix proposer ?) ;
- Economique (comment rendre le coût acceptable, si possible sans aide externe ?) ;
- Environnemental (comment réduire les impacts environnementaux ?) ;
- Sanitaire (comment réduire les risques pour la santé ?).

Nous touchons à un sujet pour lequel tout est encore à explorer, tant la situation en matière de gestion des excréta humains dans les pays en développement est dramatique. Les maigres résultats identifiés, malgré les énormes investissements consentis, ne peuvent qu'encourager de telles démarches innovantes, sortant des sentiers battus.

A nous à présent de démontrer que notre approche est pertinente et apporte une réponse encourageante.

B. Partie expérimentale

B.1 Introduction

Ce projet de recherche vise à proposer un système d'assainissement durable, accepté par la population, à un prix accessible et fonctionnant dans des conditions sanitaires et environnementales satisfaisantes. Il doit permettre d'identifier les facteurs (politiques, juridiques, économiques, socio-culturels, organisationnels, techniques, sanitaires et environnementaux) à prendre en compte dans le contexte haïtien, et proposer et tester une méthodologie répliquable, destinée à accompagner l'implantation de tels dispositifs dans tout territoire rural intéressé.

Comme nous l'avons vu, la réussite de l'implantation de dispositifs d'assainissement individuels au sein de populations qui en ont toujours été dépourvues ne dépend pas uniquement de moyens techniques ou financiers. Cela doit se faire en concertation avec les habitants, sans présupposer des besoins mais en analysant les demandes, en identifiant les obstacles de tout ordre, les moyens financiers disponibles et nécessaires. Cela doit également se faire en lien avec les autorités locales et leur stratégie en matière d'assainissement. Enfin, les dispositifs et les modes de gestion des résidus doivent être pensés pour réduire au maximum les nuisances et les impacts sanitaires et environnementaux.

L'approche globale que nous avons suivie, en réponse aux questions qui se posaient (voir en introduction) est illustrée par la Figure 8. Nous avons proposé de nous appuyer sur des expérimentations menées auprès d'une cinquantaine de ménages et deux sites pilotes situés en zone rurale pour tester et affiner notre démarche qui se veut participative et itérative. La première expérimentation suivie est celle de la localité de Grande Plaine. Elle porte sur l'intégralité de la démarche, à savoir la sensibilisation initiale des acteurs locaux, leur implication dans l'élaboration du projet, la sélection des ménages « test », les séances de formation à la fabrication de toilettes à litière et à leur usage (artisans, ménages, agriculteurs), jusqu'à la mise en place et au suivi de la collecte et de la valorisation des résidus solides et liquides. Ce suivi s'est fait sur 3 ans afin d'accompagner les ménages sur le long terme dans l'utilisation des toilettes à litière. Il a été choisi d'attendre les résultats de la

première expérimentation avant de répliquer sur un deuxième site. Sur celui-ci, seuls les premiers mois ont donc pu faire l'objet d'un suivi, dont les grandes lignes seront présentées plus loin.

Par ailleurs, des TSLB ont été installées dans une école de Grande Plaine, en remplacement de latrines vétustes que les enfants et le personnel n'aimaient pas utiliser du fait des odeurs dégagées.

Enfin, deux blocs de toilettes démontables ont été fabriqués, sur demande de la mairie de Gros-Morne, pour être utilisées au moment de manifestations publiques (fête patronale et festivals).

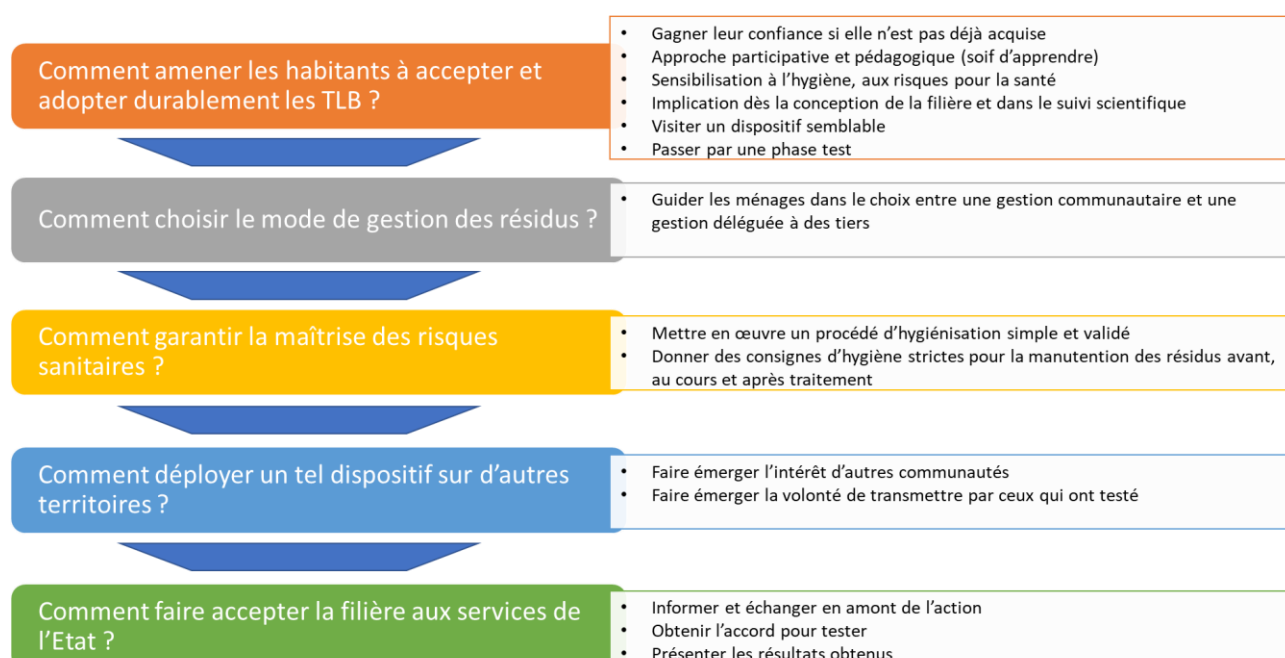


Figure 8 : Schématisation de la démarche suivie en réponse aux questions posées

B.2 L'approche sociale et économique

Comme nous avons pu le comprendre, pour garantir l'acceptation et la pérennité de la filière proposée, ce travail a intimement lié une approche sociale et économique d'une part et une approche scientifique et technique pour assurer le traitement des résidus d'autre part.

Au préalable, des échanges ont eu lieu avec la DINEPA, Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement ainsi qu'avec les TEPAC (Techniciens en Eau Potable et Assainissement pour les Communes) locaux. Le projet leur a été présenté et l'accord a été donné pour sa mise en œuvre à titre expérimental, dans la mesure où il entrerait dans l'objectif de réduction de la défécation à l'air libre de la DINEPA.

C'est grâce à 25 ans de travail avec la communauté de Grande Plaine qu'il a été relativement facile de la rassembler et de la faire réfléchir aux causes des maladies d'origine hydrique, à l'hygiène et aux problèmes liés à la défécation à l'air libre et aux latrines rudimentaires. Des rencontres ont été organisées dans le cadre des commissions santé, agriculture et environnement de l'AOG.

B.2.1 Sensibilisation et choix des ménages test

Le travail le plus important réalisé au cours de l'année 1 a été la sensibilisation des habitants. Ainsi, nous avons organisé plusieurs séances à l'intention des potentiels usagers. Pour promouvoir et encourager l'acceptabilité des toilettes sèches à litière, nous avons procédé de la manière suivante :

B.2.1.1 Réunion de présentation du projet des TSLB aux commissions de l'AOG.

Cette réunion a été l'occasion de parler des pratiques d'assainissement en cours dans la communauté, des dispositifs d'assainissement individuel existants, des maladies du péril fécal et leur cycle de transmission, du cycle de la matière organique avec valorisation des excréta (je mange, je défèque, je fais pousser des plantes, je mange, ...), etc. (Figure 9).



Figure 9 : Réunion des responsables de commissions de l'AOG

B.2.1.2 Invitation des ménages à participer à des réunions d'information

Les invitations ont été faites de porte à porte dans le but de toucher directement les intéressés. Avec l'aide des scouts et des commissions de l'AOG, plus d'une centaine de participants a pris part à ces réunions dont l'objectif principal était de leur présenter les TSLB (Figure 10). Nous avons également profité de ces séances pour enseigner aux participants certains principes d'hygiène de base comme le lavage des mains.



Figure 10 : Réunion de ménages intéressés

Pour accepter la nouvelle pratique d'assainissement proposée, nous avons pris conscience que les habitants étaient demandeurs de beaucoup d'informations, avaient soif d'acquérir de nouvelles connaissances. Tenant compte de l'importance de la communication dans la réussite de ce projet, nous avons travaillé avec différents acteurs tels les églises, les écoles,

les associations, les regroupements de vodouisants, les dirigeants du réseau des écoles vertes de Gros-Morne, etc. Ces acteurs ont joué un rôle très important dans le processus de transmission des messages devant conduire à l'adoption des TSLB.

Pour sensibiliser les acteurs clés pouvant aider à relayer les messages, nous avons organisé 4 séances de formation qui ont permis d'aborder les points suivants :

- Discussion autour des pratiques de défécation des communautés (plein air, latrines, ...);
- Problèmes liés aux latrines mal conçues et à la défécation à l'air libre (nuisances olfactives, transmissions d'agents pathogènes par les insectes, les rongeurs, la contamination des eaux, etc.);
- Importance de l'éducation sanitaire et de la promotion de l'hygiène ;
- Présentation et démonstration du fonctionnement des TSLB ;

Avant chaque séance, les participants étaient invités à réfléchir en binôme ou trinôme sur le ou les points à l'ordre du jour.

B.2.1.3 Recherche de litières

Le fonctionnement des toilettes sèches à litière biomaîtrisée exige la disponibilité de litières couvrantes et absorbantes comme la sciure et les copeaux de bois, les déchets de bagasse de canne à sucre ou autres déchets de biomasses broyés.

La participation à la recherche de structurants a donc été un critère fort, guidant le choix ou pas d'un ménage. Les ménages sélectionnés pour participer à l'expérimentation ont dû montrer leur capacité à trouver de manière régulière une litière satisfaisante. Nous avons vu dans la partie bibliographique que ce n'était pas le principe mis en place par l'ONG GiveLove, qui fonctionne elle aussi avec une approche communautaire. Nous avons fait ce choix sélectif pour garantir l'autonomie des ménages, sachant qu'il est possible de trouver, à relativement faible distance et gratuitement, des matériaux pouvant convenir. Le fait de centraliser le gisement aurait forcément généré un coût.

Les discussions menées autour des échantillons de sciure et d'autres déchets ramenés par les ménages lors des réunions ont néanmoins permis de conclure que la communauté ne disposait pas de gisements de sciure en quantité suffisante pour faire fonctionner les TSLB toute l'année (Figure 11). En fait, très déboisé, le secteur ne dispose quasiment pas de scieries. Il a donc été proposé de faire l'acquisition d'un broyeur multi-usage qui permettrait de broyer les déchets identifiés par les ménages dans les champs tels que la bagasse de canne à sucre, les coques d'arachide ou d'autres déchets de récolte. Ce broyeur pourrait également fournir un service de broyage de céréales, opération jusqu'alors effectuée à la main (Figure 12).



Figure 11 : Exemples de litières apportées par les ménages



Figure 12 : Broyeurs multi-usages

B.2.1.4 Sélection des foyers pilotes

Nous avons sélectionné comme foyers pilotes les 25 ménages les plus réguliers dans leur participation aux réunions de concertation, et qui ont respecté la majorité des consignes données en réunion, dont principalement celle de rechercher dans les champs les déchets végétaux susceptibles d'être utilisés comme litières. Le choix d'un ménage s'est ainsi fait selon plusieurs critères :

- Participer à toutes les réunions et activités concernant les TSLB ;
- Accepter de former les autres membres du foyer ;
- Montrer la volonté de contribuer au fonctionnement de l'ensemble de la filière d'assainissement ;
- Participer à l'élaboration des principes régissant le fonctionnement des TSLB ;
- Signer le contrat de fonctionnement et d'entretien des TSLB ;
- Participer à la recherche des structurants ;
- Avoir au moins 50 kg de sciure ou de copeaux disponible au démarrage de l'expérimentation.

Une visite d'échanges et d'observation a été organisée avec les intéressés sur le site de l'ONG américaine SOIL, qui implémente un projet de toilettes à litière à Limonade, près du Cap Haïtien (à environ 4h de route). Les participants ont eu l'occasion d'échanger avec des ménages équipés de toilettes sèches, de visiter l'atelier de fabrication de TSLB et la plateforme de compostage des résidus (Figure 13).



Figure 13 : Visite d'une délégation de Grande Plaine à Limonade (SOIL)

Les ménages ont formé un groupe qui s'est dénommé en créole « gwoup twalèt ZANA » (ZANA pour « zanmi lanati », les amis de la nature) et ont organisé une grande fête pour le 1^{er} anniversaire.

B.2.2 Mise en place de la filière d'assainissement

Dès lors que la sélection des ménages a été faite, le développement du projet a consisté à mettre en place l'ensemble de la filière d'assainissement à tester, de la fabrication des toilettes à la valorisation des résidus, en passant par leur collecte et leur traitement, selon la chronologie d'activités suivante (Figure 14) :

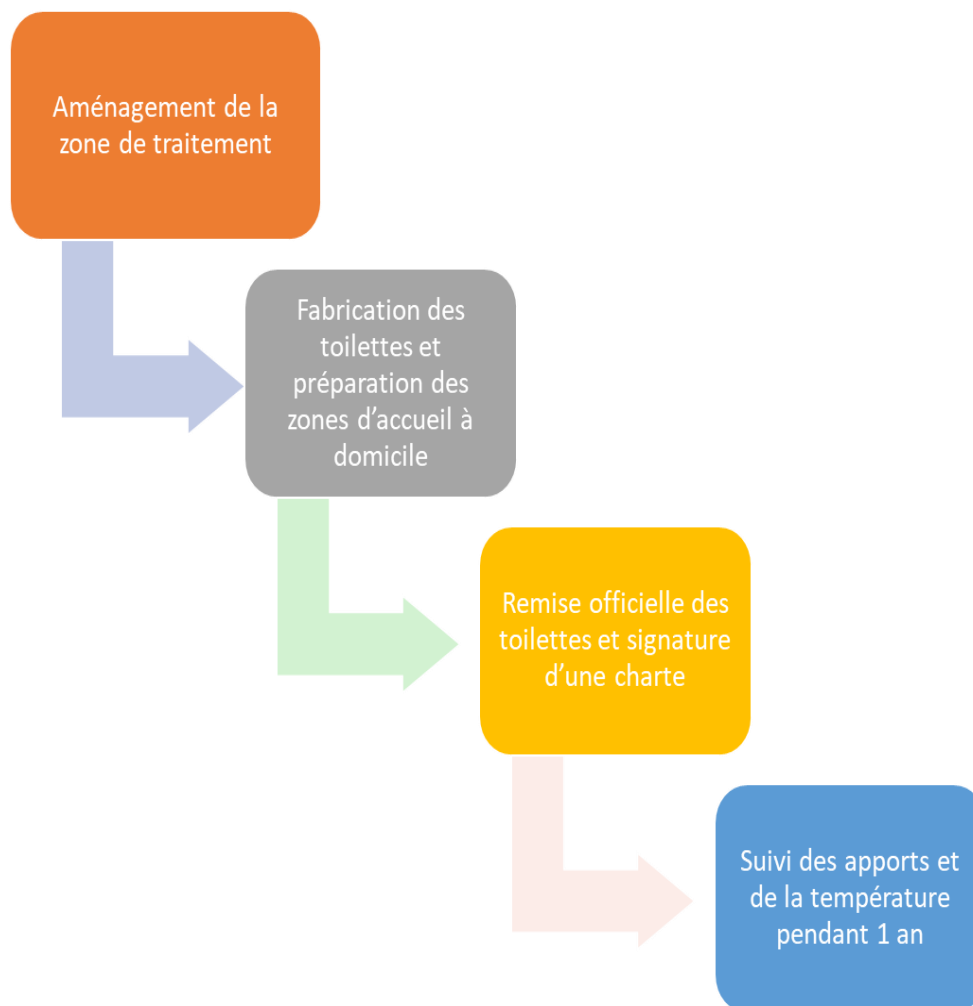


Figure 14 : Chronologie des activités de mise en place de la filière d'assainissement

Les ménages ont très vite opté pour une construction des toilettes par un artisan ou en co-construction avec lui et une organisation communautaire de la filière de gestion des résidus, sans passer par un prestataire privé, afin de réduire les coûts le plus possible. Nous sommes en effet dans un contexte où les familles vivent en dessous du seuil de pauvreté et où tout effort financier supplémentaire est difficile. Elles sont par contre motivées pour participer activement.

Après plusieurs mois, il a été demandé d'installer ce même type de toilettes dans une école du village. Nous avons également proposé de construire des toilettes démontables pour les grandes manifestations publiques.

B.2.2.1 Aménagement du site de traitement

Nous souhaitions tester dans un premier temps une gestion collective des résidus solides, afin d'obtenir une importante montée en température du fait de l'effet de masse et donc une rapide hygiénisation, limitant ainsi les risques sanitaires.

Un site a été gracieusement mis à disposition par l'AOG et les ménages ont participé collectivement à la mise en place de la plateforme collective de compostage.

Un enclos de 10 mètres sur 8 a été délimité et clôturé avec une haie vive à croissance rapide et des nattes faites en feuilles de palmiers en attendant leur croissance, afin d'empêcher le passage des animaux (Figure 15).

Le dimensionnement a été fait de sorte à pouvoir stocker dans cet enclos sécurisé par une porte cadénassée, les résidus apportés pendant au moins une année et les futurs pilotes expérimentaux.

Nous nous sommes pour cela basés sur les données de SOIL en matière de quantité de résidus produits par personne. Comme nous l'avons indiqué précédemment, SOIL récupère environ 42 tonnes de résidus par mois pour 6000 utilisateurs. Cela correspond donc à **84 kg de résidus par personne et par an**.

La population concernée par notre groupe de 25 ménages étant d'environ 120 personnes, cela pouvait conduire ainsi à la production de l'ordre de 200 kg de résidus par semaine et 10 tonnes par an. Ne connaissant pas à ce stade la masse volumique apparente des résidus, nous l'avons estimée entre 300 et 400 kg / m³, ce qui donnerait ainsi 25 à 35 m³ de résidus par an, 2 à 3 m³ par mois.



Figure 15 : Préparation du site de compostage

Compte-tenu de la biodégradation au cours du compostage, le volume est amené à réduire fortement. Nous avons donc opté pour la confection de plusieurs bacs de l'ordre de 3 m³ (2m x 1,5m x 1m de haut) susceptibles de contenir les résidus produits pendant au moins 2 mois. Les bacs ont été construits progressivement, à l'aide de matériaux locaux (bambou et troncs de palmiers).

L'absence d'eaux souterraines dans ce secteur rendant le risque de contamination négligeable, l'aire de compostage n'a donc pas été étanchéifiée. Nous avons pu voir en partie bibliographique que la réglementation française n'impose pas des aires de compostage étanches lorsque le risque pour le milieu et la santé est considéré comme tel.

Afin de laver et désinfecter les seaux sur place, un bassin en béton fait de deux compartiments de 0,8 x 0,95m et 1m de profondeur a été construit (Figure 16). Un compartiment est utilisé pour laver et désinfecter (à l'aide d'un produit chloré), l'autre pour

rincer. L'arrivée d'eau est assurée par deux robinets et un raccordement sur une canalisation publique passant à proximité.



Figure 16 : Bassin de lavage, désinfection et rinçage des seaux

En fin de chaque séance d'apport de résidus, les bassins sont vidangés, l'eau s'écoulant lentement vers une zone d'infiltration aménagée et végétalisée à l'aide notamment de vétiver, plante très adaptée localement et connue pour ses capacités épuratoires et de rétention d'eau (NKOBA et al., 2015).

B.2.2.2 Fabrication des TSLB

Le projet a utilisé un artisan formateur qui a assuré la formation de quatre personnes sur les techniques de fabrication de TSLB (deux pour chaque site). Les artisans formés dans le cadre du projet ont organisé à leur tour des séances de formation à l'intention des ménages et autres intéressés. Plus de 30 personnes ont participé à ces formations. Néanmoins, la plupart des TSLB ont été construites par les artisans (Figure 17).



Figure 17 : Atelier de fabrication des toilettes

Un module de TSLB est constitué des éléments suivants (Figure 18) :

- Un caisson en bois massif (manguier, arbre très courant et cultivé localement) de 51 cm de hauteur et de profondeur, et de 41 cm de largeur ;
- Un abattant de toilette en plastique (ou lunette) avec couvercle ;
- Un demi entonnoir et un bidon de 4 litres pour collecter les urines, placés sur le devant du module ;
- Un seau de 20 litres pour recueillir les fèces. Ce seau est recouvert d'un couvercle hermétique qui permet de limiter les risques de contamination lors de son transport vers le lieu de vidange.

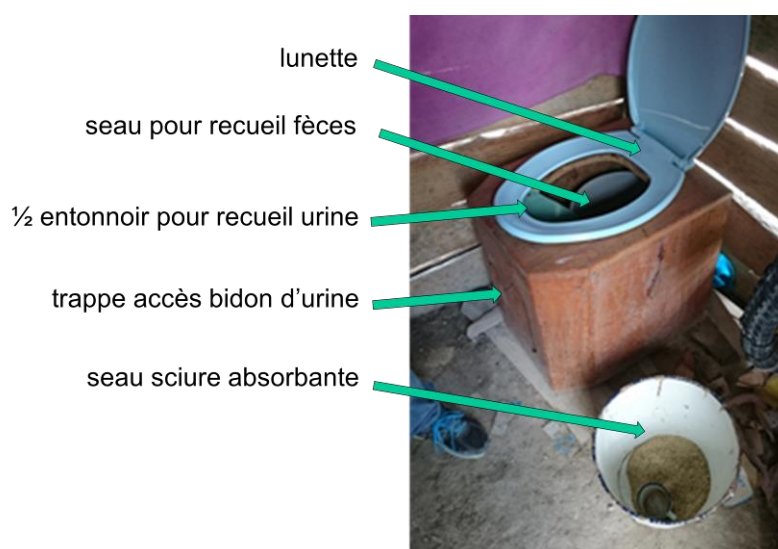


Figure 18 : Module de TSLB

Le coût de fabrication d'une TSLB s'est révélé être d'environ 2 000 gourdes haïtiennes (un peu moins de 30 €) et il était demandé une contribution de 500 gourdes aux ménages, soit l'équivalent de 2 jours de travail pour un ouvrier. Pour information, le coût moyen pour la mise en fonctionnement d'une latrine en Haïti, déterminé dans le cadre d'une étude de capitalisation de programmes d'assainissement du Nord-Ouest, est de plus de 30 000 gourdes, soit 6 mois de salaire (PEPA, 2016 ; HICKLING, 2015).

Un bloc de 4 TLB a été construit à l'école Jean-Marie Vincent de Grande Plaine par quelques parents avec l'appui d'un artisan (Figure 19). Ces toilettes sont venues remplacer des latrines malodorantes que de nombreux enfants refusaient de fréquenter.



Figure 19 : Bloc de 4 TLB installé dans une école

Après quelques explications sur leur utilisation, elles ont très vite été appréciées et adoptées par la plupart des enfants.

Deux blocs de 4 TLB en contreplaqué (2 toilettes femmes et 2 toilettes hommes dans chaque bloc) ont par ailleurs été construits pour les manifestations publiques. Dans un bloc, les 4 cabines sont côte à côte, avec un petit couloir intérieur les desservant.

B.2.2.3 Démarrage de l'action

Afin de démarrer l'action de manière synchronisée au niveau des ménages, une toilette, deux seaux et deux rouleaux de papier toilette ont été remis le même jour à chacun, lors d'une cérémonie où il leur était demandé de signer un contrat d'engagement au respect des consignes d'utilisation et d'entretien (Figure 20).

Les ménages ont été encouragés à commencer à utiliser les toilettes rapidement et un premier rendez-vous a été fixé quelques jours plus tard pour l'apport des premiers seaux de résidus.

L'école a été dotée quelques mois plus tard de ses TLB. C'est une personne employée pour le ménage à l'école qui est chargée d'apporter les seaux sur une brouette jusqu'à la plateforme, située à environ 500 mètres de là.



Figure 20 : Remise des TSLB et signature des contrats d'engagement

Les toilettes mobiles démontables ont quant à elles déjà été utilisées à plusieurs reprises, y compris transportées jusqu'à la ville de Port-de-Paix située à plus d'une heure de route. Les utilisateurs sont encore peu habitués à leur usage et hésitent à les utiliser. L'information reste à améliorer, malgré le passage de crieurs annonçant leur existence, mais l'affluence semble augmenter chaque fois, preuve que l'habitude commence à être prise.

B.2.2.4 Suivi des apports (année 1)

Dans un premier temps, deux rendez-vous par semaine ont été fixés pour l'apport des seaux. Mais rapidement, il s'est avéré qu'une seule vidange par semaine était suffisante. Les ménages apportent donc en général le mardi à 5h du matin leur seau jusqu'à la plateforme.

Les seaux sont pesés et vidés par un responsable équipé de gants et d'un masque dans le bac en cours d'utilisation. Les ménages lavent, désinfectent et rincent ensuite leur seau et ceux de l'école dans le bassin rempli d'eau chlorée. En fin de séance d'apport, l'eau du bassin s'écoule lentement vers la zone d'infiltration végétalisée.

Depuis le démarrage en décembre 2014, et pendant un peu plus d'un an, chaque seau apporté était donc pesé à l'aide d'un peson mécanique à cadran suspendu à un trépied, de portée 20 kg et de précision ± 100 grammes (Figure 21). Un responsable se chargeait de reporter dans un cahier la date, le nom du ménage et la masse de résidus (la tare est faite avec un seau vide au départ). Les informations étaient ensuite reportées sur un fichier Excel pour suivre les résultats individuels et le résultat global.



Figure 21 : Pesée des seaux au petit matin

Le contenu de chaque seau est ensuite déversé dans un des bacs situés à l'intérieur de l'enceinte de la plateforme. Quatre bacs de 2 à 3 m³ ont été construits au fil du remplissage.

A l'issue du déversement du contenu des seaux, on recouvre le tout de feuilles mortes afin d'apporter de la matière carbonée et de limiter l'attraction des insectes. Les bacs sont couverts par un cadre revêtu de tulle.

La quantité moyenne de résidus solides produits par habitant et par jour a été calculée en divisant la quantité par le nombre total d'habitants concernés et le nombre de jours, mais aussi, pour plus de précision sur cette donnée, en ne prenant en compte que les ménages ayant apporté régulièrement leurs résidus (présents de manière régulière).

Le cumul des masses de résidus apportés par les ménages montre une pente régulière, preuve que le dispositif a été très vite adopté et que les apports ont ensuite été réguliers

(Figure 22). Cela a démontré l'intérêt des ménages et toute l'importance qu'avait eu le travail de sensibilisation effectué en amont. Il est rare d'obtenir de telles cinétiques au lancement d'une nouvelle activité.

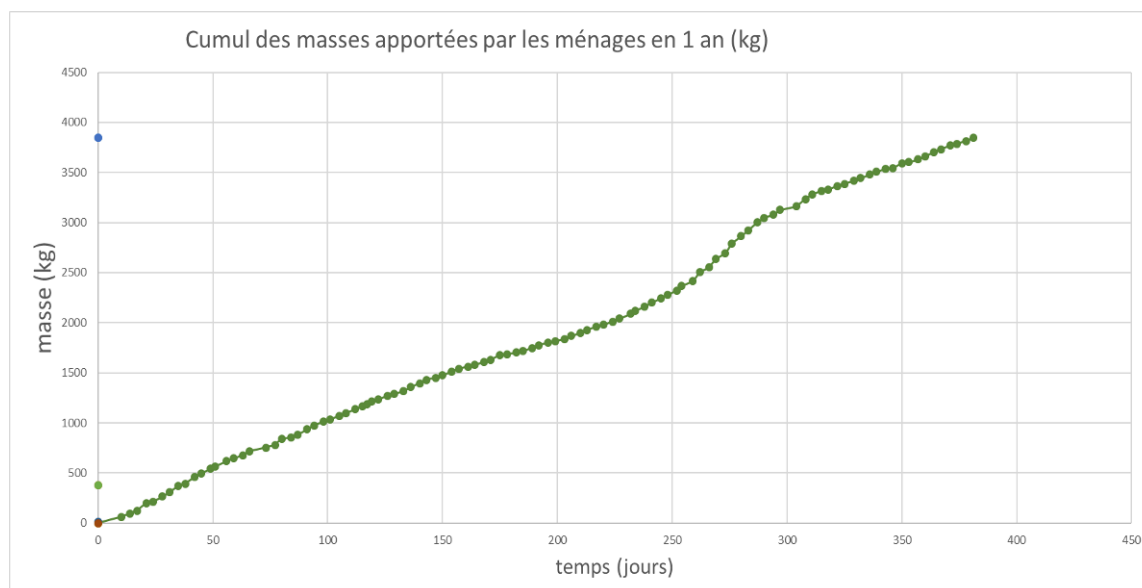


Figure 22 : Cumul des masses de résidus apportés par les ménages

En l'espace d'un an, 3 bacs de 2 à 3 m³ ont été remplis. Un rythme de remplissage de 3 à 4 mois par bac s'est maintenu pendant tout le programme.

Près de 4 tonnes de résidus ont été apportées, ce qui correspond à une moyenne de 115 g de résidus par personne et par jour (Tableau 9). Si l'on ne prend en compte que les ménages ayant apporté régulièrement leurs résidus, on passe à une moyenne de 127 g de résidus. Comme nous l'avons vu au paragraphe A.1.3.3.1., la quantité d'excréments dans les pays en développement varie entre 75 et 520 g de matière fraîche par personne et par jour, avec une médiane de 250 g, plus élevée que dans les pays développés où peu de fibres sont consommées. Cette large plage de valeurs reflète la diversité des alimentations et des quantités consommées selon le niveau de vie des habitants. La valeur basse obtenue ici (d'autant plus qu'il s'agit du mélange fèces + litière) n'est pas étonnante au regard du niveau de pauvreté des habitants de Grande Plaine. Ces valeurs sont également faibles par rapport aux quantités de résidus collectés par SOIL, qui nous avaient amenés à une estimation de 10 tonnes de résidus par an.

Tableau 9 : Quantité totale de résidus et moyenne par personne et par jour

	23 familles	14 familles
	88 personnes	59 personnes
Masse totale collectée (kg)	3846	2855
Nombre de jours	381	381
Masse moyenne par jour (kg)	10,1	7,5
Masse moyenne par jour et par personne (kg)	0,115	0,127

Nous avons observé au cours des premiers mois les courbes individuelles de production de résidus. Cela nous a permis de constater des irrégularités que nous avons cherché à comprendre. La plupart étaient dues à des absences fréquentes hors du domicile pendant plusieurs semaines. C'est la raison pour laquelle nous avons corrigé les données du tableau ci-dessus.

Nous avons souhaité faire également un suivi de la quantité de litière utilisée par les ménages. Par différence entre la quantité de résidus et de litière, nous avons ainsi pu approcher d'une autre manière la quantité de fèces par individu (Tableau 10). On voit ainsi, à partir d'un suivi de 3 semaines auprès de 13 ménages (la moitié de notre population), qu'il faut compter un peu moins de 100g de litière par jour et par personne et que la litière ajoutée correspond à 40% de la masse des résidus. On arrive ici à une moyenne de 231g de résidus par jour et par personne et 140g de fèces, chiffres deux fois supérieurs à ceux issus du suivi sur un an de toute la population concernée et proche de nos données de dimensionnement issues des résultats de SOIL. Il est possible qu'il y ait des variations saisonnières liées à un mode d'alimentation différent. Il est également possible que des erreurs de lecture ou de report des valeurs de pesée pendant la première année soient à l'origine de cet écart. Cela démontre l'importance de faire une évaluation précise des quantités de résidus attendues, représentative d'une année, si l'on doit dimensionner une installation importante.

Tableau 10 : Résultats de la mesure sur 3 semaines des quantités de litières utilisées et de résidus produits

Ménage	Nombre habitants	Mesures sur 7 jours			Mesures sur 7 jours			Mesures sur 7 jours			Moyenne par semaine		
		Masse de structurant utilisée (kg) Ms	Masse de résidus (kg) Mr	Masse de fèces (kg) Mf = Mr - Ms	Masse de structurant utilisée (kg) Ms	Masse de résidus (kg) Mr	Masse de fèces (kg) Mf = Mr - Ms	Masse de structurant utilisée (kg) Ms	Masse de résidus (kg) Mr	Masse de fèces (kg) Mf = Mr - Ms	Masse de structurant utilisée (kg) Ms	Masse de résidus (kg) Mr	Masse de fèces (kg) Mf = Mr - Ms
DL 1	7	2,2	8,8	6,6	4,0	9,6	5,6	4,7	8,9	4,3	3,6	9,1	5,5
JE 2	6	2,3	6,4	4,2	3,5	7,5	3,9	2,6	4,9	2,3	2,8	6,3	3,5
MJL 3	2	1,3	4,7	3,5	1,9	5,4	3,6	1,8	3,8	2,1	1,6	4,6	3,0
MD 4	3	1,9	4,5	2,6	1,7	4,5	2,8	2,7	5,6	2,9	2,1	4,9	2,8
LG 5	5	2,7	8,9	6,2	2,8	9,2	6,4	5,6	19,3	13,8	3,7	12,5	8,8
LL 6	4	2,1	7,1	5,0	2,0	7,1	5,2	2,7	7,8	5,1	2,3	7,3	5,1
RC 7	4	2,0	6,6	4,6	2,6	6,3	3,7	3,4	7,1	3,7	2,7	6,7	4,0
OP 8	4	2,2	7,2	5,0	2,6	8,5	6,0	3,4	7,2	3,8	2,7	7,6	4,9
IC 9	4	2,5	4,8	2,3	3,6	4,5	1,0	2,2	3,7	1,5	2,8	4,3	1,6
JC 10	1	1,2	1,9	0,7	1,8	3,3	1,5	2,0	2,6	0,6	1,6	2,6	0,9
TS 11	4	2,0	4,2	2,2	2,3	4,5	2,3	2,0	4,5	2,5	2,1	4,4	2,3
MD 12	2	1,3	3,9	2,6	1,5	4,8	3,4	2,0	4,2	2,2	1,6	4,3	2,7
Total	46	23,5	68,8	45,2	29,9	75,1	45,1	34,9	79,4	44,5	29,5	74,4	45,0
Moyenne par habitant et par jour (g)		73	214	140	93	233	140	108	247	138	91	231	140
Moyenne par habitant et par jour (%)		34%	100%	66%	40%	100%	60%	44%	100%	56%	40%	100%	60%

B.2.2.5 Enquête après 1 an de fonctionnement

B.2.2.5.1 Enquête auprès des ménages utilisateurs

Après environ 1 an de fonctionnement de la filière, nous avons réalisé une enquête auprès des 25 ménages équipés de TSLB. Cette enquête comportait des questions sur la qualité de vie et les changements observés depuis l'installation de la TSLB.

On compte 150 usagers permanents (57 de plus les week-ends dont la plupart sont des jeunes scolarisés à l'extérieur), soit de l'ordre de 6 personnes en semaine dans chaque habitation, avec des valeurs allant de 1 à 13. 96 enfants sont scolarisés. La répartition des âges est la suivante (Figure 23) :

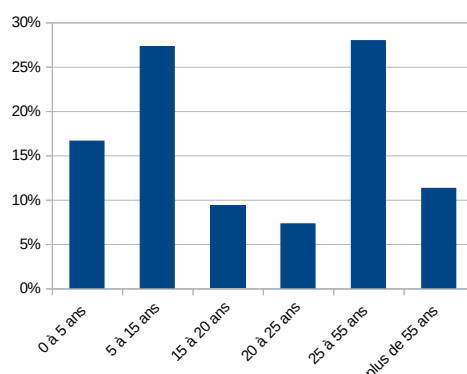


Figure 23 : Répartition des usagers par âge

Les adultes sont en majorité des agriculteurs (65%), les autres étant commerçants, artisans, enseignants ou sans profession.

Questionnés sur leurs pratiques en matière de défécation avant la mise en place des TSLB, 21 disent qu'ils disposaient d'une latrine sommaire ou d'un simple trou dans le jardin et 4 qu'ils pratiquaient la défécation en plein air. Concernant les avantages des TSLB, ils mettent en évidence la simplicité d'utilisation, la protection contre les maladies, le faible coût et le fait qu'il n'y a pas besoin d'aller à l'extérieur. Aucun n'a pu identifier spontanément d'inconvénient. 81 % d'entre eux ont installé la TSLB dans une petite pièce attenante à la maison, les autres directement dans une pièce de la maison. Les TSLB sont utilisées par tous les membres de la famille dans 81 % des cas. Ceux qui ne l'utilisent pas évoquent des questions de mauvaise compréhension, de crainte ou d'âge (pour les plus petits). 88 % utilisent de la sciure de bois (principalement de frêne) comme litière absorbante, les autres de la bagasse de canne à sucre. Selon les familles, ils utilisent 10 à 40 litres de litière par semaine, 1 à 3 poignées chaque fois. Seulement 30 % utilisent l'urine pour arroser le jardin, les 70 % restants la jettent.

Cette enquête auprès de la totalité de la population concernée montre que l'implantation des TSLB est une réussite un an après leur mise en place en termes d'acceptabilité.

B.2.2.5.2 Enquête auprès des enfants de l'école équipée de TSLB

Nous avons mené une enquête auprès d'un échantillon de 50 enfants de l'école Jean Marie Vincent de Grande Plaine après plusieurs mois d'utilisation du bloc de 4 TSLB installées.

L'échantillon était constitué de la sorte (Tableau 11) :

Tableau 11 : Constitution de l'échantillon pour l'enquête école

Classe	Nombre de filles	Nombre de garçons	Tranche d'âge
1 ^{ère} année fondamentale	6	3	6 à 10 ans
2 ^{ème} année fondamentale	5	3	8 à 12 ans
3 ^{ème} année fondamentale	5	4	9 à 15 ans
4 ^{ème} année fondamentale	6	3	9 à 18 ans
5 ^{ème} année fondamentale	5	3	13 à 17 ans
6 ^{ème} année fondamentale	2	5	12 à 16 ans
Total :	29	21	

NB : la 1^{ère} année fondamentale est équivalente au cours préparatoire en France

Sur les 50 enfants, 6 garçons et 5 filles disent ne pas utiliser les nouvelles toilettes (22%).

Parmi les 39 qui les utilisent, 25 font pipi, 37 font caca. Les 14 qui ne font pas pipi sont 6 filles et 8 garçons. Les 2 qui ne font pas caca sont 2 filles. Tous apprécient beaucoup ces nouvelles toilettes.

En moyenne, ils vont aux toilettes 1,8 fois par jour (1 à 3 fois, 1 seul 5 fois).

Les 11 qui n'utilisent pas les toilettes le font sans raison particulière (3), parce qu'ils n'ont pas besoin (3), parce que ce n'est pas propre ou avec des cafards (3), parce qu'il n'aime pas (1), sans réponse (1).

13 des 50 enfants ont des TSLB chez eux, 24 une latrine à fosse, 2 font dans la savane, 2 n'ont pas une réponse claire.

21 enfants qui n'ont pas de TSLB chez eux préfèrent les TSLB, 12 sur les 13 qui ont une TSLB aussi.

33 enfants (66%) préfèrent les TSLB contre 17 qui préfèrent les latrines. Parmi ces 17, les raisons invoquées sont l'habitude des latrines (8), le manque de propreté (5), la peur ou difficulté d'adaptation (3) ou pas de raison (1).

Les enfants ont été beaucoup moins associés que les ménages adultes à la sensibilisation amont, ce qui peut expliquer la réticence de certains à accepter cette nouveauté. Pour les autres, c'est au contraire cette nouveauté qui leur plaît. Il aurait sans doute été utile de procéder avec les enfants comme avec les adultes, ne serait-ce que pour les initier à l'approche communautaire et participative.

B.2.2.6 Tentatives de réplique

Nous avons prévu de lancer l'expérimentation sur deux sites dans le cadre de nos travaux, pour un total de 50 ménages, mais nous avons souhaité attendre les résultats concluants du 1^{er} site avant de travailler sur un deuxième. Plusieurs communautés de la commune de Gros-Morne, comme Kmas, Lacorne, Tijardin, Badenn, et Kalabat Moulin, se sont montrées au départ intéressées à l'accueillir. La distance moyenne entre Grande Plaine, où se trouve le premier site, et ces communautés intéressées, est de l'ordre de 10 km. Au cours de la période de sensibilisation, les ménages ont été invités à venir visiter les toilettes sèches à litière en fonction à Grande Plaine.

Après divers échanges, le choix s'est porté sur Kalabat Moulin, la seule communauté du groupe répondant aux critères de sélection, qui étaient :

- soit d'accepter un mode de gestion communautaire porté par un leader ou un groupe, de proposer un terrain pour le traitement des résidus, de rechercher des litières absorbantes ;
- soit d'accepter de payer pour un service qui serait privé.

Nous avons reporté dans le Tableau 12 les raisons qui ont poussé à ne pas retenir la candidature des autres communautés, après plusieurs séances de sensibilisation à l'hygiène et à l'utilisation des toilettes, suite aux rencontres de focus groupe réalisées au sein de chacune.

Tableau 12 : Raisons ayant justifié l'abandon de candidatures à la réplication

Localité	Raisons
Tijardin	Pas d'implication pour une gestion communautaire Manque de volonté pour récupérer les absorbants sur 300 mètres Refus de contribuer pour le service
Kmas	Absence de leader capable d'animer le processus Refus de contribuer pour le service, dû à un passé d'assisté dans le domaine Impossibilité de trouver un terrain pour le compostage
Badenn	Absence de leader capable d'animer le processus Indisponibilité des ménages pour participer à des réunions En attente de don de toilettes
Lacorne	Absence de leader capable d'animer le processus Refus de contribuer pour le service, dû à un passé d'assisté dans le domaine Impossibilité de trouver un terrain pour le compostage

Kalabat-Moulin est la dernière communauté à nous avoir sollicités. Ce sont les ménages du groupe ZANA de Grande Plaine qui assurent toutes les démarches relatives à la réplication,

en accord avec la leader locale. Le terrain devant accueillir le site de traitement des résidus a été mis à disposition dès la première séance de travail. Nous avons suivi la même démarche que pour le premier site. Les toilettes ont été fabriquées par 3 artisans locaux formés dans le cadre de notre action par l'artisan formateur qui a travaillé à Grande Plaine. Les ménages se montrent a priori très réceptifs en termes d'adoption des TSLB, sans doute car aucun projet de toilettes n'y a encore été mené alors que les autres localités ont bénéficié gratuitement de latrines financées par des ONG.

B.3 Étude relative au traitement des résidus

Après nous être assurés de l'adhésion des ménages de Grande Plaine au dispositif en suivant les apports pendant 1 an, nous avons entrepris un programme expérimental afin principalement d'optimiser les conditions de traitement des résidus solides en identifiant celles assurant le meilleur compromis entre des conditions opératoires simples et une hygiénisation satisfaisante. Il a porté sur :

- la caractérisation des litières utilisées, des résidus frais et d'échantillons de compost ;
- le suivi passif de l'évolution de la température dans les bacs du site de compostage, correspondant à un traitement collectif des résidus ;
- des essais en petits pilotes, selon différentes configurations, afin de simuler un compostage qui se ferait à l'échelle de chaque ménage : suivi de la température et caractérisation microbiologique des résidus.

En effet, le compostage collectif présente des contraintes et n'est pas forcément justifié en zone rurale, où chacun dispose d'un jardin. Cependant, les risques sanitaires liés à l'utilisation de résidus de toilettes qui seraient mal hygiénisés pourraient contrecarrer une telle possibilité.

Nous n'avons pas travaillé sur la valorisation de l'urine, dans la mesure où de nombreux travaux sur le sujet existent et que les conditions de leur hygiénisation et de leur utilisation sont bien connues (UDERT et al., 2003 ; WINKER et al., 2009). Nous avons conseillé aux ménages de la stocker dans des bidons sombres au soleil pendant au moins un mois et de la diluer à 1/10 pour l'arrosage. Tous ne l'utilisant pas, nous avons prévu d'organiser un recueil possible sur le site de compostage et de l'utiliser pour arroser le compost ou la confier à des agriculteurs intéressés pour sa valorisation comme engrais liquide.

B.3.1 Matériel et méthodes

Nous allons présenter ici les protocoles d'échantillonnage et d'analyse des litières, résidus et composts, de suivi de température et de conduite des essais en pilotes.

B.3.1.1 Méthodes d'échantillonnage

Nous avons accordé une importance particulière à l'élaboration des protocoles d'échantillonnage, afin d'obtenir des échantillons bien représentatifs des matrices que nous cherchions à caractériser ou à mettre en place dans les pilotes. Ces protocoles ont été bien détaillés et expliqués pour que les opérateurs en charge des prélèvements puissent les faire en bonne compréhension.

B.3.1.1.1 Échantillonnage des litières

La nature des litières est susceptible de jouer un rôle important sur toute la chaîne d'assainissement, principalement :

- Au niveau de leur collecte et de leur préparation (disponibilité du gisement, volume occupé, dimension des particules, nécessité ou non d'un broyage) ;
- Au niveau des toilettes, pour leur pouvoir masquant des odeurs, des excréments, sur la quantité à ajouter ;
- Au niveau du traitement, pour la porosité (et donc la possibilité de passage d'air) qu'elles confèrent aux résidus, pour l'effet synergique ou inhibiteur qu'elles peuvent avoir sur le processus de compostage.

Il nous est donc paru important de caractériser les litières disponibles à Grande Plaine pour associer les résultats obtenus à leurs caractéristiques propres.

La préparation des litières étant du ressort des utilisateurs de TLB, leurs caractéristiques peuvent être différentes. Ne pouvant caractériser autant de litières qu'il y a d'utilisateurs, nous les avons échantillonnées de la manière suivante :

1. Prélèvement d'environ 4 litres de litière chez chaque ménage, en prenant la peine de vider et mélanger le contenu du contenant de litière (sac ou seau) sur une bâche plastique et en prélevant en 4 points différents du tas ;
2. Par famille de litière (bagasse de canne à sucre, sciure de frêne ou sciure de pin), déversement des prélèvements sur une bâche plastique au sol ;
3. Homogénéisation de l'échantillon à la pelle ;

4. Quartage et prélèvement de 3 sous-échantillons en différents points de chaque quart ;
5. Mélange de tous les prélèvements pour constituer l'échantillon de laboratoire, de sorte à avoir une quantité de matière suffisante pour les analyses à effectuer ;
6. Mise en sac plastique fermé de manière hermétique et envoi au laboratoire.

B.3.1.1.2 Échantillonnage des résidus frais

L'échantillonnage des résidus frais se fait lors de leur apport par les ménages sur le site de compostage :

1. Déversement au sol sur une bâche plastique du contenu des seaux, par nature de litière si besoin ;
2. A l'aide d'outils, masques et gants, homogénéisation du tas et étalement au sol sous forme de rectangle ;
3. Séparation en 6 parts et prélèvement à la truelle :
 - de 3 sous-échantillons par part, de sorte à avoir une quantité de matière suffisante pour les analyses à effectuer,
 - ou par pelletage fractionné de chaque part lorsqu'il s'agit de remplir les pilotes, afin que le contenu des pilotes soit homogène ;
4. Mélange de tous les prélèvements pour constituer l'échantillon de laboratoire, de sorte à avoir une quantité de matière suffisante pour les analyses à effectuer ou confection d'autant de tas qu'il y a de pilotes à remplir ;
5. Mise en sacs plastiques fermés de manière hermétique et en glacière pour les échantillons à envoyer au laboratoire (envoi dans la journée).

B.3.1.1.3 Échantillonnage des résidus en pilotes

Des prélèvements ont été effectués au cours des essais en pilotes pour étudier l'évolution des résidus au cours du traitement. Afin de ne pas trop perturber le déroulement des essais, nous avons prélevé la juste quantité nécessaire chaque fois (environ 1 litre). Les prélèvements d'une petite truelle ont été faits l'un au cœur du pilote et en 3 autres points

situés à trois profondeurs différentes et trois distances intermédiaires du bord du pilote. Les quatre prélèvements ont été mis en sacs fermés de manière hermétique et en glacière pour envoi dans la journée au laboratoire.

B.3.1.1.4 Échantillonnage du compost

Nous avons prélevé des échantillons de compost représentatifs de différents âges, afin de voir comment leurs caractéristiques évoluaient au cours du temps et ainsi déterminer à partir de quel stade il était possible de les utiliser, selon en particulier leur état d'hygiénisation, la stabilité de la matière organique, leurs caractéristiques agronomiques.

Pour cela, nous avons prélevé des échantillons au sein des bacs et des pilotes de compostage, dans des zones correspondant à 3, 6, 9, 12, 15 et 36 mois de traitement. Nous avons chaque fois prélevé en 3 points, à l'aide d'une truelle, une quantité suffisante pour former un échantillon d'environ 5 litres.

B.3.1.2 Protocoles d'analyse

Nous indiquons ici les grands principes des protocoles d'analyse utilisés. Nous souhaitons suivre également la teneur en dioxygène et dioxyde de carbone au sein des bacs et des pilotes mais l'appareil n'a jamais fonctionné correctement.

B.3.1.2.1 Mesure de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la masse d'une matière par unité de volume. Elle peut s'exprimer en g ou kg/L ou en t/m³ par exemple. Elle peut se mesurer simplement en remplissant un récipient d'un volume connu, en le pesant plein (Mt) et à vide (Mr). On calcule ainsi la masse volumique apparente :

$$\rho = (M_t - M_r) / V_{app}$$

Nous avons utilisé un pot de 4 litres et un seau de 20 litres pour déterminer les masses volumiques apparentes. Nous les avons remplis au maximum avec de l'eau et pesés à plein et à vide. Nous les avons utilisés ensuite pour mesurer la masse volumique des litières et des résidus, sans aucun tassement. Pour nos calculs, la masse volumique de l'eau a été considérée égale à 1 kg/L. Les balances sont de précision $\pm 10g$ pour la balance utilisée pour le pot de 4 L et de $\pm 100g$ pour la balance utilisée pour le seau de 20 kg.

B.3.1.2.2 Mesure de la teneur en matière sèche

La teneur en matière sèche (MS) des échantillons est déterminée selon la norme NF ISO 11465 AFNOR X 90-029 (1994). Qualité des sols - Détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau – Méthode gravimétrique.

La teneur en MS est déterminée à partir de la perte de masse d'un échantillon après passage en étuve à 105°C pendant 24 heures. Elle est déterminée en triplicats dans des creusets préalablement séchés et pesés, sur des masses d'environ 50 g d'échantillon. Ces échantillons sont obtenus par quartages successifs. Le calcul du taux de MS est fait par rapport à la Masse Humide (MH). La teneur en eau est égale à $100\% - \%MS$.

B.3.1.2.3 Mesure de la matière organique totale et du taux de cendres

Il s'agit de déterminer le Résidu sec Minéral (RM) et la Matière Organique Totale (MOT) dans un échantillon solide. La méthode utilisée s'inspire de la procédure décrite dans le mémento technique de l'eau de Degrémont.

La teneur en MOT est déterminée par mesure de la perte de masse de l'échantillon sec lors de sa calcination à 550°C dans un four de combustion pendant 4 heures. La masse de MOT est obtenue par différence entre la masse de matière sèche avant calcination et la masse de matière minérale résiduelle après calcination. Elle a été déterminée en triplicats sur les échantillons ayant permis la détermination de la teneur en MS. La teneur en cendres, ou résidu minéral, est égale à $100\% - \%MOT$.

B.3.1.2.4 Mesure de la Capacité de Rétention en Eau (CRE)

La capacité de rétention en eau « CRE » peut être assimilée à la quantité maximale d'eau capillaire retenue par le milieu. Elle correspond donc à la saturation d'équilibre au-dessus de laquelle l'eau est drainée sous l'effet des forces de gravité.

Le mode opératoire que nous avons utilisé est le suivant : immersion de 100 g d'échantillon brut (dont la teneur en MS est connue) dans l'eau pendant 2 heures, mise en place de l'échantillon dans un Büchner muni d'un filtre en Bidim, pesée de l'ensemble, mise en place au-dessus d'un erlenmeyer. Après 24h de ressuyage, l'ensemble « Büchner + filtre + échantillon » est pesé pour déterminer la masse d'eau qui a été retenue.

La capacité de rétention en eau du matériau est exprimée en % par rapport à la masse de matière sèche.

B.3.1.2.5 Mesure de la Capacité d'Auto-Echauffement (CAE)

La maturité du compost fait l'objet d'un suivi par détermination du degré de décomposition « Rottegrad » par le test d'échauffement naturel suivant le protocole de l'association fédérale allemande de qualité du compost (BGK – 1994).

La mesure de l'échauffement naturel de la matière organique placée dans un récipient isotherme type Dewar permet d'évaluer le degré de décomposition du compost. Le test doit être effectué avec un taux d'humidité optimal. Un produit trop sec ou trop humide conduit à un échauffement moindre, la capacité d'échauffement naturel sera donc sous-estimée et la maturité surestimée. Après ajustement du taux d'humidité au niveau de la CRE, les récipients Dewar sont remplis jusqu'au bord avec le compost. Les capteurs de mesure de la température sont placés dans le tiers inférieur du récipient. Les récipients sont mis (ouverts) sur la table à température ambiante (salle climatisée à environ 20 °C). Le maximum de la température est normalement atteint après 2 à 5 jours. L'essai est terminé après atteinte du maximum de la température et redescente, au plus tard après 10 jours. Deux mesures par jour, avec un écart de temps d'au moins 8 heures, sont à effectuer.

Le degré de décomposition (de maturité) est déterminé sur la base de l'écart maximal de température entre la température ambiante et celle du compost ($\Delta T_{\max}$).

	Auto-échauffement ($\Delta T_{\max}$).	Qualité de la matière
Degré de décomposition I	: 40 - 50 et > 50°C	Biodégradabilité très élevée
Degré de décomposition II	: 30 - 40 °C	Biodégradabilité élevée
Degré de décomposition III	: 20 - 30 °C	Biodégradabilité moyenne
Degré de décomposition IV	: 10 - 20 °C	Faible biodégradabilité
Degré de décomposition V	: 0 - 10 °C	Très faible biodégradabilité

Le compost avec les degrés de décompositions II et III est déclaré comme compost frais, le compost avec les degrés de décomposition IV et V comme compost mûr.

B.3.1.2.6 Test de lixiviation sur échantillon solide pour analyse de la phase liquide

Un test de lixiviation, inspiré de la norme EN 12457-2 (2002) « Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues », a été effectué sur les litières, les résidus frais et les résidus prélevés dans les pilotes. Ceci a permis de déterminer les propriétés globales des matières solides (pH, conductivité, fraction soluble, charge carbonée soluble exprimée en DCO, charge carbonée soluble et biodégradable exprimée en DBO5) et de déterminer la stabilité biologique des matrices solides par le calcul du rapport DBO5/DCO. Le ratio liquide/solide (L/S_{MS}) est de 10 en tenant compte de l'humidité initiale de l'échantillon solide (qui est à vérifier avant le lancement des essais de lixiviation). En l'absence d'appareils d'agitation rotative électriques, les flacons contenant les substrats dans l'eau étaient agités manuellement une minute toutes les 15 minutes pendant 2h, favorisant l'homogénéisation de la suspension solide-liquide et l'extraction des matières solubles et en suspension. Après 2h d'agitation à température ambiante, les suspensions étaient filtrées sous vide (Büchner + Fiole à Vide) sur filtre en fibre de verre WHATMAN (1,2 μm) puis à 0,45 μm pour les mesures de DCO et de DBO.

B.3.1.2.7 Mesure du pH et de la conductivité de la solution

Le pH et la conductivité ont été mesurés à l'aide d'un multimètre Hach sur certains échantillons.

B.3.1.2.8 Mesure de la fraction soluble ou résidu sec

Après filtration à 1,2 μm sur filtre GFC Whatmann, nous récupérons environ 400 mL du filtrat et ajoutons 100 mL dans trois béchers en verre sec tarés. Les béchers étaient pesés avec les échantillons puis mis dans une étuve à 105°C jusqu'à évaporation totale. Les béchers étaient ensuite pesés et la masse de FS déterminée par différence entre la tare du bécher et le bécher + échantillon séché. La concentration en FS peut alors être exprimée en mg/L.

B.3.1.2.9 Mesure de la DCO soluble

La Demande Chimique en Oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène, exprimée en mg, nécessaire à l'oxydation chimique des matières organiques contenues dans un litre de solution (unité : mg.L^{-1}). Cette mesure permet la détermination de la charge organique soluble présente dans les échantillons solides. L'oxydation chimique est effectuée avec du

dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en milieu acide (acide sulfurique, H_2SO_4). 1 mole de dichromate ($Cr_2O_7^{2-}$) est équivalente à 1,5 mole d'oxygène (O_2).

La détermination de la Demande Chimique en Oxygène DCO d'un échantillon liquide par la méthode Hach repose sur l'utilisation de tubes colorimétriques Hach dans lesquels sont ajoutés à un mélange réactionnel un échantillon de la solution à analyser. Il s'agit d'un dosage colorimétrique permettant un suivi photométrique. Les mesures sont faites en triplicats.

La difficulté majeure est de choisir la bonne gamme de tube, en fonction de la charge organique de la solution à analyser, sachant que le coût de chaque tube est élevé. Il a donc été nécessaire de réaliser des essais préliminaires sur les litières et sur les résidus.

Les mesures de DCO sont effectuées sur échantillons liquides préalablement filtrés (1,2 μm puis 0,45 μm), correspondant ainsi à la détermination de la DCO soluble.

B.3.1.2.10 Mesure de la DBO soluble

La biodégradabilité aérobie d'un échantillon liquide peut être évaluée par mesure de la demande biologique ou biochimique en oxygène (DBO), selon une méthode normalisée (EN 1899-1.1998 et EN 1899-2.1998) permettant de déterminer la DBO d'une eau sur de courtes périodes d'incubation.

La consommation en oxygène est suivie par mesure manométrique de la dépression créée dans le flacon, le dioxyde de carbone produit au cours de la dégradation aérobie étant piégé par de la soude ou de la potasse. Ainsi le manomètre enregistre la dépression liée à la consommation d'oxygène.

Les mesures de DBO durent en général 5 jours (mesure de la DBO_5), mais peuvent être plus longues selon l'évolution de la courbe de consommation de l'oxygène. Les essais sont réalisés à l'obscurité et, dans la mesure du possible, à la température standard de 20°C (incubateur thermostaté à $20 \pm 1^\circ C$), sous agitation magnétique. Si cela est impossible, la température d'essai doit être connue pour exploiter les données de suivi.

Si les échantillons ne sont pas naturellementensemencés en micro-organismes, il est nécessaire d'ajouter un inoculum qui peut être préparé au préalable. En ce qui nous concerne, les essais ont été faits sans ajout d'inoculum bactérien.

Pour l'uniformisation des essais, un volume de 100 mL a été mis dans les bouteilles. Ce volume l'échantillon à analyser est dilué dans de l'eau pour ajuster la DBO à la capacité de la fiole. On ajoute également un **inhibiteur de la nitrification** : la nitrification peut en effet perturber la mesure de la consommation d'oxygène liée à la consommation du carbone organique. On ajoute donc 4 gouttes d'allyl-thio-urée à 5 g/L.

L'échantillon liquide à analyser doit être filtré à 1,2 µm puis à 0,45 µm, correspondant ainsi à la mesure de la DBO₅ soluble. Les essais sont faits en triplicats.

Les résultats de consommation en oxygène sont exprimés en mg d'O₂ par kg de MS en passant par la relation suivante :

$$\text{mgO}_2/\text{litre} = \frac{\text{MM}(\text{O}_2)}{R.T} * \frac{V_g}{V_x} * \Delta p$$

avec :

MM(O₂) = Masse Molaire oxygène (mg.mol⁻¹) = 32000 mg.mol⁻¹ ;

V_g = Volume de gaz disponible dans le flacon (L) ;

R = constante des gaz parfait (83,14 L.mbar.mol⁻¹.K⁻¹) ;

T = température (°K) ;

V_x = Volume d'échantillon (L) ;

Δp = variation de pression dans la bouteille (mbar)

La biodégradation est suivie par la détermination de la consommation en oxygène (déterminée par mesure de la consommation en oxygène ou de la dépression dans les flacons). Le pourcentage de biodégradation est calculé à partir de la valeur moyenne des mesures de DBO₅ soluble et de la demande théorique en oxygène correspondant à la DCO soluble.

B.3.1.2.11 Mesure du nombre de colonies d'*Escherichia coli*

Dans le cadre des essais expérimentaux que nous souhaitons réaliser pour étudier l'hygiénisation des résidus des toilettes sèches à litière, nous devons sélectionner un ou deux indicateur(s) pertinent(s) dont la détermination de la teneur pouvait être faite en Haïti. Après de nombreux échanges avec les laboratoires microbiologiques locaux, il s'est avéré qu'aucun d'entre eux n'était à même de fournir des résultats quantitatifs, seules la présence

ou l'absence de germes pouvant être déterminée. Or il était important pour nous de pouvoir évaluer l'hygiénisation au cours du traitement par compostage afin d'optimiser les modalités de celui-ci (température, aération, humidité, durée).

Sur la base des résultats bibliographiques, nous avons décidé de suivre en Haïti un seul indicateur biologique, *Escherichia coli*, indicateur recommandé car cette bactérie est thermorésistante et couramment présente dans les excréta. Cette bactérie est en outre non pathogène, ce qui réduit les risques en travaillant dans un laboratoire ne disposant pas de toutes les sécurités permettant de maîtriser les risques de contamination. Pour dénombrer cette bactérie dans nos matrices solides, nous avons équipé le Laboratoire d'Analyse de la Qualité des Eaux (LAQUE) de l'Université Quisqueya et mis au point la technique analytique. Le protocole mis en œuvre a été établi à partir de la norme québécoise DR-12-SCA-02 (lignes directrices concernant les travaux analytiques en microbiologie) et les recommandations pour déterminer spécifiquement *E. coli*. Un technicien de laboratoire a été recruté pour effectuer les analyses.

Des dilutions préparées à partir de l'eau de lixiviation précédemment obtenue ont été effectuées dans une eau bi-distillée contenant du KH_2PO_4 et du MgCl_2 . Les solutions sont filtrées sur des membranes filtrantes qui sont déposées sur un milieu m-coli bleu, sélectif pour *E. coli*, et incubées 24h à $37 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Les colonies sont alors comptées au microscope optique.

B.3.1.2.12 Analyse microbiologique approfondie des résidus solides

Les analyses de suivi des caractéristiques ont été complétées par des analyses microbiologiques faites en France de six échantillons collectés sur les différents essais de compostage réalisés sur la plateforme (Tableau 13).

Tableau 13 : Liste des échantillons de compost analysés

Compost 3 mois	E1	3 mois
Compost 6 mois	E2	6 mois
Compost 9 mois	E3	9 mois
2ème série de pilote	E4	12 mois
1ère série de pilote	E5	15 mois
Les casiers	E6	36 mois

Plusieurs indicateurs biologiques ont été sélectionnés pour leur pertinence dans le suivi de l'hygiénisation de biomasses organiques au cours d'un cycle de compostage (NF U44-051

sur les amendements organiques) et complétés par d'autres. Les agents biologiques et les protocoles opératoires sont décrits dans le Tableau 14 suivant. Les analyses ont été sélectionnées avec les conseils de Mme Catherine Loysance-Paroux et sur la base des travaux réalisés au cours du programme de recherche portant sur la « Caractérisation des pratiques et des impacts de la gestion des sous-produits de toilettes sèches mobiles » (BRUN et al., 2017). Les analyses biologiques ont été sous-traitées au laboratoire LABOCEA – site de Fougère – France.

Tableau 14 : Liste des indicateurs biologiques et méthodes sélectionnées pour le suivi de l'hygiénisation des résidus solides

Paramètres	Méthodes	Unités
<i>Clostridium perfringens</i>	Culture NF EN ISO 7937	Ufc.g ⁻¹ MS
Entérocoques	Entérocoques microplaques NF EN ISO 7899-1	NPP/10 g _{MS}
<i>Escherichia coli</i>	<i>Escherichia coli</i> microplaques	NPP/10 g _{MS}
<i>Salmonella</i>	Salmonella sur boues XP X33-018	NPP/100 mL
Oeufs d'Helminthes viables /10g MS selon EPA	Oeufs d'Helminthes viables /10g MS Méthode EPA	/10 g _{MS}
<i>Aspergillus</i>		
Hépatite A		

Ufc : unité formant colonie

NPP : Nombre le Plus Probable

B.3.1.2.13 Analyses agronomiques des résidus solides

Les analyses ont été sélectionnées sur la base de la norme réglementaire NF U44-051 (2006) sur les amendements organiques. Celles-ci ont été sous-traitées au laboratoire LABOCEA – site de Fougère – France. Les paramètres suivis et les méthodes d'analyses sont présentés dans le Tableau 15 suivant.

Tableau 15 : Analyses agronomiques des résidus au cours et en fin de cycle de compostage

Paramètres	Méthodes	Unités
Matière sèche (MS)	Matière sèche (Boue ; Sédiment) NF EN ISO/IEC 17025:2005 COFRAC 1-1488	% _{MH}
Matière organique (MV)	Matière volatile Méthode Interne - adaptée de XP P 94-04	% _{MS}
Azote selon Kjeldahl (NTK)	Azote selon Kjeldahl ISO/IEC 17025:2005 COFRAC 1-1488 Minéralisation et volumétrie - NF EN 13342	g.kg ⁻¹ _{MS}
Rapport C/N	Rapport COT/NTK	-
Ammonium extrait au KCL (NH ₄)	Ammonium extrait au KCl Dosage selon NFT 90-015-2 - spectrométrie UV-V	g.kg ⁻¹ _{MS}
Carbone organique total (COT) par combustion sèche	Carbone Organique Total par Combustion	mg.kg ⁻¹ _{MS}
Oxyde de magnésium (MgO)	Magnésium (MgO)	mg.kg ⁻¹ _{MS}
Oxyde de potassium (K ₂ O)	Potassium (K ₂ O)	mg.kg ⁻¹ _{MS}
Phosphore total (P ₂ O ₅)	Phosphore (P ₂ O ₅)	mg.kg ⁻¹ _{MS}

B.3.1.3 Suivi de la température dans les bacs et pilotes de compostage

Le principal et plus simple outil pour suivre sur le terrain le déroulement d'un processus de compostage est le thermomètre, qui peut refléter le niveau de biodégradation du substrat et/ou d'oxygène dans le milieu. En effet, une montée en température indique une phase active de biodégradation aérobie exothermique et une diminution, soit la fin de la fermentation, soit un manque d'oxygène et/ou d'eau. C'est en mélangeant ou agitant le substrat pour redonner de l'oxygène voire réhydrater si besoin, lorsque l'on constate une baisse de température, que l'on peut savoir à quel stade en est la biodégradation.

Pour nos essais, nous avons utilisé un thermomètre digital AGROS – AME – 01 – Skywatch muni d'une sonde de pénétration de 80 cm et 10 mm de diamètre (Figure 24).



Figure 24 : Thermomètre Skywatch utilisé pour le suivi de la température

Dans les bacs de compostage de 2 à 3 m³ et dans les pilotes de 300 litres, la température était mesurée chaque jour en 3 points différents : au centre, en partie basse proche de la périphérie et en partie haute (à 20 cm de profondeur), à un demi rayon du centre. C'est la moyenne de ces trois mesures qui a été prise comme température moyenne au sein d'un bac ou d'un pilote.

Dans les pilotes de 100 litres, la température était mesurée chaque jour en 2 points différents de chaque pilote : au centre et en partie haute (à 20 cm de profondeur), à un demi rayon du centre. C'est la moyenne de ces deux mesures qui a été prise comme température moyenne au sein du pilote.

B.3.1.4 Etude en pilotes

Deux séries d'essais en pilotes ont été menées : une première série avec des pilotes de 100 litres et une deuxième avec des pilotes de 300 litres, tous construits en matériaux locaux.

B.3.1.4.1 Étude en pilotes de 100 litres

L'objectif de cette première série d'essais était de simuler le compostage à l'échelle d'un ménage, produisant une quantité peu importante de résidus chaque jour, pratique envisagée en lieu et place d'une gestion collective, notamment pour des habitants qui seraient éloignés d'un site de compostage.

Les 6 pilotes sont de forme cylindrique, mesurant chacun 50 cm de diamètre et 50 cm de hauteur, soit environ 100 litres de volume utile. Ils sont fabriqués localement, à partir de morceaux de bambous maintenus par deux cercles d'acier (Figure 25).



Figure 25 : Pilotes de 100 litres

Ils ont été remplis en 3 jours d'apports, soit 14 jours entre le 1^{er} et le 3^{ème} apport. La litière utilisée était de la sciure de frêne pour tous les essais.

Le Tableau 16 ci-après donne la masse de résidus frais par pilote (en kg).

Tableau 16 : Masse des résidus frais dans les 6 pilotes

	J1	J2	J3	Total
Pilote 1	31	21	24	76
Pilote 2	28	18	23	69
Pilote 3	26	22	19	67
Pilote 4	23	21	25	69
Pilote 5	23	21	26	70
Pilote 6	24	23	20	67
Total	155	126	137	418

Les pilotes contenaient chacun ainsi environ 70 kg de résidus, ce qui correspond à la production d'environ deux mois de résidus pour une famille de 6 personnes si on considère 200g par jour et par personne en moyenne (cf § B.2.2.4).

Différents essais ont été étudiés :

- P1 : Ajout d'eau
- P2 : Ajout d'eau
- P3 : Ajout d'eau et branchages
- P4 : Ajout d'eau et brassage
- P5 : Ajout d'urine
- P6 : Sans aucune action

Les conditions pour les deux premiers pilotes étaient les mêmes. Des morceaux de branches ont été ajoutés dans le P3 pour favoriser la circulation de l'air. Un brassage du contenu du P4 a été effectué à 3 reprises pendant la durée de l'essai (après 1, 2 et 3 semaines) afin d'aérer le contenu. Pour le P5, l'eau a été remplacée par de l'urine. Enfin, le P6 n'a subi aucune intervention.

Il a été demandé au responsable du suivi d'ajouter un peu d'eau ou d'urine si les résidus semblaient trop secs après un test de compression à la poignée (voir explication au § A.1.5.2). La quantité d'eau ajoutée pendant l'expérience n'a par contre pas été mesurée.

Le suivi a porté spécifiquement sur l'évolution de la température pendant 25 jours.

B.3.1.4.2 Étude en pilotes de 300 litres

Suite aux résultats obtenus avec les pilotes de 100 litres, une deuxième série de 5 pilotes de volume unitaire 300 litres a été construite (Figure 26).

Ces pilotes font 75 cm de diamètre et 75 cm de haut. Ils sont constitués d'une double enveloppe extérieure, les deux épaisseurs de bambou étant séparées de 5 cm et l'espace rempli de vieux tissus très compactés destinés à réduire les pertes thermiques. Cette fois, nous souhaitons étudier l'influence de la nature de la litière absorbante sur l'évolution de la température. Les ménages se sont vu remettre la 1^{ère} semaine une litière à base d'un mélange de 40% de bagasse pour 60% de sciure de pin (pilote P21), 40% de bagasse et 60% de sciure de frêne la 2^{ème} semaine (pilote P22), 100% de bagasse pour les semaines 3 et 4 (pilotes P23 et P24) et 100% de sciure de frêne la 5^{ème} semaine (pilote P25). Des branchages ont en outre été ajoutés dans le pilote P24.



Figure 26 : Pilotes de 300 litres.

Les pilotes ont chacun été remplis en une seule fois mais avec un décalage d'une semaine en raison des quantités de résidus disponibles.

Les trois premiers pilotes ont été arrosés compte tenu de la chaleur qui régnait alors en pleine journée et du dessèchement des résidus. Pour les deux derniers, la pluie a permis de maintenir l'humidité des résidus. Le volume d'eau de pluie tombée n'a pas été mesuré.

Les informations relatives au remplissage des 5 pilotes sont indiquées Tableau 17.

Tableau 17 : Conditions opératoires pour les 5 pilotes de 300 litres

	Nature de la litière	Hauteur de résidus (cm)	Masse de résidus (kg)	Nombre de ménages	Eau ajoutée (L)
P21	Bagasse 40% -Sciure de pin 60%	63	122	21	82
P22	Bagasse 40% - Sciure de frêne 60%	60	123	19	56
P23	Bagasse 100%	58	162	25	60
P24	Bagasse 100% + branchages	64	175	25	non mesuré
P25	Sciure de frêne100%	61	153	22	non mesuré

B.3.2 Résultats et discussion

B.3.2.1.1 Caractérisation des litières et des résidus solides frais

Nous avons choisi de présenter en parallèle les résultats obtenus sur les litières et sur les résidus de sorte à pouvoir les comparer plus facilement.

Les analyses ont porté :

Sur les matrices solides :

1. Masse volumique apparente
2. Teneur en matière sèche
3. Teneur en matière organique totale
4. Capacité de rétention en eau
5. Capacité d'auto-échauffement

Après lixiviation :

1. Fraction soluble
2. pH
3. Conductivité
4. DCO soluble
5. DBO soluble

Le Tableau 18 indique les résultats obtenus sur les matrices solides. Plusieurs séries d'analyses ont été effectuées, sur des échantillons prélevés en novembre 2017, juin 2018 et juillet 2018, certaines en Haïti (HT), d'autres en France (FR), à des périodes différentes. Les analyses faites en France l'ont été pour vérification, sur des échantillons prélevés 6 mois avant et stockés au frais. Les conditions de fonctionnement du laboratoire en Haïti (chaleur importante, coupures fréquentes de courant) peuvent expliquer certaines disparités. Mais il est également probable que la composition des résidus soit variable selon les périodes, une certaine saisonnalité existant quant aux aliments disponibles localement.

Concernant la **masse volumique apparente**, on constate que celle de la bagasse broyée est plus de deux fois plus faible que celle de la sciure de frêne (environ 60 kg/m³ contre près de 150). Pour ce qui est des résidus frais, elle est de près de 220 kg/m³ avec la litière de bagasse et de 340 avec la litière de frêne. Il est probable que les caractéristiques de ces deux litières influent sur l'aération en cours de compostage, l'air devant mieux circuler avec des résidus à

base de bagasse. Connaissant les masses volumiques apparentes des litières et celles des résidus, ainsi que le pourcentage d'utilisation de litière par rapport aux fèces (40% pour 60%), on peut approximer la masse volumique apparente des fèces, qui serait égale à la masse volumique des résidus - 40% x masse volumique de la litière / 60%, soit entre 320 (résultat obtenu avec le frêne) et 470 (résultat obtenu avec la bagasse), soit donc autour de 400 g/L. Les fèces ne seraient ainsi en moyenne pas si liquides que cela, comme l'avait laisser penser le retour d'expérience de SOIL (cf § A.4.3.2.2).

Tableau 18 : Résultats d'analyse des matrices solides étudiées

Masse volumique apparente (kg/m³)	Bagasse	Frêne	Résidu bagasse	Résidu frêne
11/2017 HT	64,9	155,8	-	376,6
	67,0	167,5	-	376,3
06/2018 HT	55,6	138,0	216,4	339,9
	60,9	139,3	210,3	343,5
	58,3	137,2	215,1	340,0
07/2018 HT	-	-	224,7	317,0
	-	-	221,1	303,9
	-	-	219,1	318,2
moyenne	61,3	147,6	217,8	339,4
écart-type	4,7	13,5	5,0	26,7
Teneur en Matière Sèche (%)	Bagasse	Frêne	Résidu bagasse	Résidu frêne
11/2017 HT	37,0	53,7	49,2	50,7
	37,4	50,5	48,1	50,5
	36,2	50,3	48,8	50,2
06/2018 sur éch. 11/2017 FR	77,1	85,3	27,4	40,4
	76,7	84,1	27,9	40,4
	77,4	84,2	26,9	43,6
06/2018 HT	84,6	91,6	39,8	37,6
	84,8	91,8	35,3	37,1
	79,3	91,5	35,3	37,6
07/2018 HT	-	-	37,2	44,0
	-	-	36,3	43,8
	-	-	35,9	42,6
moyenne	65,6	75,9	37,3	43,2
écart-type	21,8	18,6	8,0	5,0
Teneur en Matière Organique Totale (% de la MS)	Bagasse	Frêne	Résidu bagasse	Résidu frêne
11/2017 HT	82,1	81,4	82,1	81,4
	81,6	80,7	81,6	80,7
	83,3	82,2	83,3	82,2
06/2018 sur éch. 11/2017 FR	93,9	84,4	86,4	85,7
	92,5	98,2	87,0	84,8
	93,2	97,4	87,0	84,4
06/2018 HT	-	93,9	83,8	86,9
	83,0	91,0	81,4	-
	83,0	88,4	79,8	89,5
07/2018 HT	-	-	74,4	87,3
	-	-	77,4	88,7
	-	-	78,0	88,7
moyenne	86,6	88,6	81,9	85,5
écart-type	5,5	6,9	4,0	3,1
Capacité de Rétention en Eau (%)	Bagasse	Frêne	Résidu bagasse	Résidu frêne
06/2018 sur éch. 11/2017 FR	570	471	533	396
	667	445	571	401
	559	516	455	346
06/2018 HT	725	455	534	546
	896	469	656	535
	654	514	534	523
moyenne	679	478	547	458
écart-type	123	30	66	87

Les résultats pour la **teneur en matière sèche** sont assez hétérogènes selon les séries d'analyses. En particulier, les résultats de la 1^{ère} série ne semblent pas corrects : la teneur en matière sèche des litières ne peut pas être aussi faible, ce que semblent confirmer les deux autres séries. Si on fait abstraction de cette série, la teneur en matière sèche de la litière de bagasse devrait être de l'ordre de 80%, et de l'ordre de 88% pour la sciure de frêne. En faisant de même pour les résidus frais, la teneur en MS des résidus à base de litière de bagasse serait de 34% et de 41% pour les résidus à base de sciure de frêne (au lieu de 37 et 43%). Il semble important de préconiser des mesures jusqu'à masse constante et non seulement sur 24h, même si cela est d'ordinaire suffisant pour de telles matrices. Les valeurs de teneur en MS pour les résidus frais sont en tout cas très favorables pour le compostage. Le même type de calcul que pour la masse volumique apparente permet d'approcher la teneur en MS des fèces, qui serait entre 92 et 97%, ce qui correspond à des selles très liquides.

Pour ce qui est de la **teneur en matière organique totale**, les différences sont moindres selon les séries de mesures, sans doute du fait du bon fonctionnement du four à moufle en Haïti (peu de coupures sur une période de 4h d'essai, qui est compensée le cas échéant). La teneur en MOT de la litière de bagasse est d'environ 87% et celle de la sciure de frêne d'environ 89%. Elle baisse un peu pour les résidus : environ 82% avec la bagasse, 86% avec le frêne, ce qui semble indiquer que les fèces sont plus riches en matières minérales que les litières.

La **capacité de rétention en eau** a été mesurée sur deux séries, d'une part en France, sur des échantillons stockés au froid pendant 6 mois, d'autre part en Haïti. Les autres résultats de mesures effectuées en Haïti ne sont pas exploitables. Les résultats obtenus permettent d'avoir un ordre de grandeur de cette capacité, suffisant pour l'usage que nous voulons faire de ces données. Il ressort ainsi que la CRE de la bagasse est de près de 700%, celle de la sciure de frêne de 500%, celle des résidus à base de litière de bagasse encore de plus de 500% et celle des résidus à base de sciure de frêne de plus de 450%. Dans la mesure où nous fonctionnons avec des toilettes à diversion d'urine, il est normal que la capacité résiduelle

d'absorption d'humidité après ajout de litière relativement sèche et absorbante, reste élevée. Il serait sans doute possible d'en ajouter moins mais la litière a aussi pour rôle de masquer les excréments et les odeurs au niveau des seaux détenus à domicile, ce qui serait peut-être moins efficace avec moins de litière.

Des mesures de **capacité d'auto-échauffement** ont été faites sur les résidus frais (2 échantillons pour chaque type de résidu). Les résultats sont pratiquement identiques, montrant après quelques jours une élévation de température de 37 à 41°C au-delà de l'ambiante (60, 63, 64 et 66°C), correspondant à des matières très biodégradables.

Le Tableau 19 indique les résultats d'analyse obtenus après agitation dans de l'eau (ratio 1 :10), afin d'avoir une idée du comportement de nos matrices au contact de ce solvant et donc de ce qui serait susceptible de contaminer le milieu environnant.

Tableau 19: Résultats d'analyse des lixiviats des matrices étudiées

	Bagasse	Frêne	Résidu bagasse	Résidu frêne
pH	5,9	6,4	7,2	7,8
	6,0	6,1	7,7	7,8
	5,8	6,3	8,2	8,0
Conductivité (mS/cm)	1,22	0,79	3,93	2,93
	1,69	0,92	2,88	2,16
	1,57	0,67	2,65	2,31
Fraction soluble (g/L)	5,35	2,67	5,35	2,67
	8,02	2,67	8,02	2,67
Demande Chimique en Oxygène (mg O ₂ /L)	1408	805	5737	4520
	1210	993	6712	5380
	824	914	6753	5543
moyenne	1147	904	6401	5148
Demande Biochimique en Oxygène (mg O ₂ /L)	572	466	3010	2040
	612	443	3695	4075
	-	-	3934	4075
moyenne	592	455	3546	3397
DBO / DCO	0,41	0,58	0,52	0,45
	0,51	0,45	0,55	0,76
			0,55	0,66
moyenne	0,46	0,51	0,54	0,62

On peut constater que le pH des résidus est supérieur à celui des litières, mais reste dans une gamme tout à fait compatible avec les conditions favorables au compostage.

Les résultats en termes de fraction soluble sont à considérer avec réserve, compte tenu de la faible précision de la balance utilisée pour peser les résidus secs ($\pm 0,1g$). On ne note pas de différence significative entre les litières et les résidus, ce qui n'est pas très cohérent avec les

autres résultats (conductivité, DBO, DCO) qui reflètent la présence plus importante de matières solubilisées dans les résidus. Il semble peu probable que des matières non analysées ici, en particulier minérales, soient très solubles à partir notamment de sciure de frêne. Ces analyses mériteraient d'être refaites dans de meilleures conditions.

La DCO des résidus frais est logiquement plus élevée que la DCO des litières. La DCO de la bagasse est supérieure à la DCO de la sciure de frêne compte tenu du sucre résiduel dans ce matériau végétal. Le rapport DBO/DCO des résidus indique un potentiel de biodégradabilité encore important malgré la relative digestion des matières fécales et la biodégradabilité limitée des litières, à forte composante ligneuse, en particulier pour la sciure de frêne. Néanmoins, le rapport DBO/DCO de ces dernières est relativement élevé, indiquant qu'elles ne sont pas biologiquement inactives.

B.3.2.2 Étude en bacs

La température au sein des bacs a été suivie pendant quelques mois. La Figure 27 donne un exemple de courbes de température obtenues dans 3 bacs, deux qui ne subissent plus d'apports (bacs 4 et 5) et le bac en cours de remplissage (bac 6). Rappelons qu'il faut entre 3 et 4 mois pour remplir un bac. On peut voir que la température au sein des 3 bacs est encore bien au-delà de la température ambiante moyenne (entre 25 et 30°C), qu'elle redescend lentement dans le bac 4, commence à redescendre dans le bac 5 et oscille autour de 50°C dans le bac 6. Encore peu rempli, des pertes thermiques peuvent expliquer une température plus instable dans ce dernier.

On peut constater que la matière au sein des bacs reste pendant une longue période autour de 50°C, garantissant ainsi une bonne hygiénisation des résidus.

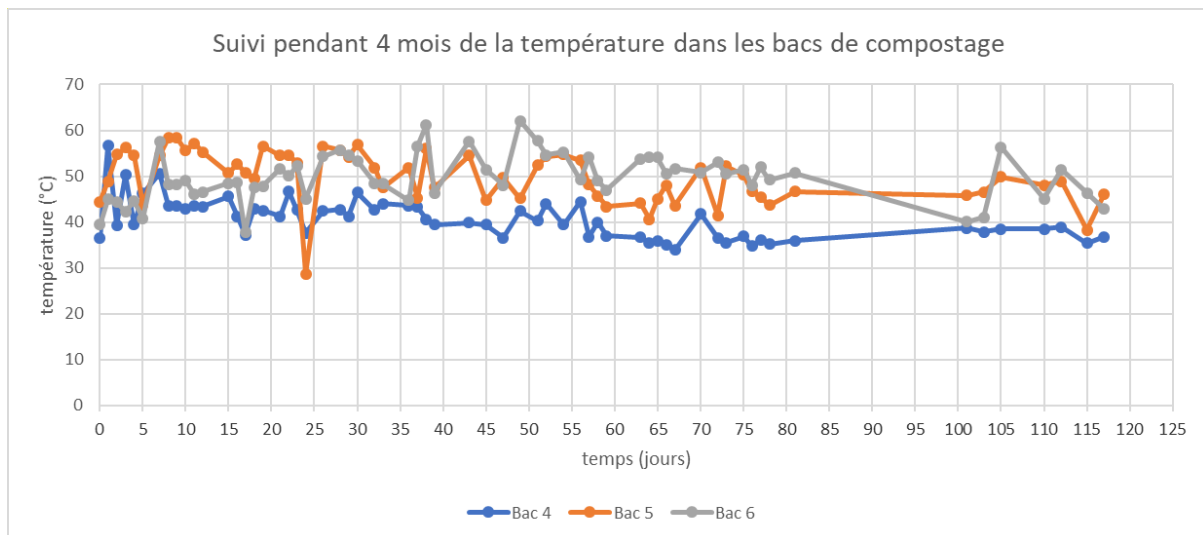


Figure 27 : Exemple d'évolution de la température dans les bacs de compostage

B.3.2.3 Etude en pilotes

Suite à ces essais de compostage collectif en grands bacs, nous souhaitions savoir s'il serait possible d'atteindre également assez vite des conditions hygiénisantes (température autour de 50°C pendant plusieurs jours) en compostage individuel, à l'échelle d'un ménage. En effet, le fait d'avoir à apporter chaque semaine le seau jusqu'à la plateforme de compostage pourrait être vécu comme une contrainte, surtout si celle-ci est éloignée du domicile. En outre, la plupart des ménages en zone rurale dispose d'un jardin, d'arbres ou de champs, rendant aisé l'usage direct du compost.

Nous avons donc fabriqué une série de 6 pilotes de 100 litres pour tester différentes conditions en même temps. Les résultats obtenus nous ont conduits à fabriquer une deuxième série de 5 pilotes de taille plus importante (300 litres).

B.3.2.3.1 Etude en pilotes de 100 litres

Avec cette première série d'essais en pilotes, nous souhaitions nous placer dans des conditions proches d'un compostage individuel, à l'échelle d'un ménage, afin de savoir si elles permettaient la montée en température observée habituellement lors du compostage. La Figure 28 montre l'évolution de la température dans les 6 pilotes au cours du premier mois de compostage. L'humidité initiale était celle des résidus, à savoir proche de 60%, donc favorable au compostage.

Les courbes obtenues montrent une évolution assez similaire, malgré des conditions opératoires différentes. Pour rappel, nous avons testé différentes conditions d'humidification et d'aération :

P1	Ajout d'eau
P2	Ajout d'eau
P3	Ajout d'eau et branchages
P4	Ajout d'eau et brassage
P5	Ajout d'urine
P6	Sans aucune action

On note une montée en température vers le 4^{ème} jour et une redescente rapide, pour rejoindre au bout de moins d'une semaine une température proche de l'ambiante en journée. La température ambiante indiquée par la courbe la plus basse correspond à la température notée en début de matinée et non à la température journalière moyenne qui est plus élevée, entre 25 et 30°C.

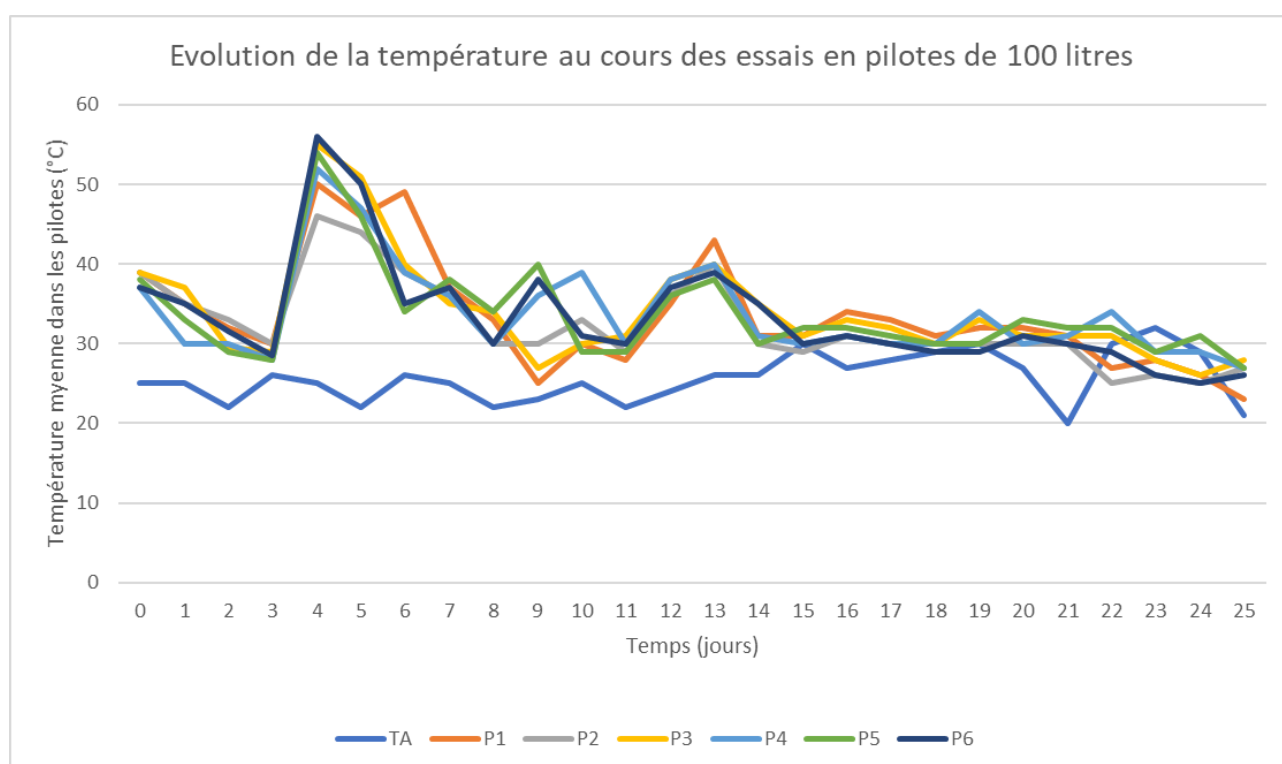


Figure 28 : Evolution de la température au cours des essais en pilotes de 100 litres

D'après ce que nous avons pu voir dans la partie bibliographique, ces conditions de température ne garantissent pas une hygiénisation effective des résidus.

Le dénombrement des colonies de *E coli* a été fait au LAQUE après 5 mois, sur des échantillons prélevés donc longtemps après les essais dans P1, P3 et P5. En effet, n'ayant pas pu trouver de laboratoire pour faire des analyses quantitatives en Haïti, nous avons décidé tardivement de remobiliser le laboratoire de microbiologie du LAQUE de l'Université Quisqueya, inutilisé depuis le séisme de 2010.

Le nombre d'UFC était toujours de l'ordre de 10^{11} à 10^{12} par g de MS, confirmant l'absence d'hygiénisation.

Il est fort probable que le faible volume de résidus, dans des pilotes non isolés thermiquement, n'ait pas permis de noter une montée en température (pertes thermiques trop importantes).

Sur la base de ces résultats, il est donc délicat de préconiser le compostage individuel des résidus de TSLB, à moins de les mélanger avec d'autres déchets (par exemple des résidus non utilisés issus de la transformation de la canne à sucre, disponibles localement) assurant un effet de masse et une bonne biodégradabilité, ou de se regrouper à plusieurs ménages.

B.3.2.3.2 Essais en pilotes de 300 litres

Afin d'essayer d'obtenir tout de même une montée en température, nous avons fait une deuxième série d'essais dans des pilotes de volume plus important.

Les courbes d'évolution de la température sont présentées Figure 29.

Nous avons superposé les courbes, bien que ces essais aient été effectués avec un léger décalage dans le temps pour des raisons de manque de résidus. On peut ainsi observer que la température monte jusqu'à 70°C pour 4 essais sur 5, reste pour ceux-ci au-dessus de 50°C pendant au moins 8 jours (essais P22 et P25), 16 jours (pour l'essai P24), et 30 jours (pour l'essai P23). La température reste au-dessus de 60°C pendant environ 4 jours pour P22 et P25, 6 jours pour P24, 16 jours pour P23. Pour ces 4 essais, ces conditions de température sont garantes d'une bonne et rapide hygiénisation. La montée en température est moins élevée dans le pilote P21, où la litière était constituée d'un mélange de bagasse et de pin. Il est possible que les essences de pin aient un effet inhibiteur sur le compostage. Cela demanderait à être vérifié si cette litière devait être utilisée couramment.

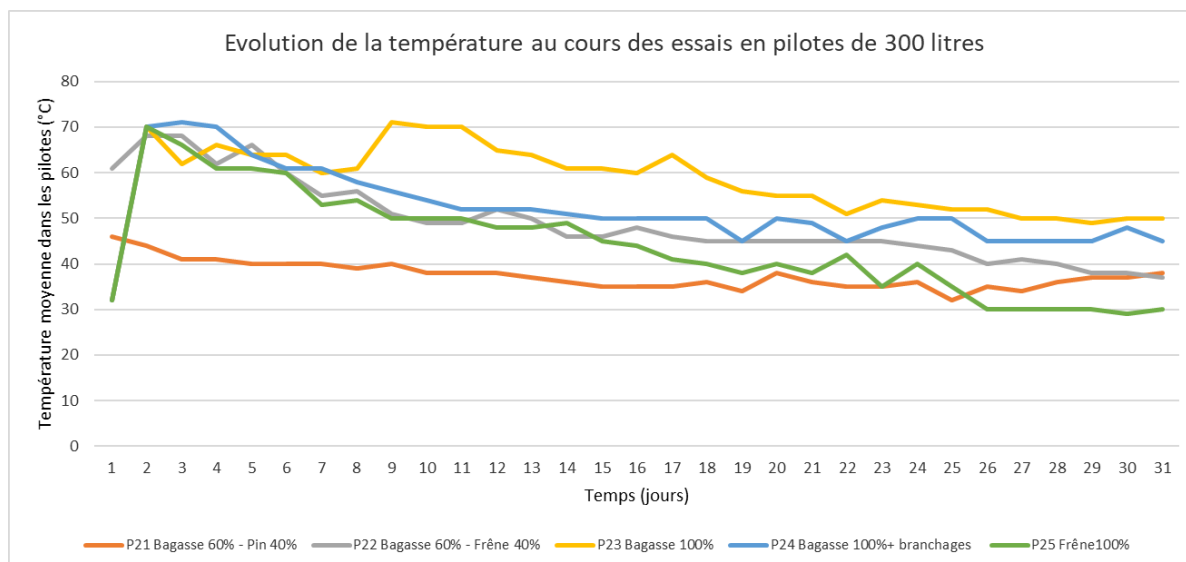


Figure 29 : Evolution de la température au cours des essais en pilotes de 300 litres

Les meilleurs résultats sont donc obtenus avec une litière faite à 100% de bagasse, ce qui n'est pas étonnant compte tenu du sucre résiduel dont la biodégradation doit participer de manière importante à la montée de température. On observe une élévation moindre lorsqu'on ajoute des branchages aux résidus avec la même litière. Il est possible que l'augmentation de porosité entraîne des pertes thermiques non compensées par l'amélioration des conditions d'oxygénation, sans doute suffisantes dans le pilote P23. La durée et l'amplitude sont un peu réduites pour le pilote avec une litière faite d'un mélange de bagasse et de sciure de frêne, et un peu plus en deçà encore avec une litière sans bagasse, constituée de 100% de sciure de frêne. Néanmoins, même dans ce cas, les conditions sont satisfaisantes pour l'hygiénisation.

Les analyses microbiologiques portant sur le dénombrement des colonies de E coli confirment clairement ces résultats (Tableau 20). Avec de l'ordre de 10^{11} UFC / g de MS dans les résidus frais, on n'atteint pas le seuil de détection après 1 mois, sauf pour le pilote P21 qui est celui qui est moins monté en température et où on détecte encore des bactéries après 1 mois de compostage.

Tableau 20 : Dénombrement des UFC de E coli lors des essais en pilotes de 300 litres.

Dénombrement E coli (UFC / g)				
	T0	T 1 mois	T 3 mois	T 6 mois
P21	1,10E+11	2,10E+11	< 10 ²	< 10 ²
P22	8,00E+10	< 10 ²	< 10 ²	< 10 ²
P23	3,12E+11	< 10 ²	< 10 ²	< 10 ²
P24	4,00E+10	< 10 ²	< 10 ²	< 10 ²
P25	3,24E+11	< 10 ²	< 10 ²	< 10 ²

B.3.2.3.3 Analyse du compost

Les résultats d'analyse des composts effectués en Haïti sont indiqués dans le Tableau 21. Les composts analysés ont été prélevés dans les 4 bacs de compostage, sachant que chaque bac a été rempli en 3 à 4 mois. Ils ont été prélevés dans des zones correspondant à des âges approximatifs de compost de 3, 6, 9, 12 et 15 mois.

Tableau 21 : Analyses effectuées en Haïti sur les échantillons de compost

Masse volumique apparente (kg/m ³)	3 mois	6 mois	9 mois	12 mois	15 mois
	457	464	565	597	601
	456	494	589	582	577
	464	459	560	591	558
moyenne	459,0	472,3	571	590	579
écart-type	4	19	16	8	22
Teneur en Matière Sèche (%)	3 mois	6 mois	9 mois	12 mois	15 mois
	40,3	38,8	34,8	56,1	40,5
	40,8	38,7	37,4	41,3	40,9
	41,9	39,7	36,6	37,8	40,9
moyenne	41,0	39,1	36,3	45,1	40,8
écart-type	0,8	0,6	1,3	9,7	0,2
Teneur en Matière Organique Totale (% de la MS)	3 mois	6 mois	9 mois	12 mois	15 mois
	36,2	38,5	42,3	-	36,8
	37,4	39,3	39,4	-	40,2
	-	38	39,8	-	39,7
moyenne	36,8	38,6	40,5	-	38,9
écart-type	0,8	0,7	1,6	-	1,8
Capacité de Rétention en Eau (%)	3 mois	6 mois	9 mois	12 mois	15 mois
	347	341	411	196	350
	296	341	351	296	288
	292	297	424	351	309
moyenne	312	326	395	281	316
écart-type	31	25	39	79	32
Analyses sur phase liquide	3 mois	6 mois	9 mois	12 mois	15 mois
pH	7,3	7,3	6,0	6,0	6,0
Conductivité (mS/cm)	1208	853	1058	1018	833
Fraction soluble (g/L)	8,0	3,3	5,0	8,5	7,0
Demande Chimique en Oxygène (mg O ₂ /L)	1010	1580	2570	2590	2580
	1630	1590	2510	1470	2460
moyenne	1320	1585	2540	2030	2520
Demande Biochimique en Oxygène (mg O ₂ /L)	355	328	784	600	877
	301	328	877	646	646
moyenne	328	328	831	623	762
DBO / DCO	0,35	0,21	0,31	0,23	0,34
	0,18	0,21	0,35	0,44	0,26
moyenne	0,27	0,21	0,33	0,34	0,30

On constate que la masse volumique apparente tend à augmenter avec la maturité du compost, ce qui signifie qu'il perd en porosité, qu'il se tasse, sans lien visiblement avec la teneur en eau.

La teneur en matière sèche est celle du compost en place, non abrité, soumis aux conditions climatiques. On peut voir que le compost reste relativement humide (55 à 63% de teneur en eau), ce qui est plutôt une bonne chose pour qu'il garde ses qualités physico-chimiques (notamment de rétention d'eau et de nutriments) lorsqu'il sera mis en terre. Il sera encore mieux de le stocker si possible sous abri (sous bâche par exemple), pour qu'il ne soit pas lessivé par les pluies. La capacité de rétention en eau est encore élevée pour les composts de 3 et 6 mois (plus de 300%).

La teneur en MOT évolue peu au cours du temps, signe d'un niveau de maturité atteint assez vite par le compost. Elle est comprise entre 37 et 41%, ce qui correspond à un compost bien minéralisé mais tout de même relativement encore riche en MO (la norme française NFU 44 051 fixe la limite minimum à 20% dans les composts). A noter que le compost vendu par SOIL en Haïti affiche néanmoins une teneur en MO > 50%.

Les résultats obtenus sur la phase liquide sont plus difficiles à interpréter, notamment le fait d'observer une baisse du pH en fonction de l'âge des composts (alors qu'on observe généralement le contraire), ainsi qu'une DCO soluble plus élevée dans les échantillons entre 9 et 15 mois qu'entre 3 et 6 mois. Toutefois, on peut tout de même noter un rapport DBO/DCO relativement faible, compris entre 0,2 et 0,3 quel que soit l'âge des composts, révélateur d'une relativement rapide stabilisation de la matière au cours du compostage.

D'autres analyses, plus poussées, ont été effectuées en France sur d'autres échantillons de composts par le site de Fougères de LABOCEA.

- Les échantillons 3, 6 et 9 mois ont été prélevés dans les casiers de la plateforme, issus de résidus mélangés à de la bagasse ou de la sciure de frêne. Nous avons pu voir (§ B.3.2.2) que la température dans ces casiers reste pendant plus d'un mois au-dessus de 50°C.

- L'échantillon 12 mois a été obtenu en mélangeant, plusieurs mois après la fin des essais, des prélèvements issus des pilotes de 300 litres P21, P22 et P23 (mélange de résidus à base de bagasse, pin et frêne), essais pilotes où une importante montée en température a été observée au cours du cycle de compostage.
- L'échantillon 15 mois provient d'un mélange de prélèvements de résidus issus des pilotes P1, P2 et P4 de la 1^{ère} série (pilotes de 100 litres), à base de sciure de frêne et qui ont eu un ajout d'eau en cours de traitement. Pour rappel, il n'a pas été noté de montée de température dans ces pilotes.
- Enfin, l'échantillon 36 mois provient d'un essai de stockage de compost soumis aux conditions climatiques naturelles, sous le simple abri d'un arbre.

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans le Tableau 22.

Tableau 22 : Caractéristiques physico-chimiques des composts

	3 mois	6 mois	9 mois	12 mois	15 mois	36 mois
pH	7,50	7,10	7,10	7,75	7,80	7,70
Teneur en Matière Sèche (%)	35,1	38,0	42,0	53,1	65,1	50,7
Teneur en Matière Organique Totale MOT (% de la MS)	44,6	39,5	36,2	39,4	28,1	36,5
Teneur en Carbone Organique Total COT (% de la MS)	18,7	17,9	18,7	21,7	18,6	17,8
Teneur en Azote Total Kjeldhal NTK (% de la MS)	2,1	1,7	1,8	1,7	1,4	1,7
Teneur en Azote Organique (% de la MS)	1,9	1,6	1,7	1,7	1,4	1,6
Teneur en Azote Nitrique (% de la MS)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Teneur en Magnésium MgO (% de la MS)	0,84	0,63	0,67	0,70	0,69	0,70
Teneur en Potassium K ₂ O (% de la MS)	0,85	0,73	0,57	0,24	0,31	0,26
Teneur en Phosphore P (% de la MS)	0,88	0,58	0,63	0,53	0,48	0,53
Rapport MOT / COT	2,4	2,2	1,9	1,8	1,5	2,1
Rapport COT / NTK	8,9	10,5	10,4	12,8	13,3	10,5

Sur les éléments comparables entre les résultats obtenus en Haïti et en France, même s'il ne s'agit pas des mêmes échantillons, on peut constater que le pH semble bien être compris entre 7 et 8. Les valeurs de 6 obtenues sur des composts anciens en Haïti doivent être liées à un problème de mesure.

La teneur en matière sèche est ici entre 35 et 65% alors qu'elle était entre 36 et 45% en Haïti, pour des conditions non contrôlées d'humidité. Dans tous les cas, on voit que le compost a conservé un taux d'humidité compatible à son utilisation (40 à 65% préconisé, avec un optimum entre 50 et 60%).

La teneur en matière organique totale est comprise entre 28 et 45%, avec une forte variabilité selon les échantillons collectés sur les différents essais, à différentes durées de

compostage. Si quelques doutes existent sur la représentativité des échantillons collectés en raison de l'hétérogénéité des composts, nous observons une tendance à la diminution de la teneur en MOT au cours du temps. Cette baisse ne semble toutefois pas corrélée à la diminution du COT dont l'évolution est irrégulière. Le rapport MOT sur COT évolue également avec une tendance à la diminution, indiquant a priori une stabilisation de la matière organique. La diminution de la MOT ne serait donc pas liée à la biodégradation mais plus vraisemblablement à l'humification de la matière organique. On peut donc supposer que la matière organique facilement biodégradable initialement présente dans les résidus de TSLB a été en grande partie minéralisée au cours des trois premiers mois de compostage. Au-delà des trois mois, le taux de matière organique continue à baisser, mais plus lentement, la matière organique résiduelle étant plus stable et donc plus difficilement biodégradable.

Les analyses de MOT faites en Haïti donnaient des valeurs entre 37 et 41%, sans réelle évolution au cours du temps, et indiquaient également une assez rapide stabilité de la matière organique, dès 3 mois de fermentation.

Le rapport COT / NTK est relativement bas, entre 9 et 13 (normalement entre 20 et 30 en fin de compostage). Cela est vraisemblablement dû au fait que les résidus de toilettes sont relativement plus riches en azote que des déchets végétaux. La tendance est l'augmentation du rapport C/N, sans toutefois observer une évolution marquée de celui-ci, au-delà de trois mois de compostage. D'après les analyses NTK et N-Norg effectuées, l'azote présent est principalement sous la forme d'azote organique. La teneur en N-Norg est en effet équivalente à NTK, et évolue peu de 3 à 36 mois de compostage. Nous pouvons considérer que l'azote encore présent est sous une forme stabilisée. Il serait associé au carbone organique sous la forme de matières humiques, peu biodégradables, avec peu de risque d'émission d'azote sous forme d'ammoniac.

Tous les résultats obtenus en termes d'éléments minéraux sont relativement proches de ceux qu'indique SOIL sur ses sacs de compost (nous ne disposons pas d'autre information) : C > 27%, MOT > 50%, N > 2,7%, P > 1,4%, K > 0,7%, Mg > 0,8%. La norme NFU 44 095 sur les composts de boues d'assainissement fixe quant à elle des seuils à ne pas dépasser pour

l'azote, le phosphore et le potassium (< 3%), une teneur en MOT > 30%, un rapport MOT / N organique < 40.

La composition de notre compost semble donc être dans la norme par rapport à ces références.

Sur l'aspect microbiologique, les résultats obtenus sont présentés Tableau 23.

Tableau 23: Caractéristiques microbiologiques des composts

	3 mois	6 mois	9 mois	12 mois	15 mois	36 mois
Escherichia coli (ufc/g)	<100	<100	< 400	24000	42000	39000
Clostridium perfringens (ufc/g)	<400	<100	<100	<100	<1000	<1000
Spores de C. perfringens (nombre/g)	130	<100	1200	<100	<100	900 estimé
Œufs d'helminthes parasites (nombre/1,5g MS)	A	A	A	A	A	A
Œufs d'helminthes parasites viables (nombre/1,5g MS)	P (1 nv)	A	Pnv (2 nv)	Pnv (10 nv)	A	A
Entérocoques intestinaux (ufc/g)	<100	<100	< 400	500 estimé	25000,0	<100
Salmonella spp (nombre/25g)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Bactéries anaérobies sulfitoréductrices à 37°C (ufc/g)	<400	8900	5500	9200	26000	22000
Spores de bactéries ASR à 37°C (nombre de spores /g)	160	3200	3100	1000	6300	1500
Aspergillus (nombre /g)	<0	<0	<0	200 An 100 Af	10	300 Af
Virus hépatite A	ND	ND	ND	ND	ND	NI
A : absence		ND : non détectable		Af : Aspergillus fumigatus		
P : présence		NI : non interprétable		An : Aspergillus niger		
Pnv : présence mais œufs non viables						

On note l'absence ou la quasi absence de *C. perfringens*, d'œufs d'helminthes viables ou non, d'entérocoques intestinaux (sauf 1 échantillon cependant proche de la norme NFU 44 051 sur les composts de déchets qui préconise moins de 10^4 pour les cultures maraîchères et 10^5 pour les autres cultures), de salmonelles, d'aspergillus et de virus de l'hépatite A.

Le taux de bactéries anaérobies sulfito-réductrices de l'ordre de 10^4 est proche de celui obtenu par TDM lors de son étude de 2017 sur les toilettes mobiles (TDM, 2017). C'est dans l'échantillon n'étant pas monté en température que la teneur est la plus élevée (compost de 15 mois). L'absence de seuil dans les normes sur ces bactéries laisse supposer que leur présence n'a pas été considérée comme étant un obstacle à la valorisation des composts.

Les analyses de *E coli* faites en Haïti en avaient montré la disparition rapide, après quelques semaines (au plus 1 mois), dans les pilotes de 300 litres où une forte montée en température avait eu lieu. Par contre, en l'absence de montée en température, l'abattement avait été très faible dans les pilotes de 100 litres. Sur des échantillons issus de ces pilotes mais

analysés tardivement (après 5 mois), le nombre d'ufc était de l'ordre de 10^{11} à 10^{12} par gramme de MS alors qu'il était de 10^{10} à 10^{11} dans les résidus frais.

Ici, on constate que *E coli* est indétectable dans les échantillons de compost de 3 à 9 mois, preuve là encore que l'hygiénisation dans les casiers s'est bien effectuée. Par contre, sur les composts plus anciens où les conditions de compostage ont pour certains (compost 12 mois, série 2 de pilotes) et n'ont pas pour d'autres (compost 15 mois, série 1) permis d'atteindre des températures normalement favorables à l'hygiénisation, on note de l'ordre de 10^4 ufc par gramme. L'échantillon où l'on en trouve le plus est celui de 15 mois, issu des pilotes de 100 litres, et celui de 36 mois stocké à l'extérieur. Cela indique que les conditions de stockage (température ambiante, eau de pluie) ont sans doute été favorables au développement d'*E coli*, malgré une baisse de l'ordre de 6 à 7 Log par rapport aux résidus de départ. L'absence d'analyses de *E coli* en Haïti, sur les composts de 3 à 15 mois ayant fait l'objet d'analyses seulement physico-chimiques, ne permet pas de comparer. La norme NFU 44 095 sur le compost à partir de boues résiduaires préconise un taux $< 10^3$ ufc / g de matière brute dans les composts issus de boues résiduaires pour les cultures maraîchères, 10^4 pour les autres cultures. Ce seuil est de 10^2 pour toutes les cultures dans la norme NFU 44 051, du fait que les composts issus de déchets sont supposés normalement être dépourvus de *E coli*, étant issus de déchets qui en sont eux-aussi normalement dépourvus.

A noter que la DINEPA demande seulement l'absence d'œufs d'helminthes viables et un abattement d'au moins 4 Log de *E coli* pour pouvoir valoriser un compost, conditions que nous avons obtenues ici. Elle demande aussi un stockage pendant au moins 6 à 12 mois.

Ces résultats confirment donc la bonne qualité microbiologique du compost obtenu sur notre plateforme. Ils montrent cependant que ses conditions de stockage seront à améliorer pour éviter que les bactéries ayant résisté au traitement ne repartent en développement. Pour cela, le compost devra au moins être stocké à l'abri de la pluie pour que son humidité ne soit pas trop élevée.

B.4 Conclusion de la partie expérimentale

Comme le synthétise la Figure 30, cette partie expérimentale a permis de répondre aux questions qui se posaient au départ et de valider la plupart des hypothèses qui étaient ressorties de la partie bibliographique. Cela concerne notamment les modalités de mobilisation des usagers pour assurer leur adhésion et la validité du modèle d'assainissement proposé, permettant de garantir un assainissement sûr, digne et sain moyennant un très faible coût, ainsi qu'aucune contrainte pour la collectivité, celles-ci étant reportées sur la communauté et les habitants eux-mêmes.



Figure 30 : Réponses aux questions de départ

Dans sa partie technique, notre étude expérimentale a permis de démontrer qu'il serait difficile d'obtenir une hygiénisation satisfaisante des résidus à petite échelle, et qu'il était donc préférable d'opter pour un traitement collectif, même un regroupement de seulement quelques ménages ou de plusieurs gisements de déchets.

Nous avons pu constater qu'en cas de traitement collectif, l'effet de masse garantissait des conditions d'hygiénisation rapides. La durée de la phase de fermentation est donc suffisante et ne nécessitera pas d'allonger la phase de maturation du compost au-delà de ce qui est normal. La durée de ces deux phases n'a pas été spécifiquement étudiée et pourra faire l'objet de travaux ultérieurs. On peut supposer que 2 à 3 mois après la fin de la phase de fermentation (redescente de la température au niveau de la température ambiante), il devrait être possible d'utiliser le compost. Mais dans l'attente de la confirmation, nous proposons de conseiller d'attendre au moins 6 mois.

La durée de la phase de fermentation à une température supérieure à 50°C dans les bacs et les pilotes de 300 litres semble montrer qu'il n'est pas forcément nécessaire d'ajouter une matière carbonée pour que celle-ci se déroule dans de bonnes conditions, la litière suffisant vraisemblablement pour cela. Il ne semble pas non plus utile d'aérer le milieu par un brassage des résidus (peu souhaitable par ailleurs pour éviter les risques d'inhalation de poussières contaminées) ou l'ajout de matière plus structurante de type branchages. Ceci est un résultat intéressant dans la mesure où cela simplifie la conduite du processus.

Il est intéressant de constater la différence observée avec la litière de bagasse, qui permet une montée encore plus importante en température du fait du sucre résiduel. Les résultats obtenus avec la sciure de frêne sont cependant également probants, contrairement à la sciure de pin (à confirmer cependant par d'autres essais). Des analyses complémentaires seraient à faire sur la sciure de frêne pour vérifier la nature de la phase solubilisable qui semble étonnamment non négligeable.

La disponibilité du gisement de litière a été notée comme un des facteurs limitants pour la mise en place d'une filière d'assainissement par TSLB. Nous proposons de prendre le contrepied de cela : plutôt que de renoncer à cette possibilité d'assainissement par manque de litière, il est possible d'inciter à la culture de végétaux pouvant produire non seulement des ressources alimentaires intéressantes mais aussi des résidus utilisables comme litière.

Les risques sanitaires sont minimisés par le respect des consignes d'hygiène données, et ce tout au long de la filière : au domicile, pendant le transport, lors du vidage des seaux, lors du travail sur la plateforme et de l'utilisation du compost.

Les risques environnementaux concernent principalement les risques de contamination des eaux. Il est important de recommander d'installer la plateforme de compostage loin de toute ressource en eau ou alors de l'étanchéifier et de gérer les écoulements éventuels. Les odeurs n'ont jamais été un problème, grâce à l'ajout de litière absorbante et à la séparation des urines.

Nous n'avons pas pu travailler à la valorisation des urines et du compost produits, ce qui pourra faire là encore l'objet de futurs travaux. Néanmoins, les résultats obtenus tant en Haïti qu'en France sur l'analyse des composts permettraient d'envisager sans problème, sous réserve d'une conduite du compostage assurant l'hygiénisation du compost, la valorisation du compost sur tout type de culture après quelques semaines de traitement. Cependant, d'autres travaux sont nécessaires pour confirmer ces résultats et fournir des données précises aux services de l'Etat qui auront à produire des réglementations et des normes. Dans cette attente, nous proposons de recommander d'attendre 3 mois, après 3 mois de traitement (soit 6 mois au total), avant d'utiliser le compost.

Enfin, la remise en ordre de marche du laboratoire d'analyse du LAQUE, quasiment non utilisé depuis le séisme de 2010, en particulier pour ce qui est de la détermination des DCO, DBO et des analyses microbiologiques, est une grande satisfaction, en espérant que cela ouvrira la porte à d'autres travaux dans le domaine de l'eau et de l'assainissement si nécessaires en Haïti.

Conclusion générale

Au terme de ce travail de recherche, rappelons quel en était l'objectif principal : contribuer à réduire le taux de défécation à l'air libre, une des cibles de l'ODD 6, en identifiant les conditions permettant de mettre en place une filière durable d'assainissement auprès de populations vivant dans des conditions extrêmement précaires, dans des zones rurales de pays en développement. Il s'agissait donc de proposer un dispositif à un coût le plus bas possible, tout en garantissant des conditions humaines (de sécurité, dignité, respect de la culture), sanitaires et environnementales, satisfaisantes.

S'il s'est déroulé en contexte haïtien, la même démarche doit pouvoir être transposée dans d'autres contextes, sous réserve de prendre en compte les spécificités locales, ce qui ne peut se faire qu'avec une excellente connaissance du terrain concerné.

Nous pouvons l'avouer à ce stade : nous savions dès le départ ce vers quoi nous voulions aller mais ne savions pas si cela fonctionnerait. La communauté avec laquelle nous évoluons depuis de nombreuses années, au sein de laquelle nous avons grandi, démontre jour après jour ce qu'il est possible de faire dès que l'on met son énergie physique et mentale pas seulement au profit de sa propre survie mais aussi au profit de celle de sa communauté. Parce que « *ansanm, nou ka fè tout bagay* », ensemble, on peut tout faire, devise de l'AOG, association communautaire paysanne haïtienne qui a décidé de prendre en main elle-même son développement.

Aucun des modèles d'assainissement que nous avons croisés dans nos rencontres, nos lectures, ne fonctionne de cette manière, tous ayant besoin au moins au départ de moyens humains et matériels importants, d'ONG internationales, de bailleurs. Et beaucoup ne fonctionnent plus ou mal, quelques mois après la fin des financements, le départ des ONG, parce qu'on n'a pas assez pris le temps de renforcer les compétences locales, pas assez travaillé avec les communautés, parce qu'on ne les a pas assez écoutées, parce qu'on ne les a pas laissées faire ce qu'elles voulaient une fois sensibilisées et informées.

Nous avons besoin de temps pour nous assurer que notre modèle était durable. Nous ne pouvons qu'être satisfaits de voir que non seulement il l'est, après 3 ans de fonctionnement,

mais qu'il semble pouvoir être à présent auto-réplicable, promu par ceux qui ont su se l'approprier et en sont reconnaissants.

Nous avons voulu non seulement trouver un modèle économique et social viable mais garantir aussi que ce modèle pouvait fonctionner dans des conditions sanitaires et environnementales acceptables. Même si notre démonstration aurait sans doute mérité plus de rigueur et plus de moyens, elle a ouvert la porte et fourni des éléments probants, suffisants pour orienter à présent vers de « bonnes pratiques » à respecter pour ne pas prendre de risques avec la santé ni avec un environnement qui devient partout de plus en plus fragile.

Comment les toilettes sèches à litière biomaîtrisée peuvent aider Haïti dans ses efforts vers l'atteinte des Objectifs de Développement Durable, qui devrait être la feuille de route de tout chercheur aujourd'hui, partout dans le monde ?

Parmi les 17 ODD, nous pouvons considérer avoir contribué à l'atteinte d'au moins 3 d'entre eux.



Le travail de sensibilisation communautaire effectué dans le cadre de notre programme de recherche avait pour but de favoriser l'adoption de principes d'hygiène et de toilettes sèches à litière biomaîtrisée, dans un contexte local où les conditions sanitaires liées à l'absence de moyen d'assainissement correct sont sans doute une des causes importantes de maladies à transmission oro-fécale.

De plus, les résidus des TSLB sont traités par compostage à haute température, mode de traitement reconnu par l'OMS pour sa capacité d'hygiéniser les excréta. Cette technique de traitement des résidus permet de détruire les germes pathogènes présents dans les matières fécales, responsables de la transmission de maladies principales causes des épidémies (salmonellose, choléra, ...).

Ainsi donc, notre travail a un grand rôle à jouer dans l'atteinte de cet objectif.

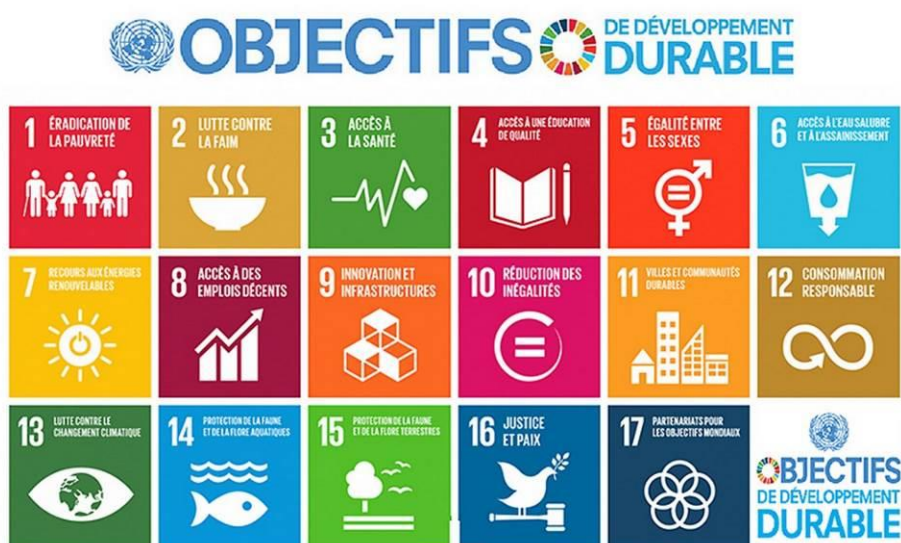


Les toilettes sèches à litière n'utilisent pas d'eau pour l'évacuation des matières fécales, contrairement aux toilettes à chasse d'eau. Elles contribuent ainsi à la préservation de cette ressource vitale pour l'Homme. Elles offrent une solution d'assainissement économique, digne, à des populations qui en sont dépourvues. De plus, le traitement des résidus par compostage permet de réduire la pollution organique et la contamination biologique des réserves d'eau du pays, notamment du fait du déploiement extrêmement important de latrines non étanches.



L'utilisation des toilettes à chasse d'eau, communément appelés toilettes hygiéniques, est préjudiciable à l'environnement puisque l'on n'est pas en mesure, en Haïti, de gérer les problèmes de pollution en aval. L'utilisation des TSLB permet donc de préserver la qualité des eaux.

Les recherches scientifiques ont pour but de produire des connaissances susceptibles d'être vulgarisées et utilisées par ceux qui sont intéressés à trouver des solutions aux problèmes sociétaux. Notre travail a été lancé dans le but de produire des connaissances dans le domaine de l'assainissement durable en Haïti. A son issue, les résultats sont plus qu'encourageants. Le travail de recherche devra désormais se poursuivre afin de produire des connaissances accessibles, à même d'aider les décideurs dans la définition des politiques publiques et de répliquer à l'envi de tels dispositifs. Nous sommes prêts à les y aider.



Références Bibliographiques

Abarghaz Y., 2013. Promotion des techniques d'assainissement écologique rural à des fins de valorisation des eaux usées - Cas du projet pilote du Douar Dayet Ufrah, Maroc, Rabat, Université Mohammed V, 158 p.

Alegbeleye, O.O., Singleton, I. & Sant'Ana, A.S., 2018. Sources and contamination routes of microbial pathogens to fresh produce during field cultivation: A review. *Food Microbiology*, 73, pp.177–208. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fm.2018.01.003>.

Anand, C.K. & Apul, D.S., 2014. Composting toilets as a sustainable alternative to urban sanitation – A review. *Waste Management*, 34(2), pp.329–343. Disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.006>.

Autran S., 2018. Container-based Sanitation as a low-cost solution in high-need areas: a case study review of community-based compost sanitation in six countries. Disponible sur <http://www.huussi.net/wp-content/uploads/2018/08/Samuel_Autran_DT2018.pdf>

Barnes D.S., 2006. The Great Stink of Paris and the Nineteenth-Century Struggle Against Filth and Germs, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, USA, 358p., disponible sur <<https://doi.org/10.3138/cbmh.25.1.274>>

Berendes, D., Levy, K., Knee, J., Handzel, T. and Hill, V.R., 2015. Ascaris and Escherichia coli inactivation in an ecological sanitation system in Port-au-Prince, Haiti in *PLOS ONE*, vol 10, n°5, e0125336, disponible sur <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125336>>

Berne B., 2010. Toilettes sèches familiales – Etat de l'Art, Etat des Lieux dans Différents Pays et Propositions pour un Accompagnement en France, Toilettes Du Monde, F26-Nyons, [En ligne]. Disponible sur : <<http://www.toilettesdumonde.org/data/file/toilettes-seches-familiales-rapport.pdf>>.

Consulté le 16.11.2016

Bibeau R., 2006. Les TIC à l'école : Proposition de taxonomies et analyse de quelques obstacles à leur intégration en classe informatique, In J. Lebrun, J. Bédard, A. Hasni et V. Grenon (éds.). Le matériel didactique et pédagogique : Soutien à l'appropriation ou déterminant de l'intervention éducative. Québec, Les Presses Universitaires de Laval, pp. 297-325, disponible sur <<https://doi.org/10.7202/1018174ar>>

Bratton, R. L., Nesse R. E., 1993. Ascariasis: an infection to watch for immigrants. Postgraduate Medecine, 93, PP. 171-178. Disponible sur <https://doi.org/10.1080/00325481.1993.11701581>

Brun, F., Delmaire, A., He, Q., Joncoux, S., Bayard, R., Esculier, F., 2017. Caractérisation des matières issues des Toilettes Sèches Mobiles et des risques sanitaires des filières d'assainissement associées. Etude ADEME, 153 pages.

Burkhardt D. 2006. Étude des systèmes décentralisés d'assainissement - Critères caractérisant les toilettes écologiques, Cemagref – ENGEES. Disponible sur : <http://engees.unistra.fr/fileadmin/user_upload/pdf/gsp/Ecosan_UMR_GSP.pdf>

CEFREPADE, 2012. Compostage des déchets ménagers dans les pays en développement : Modalités de mise en place et de suivi d'installations décentralisées pérennes. 57 p.

Disponible sur :

<https://www.pseau.org/outils/ouvrages/cefrepade_compostage_des_dechets_menagers_dans_les_pays_en_developpement_modalites_de_mise_en_place_et_de_suivi_d_installations_decentralisees_perennes_2012.pdf>

CNRTL, 2016. Assainissement [En ligne]. Disponible sur :

<<http://www.cnrtl.fr/definition/assainissement> >

Collins O.C., Robertson S.L., Govinder K.S., 2015. Analysis of a waterborne disease model with socioeconomic classes. Mathematical Biosciences, n° 269, pp.86–93, <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2015.08.016>

Couturier C., Galtier L., 1998. État des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micropolluants au cours de la méthanisation des déchets et sous-produits organiques, Programme ADEME Santé – déchet, 98 p.

CSESS, 2011. Rapport de synthèse du groupe de travail innovation sociale du CSESS (conseil supérieur de l'économie sociale et solidaire. Disponible sur <http://www.lelabo-ess.org/IMG/pdf/GT_IS_CSESS_dec2011.pdf>

Debray, 2004. Rapport au Ministre des affaires étrangères M. Dominique de Villepin du Comité indépendant de réflexion et de propositions sur les relations Franco-Haïtiennes, 104 p. Consulté le 19/08/2017 sur https://www.diplomatie.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_haiti.pdf

De Saulces De Freycinet, C., H., 1870. Principes de l'assainissement des villes, Ed. Hachette Bnf 2017, 442 p.

DINEPA (Direction nationale de l'Eau potable et de l'Assainissement), 2009. Loi-cadre portant sur l'organisation du secteur de l'eau potable et de l'assainissement in Le Moniteur, 25 mars 2009. Disponible sur : <https://www.dinepa.gouv.ht/rokdloads1/documents/loiEPA%20publie%20moniteur.pdf>

DINEPA (Direction Nationale de l'Eau potable et de l'Assainissement), 2013a. Vidange manuelle des ouvrages d'assainissement. Disponible sur : <<https://www.dinepa.gouv.ht/referentieltechnique/doc/2-assainissement/2.5.2 DIT1 Vidange manuelle des ouvrages dassainissement.pdf>>

DINEPA (Direction Nationale de l'Eau potable et de l'Assainissement), 2013b. Assainissement individuel regroupé. Disponible sur <<http://pepahaiti.net/spip.php?article276>>

DINEPA (Direction Nationale de l'Eau potable et de l'Assainissement), 2013c. Filières de traitement des matières de vidange. Disponible sur :
< <https://www.dinepa.gouv.ht/referentieltechnique/doc/2-assainissement/2.5.1%20GUI1%20Filières%20de%20traitement%20des%20Matières%20de%20Vidange.pdf>>

Drechsel P., Scoott C., Raschid-Sally L., Redwood M, Bahri A., 2011. L'irrigation avec des eaux usées et la santé. Évaluer et atténuer les risques dans les pays à faible revenu. IWMI-international water management international, CRDI – centre de recherches pour le développement international, Presses de l'Université du Québec, 479 p.

Duvalier F., 1962. Code rural Dr François Duvalier, Ministère de la justice, Haïti, 59 p. Disponible sur
<http://www.agriculture.gouv.ht/view/01/IMG/pdf/Code_Rural_1984.pdf>

Elain C., 2007. Un petit coin pour soulager la planète. Edition Eauphilane, 5 rue d'Avesnières 53000 Laval, 288 pages. ISBN 978 - 2- 9530877- 0 – 3.

Emmanuel E., Lindskog P., 2000. Regards sur la situation des ressources en eau de la République d'Haïti. Disponible sur :
<<https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/42/210175/210175_doc.pdf>.

Emmanuel E., Pierre M.G., Perrodin Y., 2009. Groundwater contamination by microbiological and chemical substances released from hospital wastewater and health risk assessment for drinking water consumers. Environment International, vol 35, pp.718-726, disponible sur <<https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.01.011>>

Esculier F., 2018. Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques, Université Paris Est, 534 p.

Esrey, S., Gough J., Rapaport D., Sawyer, R., Simpson-Hebert M. and Vargas J., Winblad U., 1998. Assainissement écologique, SIDA, agence suédoise de coopération internationale au développement, 99 p.

Eveleigh D., 2002. Bogs, baths and basins: the story of domestic sanitation, Sutton Publishing, Stroud (Royaume-Uni)

FAO, 2002. Guide diagnostic participatif des contraintes et des potentialités pour la gestion des sols et des éléments nutritifs des plantes, 112 p.

Farling, S., Rogers, T., Knee, J. S., Tilley, E. A., Brown, J., & Deshusses, M. A., 2018. Bioaerosol emissions associated with pit latrine emptying operations. *Science of The Total Environment*, 648, 1082–1086. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.147

Farnsworth H., G., 1940. Sewerage in ancient and medieval times in *Sewage Works Journal*, vol. 12, n° 5, pp. 939-946, disponible sur <http://www.medievalists.net/2008/10/sewerage-in-ancient-and-medieval-times/>

Feachem R., G., Bradley D., J., Garelick H., Mara D., D., 1983. Sanitation and disease: health aspects of excreta and wastewater management, *Water Research*, vol 19, n°1, 131 p., disponible sur [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90337-9](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90337-9)

Franceys, R., Pickford J., Reed R., 1995. Guide de l'assainissement individuel, Catalogue à la Source, Genève, OMS, organisation mondiale de la santé, 251 p.

Gabert J., 2018. Mémento de l'assainissement. Mettre en œuvre un service d'assainissement complet , durable et adapté, éd Quae, 844 p.

Germer J., Boh M.Y., Schoeffler M., Amoah Ph., 2009. Temperature and deactivation of microbial faecal indicators during small scale co-composting of faecal matter. *Waste Management*, Vol 30, pp.185–191, disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.030>

Gilles A., Osnick J., St-Fleur S., 2015. Étude Formative en assainissement, design technique de système d'assainissement et plan de communication pour la promotion de l'assainissement en Haïti. Haïti : UNICEF, 114 p.

Gotaas, H., B., 1959. Compostage et assainissement, Genève, OMS, Organisation mondiale de la Santé, Série de monographie de l'OMS, n° 31

Guerrand, R-H., 2009. Les lieux. Histoire des commodités, éd La Découverte/Poche, 206 p.

Harrou, F., Dairi, A., Sun, Y., & Senouci, M., 2018. Statistical monitoring of a wastewater treatment plant: A case study. *Journal of Environmental Management*, 223, 807–814. doi:10.1016/j.jenvman.2018.06.087

Haug, R., T., 1993. The practical handbook of composting engineering, Baca Raton (FL), CRC press, 752 p.

Hickling S., 2015. Analyse des études de marché et de comportement des consommateurs [En ligne]. Disponible sur : <
https://www.pseau.org/outils/ouvrages/wsp_principaux_determinants_comportementaux_en_matiere_d_assainissement_en_haiti_2015.pdf> . Consulté le 17 juillet 2017.

Hugo, V., 1862. La Terre appauvrie par la mer, dans *Les Misérables*, partie 5, livre 2, chapitre 1, [En ligne]. Disponible sur :
< <http://www.livresse.com/Livres-enligne/lesmiserables/050201.shtml>>

Hutton, G., 2012. Global Costs and Benefits of Drinking-Water Supply and Sanitation Interventions to Reach the MDG Target and Universal Coverage; World Health Organization: Geneva, Switzerland.

IHE (Institut Haïtien de l'Enfance) et ICF, 2018. Enquête Mortalité, Morbidité et Utilisation des Services (EMMUS-VI 2016-2017), Pétion-Ville, Haïti, et Rockville, Maryland, USA , 689 p., [En ligne]. Disponible sur :
<https://www.clio-haiti.org/IMG/pdf/haiti_enquete_mortalite_2c_morbidite_et_utilisation_des_services_emmus-vi_2016-2017_5bfr326_5d_1_.pdf>

Jean, G., Bayard, R., Lacour, J., Naquin, P., 2017. Assainissement par toilettes sèches à litière biomaîtrisée : premiers résultats d'une expérimentation menée en milieu rural (Grande Plaine, commune de Gros-Morne, Haïti). *Déchets Sciences et Techniques* [En ligne], N°74, mis à jour le : 08/09/2017, URL : <http://lodel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/index.php?id=3618>, <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3618>.

Jean, G., Bayard, R., Lacour, J., Naquin, P., 2018a Implementation of a dry toilet with biocontrolled litter device in an Haitian rural area [En ligne]. In: 6th International Dry Toilet Conference. Disponible sur <http://www.huussi.net/wp-content/uploads/2018/08/Jean_Gaston_DT2018.pdf >

Jean, G., Bayard, R., Lacour, J., Naquin, P., 2018b. Composting of dry toilets solid residues: evolution of the characteristics over time, In: 6th International Conference on Sustainable Solid Waste Management - NAXOS 2018.

Jenkins J., 2015. Thermophilic composting as a sanitation alternative, In 5 th International Dry Toilet Conference [En ligne]. Disponible sur : http://huussi.net/wp-content/uploads/2015/06/Jenkins_Dry_Toilet_2015_Final.pdf . Consulté le 02.05.2016

Jenkins J., 2017. Le petit livre du fumain - Manuel de compostage de fumier humain, Ecosociété. Québec, 247 p.

Jenkins J., 2018. Composting as a Sanitation Solution in Nicaragua, In 6th International Dry Toilet Conference, [En ligne]. Disponible sur: http://www.huussi.net/wp-content/uploads/2018/08/Joseph_Jenkins_DT2018.pdf

Jiayi, L., Wang, J., 2001. The practice, problem and strategy of ecological sanitary toilets with urine diversion in China , In *First International Conference on Ecological Sanitation*, novembre 2001, Jiusan Society & Unicef.

Jiménez, B., Asano T., 2008. Water reclamation and reuse around the world, In B. Jiménez et coll. (dir.), *Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs*, Londres, IWA Publishing, 648 p.

Kramer, S., Preneta, N., Kilbride, A., Page, L.N., Coe, C.M. and Dahlberg, A., 2011. The SOIL Guide to Ecological Sanitation, Sebastopol, CA: Sustainable Organic Integrated Livelihoods,[En ligne]. Disponible sur <www.oursoil.org/wp-content/uploads/2015/07/Complete-Guide-PDF.pdf> [Consulté le 17 Mai 2018].

Larousse, 2017. Assainissement. Disponible sur :

<<http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/assainissement/23389>>

Lienert J., Larsen Tove, 2010. A high acceptance of urine source separation in seven European countries: a review. Environmental Science Technology, 44 (2), pp.556–566, disponible sur <<https://doi.org/10.1021/es9028765>>

Lloyd, 2018. EkoLakay Haiti: Can Container-Based Sanitation be a Key Component of Citywide Inclusive Sanitation for Dense Urban Settings? In 6th International Dry Toilet Conference, [En ligne]. Disponible sur <http://www.huussi.net/wp-content/uploads/2018/08/Lloyd-DT2018.pdf>

MacDonald, D.H., 2004. The Economics of Water: Taking Full Account of First Use, Reuse and Return to the Environment.CSIRO Land and Water
http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/volume4_chap06_fr.pdf?ua=1

Mara D., 2004. Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. Earthscan. USA, 2004, 289p. Disponible sur :
<https://www.pseau.org/outils/ouvrages/earthscan_ltd_domestic_wastewater_treatment_in_developing_countries_2003.pdf>

Morgan P., 2007. Latrines à compost. Des latrines hygiéniques à faible coût qui produisent du *compost* pour l'agriculture *dans un* contexte africain, Stockholm Environment Institute, EcoSanRes Programme, 117 p.

Morgan, P., 2008. Toilets That Make Compost. doi:10.3362/9781780441313

Mustin M., 1987. Le compost : gestion de la matière organique. Editions François DUBUS. 35, rue Marthurin-Régnier 75015 PARIS, 954 pages. ISBN 2-864-72008-6.

Nasri, B., Brun, F., Fouché, O., 2017. Evaluation of the quality and quantity of compost and leachate from household waterless toilets in France. Environmental Science and Pollution Research. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-017-0604-z>.

Nkoba T.H., Musibono D.E., Kiatoko M.H., Mbata M.R., Mbu M.C., Pambu L.A., 2015. Impact de l'utilisation d'eaux usées traitées par lagunage à macrophyte à des fins d'irrigation sur la qualité du sol : Cas du traitement avec le vétiver (*Vetivera zizanoides*) dans le périmètre maraîcher de M'pozo, à Matadi, en République Démocratique du Congo. International Journal of Innovation and Applied Studies, Vol. 10, no. 04, pp. 1173-1185.

OMS, 2006. L'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Volume IV – Utilisation des excréta et des eaux ménagères en agriculture, 234 p. Disponible sur : https://www.pseau.org/outils/ouvrages/oms_directives_oms_pour_l_utilisation_sans_risque_des_eaux_usees_des_excreta_et_des_eaux_menageres_volume_iv_utilisation_de_s_excreta_et_des_eaux_menageres_en_agriculture_2012.pdf

OMS, 2017. Maladies diarrhéiques. Disponible sur : <http://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/diarrhoeal-disease>

ONU, 2000. Objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) et l'après-2015 [En ligne]. Disponible sur : http://www.un.org/fr/millenniumgoals/reports/2015/pdf/rapport_2015.pdf

ONU, 2015. Objectifs de développement durable, disponible sur : https://www.unric.org/html/english/library/backgrounders/sdgs_french.pdf

Orzag, 2017. Générations de toilettes sèches [En ligne]. Disponible sur : <http://www.eautarcie.org/05c.html#b>

Pacquement F., Lombard M., 2017. Les bailleurs de fonds doivent changer leur approche de l'aide au développement en Haïti et la considérer dans toute sa complexité, disponible sur : <https://ideas4development.org/haiti-limites-aide-developpement/>

PEPA HAITI, 2016. Capitalisation Programme Assainissement Nord Ouest [En ligne]. Disponible sur : <http://pepahaiti.net/spip.php?article119> . Consulté le 17 juillet 2017.

Piceno, Y. M., Pecora-Black, G., Kramer, S., Roy, M., Reid, F. C., Dubinsky, E. A., & Andersen, G. L., 2017. Bacterial community structure transformed after thermophilically composting human waste in Haiti. PLOS ONE, 12(6), e0177626. doi:10.1371/journal.pone.0177626

PS-Eau, 2012. Intervenir pour l'assainissement dans les pays en développement - Les questions essentielles pour des services durables, 54 pages. Disponible sur : http://www.eau-rhin-meuse.fr/sites/default/files/medias/actus/2013/pseau/guide_pseau.pdf

PS-Eau, 2013. Choisir et mettre en œuvre les services d'assainissement par mini égouts. Disponible sur : https://www.pseau.org/sites/default/files/fichiers/r_d/note_analyse_mini-egouts.pdf

PS-Eau, 2014. Services d'assainissement par mini égouts. Dans quels contextes choisir son option ? Disponible sur : https://www.pseau.org/sites/default/files/fichiers/r_d/guide_mini-egout-francais_web.pdf

PS-Eau et PDM, 2004. Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain, 192 pages. Disponible sur : https://www.pseau.org/outils/ouvrages/pseau_gestion_durable_dechets_assainissement.pdf

Rogers E., 1995. Diffusion of innovation, Free Press, New York, 4th edition, 576 p.

Rose C., Parker A., Jefferson B., and Cartmell E., 2015. The Characterization of Feces and Urine: A Review of the Literature to Inform Advanced Treatment Technology, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45 (2015), 1827–79, disponible sur <<https://doi.org/10.1080/10643389.2014.1000761>>

Schoonmaker Freudenberger K., 1999. *Evaluation Rurale Rapide et Diagnostic Rural Participatif*, CRS, 235 p.

Strauss M., Blumenthal U. J., 1990. Human waste use in agriculture and aquaculture. Utilization practices and health perspectives. IRCWD, International Reference Center for Waste Disposal, Dübendorf, Switzerland, 66 p.

Taylor K., 2018. *Faecal Sludge and Septage Treatment: A guide for low- and middle-income countries*, Rugby, UK, Practical Action Publishing, 349 p.

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, Ph., Schertenleib, R. and Zurbrügg, C., 2014. *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*. 2nd Revised Edition. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland. Edition française 2016. ISBN : 978-3-906484-60-0

TDM (Toilettes du Monde), 2015. *Gestion des sous-produits de toilettes sèches familiales : étude sur le traitement des matières par compostage*, 125 p.

Théodat, J.M., 2017. « Haïti, un Etat fragile dans la Caraïbe », ID4D, 25 juillet 2017, consulté le 25 avril 2018, <https://ideas4development.org/societe-civile-haiti/>

Tønner-Klank, L., Møller, J., Forslund, A., & Dalsgaard, A., 2007. Microbiological assessments of compost toilets: In situ measurements and laboratory studies on the survival of fecal microbial indicators using sentinel chambers. *Waste Management*, 27(9), 1144–1154. doi:10.1016/j.wasman.2006.04.021

Toukep D., D., Tcheutchoua T., E., Mougoué B., 2012. Vulnérabilité des populations vivant dans la mangrove en Afrique Subsaharienne : Cas de Bois de Singes à Douala – Cameroun [En ligne]. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/308653347>

Turcot M, 1999. Effets d'un apport de composts de résidus verts sur la production de maïs-grain, la disponibilité de l'azote et certaines propriétés du sol providence. Mémoire de la Faculté des études de l'université Laval, 93 p

Udert, K. M., Larsen, T. A., Biebow, M., & Gujer, W., 2003. Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system. *Water Research*, 37(11), 2571–2582. doi:10.1016/s0043-1354(03)00065-4

Vigarelo G., 1985. Le propre et le sale. L'hygiène du corps depuis le Moyen-Age, Paris, Seuil, 290 p.

Winblad U., Simpson-Hébert M., 2004. *Ecological Sanitation*, 2^e édition, Stockholm Institute, 2004, 147 p. (ISBN 91-88714-98-5)

WEDC, 2014. Water, Engineering and Development Center, Prévention de la transmission des maladies féco-orales. Disponible sur :
<https://www.pseau.org/outils/ouvrages/Prevention_de_la_transmission_des_maladies_feco_orales.pdf>

WHO and UNICEF, 2013. *Progress on Sanitation and Drinking-Water, Joint Monitoring Program for Water Supply and Sanitation*, Switzerland, Geneva, 40 p.

Winker, M., Vinnerås, B., Muskolus, A., Arnold, U., & Clemens, J. , 2009. Fertiliser products from new sanitation systems: Their potential values and risks. *Bioresource Technology*, 100(18), 4090–4096. doi:10.1016/j.biortech.2009.03.024

WSP, 2012. *Impacts Économiques D'un Mauvais Assainissement En Afrique*. Disponible sur :
<<https://www.wsp.org/sites/wsp.org/files/publications/WSP-Economics-Sanitation-Initiative-Africa-Factsheet-French.pdf>>



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : JEAN	DATE de SOUTENANCE : 21-12-2018
Prénoms : GASTON	
TITRE : Conditions pour la mise en place durable d'une filière d'assainissement par toilettes sèches à litière bio-maîtrisée dans les zones rurales des pays en développement. Application au contexte haïtien	
NATURE : Doctorat	Numéro d'ordre : 2018LYSEI126
Ecole doctorale : Chimie de Lyon	
Spécialité : Environnement	
RESUME : Ce travail vise à proposer une solution d'assainissement durable, digne, sécurisante, accessible à tous, permettant de réduire les maladies à transmission hydrique, adaptée aux populations vivant dans des conditions précaires en zones rurales de pays en développement. Il contribue ainsi à la lutte contre la défécation à l'air libre, une des cibles de l'Objectif de Développement Durable n°6 concernant l'eau et l'assainissement. Le choix s'est porté sur des toilettes sèches individuelles à litière biomaitrisée et un mode de gestion communautaire des résidus, en lien avec une association paysanne locale. La mise en place s'est faite avec un accompagnement scientifique qui a donné lieu aux travaux présentés ici. Dans un premier temps, nous avons opéré selon une approche participative, visant à s'assurer de l'adhésion des utilisateurs. Puis nous avons mené un programme scientifique pour identifier les conditions permettant l'hygiénisation des résidus traités. Après 3 ans d'expérimentation, la filière d'assainissement mise en place est totalement adoptée par les ménages, qui apportent régulièrement leurs résidus sur le site de compostage. Une enquête a fait ressortir que les familles sont très satisfaites de ce mode d'assainissement à domicile et se sentent moins sujettes à des maladies féco-orales. Ces ménages se sont constitués en un groupe qui procède à présent à l'appui à la réplication. Les litières absorbantes utilisées, les résidus avant et après traitement par compostage ont été caractérisés. Des essais en pilotes ont permis de déterminer les conditions permettant de garantir une hygiénisation rapide, ce qui était un de nos principaux objectifs, afin de réduire les risques sanitaires. Nous sommes à présent à même de définir les « bonnes pratiques » pour que la filière d'assainissement par toilettes sèches à litière biomaitrisée dans une zone rurale de pays en développement soit sûre et durable, sur les aspects sociaux, techniques, économiques, environnementaux et sanitaires.	
MOTS-CLÉS : assainissement, pays en développement, Haïti, rural, développement durable, toilette sèche, toilette à litière biomaitrisée, pathogène, hygiénisation, risque sanitaire, compostage, gestion communautaire	
Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire Déchets, Environnement, Eau et Pollution (DEEP)	
Directeur de thèse: BAYARD Rémy	
Président de jury : EMMANUEL Evens	
Composition du jury :	

BARBIER, Rémi	Professeur (ENGEES)	Rapporteur
BAYARD, Rémy	Maître de conférences HDR (INSA Lyon)	Directeur de thèse
EMMANUEL, Evens	Professeur HDR (Université Quisqueya)	Examineur
LACOUR, Joaneson	Enseignant chercheur, Docteur (Université Quisqueya)	Co-directeur de thèse
LECOMTE, Chloé	Docteur	Examinatrice
TASSIN, Bruno	Professeur (ENPC)	Rapporteur