

Filière Technologies du vivant

Orientation Biotechnologie

Travail de bachelor Diplôme 2018

Alain Cornillet

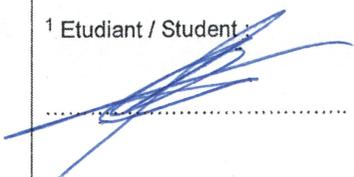
*Mise en œuvre et maintenance de
biodigesteurs au Rwanda*

- *Professeur*
Simon Crelier
- *Expert*
Stéphane Genoud
- *Date de la remise du rapport*
31.08.2018

SYND	ETE	TEVI
X	X	X

Filière / Studiengang TEVI	Année académique / Studienjahr 2017/2018	No TD / Nr. DA bt12018\16
Mandant / Auftraggeber <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input checked="" type="checkbox"/> Swisscontact, Zürich	Etudiant / Student CORNILLET Alain Professeur / Dozent CRELIER Simon	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input checked="" type="checkbox"/> IPRC West, Kibuye (Rwanda)
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) GENOUD Stéphane, HES/SO Valais Wallis (IEM)	

Titre / Titel	Mise en oeuvre et maintenance de biodigesteurs au Rwanda
Description / Beschreibung	<p>La production de biogaz à l'échelle domestique par digestion anaérobie de déchets organiques présente des atouts considérables pour le Rwanda en termes d'économie, de développement durable et de santé publique. Le candidat se rendra à l'IPRC West de Kibuye sous l'égide de Swisscontact en tant qu'expert junior, avec les objectifs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Effectuer un recensement des équipements de méthanisation dans la région de Kibuye et identifier les causes des dysfonctionnements éventuels • Mettre sur pied un laboratoire robuste pour le suivi et le diagnostic des méthaniseurs • Evaluer l'opportunité de la remise en état – à des fins didactiques –des digesteurs de 200 L construits pendant le travail de diplôme de José Hoyos Munoz en 2016 • Développer du matériel pédagogique (éléments théoriques, protocoles expérimentaux) à l'intention des professeurs et des étudiants de l'IPRC West • Former 2 collaborateurs de l'IPRC à la gestion et au dépannage d'installations de méthanisation • Coordonner le travail de rédaction de la méthode d'exploitation sur place. • Rédaction, mise à disposition des protocoles pour le dépannage des méthaniseurs existants • Réaliser une étude de faisabilité relative à la construction d'un digesteur de démonstration à l'échelle de 8 m³ env. sur le site de l'IPRC

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum	Délais / Termine
Responsable de l'orientation / filière Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang: 	Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 30.04.2018 Fin des travaux de diplôme dans les laboratoires de l'école / Ende der Diplomarbeiten in den Labors der Schule : 13.07.2018
¹ Etudiant / Student : 	Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: A définir (TD à l'étranger)
	Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: Non-pertinent (TD à l'étranger)
	Défense orale / Mündliche Verfechtung: dès la semaine 35 / ab Woche 35

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.



Mise en œuvre et maintenance de biodigester au Rwanda

Diplômant Alain Cornillet

Objectif du projet

L'objectif de ce travail de diplôme était de renforcer les connaissances des professeurs de l'IPRC-Karongi dans le domaine de la technologie du biogaz tout apportant un soutien aux propriétaires de biodigesteurs de la région.

Méthodes | Expériences | Résultats

Les travaux réalisés au Rwanda ont débuté par une appréhension de la situation dans la région de Karongi, en réalisant un inventaire des biodigesteurs. Quinze installations ont été visitées, permettant de constater leur bon état général et une exploitation par les propriétaires relativement similaire. La production de biogaz ne semble toutefois pas suffisante pour couvrir les besoins domestiques des utilisateurs. Un dépannage a été effectué sur une installation qui ne produisait pas de biogaz depuis son démarrage, mais aucune solution n'a pu être identifiée. Un manuel d'utilisateur, ainsi qu'un protocole de dépannage ont été rédigés en anglais sur la base des observations faites sur place et mis à disposition des professeurs de l'IPRC. Une étude de faisabilité portant sur la construction d'un digesteur à des fins d'enseignement a été réalisée durant le séjour et a confirmé la viabilité d'un tel projet. Du matériel pédagogique a été mis à disposition des collaborateurs de l'IPRC-Karongi afin de renforcer leur compréhension de la technologie du biogaz. Un prototype de digesteur de 200 L a été remis en état en vue d'une future exploitation par les employés de l'école polytechnique.

Travail de diplôme | édition 2018 |

Filière
Technologie du vivant

Domaine d'application
Biotechnologie

Professeur responsable
Simon Crelier
simon.crelier@hevs.ch

Partenaire
IPRC-Karongi, Rwanda



Sommet du dôme de la chambre d'évacuation d'un digesteur de type CAMARTEC, construit en 2017 dans le cadre du programme FONERWA au Rwanda.



Chambre d'alimentation permettant l'injection de substrats dans un digesteur de 100 m³ à la prison de Mageragere, près de Kigali (Rwanda).

Table des matières

Table des abréviations	2
1. Introduction	3
1.1. Mise en contexte du travail de diplôme	3
1.2. Situation du Rwanda en 2018.....	4
1.3. Objectifs du travail de diplôme.....	5
2. Déroulement des activités.....	5
3. Inventaire des digesteurs	7
3.1. Protocole de recensement et de caractérisation des digesteurs	7
3.2. Résultats et discussion sur le recensement des digesteurs.....	8
3.2.1. Vue d'ensemble des résultats	8
3.2.2. Substrat(s) utilisé(s) et fréquence	10
3.2.3. Conditions opératoires des installations	13
4. Maintenance et dépannage de digesteurs domestiques	15
4.1. Modèle de digesteur à dôme fixe employé dans la région de Karongi	15
4.2. Exploitation des digesteurs.....	17
4.2.1. Situation	17
4.2.2. Constatations tirées des observations	18
4.3. Maintenance des digesteurs.....	19
4.3.1. Situation	19
4.3.2. Constatations tirées des observations	19
4.4. Dépannage des digesteurs.....	22
4.4.1. Situation	22
4.4.2. Dépannage du site de S. NTAGAHINDA.....	22
4.4.3. Rédaction d'un protocole de dépannage	23
4.4.4. Constatations tirées des observations	24
4.5. Discussion sur la maintenance et le dépannage des digesteurs	24
4.6. Préparation d'un laboratoire d'analyses	25
4.6.1. Situation	25
4.6.2. Propositions d'acquisition de matériel.....	26
4.7. Réhabilitation d'un prototype de digesteur de 200 L.....	27
4.8. Evaluation de l'utilisation d'un réservoir à eau comme digesteur	29
5. Etude de faisabilité de la construction d'un digesteur sur le site de l'IPRC.....	30

5.1. Objectifs généraux de l'étude de faisabilité	30
5.2. Dimensionnement de l'installation et exploitation	31
5.3. Discussion sur les constatations	32
5.4. Conclusion de l'étude de faisabilité	32
6. Transmission des connaissances	32
6.1. Organisation de séminaires de formation	33
6.1.1. Séminaire 1 : présentation générale du projet	33
6.1.2. Séminaire 2 : présentation de la digestion anaérobie.....	34
6.2. Formation d'une équipe de dépannage	34
6.3. Discussion sur la transmission des connaissances.....	35
7. Discussion du projet de diplôme.....	36
7.1. Phase 1 : inventaire des méthaniseurs	36
7.2. Phase 2 : maintenance et dépannage des digesteurs	36
7.3. Phase 3 : rédaction d'un manuel d'utilisateur et d'un protocole de dépannage.....	38
7.4. Phase 4 : étude de faisabilité de la construction d'un digesteur.....	39
7.5. Phase 5 : transmission des connaissances.....	40
8. Conclusion du projet.....	41
9. Perspectives du projet	42
10. Remerciements.....	43
11. Bibliographie	44
12. Annexes.....	I

Table des abréviations

BMP : *biochemical methane potential*
 CICR : Comité International de la Croix Rouge (en anglais = ICRC)
 DA : digestion anaérobie
 FDDM : *Fondation pour le Développement Durable des régions de Montagne*
 FONERWA : *Fund for Environment and Natural Resources for Rwanda*
 IPRC : *Integrated Polytechnic Regional Center*

HRT [jour] : *hydraulic retention time* (temps de rétention hydraulique)
 NDBP: *National Domestic Biogas Program*
 PROMOST : *Promoting Market Oriented Skills Training in the Great Lakes regions*
 RCS : *Rwandan Correctional Services*
 RDC : République Démocratique du Congo
 UNHCR : *United Nations High Commissioner for Refugees*

1. Introduction

1.1. Mise en contexte du travail de diplôme

Les activités réalisées s'inscrivent dans le cadre d'une collaboration entre la HES-SO Valais/Wallis en Suisse et l'IPRC-Karongi au Rwanda, sous la supervision de l'ONG Swisscontact. Celle-ci participe au projet PROMOST, visant à renforcer :

1. L'accès à la formation professionnelle.
2. La qualité de la formation.
3. La certification et la reconnaissance des acquis.
4. Le *capacity building* et le management de la formation.
5. Le lien entre les institutions financières et la formation.

Ce projet de diplôme se situe lui-même dans la quatrième rubrique, soit la construction de connaissances et de capacités vis-à-vis de la technologie du biogaz pour les collaborateurs de l'IPRC-Karongi, avec le soutien de la HES-SO Valais/Wallis. Les interactions entre les différentes parties impliquées dans le projet sont présentées sur la fig. 1.



Fig. 1 : diagramme représentant les différentes parties impliquées dans le projet « Biogaz au Rwanda »

1.2. Situation du Rwanda en 2018

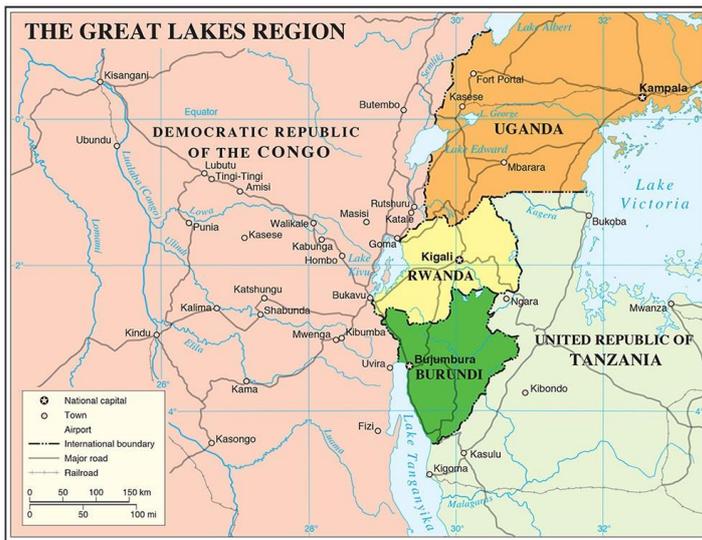


Fig. 2: Région des Grands Lacs en Afrique, zone géopolitique regroupant les quatre pays du Burundi, de la République Démocratique du Congo (RDC), du Rwanda et de l'Ouganda. Source [1]

La République du Rwanda est un pays montagneux situé en Afrique de l'Est, dans la région dite « des Grands Lacs », selon l'appellation géopolitique regroupant quatre pays riverains de ces lacs (Burundi, RDC, Ouganda et Rwanda) (fig. 2). Le pays jouit d'un climat tempéré, compris entre 25 et 28°C, à une altitude entre 1000 et 4500m. Le recensement de la population réalisé en 2012 dénombre 10.5 millions d'habitants et une croissance démographique estimée à 2.37% en 2018 [1].

Comme il a été présenté dans le rapport de projet précédant le présent travail de diplôme [2], la technologie du biogaz a été implantée au Rwanda depuis 1982 [3] et développée au moyen de plusieurs programmes. Ceux-ci sont notamment le NDBP (depuis 2006) et le FONERWA (depuis 2012) qui visaient chacun à réduire la consommation de biomasse par les foyers rwandais et l'érosion des sols due à la déforestation, illustrée à la fig. 3.

Ces programmes s'inscrivent tous dans la volonté du gouvernement rwandais de transformer le Rwanda en un pays « plus sain, éduqué et généralement plus prospère [...], cherchant à être unis et compétitif autant régionalement que globalement » [4]. Cette citation est issue de la présentation du projet *Vision 2020*, qui consiste en une série de lignes directrices cherchant à mener le Rwanda vers une meilleure gouvernance et une meilleure gestion de ses ressources d'ici à 2020. Elles concernent tant le développement des ressources humaines, des connaissances et de l'économie que celui des infrastructures, de l'agriculture et de la protection de l'environnement.



Fig. 3: Effondrement d'une route dû à l'érosion des sols dans la région de Karongi. Photographie prise le 04.06 près du village de Nyabikense (cellule Burunga, secteur Bwishyura, district de Karongi).

1.3. Objectifs du travail de diplôme

Dans le cadre de ce travail de diplôme, les objectifs ont été établis en accord entre les parties intervenantes, soit la HES-SO Valais/Wallis et l'IPRC-Karongi, sous la supervision de l'ONG Swisscontact.

Ces objectifs – tels qu'ils ont été établis au commencement – sont les suivants :

1. Effectuer un recensement des équipements de méthanisation dans la région de Kibuye et identifier les causes des dysfonctionnements éventuels.
2. Mettre sur pied un laboratoire robuste pour le suivi et le diagnostic des méthaniseurs.
3. Evaluer l'opportunité de la remise en état — à des fins didactiques — des digesteurs de 200 L construits pendant le travail de diplôme de José Hoyos Muñoz en 2016.
4. Développer du matériel pédagogique (éléments théoriques, protocoles expérimentaux) à l'attention des professeurs et des étudiants de l'IPRC-Karongi.
5. Former 2 collaborateurs de l'IPRC à la gestion et au dépannage d'installations de méthanisation.
6. Coordonner le travail de rédaction de la méthode d'exploitation sur place.
7. Rédiger, mettre à disposition des protocoles pour le dépannage des méthaniseurs existants.
8. Réaliser une étude de faisabilité relative à la construction d'un digesteur de démonstration à l'échelle de 8 m³ env. sur le site de l'IPRC.

Les objectifs de ce travail, cités dans ce chapitre ont une finalité qui possède également une dimension durable. En effet, en aidant au développement de la technologie du biogaz au Rwanda, ce travail de diplôme vise à :

- Réduire la consommation en bois de chauffage et charbon pour la cuisine dans les foyers rwandais.
- Limiter l'érosion des sols due à une déforestation massive identifiée comme étant une des conséquences de cette consommation en biomasse [5].
- Améliorer les conditions sanitaires, économiques et sociales des propriétaires d'un digesteur domestique, notamment en réduisant la production de suie responsable de dommages pulmonaires, en limitant les coûts relatifs à l'achat de bois/charbon pour la cuisine et le temps de trajet nécessaires à se les procurer [6, p. 44].
- Renforcer les connaissances des membres de l'IPRC-Karongi dans la digestion anaérobie et la compréhension des digesteurs en usage au Rwanda.

2. Déroulement des activités

A l'établissement des buts du travail de diplôme, plusieurs phases ont été identifiées, exprimant un chemin chronologique d'activités menant à la réalisation des objectifs fixés. Ces phases sont décrites ci-après :

1. Inventaire des biodigesteurs

La première phase des travaux menés dans le cadre du projet consiste à réaliser un recensement des digesteurs de la région entourant l'IPRC-Karongi et d'identifier de possibles dysfonctionnements.

Une évaluation des performances de l'installation est également menée, complétée par une série de questions posées au propriétaire de chaque installation. Ces investigations ont pour objectif de définir la manière dont le biodigester est utilisée, la maintenance apportée à l'installation ainsi que les usages du biogaz produit.

2. Maintenance et dépannage des digesteurs domestiques

Après l'exécution de la première phase du projet et une fois synthétisées les informations relatives aux digesteurs de la région de Karongi, une sélection de 2 à 3 méthaniseurs hors service est effectuée en collaboration entre l'IPRC-Karongi et la HES-SO, selon des critères d'accessibilité, de faisabilité du dépannage et de coûts, notamment.

Sur la base de cette sélection, un dépannage est réalisé en fonction des problèmes identifiés, et un protocole de travaux est mis en place.

Une évaluation des possibilités d'amélioration des installations – de manière générale – est également réalisée en marge de ces travaux, incluant une étude de faisabilité et de coûts.

3. Etablissement des protocoles d'utilisation et de dépannage

En parallèle des travaux de dépannage, le protocole précédemment cité, ainsi qu'un manuel d'utilisation s'adressant prioritairement aux propriétaires des digesteurs, sont rédigés en anglais, puis seront traduits en kinyarwanda par les collaborateurs de l'IPRC. Ceci pour les rendre accessibles à chacun, dans un langage adapté.

Une planification et une organisation de séminaires à l'attention des membres de l'IPRC-Karongi sont réalisés en marge de ces travaux, comme première partie de la phase numéro cinq.

4. Etude de faisabilité d'un digesteur à dôme fixe sur le site de l'IPRC-Karongi

Une étude de faisabilité, s'intéressant prioritairement à la gestion anaérobie en tant que telle, est réalisée sur le site de l'IPRC-Karongi. Cette étude déterminera la possibilité de construire un digesteur à dôme fixe, sur la base des modèles utilisés dans la région et construits – pour la grande majorité – par la FONERWA courant 2017.

Un dimensionnement de l'installation est réalisé en fonction du substrat – constitué quasiment exclusivement de déjections humaines – et des besoins identifiés en termes de production de biogaz sur le site.

5. Transmission des connaissances et formation

Parallèlement à ces activités, et dans la continuité de la planification réalisée en phase trois, des formations sont dispensées sous forme de séminaires à l'attention des professeurs et étudiants de l'IPRC-Karongi. L'objectif de cette démarche est de transmettre un maximum de connaissances aux personnes qui seront chargées de la maintenance et de l'identification de dysfonctionnements futurs sur les digesteurs autour de Karongi.

Un accent particulier est mis sur la compréhension générale du bioprocédé et la résolution pratique de problématiques concrètes.

3. Inventaire des digesteurs

Les buts de l'inventaire de méthaniseurs réalisés autour de Karongi entre le 29 mai et le 3 juillet 2018 étaient principalement de rendre compte des conditions opératoires des installations et de leur état général. Ce chapitre traite des observations réalisées à partir de ces visites, tandis que les comptes-rendus de chacune d'entre elles sont présentés en annexes 1 à 15 du présent rapport.

3.1. Protocole de recensement et de caractérisation des digesteurs

Deux catégories principales ont été distinguées pour les méthaniseurs recensés :

- Les modèles domestiques, dont le propriétaire est un agriculteur et dont le volume n'excède généralement pas 8 m³.
- Les modèles institutionnalisés, dont le propriétaire est une organisation (école, prison) et dont le volume est généralement supérieur à 10 m³.

Lors des visites, plusieurs éléments étaient déterminés de manière à caractériser l'installation, au moyen de questions adressées au propriétaire, présentée dans le tableau 1 :

Tableau 1: Questions adressées au propriétaire d'un digesteur lors du recensement.

#	Questions
Généralité & maintenance	
1	Quand a été construit le biodigesteur ?
2	Qui l'a construit ? L'a financé ?
3	Avez-vous encore des contacts avec ces instances ?
4	Quel type de formation avez-vous reçu pour utiliser le digesteur ?
5	En cas de problème, savez-vous qui contacter ?
Substrat	
6	Quel type de substrat utilisez-vous ?
7	A quelle fréquence ? Quelle quantité ?
8	Utilisez-vous des excréments humains ?
Biogaz	
9	Quel type de cuisson pouvez-vous réaliser avec le biogaz produit ?
10	Avez-vous constaté des variations de la production au cours du temps ?
Digestat	
11	Comment utilisez-vous le digestat ?
Perspectives	
12	Êtes-vous satisfait de l'installation ?
13	De quelle amélioration pourriez-vous bénéficier ?

Par la suite, les paramètres du digesteur étaient relevés par les intervenants :

1. Volume du digesteur
2. Mesure du pH du digestat par papier pH ou par sonde
3. Mesure de la température du digestat dans la chambre d'évacuation
4. Pression de gaz sur le manomètre de la cuisine (si disponible)

Ces éléments permettent par la suite d'estimer le temps de rétention hydraulique (HRT) ainsi que d'évaluer le fonctionnement général des installations. En fonction de ces points, le rapport de chaque visite est réalisé, tel que stipulé plus haut.

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.



3.2. Résultats et discussion sur le recensement des digesteurs

Le recensement des méthaniseurs a permis de mettre en lumière plusieurs éléments se rapportant aux rubriques mentionnées dans le tableau 1, soit :

1. Généralités autour des installations (intégrité du digesteur, exploitation, maintenance)
 1. Substrat(s) utilisé(s) et fréquence
 2. Biogaz produit, état des conduites et utilisation du biogaz
 3. Utilisation du digestat
 4. Perspectives d'amélioration des digesteurs

Par souci d'uniformité et d'aisance, ces points seront énumérés ainsi dans les résultats.

3.2.1. Vue d'ensemble des résultats

Le tableau 2 permet d'établir une première vue d'ensemble des installations visitées et de leurs configurations.

Tableau 2: Vue d'ensemble des installations recensées lors de l'inventaire. Légende : D = domestique, I = institutionnel.

#	Type	Propriétaire	Lieu	Construit par...	En...	Formation initiale?	En service?
1	I	Referral Hospital	Kibuye Cell	UNHCR	2014	Non	Non
2	D	MADENDE Z.	Kiniha Cell	FONERWA	2017	Démo	Oui
3	D	NAIMURWANGO B.	Burunga Cell	FONERWA	2017	Démo	Oui
4	D	KAYITERA J.-B.	Burunga Cell	FONERWA	2017	Démo	Oui
5	D	KABERA G.	Burunga Cell	FONERWA	2017	Démo	Oui
6	D	UZABAKIRIHO T.	Burunga Cell	FONERWA	2017	Démo	Oui
7	D	NTIVUGURUZA L.	Burunga Cell	FONERWA	2017	Démo	Oui
8	D	NYANDWI E.	Kayenzi Cell	FONERWA	2017	Démo	Oui
9	D	BITWAYIKI I.	Kayenzi Cell	FONERWA	2017	Démo	Oui
10	D	FASHAHO F.	Kayenzi Cell	FONERWA	2017	Démo	Oui
11	D	NTAGAHINDA S.	Kayenzi Cell	FONERWA	2017	Démo	Non
12	I	RCS	Rubavu	TUMBA + CICR	2012	Suivi TUMBA (1 an)	Oui
13	I	IPRC	Tumba	IPRC-TUMBA	n.d.	Sur place	Oui
14	I	RCS	Mageragere	TUMBA + CICR	2015	Suivi TUMBA (1 an)	Oui
15	I	Catholic church	Kiniha Cell	FONERWA	?	?	Non

Parmi les installations visitées, seules trois d'entre elles (#1, #11 et #15) sont hors service. Concernant les autres digesteurs, plusieurs propriétaires ont déclaré ne pas disposer d'assez de biogaz pour cuire des aliments durs tels que des haricots, mais peuvent chauffer de l'eau et cuire du riz durant environ 30 minutes. Le service correctionnel de Rubavu a, quant à lui, pu réduire sa consommation journalière en stères de bois de 16 à 5 depuis l'installation de son digesteur.

Le programme FONERWA (2012) [7] s'est chargé de promouvoir la construction de digesteurs domestiques au cours des dernières années dans la région de Karongi ; la totalité des installations domestiques de cette liste a été construite au cours de l'année 2017 par ce programme. La fig. 4, p.9 est un détail du plan de construction de ces installations (cf. Annexe 16 : plan de construction d'un digesteur, programme NDBP) et permet une vue d'ensemble d'un digesteur type. Il peut être constaté sur cette figure que le système ne dispose pas d'agitation propre dans le dôme. La pression maximale de gaz accumulé peut atteindre 80 cm de colonne

d'eau (8 kPa), correspondant à la hauteur maximale de déplacement du digestat avant son éjection de la chambre 3 ($H_d + H_{Flow}$ sur la figure). La chambre 2 ne possède pas d'ouverture outre la sortie de gaz. Une ouverture au sommet de la chambre 3 est visible, permettant l'accès au digestat évacué du dôme de digestion pour prélèvement ou nettoyage.

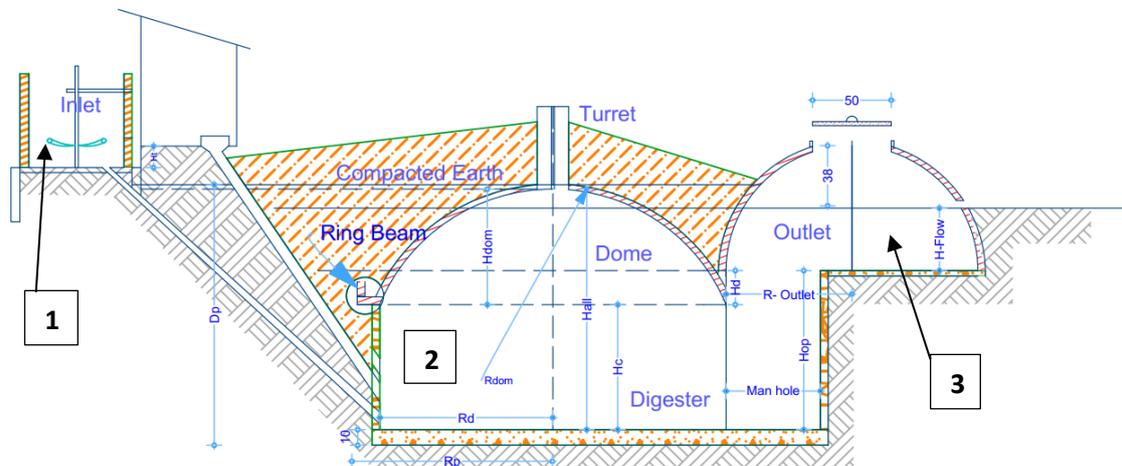


Fig. 4 : plan de construction d'un digesteur domestique à dôme fixe tel qu'installé par le programme FONERWA au cours de l'année 2017. Selon les plans originaux, ces plans sont adaptés de 4 à 10 m³. Source [9].

Légende : (1) : chambre d'alimentation, (2) : chambre de digestion, (3) : chambre d'évacuation.

L'IPRC-Tumba est l'une des écoles polytechniques partenaires de l'IPRC-Karongi. Celle-ci a développé une spécialisation dans les énergies alternatives et a des compétences dans ce domaine depuis déjà une dizaine d'années. C'est la raison pour laquelle ils ont été chargés de développer les plans des digesteurs des services correctionnels rwandais (RCS) (#12 et #14), les financements étant fournis par le CICR. Selon les indications de l'expert en charge du biogaz à l'IPRC-Tumba, un suivi d'un an était réalisé par l'école auprès de chaque site pénitentiaire. Ceux-ci étaient cependant chargés de la maintenance et de l'entretien des digesteurs (par les prisonniers, sous la supervision des gardiens), de manière à développer leur autonomie.

Concernant les digesteurs domestiques (#2 à #11), plusieurs propriétaires ont signalé que la formation initiale dispensée par le programme FONERWA consistait en une démonstration en groupe du fonctionnement des installations. Des explications générales quant à l'entretien et l'utilisation des digesteurs étaient dispensées, mais aucun support n'était fourni au-delà.

Le digesteur de l'hôpital de Karongi (#1, fig. 5) a été réalisé sous forme de don par l'UNHCR. Selon le responsable de la maintenance, aucune formation n'a été dispensée pour l'utilisation et l'entretien de ce digesteur, et aucun contact n'a été possible pour le réhabiliter après sa mise hors service.

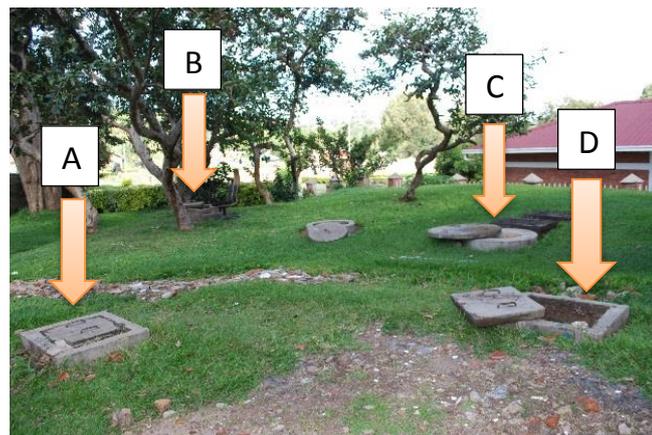


Fig. 5 : digesteur de l'hôpital de Karongi. (A) et (D) : regards sur chambres d'évacuation secondaires, (B) : évacuation du digestat, (C) : chambre d'évacuation principale. Photo prise le 29.05 à l'hôpital de référence de Karongi.

Pour toutes les installations, les propriétaires affirment ne réaliser aucune maintenance sur les digesteurs autre que nettoyer les éléments extérieurs. Ces installations étant récentes, il peut être considéré qu'aucun problème majeur dû à une sédimentation excessive ou une obstruction des conduites n'est encore à déplorer. Il conviendrait cependant d'établir des prévisions concernant l'entretien sur le long terme (5-10 ans).

3.2.2. Substrat(s) utilisé(s) et fréquence

Concernant les substrats utilisés pour chacune des installations, le tableau 3 permet une vue d'ensemble des dispositions.

Tableau 3: Vue d'ensemble des substrats utilisés dans les installations de méthanisation recensées durant les travaux. La fréquence mentionnée en colonne D se rapporte à la colonne C. Légende : Cd = cow dung (excréments bovins), Hw = human waste (excréments humains), Ur = urine, W = water (eau).

#	A : Propriétaire	B : Feed	C : Fréquence	D : Quantité par fréquence
1	Referral Hospital	Hw	-	-
2	MADENDE Z.	Cd	n.d.	n.d.
3	NAIMURWANGO B.	Cd + Ur	4x/sem	n.d.
4	KAYITERA J.-B.	Cd	1x/2 j	n.d.
5	KABERA G.	Cd	1x/j	20 kg Cd + 80 L W
6	UZABAKIRIHO T.	Cd + Hw	Si biogaz diminue	~200 kg Cd + Hw + 200 L W
7	NTIVUGURUZWA L.	Cd	1x/j	n.d.
8	NYANDWI E.	Cd	1x/2 j	20 kg Cd + 20 L W
9	BITWAYIKI I.	Cd	1x/sem	n.d.
10	FASHAHO F.	Cd	2x/j	20 kg (Cd + Hw) + 20 L W
11	NTAGAHINDA S.	Cd	1x/3 j	60 kg Cd + 60 L W
12	RCS	Cd + Hw	1x/j + Hw	400 kg Cd + 0.5 kg Hw/pers. + 1L W/kg feed
13	IPRC	Cd + Hw	1x/j + Hw	210 kg feeding + 210 kg W
14	RCS	Cd + Hw	1x/j + Hw	60 kg Cd + 40 L W + 1 kg Hw/pers.
15	Catholic church	Cd	-	-

Tous les digesteurs en fonction qui ont été recensés utilisent des excréments bovins comme substrat, confirmant les éléments issus de la littérature [5], [8] quant aux objectifs initiaux de programmes NDBP et FONERWA visant à développer la technologie du biogaz au Rwanda en utilisant ce type de substrat.

Il a pu être observé sur le terrain qu'une chambre d'alimentation (fig. 6, p.11) a été mise en place pour ces digesteurs. Cette chambre sert à réaliser un brassage du substrat tout en y ajoutant de l'eau, créant ainsi un mélange homogène (fig. 7, p.11). Selon les instructions qu'ils ont reçues, les propriétaires des digesteurs retirent les débris non fermentescibles (minéraux et végétaux). Une fois le mélange homogène, le substrat est injecté dans la chambre de digestion (dôme enterré).



Fig. 6 : le substrat est mixé avec l'eau, formant un mélange homogène, d'où les composants non-fermentescibles sont retirés manuellement. Photo prise le 29.06 dans la propriété de Simon NTAGAHINDA.



Fig. 7 : chambre d'alimentation couplée au digesteur et munie d'un bouchon permettant d'homogénéiser le substrat avant son injection dans la chambre de digestion. Photo prise le 29.06 dans la propriété de Simon NTAGAHINDA.

L'utilisation d'excréments humains est moins systématique, seuls quatre digesteurs en fonction exploitant cette ressource (#6, #12, #13 et #14). Parmi eux, le #6 (Annexe 6 : rapport d'inventaire, digesteur de T. UZABAKIRIHO) est un digesteur domestique. Selon les déclarations du propriétaire, la production de biogaz est bonne, bien qu'elle ne permette pas de cuisson à longue durée. Les digesteurs #12 à #14 concernent les deux prisons visitées (Rubavu et Mageragere) ainsi que le site de l'IPRC-Tumba. Ces sites utilisent une combinaison d'excréments humains et bovins depuis le début, la production de biogaz associée ayant permis une diminution de l'utilisation de bois pour la cuisine (Annexe 12 : rapport d'inventaire, digesteur de la prison de Rubavu).

Plusieurs installations domestiques ont été prévues pour utiliser les excréments humains, et un accès direct à la chambre de digestion y a été installé (fig. 8).



Fig. 8 : accès direct à la chambre de digestion, prévu pour l'utilisation d'excréments humains comme substrat. Echelle : longueur du calepin = 17 cm. Photo prise le 31.05 sur la propriété de Léonard NTIVUGURUZA.

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

Seul un des propriétaires (#3) a déclaré utiliser abondamment de l'urine de vache tout en constatant une production de biogaz relativement faible. Il lui a été suggéré de réduire son utilisation d'urine, sachant qu'une trop forte concentration en azote (> à 30% du volume totale d'eau, selon [9]) dans le milieu de fermentation peut causer une inhibition, voire un arrêt de la culture [2], [10].

Concernant la fréquence et la quantité d'alimentation des digesteurs domestiques (#2 à #11), il semble que la formation procurée par le programme FONERWA n'ait pas donné d'instruction précise, chaque propriétaire utilisant un rythme qui lui est propre.

Compte tenu du fait que la production de biogaz est relativement similaire pour tous les propriétaires utilisant uniquement des excréments bovins – selon leurs déclarations – l'impact réel de ce paramètre est difficile à déterminer. Il a cependant été suggéré à chacun, en s'appuyant sur la littérature [6], [11], de conserver un rythme régulier d'une fois par jour, dans la mesure du possible.

Il semble que les propriétaires ont également tendance à suivre les prescriptions qui recommandent d'ajouter une quantité égale d'eau et d'excréments bovins, à une exception (#5) qui utilise déjections et eau dans un ratio 1:4. Les matières fécales humaines, quant à elles, ne sont pas contrôlées dans la mesure où la connexion entre les toilettes et la chambre de digestion s'effectue directement.

Il peut être constaté que malgré leur dénominateur commun qui est l'IPRC-Tumba comme planificateur des projets, les installations de méthanisation des services correctionnels rwandais (RCS) considèrent un apport en substrat différent pour chaque site. Aucune explication n'a été fournie pour justifier cette divergence.

Aucun propriétaire n'a déclaré utiliser un autre type de substrat, tel que des restes alimentaires, des déchets agricoles ou des plantes. Outre la faible probabilité pour ces personnes de générer des restes non consommés par homme ou animaux, ce choix peut s'expliquer par la formation initiale reçue de la part du programme FONERWA [7] ou du NDBP [5], où le but premier était de réutiliser les excréments bovins.

Il peut également être mentionné que l'apport en eau durant la saison sèche peut devenir problématique dans les régions ne bénéficiant pas de source à proximité. Les propriétaires de digesteurs ont été plusieurs à déclarer ne disposer que du volume nécessaire à abreuver leur bétail et au moins l'un d'entre eux a déclaré remplacer totalement l'eau par de l'urine en cas de période de sécheresse (Annexe 3 : rapport d'inventaire, digesteur de B. NAIMURWANGO).

En synthèse de ces observations, la disparité des utilisations des installations de méthanisation met en évidence le peu de suivi organisé par les programmes qui ont implantés ces systèmes chez les particuliers. Il conviendrait d'évaluer l'intérêt et la nécessité d'assainir ces utilisations, en poussant les propriétaires à revenir à une méthode unique (1x/jour, masse/volume fixe) pour un même type d'installation. Il convient cependant de souligner que, malgré cette disparité, la production de biogaz semble être identique (cf. chap. 3.2.3).

3.2.3. Conditions opératoires des installations

Le dernier point de cet inventaire a consisté à recenser les conditions opératoires et les paramètres (T [°C], p [kPa], HRT [j], V [m³], pH [-]) des digesteurs cités au chapitre précédent. Le tableau 4 permet une visualisation de ces conditions.

Tableau 4 : conditions opératoires des installations de digestion anaérobie. La température mesurée correspond à celle du digestat, sauf indication contraire. Le pH a été relevé par pH-mètre (a), ou par papier pH (b).

#	Propriétaire	V [m3]	HRT [j]	Pression [kPa]	T [°C]	pH [-]
1	Referral Hospital	n.d.	-	-	-	-
2	MADENDE Z.	4	n.d.	8	24	6.5 _a
3	NAIMURWANGO B.	4	n.d.	8	n.d.	7.04 _a
4	KAYITERA J.-B.	4	n.d.	8	22	7 _b
5	KABERA G.	4	40	8	22	7 _b
6	UZABAKIRIHO T.	4	n.d.	8	22	7.11 _a
7	NTIVUGURUZWA L.	4	n.d.	8	22	7 _b
8	NYANDWI E.	4	40	15	22.5	6.9 _{3a}
9	BITWAYIKI I.	~10	n.d.	n.d.	26	8 _b
10	FASHAHO F.	4	50	n.d.	21	7.54 _a
11	NTAGAHINDA S.	4	33	n.d.	20	6.54 _a
12	RCS	400	40	12	22	7.26 _a
13	IPRC	42	80	1-10	35 (digesteur)	7 _b
14	RCS	900	40	15	n.d.	n.d.
15	Catholic church	4	-	-	-	-

Selon le tableau 4, il peut être constaté que les modèles de digesteurs construits dans le cadre du programme FONERWA et qui sont en fonction (#2-8, #10 et #11) ont des conditions opératoires similaires : le volume est de 4 m³, la pression de sortie déclarée par les propriétaires est de 8 kPa, la température moyenne du digestat de 22°C et le pH moyen de 7.0 [-].

Lorsque les informations étaient disponibles, le HRT des installations a été estimé en fonction du volume total du digesteur et du volume journalier de substrat. Celui-ci se situe en moyenne à 40 jours, correspondant aux informations fournies par le spécialiste en biogaz de l'IPRC-Tumba, toutefois il conviendrait d'effectuer de plus amples contrôles pour confirmer cette assertion.

Les conditions opératoires des digesteurs des services correctionnels rwandais (#12 et #14) semblent être nécessairement adaptés aux besoins de chacune des prisons, soit le nombre de prisonniers sur le site (6500 détenus à la prison de Rubavu pour 7300 à Mageragere), le volume attendu en biogaz et son utilisation globale, d'où leur divergence de capacité. Le temps de rétention hydraulique de ces installations est basé sur les déclarations du spécialiste de la technologie du biogaz de l'IPRC-Tumba.

Comme il a été mentionné au chapitre 3.2.2, les pressions de sortie du gaz sur les digesteurs domestiques sont identiques, soit 8 kPa selon les déclarations des propriétaires. Le propriétaire du digesteur #8 a déclaré avoir une pression pouvant atteindre 15 kPa alors qu'il ajoutait du substrat, bien que la véracité de cette affirmation n'ait pu être vérifiée de visu (Annexe 8 : rapport d'inventaire, digesteur de E. NYANDWI).

Compte tenu de la géométrie du digesteur, cette déclaration ne semble pas vraisemblable, d'autant qu'elle n'a pu être observée directement. Outre la possibilité d'un manomètre défectueux, une explication peut néanmoins expliquer ce phénomène, s'il se vérifie : une obstruction partielle des conduites, notamment par accumulation d'humidité, peut créer une surpression conduisant à une mesure anormalement élevée sur le manomètre situé dans la cuisine.

Selon les individus chargés de la maintenance des digesteurs des services correctionnels rwandais (#12 et #14, fig. 9), ceux-ci indiquent généralement une pression de 12 et 15 kPa respectivement. Il peut être relevé que pour l'ensemble de ces digesteurs, la pression la plus courante correspond environ au milieu de l'échelle du manomètre. En outre, l'ingénierie des digesteurs selon les plans fournis par le NDBP [12] indique que la hauteur maximale prévue pour l'accumulation de gaz (avant éjection du digestat) est d'environ 80 cm, correspondant à la pression indiquée par le manomètre (80 cm de colonne d'eau ou 8 kPa).



Fig. 9: manomètre utilisé dans les services correctionnels rwandais (RCS) sur les installations de méthanisation. Photo prise le 12.06 à la prison de RUBAVU.

Le digesteur implanté sur le site de l'IPRC-Tumba diffère quelque peu des autres installations visitées, dans la mesure où il a des objectifs purement didactiques. Pour ce faire, des sondes de mesure ont été implantées au sein même du digesteur (chambre de digestion). Des mesures de températures initiale (0 jour) et finale (+10 jours) ainsi que du pH sont ainsi effectuées directement dans le milieu de fermentation.

L'évolution de ces paramètres est observée en fonction du temps, et les étudiants – selon les propos des responsables sur site – sont chargés de comprendre et d'appréhender les changements. La pression de sortie des gaz et sa composition (fig. 10) sont également relevées. Il a pu être constaté durant la visite que de vastes aménagements ont été opérés pour permettre une alimentation en excréments humains tout en séparant les eaux de lavage (douches)

contenant du savon des eaux d'épuration (WC).



Fig. 10: mesure de la composition du gaz sur les chambres d'évacuation du digesteur de l'IPRC-Tumba. Photo prise le 15.06 sur le site de l'école.

En outre, ce digesteur diffère quelque peu des installations de la région, notamment par la présence de plusieurs chambres d'évacuation construites en série, comme il peut être observé sur le plan de l'installation (Annexe 17 : plan de construction d'un digesteur, IPRC-Tumba).

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.



4. Maintenance et dépannage de digesteurs domestiques

Les travaux réalisés dans le cadre de ce chapitre se divisent en deux parties, la première consistant à réaliser un protocole général d'exploitation et de maintenance, la seconde étant une synthèse des travaux effectués sur site en se basant sur ces protocoles.

4.1. Modèle de digesteur à dôme fixe employé dans la région de Karongi

Au premier stade des travaux de maintenance, il convient tout d'abord d'identifier tous les éléments liés à un digesteur qui peuvent avoir une influence sur le bioprocédé.

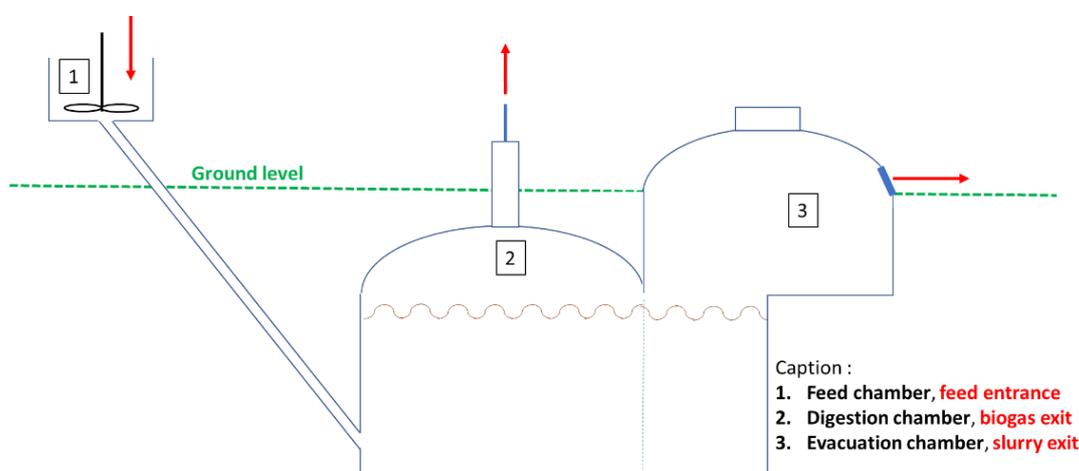


Fig. 11: schéma simplifié d'un digesteur à dôme fixe du projet FONERWA, d'un volume total d'environ 4m³.

Le seul modèle rencontré dans le cadre de l'inventaire des digesteurs domestiques à dôme fixe autour de l'IPRC-Karongi a été implanté dans le cadre du projet FONERWA [7], et correspond aux plans présentés sur la fig. 4, à la page 9. Un schéma simplifié de ce digesteur est présenté sur la fig. 11.

Comme le montre cette illustration, le digesteur est séparé en trois parties principales, qui sont **la chambre d'alimentation (1)**, où le substrat est homogénéisé et mélangé avec de l'eau, les éléments indésirables (végétaux ou matière organique non-fermentescibles, minéraux, etc.) sont retirés. Un bras pivotant muni de pales (fig. 12) est monté d'origine sur cette chambre, permettant un brassage plus efficace que s'il est exécuté manuellement. Un bouchon – formé généralement de tissu compacté – empêche le substrat d'être injecté dans le digesteur avant sa complète homogénéisation.



Fig. 12: bras pivotant similaire à un mixeur et permettant le brassage efficace du substrat pour son homogénéisation et avant son injection. Photo prise le 03.07 sur le site de l'église catholique de Kibuye.

Une fois le substrat apprêté, il est déversé dans **la chambre de digestion (2)**, soit le

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

dôme proprement dit où a lieu le processus de fermentation. Au sommet de ce dôme se trouve le robinet de biogaz (fig. 13), lui-même connecté à un réseau de canalisations enterrées en plastique d'un diamètre ½" qui mène à la cuisine de la propriété.

Le biogaz s'accumulant au sommet du dôme, la surpression ainsi provoquée permet l'évacuation du substrat par convection naturelle dans la **chambre d'évacuation (3)**. Cette chambre possède deux ouvertures, l'une au sommet permettant l'accès au digestat, et l'autre sur le côté, permettant l'évacuation du trop-plein (fig. 14). Il a été observé qu'un bassin de rétention avait été généralement creusé non loin de l'installation, permettant l'accumulation de ce trop-plein le temps qu'il soit employé comme engrais.



Fig. 13: robinet du biogaz, situé au sommet du dôme (enterré) et début de la canalisation permettant l'acheminement du gaz vers la cuisine. Photo prise le 28.06 sur la propriété de Simon NTAGAHINDA.



Fig. 14: chambre d'évacuation d'un digesteur, avec au sommet l'ouverture permettant l'accès au digestat et au premier plan la sortie du trop-plein et le menant au bassin de rétention. Photo prise le 04.06 sur la propriété de Félicien FASHAHO.

Tous les propriétaires consultés ont signalé réutiliser ainsi le digestat dans leurs cultures et plusieurs ont affirmé y trouver des avantages. Concernant le biogaz et son utilisation dans les cuisines, la construction du digesteur par le programme FONERWA incluait la mise en place d'un système de brûleur à gaz dans la cuisine de la maison. Un manomètre était également installé à proximité, permettant le contrôle de la pression de gaz à l'intérieur des canalisations. La pression normale signalée par les propriétaires est de l'ordre de 8 kPa.

Ces digesteurs visités ont tous été prévus pour l'utilisation de déjections bovines comme substrat principal. Certaines installations étaient soit connectées aux toilettes de la propriété, soit prévues pour une telle utilisation ;

dans ce cas, une canalisation directement connectée à la chambre de digestion était visible à proximité du dôme (fig. 15). Ces canalisations étaient généralement scellées artisanalement dans l'attente de la finalisation du système, même si aucun propriétaire n'a su confirmer si le programme FONERWA allait s'en charger.



Fig. 15: accès prévu pour l'injection de déjection humaine dans le dôme et scellé en attente de finalisation. Photo prise le 31.05 sur la propriété de Grégoire KABERA.



Fig. 16: robinet de purge permettant l'évacuation de l'humidité dans les canalisations de gaz, située après le robinet du biogaz (conduite en bas à droite), au sommet du dôme. Photo prise le 04.06 sur la propriété de Simon NTAGAHINDA.

Les installations comprennent également un robinet de purge en sortie de la chambre de digestion (fig. 16). Il permet l'évacuation de l'humidité pouvant s'accumuler dans les canalisations de gaz entre le digesteur et la cuisine. Les propriétaires ont signalé l'ouvrir régulièrement, selon les instructions des membres du programme FONERWA à l'implantation des digesteurs sur leur propriété.

Les digesteurs visités au Rwanda dans le cadre de ce travail de diplôme, notamment sur les sites des services correctionnels rwandais et de l'IPRC-Tumba se basent également sur la technologie dite « à dôme fixe », avec l'essentiel de l'installation se situant sous le niveau du sol.

Le nombre de chambres d'alimentation semble dépendre de la capacité totale du digesteur :

- Le site de la prison de Rubavu en possède une pour les déjections bovines et des accès directs pour les déjections humaines.
- La prison de Mageragere possède une chambre d'alimentation pour les digesteurs primaires avec accès aux déjections des hommes et une chambre pour les digesteurs secondaires reliés aux déjections des femmes.
- Le site de l'IPRC-Tumba possède une chambre d'alimentation pour les déjections bovines et un accès direct relié aux WC des élèves.

4.2. Exploitation des digesteurs

4.2.1. Situation

Les propriétaires de digesteur de la région de Karongi disent avoir reçu une formation initiale basique leur permettant d'assurer l'exploitation de leur installation, mais aucune véritable formation de maintenance. Ils ne semblent également posséder aucun contact disponible pour dépanner leur digesteur en cas de problème.

En synthétisant les informations recueillies durant les visites, ces étapes d'exploitation peuvent être listées comme suit :

1. Le substrat (déjections bovines) est ajouté à une fréquence régulière dans la chambre d'alimentation, brassé avec de l'eau à quantité égale en utilisant le bras pivotant.
2. Les éléments non organiques et végétaux doivent être retirés de la mixture manuellement.
3. Une fois le mélange devenu homogène, dépourvu de matériaux non fermentescibles, le bouchon est retiré de l'accès à la chambre de digestion et la mixture est injectée dans le digesteur. Le bouchon est ensuite remis en place.
4. Le robinet de purge est ouvert régulièrement pour évacuer l'humidité accumulée dans les conduites.

5. Le robinet des gaz, au sommet du dôme, est ouvert pour permettre au biogaz d'arriver jusqu'à la cuisine.
6. Le digestat sort régulièrement de la chambre d'évacuation – souvent après injection de substrat – et est guidé vers un bassin de rétention. Il est généralement utilisé comme engrais pour les cultures possédées par les propriétaires.
7. En cas d'utilisation de déjections humaines comme co-substrat, l'injection dans le digesteur se fait naturellement par le biais d'une conduite menant à la chambre de digestion. Les toilettes elles-mêmes sont rincées à l'eau après utilisation, maintenant un niveau d'hygiène des lieux et permettant au substrat de s'écouler dans le digesteur.

En se basant sur cette synthèse, il peut être constaté que les informations fournies aux propriétaires ont été limitées au strict nécessaire. En outre, cette formation semble partir du principe que le digesteur fonctionnera continuellement, sans nécessiter de travaux de maintenance et d'entretien sur le long terme. Ces assertions ne peuvent cependant pas être confirmées, dans la mesure où aucun contact n'a été pris durant le séjour avec le programme FONERWA.

4.2.2. Constatations tirées des observations

De manière à assainir l'exploitation des digesteurs de la région de Karongi, de compléter les lacunes de certains propriétaires et de renforcer les compétences générales de l'IPRC-Karongi, un manuel d'utilisateur a été rédigé en anglais au cours du séjour sur place (cf. Annexe 18 : manuel d'utilisateur d'un digesteur à dôme fixe). Les éléments principaux de ce document sont décrits dans le tableau 5.

Tableau 5: description générale du manuel d'utilisation rédigé à l'attention des propriétaires de digesteurs de la région de Karongi.

Chapitre	Description
1. Generalities	Description générale du procédé de DA et de la configuration d'un digesteur utilisé dans le programme FONERWA. Basé sur les observations des modèles et la documentation à disposition [12].
2. What kind of feed can be used for the digestion?	Explication des substrats à utiliser ainsi que la quantité générale de co-substrats à ajouter. Eléments à éviter (antibiotiques, substrats non fermentescibles, etc.), issu de [6], [11].
3. When and how to feed to feed the digester?	Extrait tiré de [11] et reprenant la méthode générale d'alimentation d'un digesteur domestique dans les pays en voie de développement.
4. What amount of feed per day?	Suggestions quant à la quantité de substrat à pourvoir, en relation avec le dimensionnement et le type du digesteur, issues de [6].
5. How to use the slurry?	Suggestions d'utilisation du digestat, basées sur les observations sur place.
6. How to use the biogas?	Basé sur les observations sur place, suggestion d'utilisation du biogaz [6] et du fonctionnement général du manomètre.
7. How to maintain the digester?	Recommandations générales de la maintenance du digesteur après chaque alimentation.
8. What to do if using human waste as feed?	Recommandations sur l'utilisation des excréments humains comme substrat pour le digesteur.

En plus de ce manuel, il a été suggéré aux collaborateurs de l'IPRC-Karongi d'organiser des séances de groupe auprès des propriétaires de digesteur, sur le même principe que les sessions organisées par le gouvernement rwandais à l'implantation des installations. Ces sessions auraient pour objectifs principaux de :

1. Présenter l'IPRC-Karongi comme étant une institution capable de répondre de la technologie du biogaz dans la région.
2. Présenter l'équipe de dépannage et les compétences mises en avant pour les besoins des propriétaires de digesteurs.
3. Expliquer à nouveau les principes généraux de la digestion anaérobie, de l'exploitation d'un digesteur et des manœuvres de maintenance nécessaire au bon fonctionnement.
4. Reprendre point par point l'alimentation d'un digesteur, le rythme, la quantité de substrat et les « faire ou ne pas faire » en lien avec ce chapitre.
5. Proposer un calendrier de visite des digesteurs et de leurs propriétaires afin de poursuivre le recensement et de rendre compte du fonctionnement des installations.
6. Mettre à disposition un manuel d'utilisateur pour chacun, traduit en kinyarwanda et disposant des coordonnées de l'équipe de dépannage de l'IPRC-Karongi.
7. Répondre aux questions générales ou particulières des propriétaires quant à leur propre situation.

Ces sessions n'ont pu être réalisées au cours du séjour sur place, raison pour laquelle elles ont été définies comme perspectives des présents travaux et soumises comme suggestion auprès de l'IPRC-Karongi.

4.3. Maintenance des digesteurs

4.3.1. Situation

A l'image de n'importe quelle installation, un digesteur nécessite des étapes de maintenance permettant son bon fonctionnement, un rallongement de sa durée de vie et l'entretien de chacune de ses parties – fixes ou amovibles.

Au moment du déroulement du projet, il n'existait pas d'équipe de maintenance en charge des digesteurs de la région de Karongi, et les propriétaires visités durant l'inventaire ont signalé n'avoir jamais bénéficié de la venue de spécialistes issus des programmes FONERWA ou NDBP.

4.3.2. Constatations tirées des observations

Le tableau 6, p.20 recense une synthèse des événements identifiés comme vraisemblables par le biais des observations sur site et par recoupement avec la littérature [6], [11], [13], [14] et nécessitant des travaux de maintenance ou d'entretien. Les conséquences probables sont également listées, ainsi que les travaux nécessaires à la confirmation de l'occurrence de ces événements et à leur élimination.

Sur la base de cette synthèse, il peut être constaté que les événements les plus récurrents concernent la pression de biogaz ou sa production. Le biogaz étant le principal produit d'intérêt de ce procédé, cette constatation est somme toute logique, mais elle permet de conduire au fait qu'un contrôle régulier de l'état de toutes les parties en contact avec ce biogaz est nécessaire. Ces parties concernent notamment le sommet du dôme de la chambre de digestion (fig. 17, p.21), ainsi que les conduites partant de là et allant en cuisine.

Tableau 6: synthèse des événements identifiés pouvant nécessiter une maintenance du digesteur, des conséquences et des mesures à prendre pour en limiter la portée. Ces éléments ont servi à rédiger le protocole de dépannage cité en annexe 20 du présent rapport.

Evènement	Lieu	Conséquences	Mesure
Fuite de gaz	Conduites	Perte du biogaz produit, réduction de la pression dans les conduites et impossibilité de cuisiner avec.	Contrôle des joints, de l'intégrité des conduites et de l'étanchéité des robinets avec eau/savon ou appareillage.
Conduites des gaz obstruées	Chambre de digestion -> cuisine	Plus d'accès au biogaz. Augmentation de la pression interne. Rejet trop important de digestat et baisse du niveau dans les chambres.	Contrôle régulier des conduites. Ouverture du robinet de purge.
Canal d'accès à la chambre de digestion obstrué	Chambre d'alimentation -> chambre de digestion	Plus d'accès pour le substrat dans la chambre de digestion.	Préparation/homogénéisation correcte du substrat
Fuite de gaz	Chambre de digestion	Perte du biogaz produit, de la pression interne dans le digesteur. Pas d'évacuation du digestat et faible pression de gaz dans la cuisine.	Contrôle de l'intégrité du dôme avec eau/savon.
Production de biogaz faible ou nulle	Chambre de digestion	Mort de la culture bactérienne ou fuite importante de gaz.	Contrôle de l'intégrité du digesteur avec eau/savon (conduite + dôme) et contrôle du digestat.
Production de biogaz insuffisante pour les besoins	Chambre de digestion/cuisine	Apport en substrat insuffisant ou fuite de gaz.	Contrôle de l'intégrité du digesteur avec eau/savon (conduite + dôme) et contrôle du digestat.
Plus de pression de gaz sur le manomètre	Cuisine	Plus de visibilité de la pression interne.	Contrôle par manomètre en U.
Biogaz ne brûle pas	Cuisine	Trop faible fraction de méthane dans le biogaz (<60%).	Si le digesteur vient d'être installé : attendre au moins 1 mois tout en alimentant chaque jour et en évacuant le gaz produit. Sinon : vérification de la nature du substrat, ratio C:N entre 20 et 30 ?
Pas d'évacuation du digestat	Chambre d'évacuation	Pression interne de la chambre de digestion insuffisante, fuite de gaz. Obstruction ou fuite du digestat hors de la chambre d'évacuation. Temps de rétention trop long, apport en substrat trop faible.	Contrôle de l'intégrité du digesteur avec eau/savon (conduite + dôme). Contrôle de l'alimentation.

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.





Fig. 17: robinet de gaz présent au sommet du dôme de la chambre de digestion. Les deux écrous permettent la fermeture de la sortie de gaz, soit avec une clé à tube (gauche) soit avec un robinet amovible (droite). Photo prise le 4 juin 2018 sur la propriété d'Éric NYANDWI.

Il a été constaté au cours des visites que l'étanchéité des conduites est assurée par des joints en téflon. La qualité de cette jointure étant fortement corrélée aux compétences du technicien qui l'a installé, il conviendrait d'effectuer un contrôle général des conduites et de leur étanchéité à l'air à chaque nouvelle visite d'un digesteur.

Compte tenu du fait que la disponibilité des raccords de plomberie n'est pas toujours assurée dans la région, des raccords et adaptateurs de différentes dimensions, montés en série, semblent régulièrement utilisés pour pallier le problème. Les conséquences sont un risque accru de voir l'apparition d'une fuite entre ces raccords ainsi qu'une probable augmentation de la perte de charge dans les conduites.

En se basant sur ces premières constatations, un premier contrôle superficiel de l'état des conduites peut être réalisé par le propriétaire après chaque alimentation du digesteur. Des contrôles plus conséquents devraient être par la suite réalisés à intervalle régulier par l'équipe de dépannage afin de vérifier l'absence de fuite. Utilisant eau et savon, il est possible d'asperger les joints des canalisations et la surface du dôme afin de vérifier l'absence de formation de bulle (fig. 18).

Des contrôles de l'intégrité générale du digesteur (incluant les trois chambres, les conduites, le brûleur en cuisine et le bassin de rétention) devraient être réalisés annuellement, en même temps qu'une visite visant à vérifier la satisfaction du propriétaire et l'absence de problème.

L'alimentation est également un élément critique de l'exploitation d'un digesteur, et peut demander des travaux d'investigation et de maintenance soutenus en cas de dysfonctionnement du procédé, comme il a pu être constaté au gré des visites et du dépannage réalisé sur la propriété de S. NTAGAHINDA (cf. Annexe 19 : dépannage du digesteur de S. NTAGAHINDA).



Fig. 18: contrôle de l'intégrité du dôme de la chambre de digestion au moyen d'eau savonneuse. L'absence de bulle permet d'attester du bon état général du dôme. Photo prise le 11 juillet 2018 sur la propriété de S. NTAGAHINDA.

4.4. Dépannage des digesteurs

4.4.1. Situation

La littérature [5] ainsi que les précédents travaux réalisés sur site [15] semblaient indiquer que de nombreux sites de méthanisation au Rwanda étaient hors service, du fait d'un manque de maintenance et de compréhension de la digestion anaérobie dans sa globalité. Il a cependant été constaté durant la session de recensement des équipements de méthanisation en 2018 que seule une installation nécessitait un véritable dépannage (cf. Annexe 19 : dépannage du digesteur de S. NTAGAHINDA).

D'autres propriétaires ont signalé la nécessité de travaux sur l'installation tels que la réfection d'une dalle abimée (cf. Annexe 6 : rapport d'inventaire, digesteur de T. UZABAKIRIHO) ou de toilettes initialement utilisées pour l'apport en co-substrats et détruites par les précipitations durant la saison des pluies (cf. Annexe 10 : rapport d'inventaire, digesteur de F. FASHAHO).

Le bon fonctionnement apparent des installations doit évidemment être considérée avec prudence, dans la mesure où aucune liste des digesteurs présents aux alentours de Karongi n'a pu être fournie par l'IPRC ou le secrétariat du district durant le déroulement du projet. Il est dès lors possible que seule une infime portion des méthaniseurs aient été visités, ne constituant donc pas une vision représentative de l'état général des méthaniseurs de la région. De même, la totalité des digesteurs domestiques visités durant le recensement est issue du programme FONERWA [7], plus récent que celui du NDBP [5], [8]. Selon les propriétaires, leurs installations ont toutes été construites entre 2016 et 2017 et sont donc dans un état général encore relativement bon.

Il peut être également rappelé qu'aucune maintenance n'a été effectuée sur les digesteurs par le programme FONERWA et que seule une maintenance journalière superficielle est réalisée par les propriétaires, toujours selon leurs déclarations.

4.4.2. Dépannage du site de S. NTAGAHINDA

Comme stipulé précédemment, un seul site visité a permis la réalisation d'un dépannage. Le tableau 7 à la page 23 résume les opérations effectuées et les conclusions tirées à la suite de ces manœuvres (cf. Annexe 19 : dépannage du digesteur de S. NTAGAHINDA pour le rapport complet). Cependant, la raison des problèmes de production de biogaz sur ce site n'a pu être identifiée et la production ne s'en est pas trouvée améliorée.

Il a été proposé au propriétaire de l'installation une série de mesures permettant éventuellement d'augmenter la production de biogaz, soit :

- Augmenter l'apport en substrat principal (déjections bovines) à au moins 20 kg par jour (au lieu d'environ 20 kg tous les trois jours), mais le propriétaire n'est pas en mesure de le faire.
- Utiliser des co-substrats comme la plante *Euphorbia tirucalli*, qui possède un potentiel méthanogène élevé selon la littérature [16], à hauteur de 10% de l'apport normal en substrat. L'utilisation de déchets alimentaires a également été suggérée, mais le propriétaire affirme ne pas en posséder.
- Connecter le digesteur aux toilettes de la maison afin d'augmenter l'apport en substrat, sachant qu'un accès direct à la chambre de digestion (fig. 15, p.16) a été installé d'office par le programme FONERWA durant la construction de l'installation.

Tableau 7: résumé du dépannage du site de S. NTAGAHINDA, selon les informations du rapport en annexe 19.

	Description	
Situation initiale	<p>Lors de la visite du 04/06/2018, le propriétaire signale que la production en biogaz est très faible, rendant la cuisine impossible.</p> <p>L'installation est similaire aux digesteurs du programme FONERWA de la région et fait partie d'un réseau d'environ 15 digesteurs répartis dans la cellule KAYENZI.</p> <p>Il est actuellement le seul à rencontrer des problèmes avec son installation.</p> <p>Il est décidé d'effectuer des opérations de dépannage afin de rendre compte des possibilités d'améliorer la situation.</p>	
Dépannage	Contrôle de l'intégrité des canalisations (28/06/2018)	L'étanchéité des joints et l'état des canalisations de gaz sont contrôlés visuellement et au moyen d'un appareil permettant de contrôler la stabilité de la pression en y injectant de l'eau. Aucune fuite ne peut être mise en évidence.
	Potentiel résiduel de production de biogaz (28-30/06/2018)	Un volume d'environ 13L de digestat est prélevé et placé dans un jerrycan scellé, dans lequel est également ajouté un total d'environ 1kg de déjections bovines homogénéisé dans 1L d'eau. L'objectif est de contrôler le potentiel résiduel de production de biogaz. Une faible production de biogaz a pu être observée.
	Contrôle de l'intégrité du dôme (11/07/2018)	Le dôme de la chambre de digestion est détérré et un contrôle des potentielles fuites est réalisé au moyen d'eau savonneuse sur les conduites de gaz et le dôme lui-même. Aucune fuite n'est observée.
	Contrôle de la pression interne au dôme (11/07/2018)	La pression interne de gaz est contrôlée au moyen d'un manomètre « en U » après 3 jours où le biogaz n'a pas été utilisé par le propriétaire et est mesurée à environ 1.5 kPa.
Conclusion	<p>La faible pression interne de biogaz et l'absence de fuite évidente sur le dôme et les canalisations laissent à penser que le problème principal provient de la digestion anaérobie elle-même et non de l'installation.</p> <p>Le potentiel résiduel de production de biogaz indique que les bactéries présentes dans le digestat ont la faculté de dégrader le substrat, même si les conditions de réalisation du test ne permettent pas d'évaluer quantitativement le résultat.</p> <p>Le propriétaire a laissé entendre au cours d'une visite que les membres du programme FONERWA avait mentionné devoir reprendre le procédé depuis le début, en raison d'un problème quelconque.</p> <p>A ce jour, une solution était cherchée pour permettre de vider le digesteur et reprendre le procédé depuis le départ.</p>	

4.4.3. Rédaction d'un protocole de dépannage

Conjointement au dépannage réalisé durant l'exécution du projet, un protocole a été rédigé, permettant aux membres de l'équipe de dépannage d'agir de manière autonome dans l'avenir, selon une procédure claire et des étapes concrètes.

Ce protocole a été rédigé en anglais, et peut être consulté dans les annexes (cf. Annexe 20 : protocole de dépannage des digesteurs). Il se base sur les observations faites sur le matériel utilisé par le programme FONERWA, étant l'unique modèle rencontré au cours de l'inventaire des digesteurs domestiques.

Le document cherche à identifier les problématiques potentiellement rencontrées lors de l'exploitation d'une installation de méthanisation, identifie les manières de les reconnaître, et propose les solutions disponibles pour y remédier.

Il va de soi que ce protocole ne saurait être applicable à d'autres types de digesteur et des environnements différents, compte tenu du fait que les moyens et les contraintes d'exploitation peuvent fortement diverger.

Ce protocole a également pour vocation d'être complété par les collaborateurs de l'équipe de dépannage, à mesure que des situations inédites peuvent se présenter.

En outre, il a été élaboré en confrontant plusieurs manuels d'exploitation de digesteurs issus de la littérature [6], [11], [13] et en cherchant à identifier des mesures « universelles » à prendre en cas de panne.

4.4.4. Constatations tirées des observations

Durant les travaux de dépannage réalisés sur le site de l'IPRC, il a été possible d'identifier les dysfonctionnements les plus fréquents que peuvent rencontrer les propriétaires de digesteurs de la région. Comme il a été mentionné dans les chapitres précédents, ces éléments concernent uniquement le modèle de digesteur construit par le programme FONERWA entre 2016 et 2017 et ne peuvent nécessairement être appliqués au-delà. Il conviendrait dès lors de chercher à étendre cette identification à d'autres modèles, tels que le modèle « capsule » utilisé à l'IPRC-Tumba (cf. Annexe 17 : plan de construction d'un digesteur, IPRC-Tumba) ou celui de sac flexible également présent en Afrique [11] et dont un exemplaire qui n'était pas terminé a pu être visité durant l'inventaire (cf. Annexe 9 : rapport d'inventaire, digesteur de I. BITWAYIKI).

4.5. Discussion sur la maintenance et le dépannage des digesteurs

En fonction des travaux effectués durant l'exécution du projet, une des problématiques soulevées par l'IPRC-Karongi a été de savoir qui financerait les frais occasionnés par les dépannages. En effet, il a été constaté que d'importants moyens peuvent demander à être mis en place pour exécuter un dépannage, notamment s'il est question de réhabiliter un digesteur hors service. Dans une telle situation, il peut être nécessaire de vider complètement la chambre de digestion au moyen d'une pompe immergée, ou d'en laver le contenu avec une quantité importante d'eau claire (jusqu'à deux fois le volume de la chambre selon [11]). Compte tenu du fait que la disponibilité en eau n'est pas toujours garantie dans les environs immédiats du site de dépannage, il faut donc prendre en compte son approvisionnement. Celui-ci peut également avoir à être réalisé à la main, sachant que l'état des routes ne permet pas nécessairement un camion-citerne ou un véhicule 4x4 de venir à proximité.

Un autre élément, soulevé par le Principal de l'IPRC-Karongi, a été le refus de prendre la responsabilité de dépanner des digesteurs domestiques dans la région de l'école, et ce en dépit du cadre de travail (« collaborative framework ») établi initialement. Cet élément peut s'expliquer par le manque d'expérience des collaborateurs de l'IPRC dans la technologie du biogaz et l'implication de ces collaborateurs dans d'autres projets parallèles à celui de la méthanisation (panneaux solaires et centrale hydro-électrique).

Il pourrait être profitable pour les collaborateurs de l'IPRC-Karongi d'avoir la possibilité de réaliser un stage de plusieurs semaines à l'IPRC-Tumba et éventuellement en Suisse à la HES-SO

afin d'acquérir des connaissances globales sur la digestion anaérobie et une compréhension plus approfondie de l'exploitation de digesteurs. Il a en effet été établi que l'IPRC-Tumba propose une formation sur la digestion anaérobie pour ses étudiants et réalise les dépannages des méthaniseurs autour de son site gratuitement.

4.6. Préparation d'un laboratoire d'analyses

4.6.1. Situation

Durant l'exécution de ce travail de diplôme, aucune infrastructure n'avait été prévue par l'IPRC-Karongi pour accueillir la technologie du biogaz sur leur site, impliquant un laboratoire dédié aux analyses courantes. Dans le cadre des objectifs de ce projet, l'élaboration d'un tel laboratoire a été fixé, permettant idéalement aux membres de l'équipe de dépannage de réaliser leur propre suivi des :

- Potentiel hydrogène (pH) et d'alcalinité (pouvoir tampon) du milieu de fermentation.
- Teneur en matière sèche et matière volatile des substrats et du digestat.
- Teneur du milieu de fermentation et des substrats en différents sels par titration.
- Demande chimique en oxygène (DCO) par titration ou kit de mesure standardisé.
- Teneur en méthane, débit de biogaz et potentiel de production de biogaz d'un milieu.

Ces analyses requièrent évidemment des substances chimiques spécifiques, mais également un lieu de travail protégeant à la fois l'opérateur et les personnes externes.

En outre, ce lieu se doit de disposer d'éléments d'infrastructure comme :

- | | |
|--|---|
| a) Un plan de travail carrelé (paillasse) à hauteur d'homme. | d) Une aération si possible maîtrisée. |
| b) Un lavabo avec accès à l'eau courante. | e) L'accès au réseau et à des prises électriques. |
| c) Un éclairage suffisant (néon, LED). | f) Une armoire verrouillable. |
| | g) Un frigo/congélateur. |



Fig. 19 : box de l'atelier de maçonnerie sur le site de l'IPRC-Karongi, pouvant servir de lieu pour l'implantation d'un laboratoire d'analyse du biogaz. Surface au sol : 5x4m, hauteur de mur env. 1.5 m.

Les espèces chimiques utilisées, de même que le matériel de laboratoire (verrerie, instruments de mesure), doivent pouvoir être conservés dans ce local afin d'éviter vols et mauvaises manipulations par du personnel non formé.

Au moment de la reddition du présent rapport, aucune demande n'a été déposée auprès de l'IPRC-Karongi pour l'attribution d'un espace existant à ces fins. Une investigation a cependant été réalisée sur le site afin de trouver un lieu permettant une telle activité.

Une première inspection du site de l'IPRC-Karongi a permis l'identification d'un secteur propice à l'élaboration d'un tel laboratoire dans l'atelier de maçonnerie (fig. 19). Trois box actuellement partiellement utilisés comme lieu de stockage bénéficient de séparation d'environ 1.5 m de

haut. La surface au sol est d'environ 5 x 4 m. Selon l'assistant en charge de l'atelier, la place peut être libérée pour la construction d'un laboratoire dans l'un de ces box, pour autant que la demande soit validée par l'administration de l'école.

Des travaux seraient nécessaires pour niveler le sol, surélever les murs, poser une porte verrouillable et installer les équipements minimaux (plan de travail, lavabo, etc.). Il s'agit néanmoins – toujours selon l'assistant de l'atelier – de compétences apprises par les étudiants à l'IPRC-Karongi et ce projet pourrait constituer une matière d'enseignement adéquate.

Il a été suggéré à l'assistant de déposer la demande auprès de l'administration pour réaménager l'un de ces box d'ici à l'été 2019, de manière à encourager la poursuite de la collaboration avec la HES-SO Valais/Wallis dans le domaine du biogaz.

4.6.2. Propositions d'acquisition de matériel

Dans le processus d'élaboration d'un laboratoire d'analyse, du matériel devra être acquis soit par donation, soit par achat auprès de sociétés à définir. Le tableau 8 liste ce matériel de manière aussi exhaustive que possible, tout en recensant son utilisation et une quantité approximative à renouveler en cas d'utilisation.

Tableau 8: liste du matériel nécessaire à l'élaboration d'un laboratoire d'analyses pour le biogaz.

Matériel	Utilisation	Quantité
Eau distillée	Dilution, nettoyage	10 L
Ethanol, 96%	Nettoyage	5 L
Tampon pH 4.0	Calibration du pH-mètre	1 L
Tampon pH 7.0	Calibration du pH-mètre	1 L
Tampon pH 10.0	Calibration du pH-mètre	1 L
pH-mètre digital (de terrain)	Mesure du pH	1 pce
Electrode de pH (réserve)	Entretien du pH-mètre	1 pce
KCl 0.1 M	Entretien du pH-mètre	1 L
Kit de mesure DCO (par $K_2Cr_2O_7$)	Mesure de la DCO	1 set
Plaque agitatrice/chauffante	Titration	1 pce
Agitateur magnétique	Titration	10 pces
Burette graduée	Titration	2 pces
Thermomètre digital (thermocouple)	Mesure de la température	1 pce
Four à moufle	Mesure MS/MV	1 pce
Creuset (Cu)	Mesure MS/MV	5 pces
Verrerie	Travaux en laboratoire	1 set
Cylindre gradué en plastique	Mesure du débit de gaz et BMP	2 pces
Seau transparent	Mesure du débit de gaz et BMP	2 pces
Détecteur de fuite	Contrôle des conduites de gaz	1 pce
PPI (lunettes, blouses, gants)	Travaux en laboratoire	5 set

En sus de ces éléments concernant les analyses de laboratoire pour l'exploitation et la maintenance des digesteurs de la région de Karongi, il serait également suggéré de fournir à l'équipe de dépannage plusieurs outils leur octroyant les moyens d'intervenir sur une installation dysfonctionnelle. Le tableau 9, p. 27 recense ces objets, leur utilisation ainsi que – si disponible – une estimation de leur coût au Rwanda.

Tableau 9 : liste du matériel nécessaire au dépannage de digesteurs et prix estimé, si connu.

Matériel	Utilisation	Prix estimé
Pompe immergée	Vidange de digesteur	450'000 RWF
Génératrice 3.5 VA	Fonctionnement de la pompe	250'000 RWF
Contrôleur de pression	Intégrité des conduites	n.d.
Jeu de raccords/adaptateurs	Travaux sur les conduites	n.d.
Outils pour la plomberie	Travaux sur les conduites	n.d.
Spray (vide)	Test d'étanchéité	10'000 RWF
Savon en poudre	Test d'étanchéité	200 RWF/100g

4.7. Réhabilitation d'un prototype de digesteur de 200 L

Afin de compléter les possibilités d'action de l'IPRC-Karongi dans le domaine du biogaz, la proposition a été faite de réhabiliter un des prototypes de digesteur initialement mis en fonction par Jose Hoyos dans le cadre de son propre travail de diplôme [15].

Les prototypes en question ont été laissés à l'abandon durant deux ans au terme du projet de M. Hoyos, ne laissant que peu de marge quant au choix du méthaniseur à remettre en état. Compte tenu de son état, il a été décidé que le dernier en date (fig. 20) présentait les meilleures dispositions pour ce faire.

Les travaux de remise en état comprenaient tout d'abord une vidange complète du milieu de fermentation présent depuis deux ans à l'intérieur.



Fig. 21: partie supérieure du prototype de digesteur après démontage et nettoyage complet. La sortie de gaz est en bon état général.

Le prototype a ensuite été intégralement démonté, puis rincé à l'eau claire et finalement mis à sécher.

Une fois démonté et lavé (fig. 21), une évaluation complète de l'appareillage a été réalisée sur site, de manière à analyser les besoins d'éventuelles réparations et des frais occasionnés.

Il a pu être constaté que le prototype est en relativement bon état extérieur et intérieur (fig. 22, p.28), ne nécessitant que peu de travaux pour pouvoir être réhabilité. Il a été cependant constaté que le joint raccordant la valve d'évacuation et la chambre de



Fig. 20: prototype de digesteur de 200L réalisé par Jose Hoyos dans le cadre de son travail de diplôme en 2016 et laissé en l'état sur le site de l'IPRC-Karongi.



Fig. 22: intérieur de la chambre de digestion du prototype de 200L, avec l'entrée du substrat (en bas à gauche), l'agitateur manuel (centre) et la sortie de gaz (arrière-plan, au centre).

digestion (fig. 23) a été endommagé par le temps et éventuellement l'acidité du milieu de fermentation resté à l'intérieur. Les moyens nécessaires à sa remise en état par l'application d'un joint en silicone ou une colle époxy ont été évalués par le personnel de l'IPRC-Karongi.

L'objectif de cette réhabilitation est de permettre à l'IPRC-Karongi de pouvoir exploiter la technologie du biogaz à court terme et à moindre coût, en permettant en outre à l'équipe de dépannage d'effectuer un démarrage et un suivi de

culture bactérienne durant environ un an, avant le retour d'un étudiant de la HES-SO Valais/Wallis.

Concernant le suivi, cette optique permettrait également de rentabiliser efficacement l'installation du laboratoire d'analyse citée dans le chapitre 4.6.

Selon les dispositions établies avant la fin du projet sur site entre les intervenants (étudiants de la HES-SO et collaborateurs de l'IPRC), l'objectif serait d'exploiter une digestion anaérobie avec de la bouse de vache comme substrat principal.



Fig. 23: partie inférieure du prototype de digesteur de 200L, et conduite d'évacuation du digestat et robinet (en rouge). Des dégâts ont été constatés au niveau de la jonction entre le bidon et le robinet.

Les possibilités liées à une co-digestion pourront par la suite être évaluée au cas par cas, notamment en utilisant des co-substrats tels que :

- Les déchets alimentaires provenant du restaurant du *Hospitality Center*, sur le site de l'IPRC et permettant une production de biogaz variable [11].
- Les pelures de bananes, ayant un BMP situé entre 0.4 et $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{vs}}^{-1}$ [17], [18] et les pelures d'oranges [19].
- La paille de riz et de blé ainsi que les déchets de maïs possédant des ratios C:N élevés [6] permettant de compenser de haut taux en azote provenant par exemple de déjections humaines ou de déchets alimentaires [11].
- Des plantes facilement trouvables en Afrique, telles qu'*Euphorbia tirucalli* possédant un potentiel méthanogène éprouvé [16], le *Jatropha curcas*, également utilisé dans la production de biodiesel [11], [19].

4.8. Evaluation de l'utilisation d'un réservoir à eau comme digesteur

Un autre point évalué durant le séjour concernait l'utilisation d'un réservoir à eau tel que ceux proposés par la marque Roto [20] visible sur la fig. 24 comme digesteur d'appoint afin de renforcer les compétences des collaborateurs de l'IPRC-Karongi. Ces réservoirs sont disponibles en plusieurs dimensions, allant de 1 m³ à 5 m³.

L'utilisation d'un tel réservoir pour une digestion anaérobie présente de nombreux atouts qui ont été identifiés comme suit :

- Le transport, la mise en place et l'installation d'un tel réservoir ne nécessite qu'un minimum d'aménagement.
- L'installation de raccord de plomberie pour l'injection et l'évacuation des substances (substrat, digestat, biogaz) est aisée en raison du matériaux utilisé (polyéthylène souple).
- Selon le site internet du fabricant [20], le matériau est un mauvais conducteur de chaleur, limitant les variations de température du digestat. En outre, le réservoir peut être partiellement enterré.
- L'exploitation d'un digesteur d'une telle dimension permet une meilleure observation des conditions opératoires d'installations domestiques d'un volume d'environ 4 m³.



Fig. 24: réservoir à eau de 2 m³, tel qu'utilisé au Rwanda pour recueillir l'eau de pluie. Photo prise le 29.05 sur le site de l'hôpital de référence de Kibuye.

Après contact auprès d'un distributeur situé à Muhanga (RW), les prix de tels réservoirs sont fixés selon le tableau 10:

Tableau 10: liste des prix [RWF] d'un réservoir à eau de type Roto, en fonction de son volume en [L].

Volume du réservoir [L]	Prix [RWF]
1000	120'000
2000	180'000
3000	280'000
5000	380'000

En fonction de ces recherches, il a été suggéré aux collaborateurs de l'IPRC-Karongi de déposer une demande auprès de Swisscontact afin de financer l'achat et l'implantation d'un tel digesteur sur le site de l'école polytechnique en complément de l'installation du prototype de 200 L mentionné au chapitre 4.7.

5. Etude de faisabilité de la construction d'un digesteur sur le site de l'IPRC

Dans le cadre de ce projet, un des objectifs définis prioritairement par l'IPRC-Karongi a été de réaliser une étude de faisabilité portant sur la construction d'un digesteur sur le site de l'école polytechnique. Elle se répartissait en deux éléments distincts, l'un portant sur les aspects biotechnologiques (rédigé par l'auteur du présent rapport), notamment :

- La production de biogaz attendue, la charge volumique appliquée (CVA) et le temps de rétention hydraulique (HRT) définis en fonction du substrat utilisé.
- Le dimensionnement de l'installation.
- Les paramètres minimaux et optimaux à considérer pour l'exploitation.
- Les éléments de sécurité et les risques associés à l'implantation.

La seconde partie porte sur la détermination des coûts relatifs à l'implantation et la construction du digesteur. Cette partie (cf. Annexe 22 : détermination des coûts (*Bill of Quantities*) de l'étude de faisabilité réalisée par l'IPRC-Karongi) a été rédigée par les collaborateurs de l'IPRC-Karongi.

5.1. Objectifs généraux de l'étude de faisabilité

Après discussion avec les membres de l'IPRC-Karongi, il a été convenu que le fait de posséder un digesteur sur le site de l'école constitue un atout, en ceci qu'il permet aux collaborateurs et aux étudiants de se familiariser directement à la digestion anaérobie.

Comme il a pu être constaté durant les visites de digesteurs, l'IPRC-Tumba – qui propose une formation sur la méthanisation – possède elle-même un digesteur sur leur site (cf. Annexe 13 : rapport d'inventaire, digesteur de l'IPRC-Tumba) leur permettant d'illustrer à leurs élèves les éléments importants de la digestion anaérobie au moyen d'ateliers pratiques.

La vocation de cette installation est donc éminemment pédagogique, à l'attention des collaborateurs de l'IPRC pour renforcer leurs compétences dans le dépannage et la maintenance des installations domestiques alentours, et à l'attention des élèves pour améliorer leur compréhension de cette technologique.

A la demande de l'administration de l'école, le digesteur devait utiliser les excréments humains

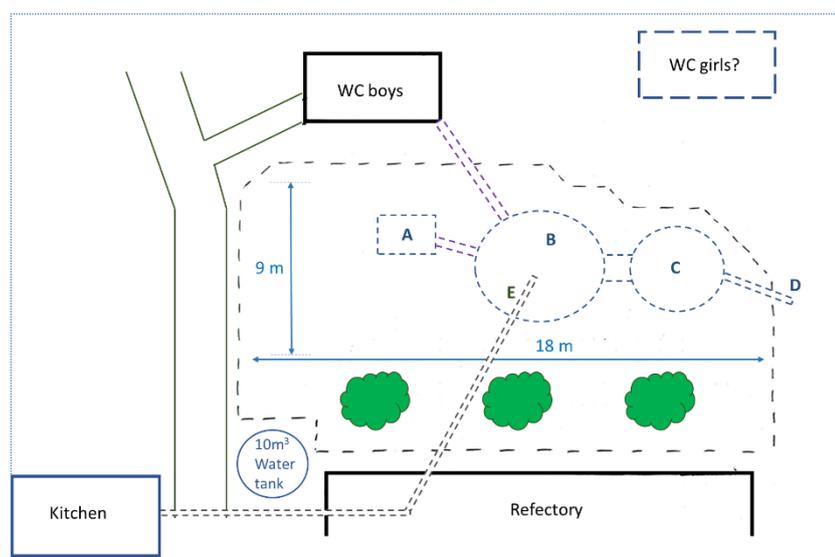


Fig. 25: plan du digesteur issu de l'étude de faisabilité présentée en annexe 22. Légende : A) chambre d'alimentation, B) chambre de digestion, C) chambre d'évacuation, D) conduite d'évacuation du digestat, E) conduite de gaz. Les toilettes pour filles (en haut à droite) sont un projet à l'étude afin d'augmenter l'apport en substrat.

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.



produits par les élèves masculins dans les toilettes situées à proximité du réfectoire et des cuisines, selon la fig. 25, p.30. Le but était ainsi d'exploiter un maximum les ressources disponibles, en limitant également la recherche et l'achat de co-substrats (bouse de vache, déchets organiques divers).

Afin de se calquer sur les digesteurs présents aux alentours de l'école, le digesteur devait également conserver une taille « raisonnable », au détriment de la production de biogaz totale. Cela pour permettre une meilleure appréhension des tenants et aboutissants des exploitations domestiques environnantes, et gardant à l'esprit que les problématiques rencontrées pour un digesteur de 40 m³ ne sont pas nécessairement les mêmes que celles d'un digesteur de 5 m³.

5.2. Dimensionnement de l'installation et exploitation

Lors de l'étude de faisabilité et en fonction des paramètres établis dans le chapitre précédent, il a été déterminé que le nombre d'étudiants total sur le site est de 467 personnes, dont 315 hommes.

Il n'a pas été possible de déterminer précisément la quantité d'excréments produite par un étudiant et par jour, raison pour laquelle la littérature a été consultée [21]–[23] afin d'obtenir une estimation d'environ 0.250 kg·pers⁻¹·jour⁻¹ de masse humide, composée de 23% de masse sèche, dont 85% [21], [24] de matière volatile.

Les toilettes situées à proximité du réfectoire (fig. 25, p.30) n'étant utilisée que de jour par les étudiants, seule la moitié de la masse journalière d'excréments humains a été considérée dans un premier temps pour le dimensionnement de l'installation, soit 0.125 kg_{humide}·pers⁻¹·jour⁻¹, représentant une masse totale de 39.38 kg_{humide}·jour⁻¹ dont une matière volatile (*volatile solid*, VS) de 7.70 kg_{VS}·jour⁻¹.

Une masse égale d'eau a été considérée comme nécessaire pour l'alimentation journalière, soit 39.38 kg·jour⁻¹.

Considérant que la masse volumique des excréments humains et de l'eau sont équivalents à $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, le débit journalier entrant de l'installation est donc de 78.76 L·jour⁻¹, incluant 7.70 kg_{VS}·jour⁻¹.

Concernant l'utilisation d'excréments humains pour la digestion anaérobie, et surtout du digestat comme engrais sur les cultures, la littérature [14] recommande un temps de rétention hydraulique de 90 à 100 jours afin d'éliminer les microorganismes pathogènes potentiellement présents (œufs d'helminthe, virus et bactéries). Compte tenu des éléments précédents, le volume total du digesteur serait de $7.88 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{jour}^{-1} \cdot 100 \text{ jours} = 7.88 \text{ m}^3$. Ce volume est adapté à la plus proche dimension existante de digesteur, soit 8 m³.

En admettant ce dimensionnement et l'utilisation d'excréments humains comme unique substrat, la production de biogaz attendue est d'environ 0.18 m³·jour⁻¹ (le potentiel de production de biogaz des excréments est situé entre 0.02 et 0.028 m³_{biogaz}·kg_{VS}⁻¹, selon [6], [21]). Dans l'étude, l'utilisation de co-substrats (bouse de vache, *Euphorbia tirucalli*, etc.) a été suggérée afin d'augmenter la production de biogaz.

5.3. Discussion sur les constatations

Après révision de l'étude, l'IIRC-Karongi a manifesté la volonté d'inclure l'apport en substrat des dortoirs masculins du campus, permettant d'atteindre $0.250 \text{ kg}\cdot\text{pers}^{-1}\cdot\text{jour}^{-1}$ d'excréments (masse humide), soit un total de $78.8 \text{ kg}_{\text{humide}}\cdot\text{jour}^{-1}$, dont $15.4 \text{ kg}_{\text{VS}}\cdot\text{jour}^{-1}$.

Il a également été décidé de prendre en compte un volume d'eau équivalent à deux fois le volume d'excréments, représentant un apport quotidien total en substrat de $236 \text{ kg}_{\text{humide}}\cdot\text{jour}^{-1}$.

Ces ajustements ont conduit à un ajustement du volume utile de $236 \text{ L}\cdot\text{jour}^{-1} \cdot 100 \text{ jours}/1000 \text{ L}\cdot\text{m}^{-3} = 23.6 \text{ m}^3$. Considérant l'espace nécessaire à l'accumulation de biogaz au sommet du dôme, il a été proposé que le volume total du digesteur soit de 30 m^3 .

Outre ces points, l'étude de faisabilité a mis en évidence la nécessité d'hygiéniser le digestat en sortie du digesteur, compte tenu notamment de la proximité du digesteur avec le réfectoire des étudiants et le risque d'exposition élevé des élèves à des organismes pathogènes [14].

Au moment de la rédaction de l'étude, aucun plan dimensionné pour 30 m^3 n'était disponible, raison pour laquelle les dimensions d'un digesteur de 10 m^3 fait de briques, ciment et pierres (modèle RW3, [13]) ont été adaptée à 30 m^3 , moyennant un facteur $\sqrt[3]{3}$. Il a cependant été mentionné que ces mesures ne sauraient être utilisées avant un examen réalisé par un ingénieur en génie civil pour attester de la faisabilité d'une telle construction.

5.4. Conclusion de l'étude de faisabilité

L'étude réalisée durant l'exécution du travail de diplôme a permis de confirmer la faisabilité du projet visant à construire un digesteur de 8 m^3 à vocation pédagogique sur le site de l'IIRC-Karongi.

À la suite des ajustements réalisés, il a également été attesté de la faisabilité de construire un digesteur de 30 m^3 tout en connectant les toilettes des dortoirs masculins.

6. Transmission des connaissances

Comme il a été spécifié au chapitre 1.3, le projet PROMOST géré par l'ONG Swisscontact intègre une dimension durable, visant – entre autres – à renforcer les compétences d'enseignement des professeurs de l'IIRC-Karongi.

Il a donc été décidé que l'un des aspects fondamentaux du projet vise à transmettre les connaissances nécessaires pour développer la compréhension et l'autonomie des collaborateurs de l'IIRC-Karongi concernant la technologie du biogaz.

Dans ce contexte, les objectifs fixés par le cahier des charges ont ciblé plusieurs approches, soit l'organisation de séminaire de formation, la mise à disposition de matériel pédagogique et la formation d'une équipe de dépannage des digesteurs domestiques.

6.1. Organisation de séminaires de formation

La première approche visée par le travail de diplôme a été d'organiser des séminaires de formation à l'attention des professeurs et étudiants. Ces sessions devaient porter sur le projet en tant que tel, ainsi que le procédé de digestion anaérobie en général.

Des documents ont donc été préparés sur la base de la matière visant à être enseignée, comme présentés ci-dessous.

6.1.1. Séminaire 1 : présentation générale du projet

Le premier séminaire (cf. Annexe 23 : Séminaire 1, présentation générale du projet) visait à présenter globalement le « projet Biogaz », soit l'exécution du travail de diplôme réalisé sur le site de l'IPRC-Karongi.

Il brosse tout d'abord un portrait de l'ensemble des acteurs regroupés pour permettre la mise en place et le bon déroulement du projet. Il délimite ensuite les objectifs mis à jour, ainsi que les délais fixés par le cahier des charges, en s'appuyant sur l'adaptation du plan de travail (fig. 26) mis en place au départ des travaux.

Week		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Activities	Sub-activities	28.05 - 03.06	04 - 10.06	11 - 17.06	18 - 24.06	25.06 - 01.07	02 - 08.07	09 - 15.07	16 - 22.07	23 - 29.07	30.07 - 05.08	06 - 12.08	13 - 19.08
Phase 1 : inventory	Proximity based digesters												
	Concept note : inventory												
Phase 2 : maintenance	Digesters evaluation												
	Troubleshooting												
Phase 3 : redaction	Protocol redaction												
	Proofreading (troublesh. protocol)												
	Users manual redaction												
	Proofreading (users manual)												
	Translation												
Phase 4 : digester building	Feasibility study redaction												
	Proofreading (feasibility study)												
	Construction												
Phase 5 : knowledge transm.	Seminar organisation												
	Seminar execution												
Conclusion													
										Holidays	Sr Ex	Holidays	Sr Ex

Fig. 26: plan de travail adapté au 15.07 des travaux réalisés durant le "projet Biogaz" au Rwanda, tel que présenté dans le séminaire 1 : présentation générale du projet.

Par la suite, il décrit les livrables attendus à terme par la HES-SO, l'IPRC-Karongi ainsi que l'ONG Swisscontact, passant en revue également les étapes déjà réalisées au moment de la rédaction du séminaire, soit :

- L'inventaire des 15 digesteurs institutionnels et domestiques visités durant le séjour.
- L'étude de faisabilité de la construction d'un digesteur sur le site de l'IPRC-Karongi.
- Le dépannage d'un digesteur domestique sur la propriété de S. NTAGAHINDA.

Il se conclut avec les perspectives des travaux en cours, soit l'établissement des objectifs non encore atteints et une série de suggestions pour encourager et développer le « projet Biogaz » après la finalisation du travail de diplôme.

6.1.2. Séminaire 2 : présentation de la digestion anaérobie

Le second séminaire organisé à l'attention des collaborateurs de l'IPRC-Karongi traite du procédé de digestion anaérobie dans sa globalité. Il vise à permettre aux participants de mieux comprendre et appréhender les mécanismes liés à la méthanisation.

Il se divise en plusieurs parties, dont la première définit les quatre étapes principales de la DA et les conditions normales et optimales nécessaires aux bactéries pour vivre.

La seconde partie s'intéresse aux paramètres opératoires liés à la méthanisation, notamment le temps de rétention hydraulique, le potentiel de production de biogaz et le ration C:N, et illustre les méthodes mathématiques pour les optimiser. La dernière partie énonce brièvement les besoins liés à une maintenance sur le long terme d'un digesteur.

6.2. Formation d'une équipe de dépannage

Le deuxième point concernant la transmission de connaissance sur la thématique du biogaz visait à former une équipe de dépannage constituée de deux collaborateurs de l'IPRC-Karongi. Ceux-ci devaient – à terme – disposer de suffisamment de connaissances pour pouvoir :

1. Visiter des sites disposant d'une installation de méthanisation et identifier les différentes parties du méthaniseur, avec l'aide du propriétaire.
2. Effectuer une première analyse de l'exploitation et de la maintenance de l'installation par le propriétaire, au moyen de questions ciblées et d'observations sur site.
3. Prélever des échantillons de substrat et de digestat (selon les besoins) et de réaliser des contrôles de pH et de température, de déterminer le temps de rétention hydraulique et éventuellement le ratio C:N du substrat utilisé.
4. Contrôler l'ensemble de l'installation à la recherche de possible(s) dysfonctionnement(s), conformément aux déclarations du propriétaire.
5. Identifier les causes de ces dysfonctionnements au moyen des outils à disposition.
6. Dans la mesure du possible, apporter les mesures adéquates pour réduire ou éliminer les causes des problèmes identifiés.
7. Fournir au propriétaire les informations adéquates pour éviter la réapparition de ces problèmes.

Au cours des travaux exécutés sur le terrain, il a pu également être constaté que – pour réaliser un dépannage dans les meilleures conditions – l'équipe se devrait de posséder les compétences suivantes :

- Expertise en plomberie pour l'évaluation des conduites de gaz et de liquide.
- Expertise en maçonnerie pour l'évaluation de l'état général de l'installation.
- Connaissance en ingénierie civile pour l'évaluation du choix d'un site et de la construction d'un digesteur.
- Lecture de plan de construction et interprétation.
- Compréhension de la chimie et capacité à effectuer des analyses simples (mesure de température, pH, pression de gaz, DCO, etc.)
- Capacité de rédaction d'un rapport en anglais et/ou en français.

Malgré l'impossibilité de réaliser une véritable formation et un suivi sur le moyen terme afin de vérifier les acquis des personnes impliquées, deux personnes se sont particulièrement distinguées par leur intérêt dans la conduite du projet et leur motivation à le poursuivre dans le

futur. Il semble dès lors qu'ils présentent les meilleures dispositions pour constituer les premiers membres de l'équipe de dépannage.

Il s'agit de MM. IYAMUREMYE Pacifique et MWISENEZA Faustin, qui sont respectivement assistant de l'atelier de maçonnerie et instructeur en ingénierie civile et technologie environnementale.

- M. IYAMUREMYE Pacifique a obtenu son diplôme d'études secondaires professionnelles A2 en 2005, ces études incluant une formation dans la maçonnerie. Depuis lors, il a exercé plusieurs mandats en tant que chef d'équipe ou contremaître au Rwanda. Il est employé à l'IPRC-Karongi depuis 2014 en qualité d'assistant.
- M. MWISENEZA Faustin a obtenu un *Advanced Level Certificate in Physics, Chemistry and Mathematics* en 2009, ainsi qu'un *Advanced Diploma in Civil Engineering Department, Environmental Management and Water Technology Option* en 2013. Il a exercé plusieurs activités professionnelles en tant que technicien, jusqu'à débiter son activité d'instructeur sur le site de l'IPRC-Karongi en 2018.

Il peut également être mentionné l'intérêt et la participation de M. GAKUBA Aimable, professeur de physique à l'IPRC-Karongi, qui a manifesté un intérêt à intégrer le projet, tout en sachant qu'il dispense déjà une formation sur les énergies renouvelables – dont le biogaz – aux étudiants de niveau *Diploma* (équivalent d'un Bachelor).

6.3. Discussion sur la transmission des connaissances

Au terme des travaux de terrain réalisés sur le site de l'IPRC-Karongi, la transmission des connaissances a été réalisée en mettant l'accent sur la prise d'autonomie des membres de l'équipe de dépannage. En effet, l'objectif est fondamentalement pour les collaborateurs d'acquérir efficacement et rapidement une expertise suffisante pour réaliser des dépannages et développer la technologie du biogaz dans la région.

C'est ainsi que le séminaire portant sur la digestion anaérobie a été réalisé en petit comité (MM. IYAMUREMYE Pacifique et MWISENEZA Faustin) afin de leur permettre une meilleure vision globale de la DA et des impératifs liés à ce procédé.

La présence sur le terrain de ces deux collaborateurs à la majorité des sessions de dépannage et de visite fournit déjà un bagage et une compréhension supérieurs à la majorité de leurs collègues sur le site de l'IPRC.

En dépit de cette volonté, il s'agit cependant de relever de l'impossibilité de former un spécialiste en biogaz sans un suivi rigoureux et des contrôles d'acquisition des connaissances. Il semble donc que, même si les participants au projet possèdent une compréhension de la digestion anaérobie plus élevée que la majorité des Rwandais, ils ne semblent pas capables de pouvoir faire preuve d'une totale autonomie dans le domaine.

En conséquence, un support accordé par des instances disposant de connaissances mieux entérinées, comme l'IPRC-Tumba ou la HES-SO Valais/Wallis permettrait de consolider et assainir les lacunes, renforcer leur confiance dans le domaine et leur allouer une véritable indépendance sur une période d'un ou deux ans.

7. Discussion du projet de diplôme

Le présent chapitre discute du projet dans sa globalité, tout en passant en revue chacune des étapes de travail, telles qu'elles ont été définies entre les collaborateurs de l'IPRC-Karongi et l'auteur de ce rapport.

7.1. Phase 1 : inventaire des méthaniseurs

La première constatation qui a été faite durant l'inventaire des méthaniseurs est l'apparent bon état de fonctionnement des installations autour de l'IPRC-Karongi. Cet élément semble être directement en contradiction avec la littérature [6] et les conclusions tirées du travail de diplôme précédemment réalisé par M. Hoyos [16].

Compte tenu du fait que le ministère de l'infrastructure rwandais annonce que plus de 3500 digesteurs étaient construits en 2013 [25], il est évident que la visite d'une quinzaine d'installations est loin de représenter un échantillonnage exhaustif. En outre, seuls les modèles à dôme fixe issus du projet FONERWA [8] ont pu être observés.

En dépit de demandes répétées auprès des instances dirigeantes de l'école polytechnique, aucune liste des installations de méthanisation n'a pu être fournie pour aider à diriger les recherches. Le cadre de travail collaboratif (*collaborative framework*) fixait initialement comme objectif pour l'IPRC-Karongi d'identifier 20 sites de méthanisation, travail qui n'a pas été réalisé en amont de ce projet. Les recherches ont donc été effectuées sur le moment par le biais de contacts interposés entre les Rwandais, approche qui a été très vite limitée à un voisinage restreint.

La visite des sites des services correctionnels rwandais de Mageragere et Rubavu ont représenté un intérêt académique certain, permettant d'apprécier la réussite d'un projet collaboratif entre une IPRC et une ONG. Cependant, ces observations ne peuvent être mises en relation avec des digesteurs domestiques, en raison de divergences de dimensionnement et d'exploitation beaucoup trop conséquentes.

Quant à la visite du site de Tumba, il a permis un contact avec une école disposant d'une infrastructure et d'un cursus de formation orienté vers le biogaz, ouvrant la possibilité d'une collaboration entre ces écoles.

7.2. Phase 2 : maintenance et dépannage des digesteurs

La prise d'informations auprès des propriétaires de digesteurs dans la région de Karongi a permis de mettre en évidence que ces personnes ne possèdent que peu de compréhension du procédé de méthanisation et de l'exploitation de leur système.

Il était d'autant plus surprenant que plusieurs propriétaires déclarent n'avoir reçu qu'une formation superficielle à la construction de leur installation et qu'aucun contact postérieur n'avait été engagé par les autorités pour s'enquérir du fonctionnement de leur digesteur.

Il conviendrait dès lors de prendre contact avec ces instances (du projet NDBP ou FONERWA) afin de pouvoir entériner cette information et comprendre comment ils souhaitent engager la maintenance et l'entretien sur le long terme des installations qu'ils ont construites. En effet, concernant les installations issues du projet FONERWA, il peut être envisagé que l'absence de problème ne s'explique que par l'état relativement récent des méthaniseurs.

Dans cette même optique, et pour autant que le programme précité ait un budget alloué pour la maintenance et le dépannage des digesteurs domestiques, l'IPRC-Karongi pourrait faire office de représentant dans sa région.

Il a été également proposé à l'IPRC d'organiser des séances d'informations de groupe réunissant les propriétaires afin d'approfondir les connaissances et la compréhension de l'exploitation d'un digesteur.

Un des points récurrents abordés par les propriétaires de digesteur domestique était la faible production de biogaz, ne permettant au mieux que de cuire de l'eau ou des aliments tendres (légumes, riz).

En se basant sur les observations et informations tirées du recensement, il peut être présumé que l'une des causes de ce faible rendement provient d'une alimentation insuffisante en substrat. En effet, les études d'implantation du projet [9] et les manuels d'utilisation [7], [12] concordent sur une alimentation quotidienne de 20 à 40 kg de déjections bovines, produites généralement par une à deux vaches. Or, il a pu être constaté au gré des visites sur site que plusieurs propriétaires ne possédaient qu'une vache adulte, limitant de fait l'apport journalier en substrat à environ 20 kg dans le meilleur des cas. Il a pu également être entendu de la part de propriétaires qu'ils nourrissent le digesteur par intervalle de deux à trois jours, attendant une accumulation suffisante d'excréments pour l'injecter. Cet élément peut également causer un ralentissement de la croissance bactérienne, voire favoriser une population au détriment d'une autre et causer une baisse de la production de biogaz.

Une évaluation de la combustion du biogaz pourrait également être envisagée, notamment concernant l'efficacité des brûleurs et la possibilité de les isoler de manière à limiter les pertes thermiques durant la cuisson des aliments. Cette approche pourrait éventuellement améliorer l'efficacité de la combustion du biogaz à moindre coût et sans modifier les habitudes des propriétaires de digesteurs.

Dans le contexte de l'exploitation des installations, il convient également de considérer l'apport en eau, qui peut s'avérer visiblement problématique lors de la saison sèche : les propriétaires ne disposant pas d'assez d'eau pour nourrir leur bétail, ils ne peuvent dès lors en utiliser que de manière très limitée dans les digesteurs. Certains remplacent alors l'eau par de l'urine de vache, avec le risque – en trop forte quantité – de mettre en péril la culture par empoisonnement à l'azote.

Il semble que ces points se rapportant à l'alimentation des digesteurs se recoupent avec les constatations faites sur le site de l'hôpital de référence de Kibuye, et concernant un dimensionnement des installations inapproprié par rapport au besoin et aux attentes. Il conviendrait cependant de clarifier s'il s'agit d'une erreur initiale d'ingénierie ou une sous-évaluation des besoins en biogaz.

Il semble exister également une dimension non négligeable de tradition dans la cuisine au Rwanda : d'après le spécialiste en biogaz du site de l'IPRC-Tumba, les Rwandais ont pour habitude de cuire des haricots rouges sans les mettre à tremper préalablement. Cela a pour effet de nécessairement augmenter le temps de cuisson nécessaire à les ramollir. En dépit de ses efforts tenter de changer ces habitudes en proposant de mettre les haricots à tremper la nuit précédente, il ne semble pas être parvenu à des résultats probants.

Les dernières démarches réalisées sur site ont permis d'identifier un site propice à l'établissement d'un laboratoire d'analyses de routine, tout en encourageant le responsable de l'atelier (IYAMUREMYE Pacifique) à déposer une demande officielle auprès de l'administration de l'école pour l'y établir. Cette démarche a été mentionnée comme étant nécessaire pour encourager les tenants du projet (HES-SO Valais/Wallis et Swisscontact) à poursuivre une collaboration dans le domaine du biogaz.

Conjointement à cela, le dernier prototype de digesteur de M. Hoyos a été vidé et nettoyé de manière à fournir un premier instrument de travail sur le site de l'IPRC-Karongi. Il a été également suggéré aux membres de l'équipe de dépannage de formuler une demande officielle afin de :

1. Remettre en état le prototype.
2. Acquérir le substrat (excréments bovins en priorité) par l'intermédiaire de Swisscontact.

Une fois le digesteur en état de fonctionner, une exploitation de plusieurs mois avec un suivi régulier de la méthanisation permettrait à l'équipe de dépannage de gagner en autonomie et en assurance quant à l'exploitation de ces systèmes. Ces éléments permettraient – à terme – de renforcer leur crédibilité quant à la poursuite de leur projet de dépannage et d'entretien sur le site et dans la région.

7.3. Phase 3 : rédaction d'un manuel d'utilisateur et d'un protocole de dépannage

La rédaction du manuel d'utilisateur ainsi que du protocole de dépannage ont été réalisés au cours du séjour sur place sur la base des observations effectuées sur le terrain, tout en recoupant les informations issues de manuels de plusieurs horizons, notamment la Chine, le Népal et le Mozambique [7], [12], [14], [15]. Ils ne peuvent donc être considérés comme « universels » et devront être complétés au gré des futures visites et constatations réalisées sur le terrain par les intervenants.

Il convient également de considérer les limites du protocole de dépannage, en ceci qu'il se contente de citer les causes et conséquences les plus probables, et ne peut bien évidemment prendre en considération chaque situation.

Aucun manuel d'utilisation rwandais – permettant une mise en contexte plus circonstanciée – n'a pu être obtenu de la part des autorités ou de l'administration des IPRC, malgré plusieurs demandes effectuées en ce sens.

La volonté de traduire le manuel d'utilisateur en kinyarwanda, puis de soumettre une demande auprès de l'ONG Swisscontact afin de les imprimer en format « flyer » s'est heurtée à la complexité de cette langue. En effet, aux dires des collaborateurs de l'IPRC-Karongi participant au projet, une traduction de l'anglais au kinyarwanda d'un tel document exige un groupe de plusieurs personnes (4-5) – dont au moins une versée dans les termes techniques utilisés – disponibles pendant plusieurs jours. Cela afin de garantir une traduction à la fois rigoureuse et compréhensible pour tous, compte tenu des dialectes régionaux.

Dès lors, il n'a pas été possible de réaliser la traduction durant la durée du séjour.

7.4. Phase 4 : étude de faisabilité de la construction d'un digesteur

L'étude de faisabilité réalisée au cours du séjour a permis de confirmer la possibilité de construire un digesteur sur le site de l'IPRC-Karongi, utilisant les excréments humains comme substrat principal.

Après soumission de l'étude auprès de l'ONG Swisscontact, celle-ci a déclaré refuser d'entrer en matière pour l'octroi de fonds. Il dépend dès lors de l'IPRC de trouver les fonds auprès d'autres instances pour permettre la construction d'un méthaniseur sur le site de l'école.

Plusieurs éléments doivent cependant être pris en considération, notamment concernant l'hygiénisation du digestat et les risques sanitaires liés à l'exploitation d'un digesteur à proximité du réfectoire des élèves. Des suggestions ont été faites en ce sens dans l'étude à proprement parler. Il conviendrait cependant de réaliser un suivi et une formation approfondie des personnes directement concernées par ces risques (étudiants et professeurs) de manière à les sensibiliser. Une étude pourrait également être réalisée sur la microbiologie du digestat, permettant d'identifier les souches pathogènes les plus communes dans la région et les symptômes associés aux maladies dont elles sont le vecteur. Cette approche permettrait une meilleure connaissance globale des risques, et des mesures à prendre afin de les réduire jusqu'à un domaine acceptable [14].

Concernant un surdimensionnement du digesteur jusqu'à un volume total de 30 m³, les points principaux à étudier concernent l'apport en substrat et en eau sur le site de l'IPRC-Karongi. Il a été déclaré par les collaborateurs de l'école que Swisscontact s'était chargée d'acheter des excréments bovins à l'attention des prototypes construits par M. Hoyos en 2016. Cette démarche pourrait être reproduite dans le cas présent, tout en prenant en compte que le volume final à acheter serait nettement plus conséquent. Il s'agirait également d'un coût fixe à appliquer quotidiennement, de manière à garantir un apport en substrat régulier dans le méthaniseur.

L'accès à l'eau peut également constituer une problématique à résoudre durant la saison sèche et nécessiterait une évaluation concrète de sa disponibilité et de son accessibilité.

Enfin, l'aspect de l'utilisation du biogaz produit par le digesteur est un point qui n'a été couvert que de manière superficielle : la littérature [7] indique que le potentiel de production de biogaz des excréments humains est en moyenne de 0.024 m³·kg_{VS}⁻¹, représentant une production totale de 0.37 m³ de biogaz par jour pour un digesteur de 30 m³ tel que mentionné dans l'étude.

Admettant une teneur moyenne en méthane de 60%, cela représente environ 1.3 MJ·jour⁻¹ d'énergie à disposition ($\rho_{\text{CH}_4} = 0.717 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\Delta c_{\text{H}^0_{\text{CH}_4}} = 50\cdot 10^6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, selon [26]) qu'il conviendrait d'utiliser. Si ce gaz n'était pas évacué, le digestat serait lentement expulsé du dôme de digestion par effet d'accumulation du biogaz à son sommet.

Les cuisines à proximité n'utilisant que des marmites de 200 L pour cuire de l'eau, une énergie d'environ 6.3 MJ est nécessaire pour élever ce volume de 25 à 100°C, rendant cette production obsolète. Il conviendrait donc de trouver une autre utilité à ce biogaz, telle que le nettoyage, de la cuisine en petite quantité, etc.

7.5. Phase 5 : transmission des connaissances

La transmission des connaissances, telle qu'elle a été planifiée au début du travail de diplôme, n'a pas pu être réalisée.

Les séances de formation (séminaires) proposés à l'IPRC-Karongi afin de renforcer et d'élargir la compréhension de la méthanisation ont fait l'objet de réticence de la part du corps enseignant. Il semble – bien que cette assertion ne puisse être dûment vérifiée – que les professeurs et membres de l'administration en place ne montrent que peu d'intérêt à suivre une formation dispensée par un individu qui est lui-même élève d'une école.

Sachant cela, l'accent a été mis particulièrement sur une formation « de terrain », en tâchant d'élargir la compréhension des membres de l'équipe de dépannage concernant les mécanismes globaux régissant la digestion anaérobie. Concrètement, cela se traduisait par illustrer la théorie de situations concrètes, rencontrées sur le terrain et directement observables. Cette approche a nécessairement limité les explications à un niveau superficiel de compréhension mais a cherché essentiellement à communiquer un message accessible.

Les supports écrits des deux séminaires ont été remis aux collaborateurs de l'IPRC-Karongi, de même que le manuel d'utilisateur et le protocole de dépannage, dans une version anglaise corrigée. Cette approche vise à leur fournir une trace des démarches effectuées durant le séjour, leur fournissant également un support physique sur lequel se reposer en cas de développement postérieur du projet. Ces documents représentent également le matériel pédagogique mis à disposition afin d'illustrer partiellement les mécanismes de base de la DA auprès des professeurs et étudiants.

Les protocoles expérimentaux permettant l'analyse des composants de la digestion (digestat, substrat) par titration n'ont pas été développés dans la mesure où il n'a pas été possible de se fournir en substances chimiques nécessaires à ces tests.

Un contact devrait être pris en amont – par les membres de l'école polytechnique – afin de pouvoir se fournir en ces substances, ou l'ONG Swisscontact devrait assurer l'intermédiaire auprès d'un fournisseur à Kigali.

8. Conclusion du projet

En conclusion de ce rapport, les objectifs du projet sont tout d'abord rappelés tels qu'ils sont énoncés dans le cahier des charges (cf. Annexe 25 : Cahier des charges du travail de diplôme) :

1. Effectuer un recensement des équipements de méthanisation dans la région de Kibuye et identifier les causes des dysfonctionnements éventuels.
2. Mettre sur pied un laboratoire robuste pour le suivi et le diagnostic des méthaniseurs.
3. Evaluer l'opportunité de la remise en état — à des fins didactiques — des digesteurs de 200 L construits pendant le travail de diplôme de José Hoyos Muñoz en 2016.
4. Développer du matériel pédagogique (éléments théoriques, protocoles expérimentaux) à l'attention des professeurs et des étudiants de l'IPRC-Karongi.
5. Former 2 collaborateurs de l'IPRC à la gestion et au dépannage d'installations de méthanisation.
6. Coordonner le travail de rédaction de la méthode d'exploitation sur place.
7. Rédiger, mettre à disposition des protocoles pour le dépannage des méthaniseurs existants.
8. Réaliser une étude de faisabilité relative à la construction d'un digesteur de démonstration à l'échelle de 8 m³ env. sur le site de l'IPRC.

Il peut être établi que l'objectif de recensement d'équipements de méthanisation a été réalisé, à hauteur de quinze visites, dont douze autour de Karongi. Parmi elles, dix représentaient des digesteurs domestiques d'un volume d'environ 4 m³, les cinq restants étant des systèmes institutionnels de plus grande taille (jusqu'à 900m³). Les méthaniseurs domestiques visités sont tous issus d'un même programme d'implantation gouvernemental et se présentent sous un bon état général, ayant été construits entre 2016 et 2017. Parmi ces digesteurs, seul l'un d'entre eux ne produisait pas de biogaz et une tentative de dépannage a été réalisée dessus. Ces installations sont nourries par des déjections bovines, seule l'une d'entre elle utilise couramment des selles humaines, bien que plusieurs digesteurs disposent d'un canal prévu pour cette utilisation. La pression normale de biogaz est de 8 kPa, compte tenu de l'ingénierie de l'installation, et le méthane produit permet la cuisson d'eau et d'aliments tendres (légumes, riz).

Le laboratoire d'analyses a été l'objet d'un premier repérage sur le site de l'IPRC-Karongi et un site a été sélectionné. Une liste du matériel nécessaire à sa mise en place a été dressée dans ce rapport, et une demande officielle doit être déposée auprès de l'administration de l'école par l'un des membres de l'équipe de dépannage.

Le dernier prototype de J. Hoyos a été vidé et nettoyé, dans l'optique de le remettre en état. Une évaluation des coûts pour ce faire a été réalisée par les membres de l'équipe de dépannage et une demande sera adressée à Swisscontact pour financer son exploitation.

Un manuel d'utilisateur d'un digesteur de 4 m³ (modèle CAMARTEC, issu du programme FONERWA) a été rédigé en anglais et mis à disposition des collaborateurs de l'IPRC-Karongi pour traduction en kinyarwanda. Cette étape n'a pas pu être réalisée durant le séjour. Un protocole de dépannage a également été rédigé en anglais, à disposition de l'équipe de dépannage, de manière à soutenir les interventions dans la région. Ce manuel devra cependant être complété

par les situations inédites qui pourraient se présenter dans l'avenir. Les séminaires organisés ont fait l'objet d'un document rédigé en anglais (*handout*) servant de support et reprenant chacune des étapes de la présentation.

Deux collaborateurs de l'IPRC ont été formés sur le terrain au dépannage et ont vu leur compréhension de la méthanisation approfondie, en ayant participé à la majeure partie du projet sur place. Sans être parfaitement autonomes, ils possèdent les premières bases pour intervenir et agir dans une optique de renforcer la technologie du biogaz dans la région.

L'étude de faisabilité de la construction d'un digesteur sur le site de l'IPRC-Karongi a permis de conclure par un préavis positif, mais l'ONG Swisscontact a refusé d'octroyer les fonds.

9. Perspectives du projet

En perspectives de ce projet, il conviendrait de poursuivre un état des lieux systématique de la technologie du biogaz dans la région de Karongi. En outre, une visite de digesteurs domestiques datant d'avant 2016 (programme NDBP) constituerait l'occasion de comparer les installations, leur efficacité et rendrait compte de la maintenance sur le long terme apportée aux digesteurs. Pour ce faire, une demande devrait être adressée aux autorités du district de Karongi afin d'obtenir la liste des méthaniseurs et leur propriétaire, et un contact devrait être établi avec les responsables des programmes NDBP et FONERWA.

Dans l'optique de la construction d'un méthaniseur sur le site de l'IPRC, l'exploitation d'un digesteur de 200 L – sur le modèle du prototype de J. Hoyos – durant environ un an renforcerait la crédibilité de l'école et démontrerait leur motivation à poursuivre le projet. En réalisant également un suivi régulier des paramètres fondamentaux de la méthanisation (T, pH, matière sèche, etc.) depuis le commencement, l'équipe de dépannage disposerait également d'une meilleure compréhension globale du procédé. Pour ce faire, ils devraient cependant disposer d'un appui financier, technique et théorique pour leur permettre d'appréhender les situations.

L'acquisition d'un matériel de base pour l'équipe de dépannage est une condition sine qua non pour leur autonomie, et devrait être constitué d'un jeu d'outils complet pour la plomberie, la maçonnerie et les analyses de routine. Ce matériel devrait être conservé sous clé, dans le local attribué aux analyses des digesteurs de manière à éviter un usage par des personnes non formées.

Un responsable du biogaz sur le site de l'IPRC devrait être nommé afin que l'école se dote d'une politique claire dans ce domaine, et d'une personne capable de donner un axe de travail concret. En outre, si le projet se poursuit, une véritable réflexion devrait être menée entre les intervenants afin de définir cet axe et son évolution sur le moyen à long terme.

Le manuel d'utilisateur rédigé au cours du projet devrait être confronté au manuel rwandais existant – s'il est disponible – afin d'actualiser les informations et devrait faire l'objet d'une collaboration entre l'IPRC-Tumba et l'IPRC-Karongi. En joignant les connaissances de ces deux écoles, la possibilité de créer des pôles de compétences concrets verrait le jour, et les

informations fournies aux propriétaires de digesteurs seraient rendues uniformes. De plus, l'expertise de l'IPRC-Tumba dans le domaine du biogaz aiderait l'IPRC-Karongi à renforcer ses récents acquis. Des stages de formation devraient être proposés pour les membres de l'équipe de dépannage entre les écoles afin de créer un premier pont de collaboration dans le domaine.

Dans une même mesure, il serait profitable pour ces deux membres de profiter d'un stage en Suisse, sous l'égide de la HES-SO Valais/Wallis, pour approfondir leurs connaissances dans la chimie, la microbiologie et la technologie du biogaz.

10. Remerciements

Ce travail ne saurait se terminer sans un minimum de gratitude, donc...

Au Prof. Dr Simon Crelier et Rémy Dufresne, qui, dès le départ, ont su accorder l'attention et le soutien nécessaire à mes premiers pas dans le domaine et qui ont toujours fait montre de patience pour me permettre d'arriver au niveau attendu.

A Prof. Dr Alain-François Grogg, pour le temps pris à répondre avec plaisir et bonne humeur à mes nombreuses questions d'ingénierie – parfois tirées par les cheveux.

A Pacifique, Faustin et Gakuba de l'IPRC-Karongi, qui m'ont fait me sentir « comme à la maison » durant mon séjour au Rwanda. Sans leur aide, le projet n'aurait sans doute pas été le même, et pour cela, un immense merci !

A Pacy de Swisscontact pour sa grande compréhension de notre situation et son aide précieuse durant toutes sortes de situations abracadabrantes.

A mes deux confrères et camarades de galère, Armand et Matthias, pour leur bonne humeur et leur aide sur certains points de mon rapport, mais aussi pour leurs précieux conseils en photographie !

Un remerciement spécial à mes proches, ma mère et ma tendre compagne, pour leur soutien infailible et leurs encouragements dans les moments difficiles.

Finalement, un grand merci à toutes les personnes qui ont aidé à la rédaction, la relecture et la correction de ce rapport, mais aussi à toutes celles et ceux que j'aurais pu oublier à cause d'une mémoire franchement défaillante.

11. Bibliographie

- [1] « Home | National Institute of Statistics Rwanda ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.statistics.gov.rw/>. [Consulté le: 01-avr-2018].
- [2] A. Cornillet, « Etat de l'art de la production de méthane par digestion anaérobie et analyse des besoins en biogaz de la région de Kibuye (RW) », HES-SO VS, Filière Biotechnologies, Sion (CH), Rapport de projet 3, avr. 2018.
- [3] J. de la C. Sinaruguliyi et J. B. Hategekimana, « BIOGAS DEVELOPMENT SCENARIOS TOWARDS 2020 IN RWANDA: The contribution to the energy sector and socio-economic and environmental impacts », Independent thesis advanced level (Master's degree), University of Gävle, faculty of engineering and sustainable development, 2013.
- [4] Republic of Rwanda, « Vision 2020 », 2012. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.minecofin.gov.rw/index.php?id=148>. [Consulté le: 05-avr-2018].
- [5] M. Landi, B. K. Sovacool, et J. Eidsness, « Cooking with gas: Policy lessons from Rwanda's National Domestic Biogas Program (NDBP) », *Energy Sustain. Dev.*, vol. 17, n° 4, p. 347-356, août 2013.
- [6] A. Nakarmi, A. Bahadur Karki, R. Dhital, I. Sharma, et P. Kumar, *Biogas as Renewable Source of Energy in Nepal. Theory and Development*. Khumaltar, Lalitpur: Alternative Energy Promotion Center (AEPCC), 2015.
- [7] Government of Rwanda, « Final report : Government of Rwanda, Environment and Climate Change Fund (FONERWA) Design Project », Government of Rwanda, Rwanda, Project Design, 2012.
- [8] G. Dekelver, A. Ndahimana, et S. Ruzigana, « Implementation Plan : National Programme on Domestic Biogas in Rwanda », SNV, Kigali, Rwanda, Plan d'implantation, sept. 2006.
- [9] M. S. Haque et N. N. Haque, « Studies on the Effect of Urine on Biogas Production », *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.*, vol. 41, n° 1, p. 23-32, 2006.
- [10] R. Moletta, *La méthanisation*, 3e éd. Paris (FR): Lavoisier, 2015.
- [11] FACT Foundation, « Manual for the construction and operation of small and medium size biogas system », ADPP, FACT Foundation, Bilibiza, Gabo Delgado, Mozambique, Construction Manual, oct. 2012.
- [12] C. Sendashonga et A. Ndahimana, « Plant Drawing (RW I, II & III) », NDBP, Republic of Rwanda, n.d.
- [13] Consortium on Rural Technology, « Biogas from Human Waste », Consortium on Rural Technology, New Dehli, IN, Conference Report, 1987.
- [14] Office of the Leading Group for the Propagation of Marshgas, *A Chinese Biogas Manual*, Intermediate Technology Publications Ltd. Sichuan Province, China: Ariane van Buren, 1976.
- [15] J. A. H. Muñoz, « Développement et installation d'une petite centrale de biogaz au Rwanda », Travail de diplôme : bachelor, HES-SO Valais/Wallis, filière Energie et Techniques environnementales, Sion (CH), 2016.
- [16] G. Taddese et B. Weldegebriel, « Evaluating of Biogas Production from Euphorbia tirucalli », *Am. J. Environ. Energy Power Res.*, vol. 2, n° 2, p. 1-9, 2014.
- [17] P. Tumutegyeize, F. I. Muranga, J. Kawongolo, et F. Nabugoomu, « Optimization of biogas production from banana peels, Effect of particle size on methane yield », *Afr. J. Biotechnol.*, vol. 10, n° 79, p. 18243-18251, déc. 2011.
- [18] N. Pisutpaisal, S. Boonyawanich, et H. Saowaluck, « Feasibility of Biomethane Production from Banana Peel », *Technol. Mater. Renew. Energy Environ. Sustain. TMREES14 – EUMISD*, vol. 50, p. 782-788, janv. 2014.
- [19] P. Elaiyaraju et N. Partha, « Biogas production from co-digestion of orange peel waste and jatropha de-oiled cake in an anaerobic batch reactor », *Afr. J. Biotechnol.*, vol. 11, n° 14, p. 3339-3345, janv. 2012.

- [20] « Welcome to Roto Website ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.rotorwandatanks.com/Roto_Tanks.html. [Consulté le: 29-août-2018].
- [21] D. Andriani, A. Wresta, A. Saepudin, et B. Prawara, « A Review of Recycling of Human Excreta to Energy through Biogas Generation: Indonesia Case », *Energy Procedia*, vol. 68, p. 219-225, avr. 2015.
- [22] C. Rose, A. Parker, B. Jefferson, et E. Cartmell, « The Characterization of Feces and Urine: A Review of the Literature to Inform Advanced Treatment Technology », *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, n° 17, p. 1827, sept. 2015.
- [23] N. L. Schouw, S. Danteravanich, H. Mosbaek, et J. C. Tjell, « Composition of human excreta — a case study from Southern Thailand », *Sci. Total Environ.*, vol. 286, n° 1, p. 155-166, mars 2002.
- [24] A. Muralidharan, « Feasibility, health and economic impact of generating biogas from human excreta for the state of Tamil Nadu, India », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, p. 59-64, mars 2017.
- [25] MININFRA, « Ministry of Infrastructure - Biogas », *Republic of Rwanda - Ministry of Infrastructure*. [En ligne]. Disponible sur: <http://mininfra.gov.rw/index.php?id=84>. [Consulté le: 09-avr-2018].
- [26] Commissions romandes de mathématique, de physique et de chimie, *Formulaires et tables*. Le Locle, CH: G d'Encre, 2015.
- [27] X. Chu, G. Wu, J. Wang, et Z.-H. Hu, « Dry co-digestion of sewage sludge and rice straw under mesophilic and thermophilic anaerobic conditions », *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 22, n° 24, p. 20143-20153, déc. 2015.
- [28] J. Colón, A. A. Forbis-Stokes, et M. A. Deshusses, « Anaerobic digestion of undiluted simulant human excreta for sanitation and energy recovery in less-developed countries », *Energy Sustain. Dev.*, vol. 29, p. 57-64, déc. 2015.
- [29] H. Heinonen-Tanski et C. van Wijk-Sijbesma, « Human excreta for plant production », *Bioresour. Technol.*, vol. 96, n° 4, p. 403-411, mars 2005.
- [30] A. Regattieri, M. Bortolini, E. Ferrari, M. Gamberi, et F. Piana, « Biogas Micro-Production from Human Organic Waste—A Research Proposal », *Sustainability*, vol. 10, n° 2, 2018.
- [31] L. Rakotojaona, « Open ideas : Domestic biogas development in developing countries », Enea consulting, Paris, juin 2013.

12. Annexes

a) Annexe 1 : rapport d'inventaire, digesteur de l'hôpital de référence de Kibuye

31/05/2018	KIBUYE Cell, GATWARO Village, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	Eric, technician in charge of digester maintenance Dr NTIRENGANYA Emmanuel, Director general of the Hospital, +250 (0) 78 381
Type of digester	Fixed dome digester
Volume	Unknown
Built by	UNHRC and/or UNICEF, ~2014
Digester in service?	No
Type(s) of feed	Human waste (no further information provided)
HRT	n.d.
Biogas flow	n.d.
Temperature	n.d.
pH	n.d.

Description of the situation

The fixed dome digester from Kibuye Referral Hospital has been out-of-service for 6 to 10 years, according to former persons in charge of the digester. Built by the UNHRC (as a donation), it used human wastes collected from the latrine (fig. 1) as feed and rainwater to dilute it. Pipes (PVC, concrete) have been build underground to connect the different chambers of the digester (fig. 2), though the utility of these several chambers was unclear. Pipes also allowed the biogas to be used with two (three?) burners placed in the kitchen (fig. 3).

The produced biogas was considered as sufficient to cook food.



Figure 1: latrine, including human waste collector (blue arrow)

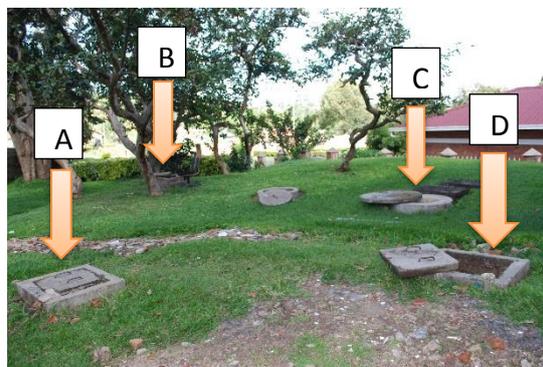


Figure 2: biodigester's openings on the ground, with sight from different evacuation chambers. The usage of these several chambers was unclear and no information was provided about them.



Figure 3: pipes used for the biogas in front of the kitchen.

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.



Uses and maintenance of the digester

According to the technician in charge of maintenance, after the building by the HRC the digester provided biogas during a period of one year. No information was given to the hospital staff about maintenance and/or troubleshooting.

No slurry evacuation or reuse were performed during this time.

After the digester has become out-of-service, maintenance staff was unable to have contact with HRC to rehabilitate it. No actions were performed, the digester and the latrine are now unused. It was possible to note that the digester chambers seem now to be almost empty and dry (fig. 4).



Figure 4: evacuation chamber (A), as observed during inventory.

Conclusions

The hospital director general and the person responsible for maintenance has communicated a clear motivation to rehabilitate this digester, with the help of IPRC Karongi and the support of Rwandan Government.

Based on the observations on site, studies can be performed in order to assess this rehabilitation and improvement possibilities.

Improvements and perspectives

In order to rehabilitate the digester, early works need to be performed: the state/condition of pipelines has to be controlled, using either inert gas (for the biogas) and water (through digester's chambers). The condition of three retention chambers have to be controlled: the chambers must be filled with water and fully emptied before further activities.

The hospital direction has manifested interest into biogas technology and improvement of their digester: because of hygiene consideration, cooking with biomass (wood, charcoal) has to be avoided near the hospital buildings.

Further work would have to be performed in order to evaluate different options such as:

To serve the whole kitchen with biogas (about 12 burners).

To use biogas to lighten hospital buildings.

To use biogas in medical activities (i.e. boiling water to disinfect medical instruments).

b) Annexe 2 : rapport d'inventaire, digesteur de Z. MADENDE

31/05/2018	KINIHA Cell, KIYOVO Village, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	MADENDE Zachary, +250 (0) 728 12 63 01
Type of digester	Fixed dome digester
Volume	4 m ³
Built by	FONERWA
Digester in service?	Yes
Type(s) of feed	Cow dung + water
HRT	n.d.
Biogas pressure	8 kPa
Temperature	24°C
pH	6.50 (26°C)

Description of the situation

The fixed dome digester in the house from MADENDE is a domestic 4m³ biodigester, fed with cow dung and water exclusively. It was built by a delegation from Karongi district (FONERWA). No manual or training were given, except a demonstration at the very beginning.

Stirring is performed in a “feed chamber” as a plug is in place, allowing to remove non-degradable material (tree branches, leaves, etc.) before the plug removal (fig. 1). The feed is transferred into a second “feed chamber”, which seems to allow sand and soil to sediment. After these steps, the feed proceeds into the digestion chamber by natural convection.

The slurry is evacuated by natural convection into a small canal under the digester and reused as



Figure 1 : Feed 1st chamber with stirrer, allowing to remove non-degradable material.



Figure 2 : slurry exit, moved by natural convection and reused as fertilizer.

fertilizer (fig. 2).

Uses and maintenance of the digester

No maintenance is performed on the digester.

The produced biogas is sufficient for light cooking (vegetables, boiled water) but not for food requiring longer cooking time (beans, etc.). The owner informed us that the maximal reached pressure of the biogas is 8 kPa (80 mbar), according to the manometer installed into the kitchen.

c) *Annexe 3 : rapport d'inventaire, digesteur de B. NAIMURWANGO*

31/05/2018	BURUNGA Cell, NYABIKENSE Village, BWISHYURA Sector, KARONGI
Contact on site	NAIMURWANGO Balthazar
Type of digester	Fixed-dome digester
Volume	4 m ³
Built by	RW government, FONERWA (2017)
Digester in service?	Yes, but poor yield
Type(s) of feed	Cow dung, cow urine
HRT	n.d.
Biogas pressure	8 kPa
Temperature	n.d. (not measured)
pH	7.04

Description of the situation

This fixed-dome digester has been built during 2017 by Rwandan government in a little farm. According to the owner, it works poorly, without any explainable reason. The owner says that the biogas yield remains poor, only sufficient for 30 minutes cooking. The biogas pressure on manometer indicates 8 kPa at its maximum.

Uses and maintenance of the digester

Cow dung and urine are currently used as feed 4 times a week (fig. 1), while water is occasionally added, whenever urine quantity isn't sufficient to dilute dung.



Figure 1 : feed chamber, where feed is added 4x a week.



Figure 2 : digester chamber (blue arrow) and evacuation chamber (middle left). In the foreground, gas tap chamber.

Improvements and perspectives

It was said during the visit that the use of urine as source of liquid may be too concentrated in nitrogen for the digester's bacteria. Further investigations should be performed to confirm this assertion. Nevertheless, it has been suggested to use only water to dilute feed, and maybe look for better carbon sources.

d) Annexe 4 : rapport d'inventaire, digesteur de J.-B. KAYITERA

31/05/2018	BURUNGA Cell, NYABIKENSE Village, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	KAYITERA Jean-Baptiste, prof IPRC, +250 787 368 288
Type of digester	Fixed-dome digester
Volume	4 m ³
Built by	Rwandan government (FONERWA), 2017
Digester in service?	Yes
Type(s) of feed	Cow dung
HRT	n.d.
Biogas pressure	8 kPa
Temperature	22°C
pH	6-7

Description of the situation

Built by Rwandan government in 2017 on the same model as digesters in the sector of Bwishyura, this digester provides enough biogas for cooking in the morning and the evening, according to the owner.

Maximum biogas pressure is 8 kPa.

Uses and maintenance of the digester

Cow dung is used as feed and is added every 2 days through feed chamber (fig. 1). Water is used to dilute the dung and allows the feed to flow into the digester's chamber. Evacuation chamber (fig. 2) allows to recover slurry as fertilizer. No maintenance is performed on the digester.



Figure 1: feed chamber, where feed is added every 2 days. Stirring is used to mix the feed before it enters the digester.



Figure 2: evacuation chamber, where measured temperature reaches 22°C.



Figure 3 : evacuation chamber's exit, where slurry surplus is emptied and reused as fertilizer.

Improvements and perspectives

No necessary improvement has been identified in near future.

e) Annexe 5 : rapport d'inventaire, digesteur de G. KABERA

31/05/2018	BURUNGA Cell, NYABIKENSE Village, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	KABERA Grégoire, +250 784 068 760
Type of digester	Fixed-dome digester
Volume	4 m ³
Built by	Rwandan government (FONERWA), 2017
Digester in service?	Yes
Type(s) of feed	Cow dung (planned for human waste)
HRT	40 days
Biogas pressure	8 kPa
Temperature	22°C
pH	7

Description of the situation

Built on the same model as previous domestic digesters by Rwandan government in 2017, this fixed-dome digester is fed with cow dung but planned for human waste as well (fig. 1). Production of biogas is considered as sufficient by the owner and allows to cook soft food.



Figure 1 : entrance pipe for the human waste.



Figure 2: digester chamber, with gas tap on the top. On the back left, evacuation chamber.

Uses and maintenance of the digester

The feed is added each day, 20kg cow dung + 80kg water.
Slurry is reused as fertilizer.

Improvements and perspectives

No necessary improvement has been identified, except the possibility to connect the digester chamber to human feed.

f) Annexe 6 : rapport d'inventaire, digesteur de T. UZABAKIRIHO

31/05/2018	BURUNGA Cell, NYABIKENSE Village, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	UZABAKIRIHO Théoreste, +250 727 701 974
Type of digester	Fixed-dome digester
Volume	4 m ³
Built by	Rwandan government (FONERWA)
Digester in service?	Yes
Type(s) of feed	Cow dung + human waste
HRT	n.d.
Biogas pressure	n.d.
Temperature	22°C
pH	7.11

Description of the situation

Built in 2017 by Rwandan government on the same model as previous digester reports, this fixed-dome digester is fed by both cow dung and human waste. Cow dung (~0.2 m³) is added (fig. 1) with water (same volume) every time the biogas production decrease, through feed chamber. Human wastes are directly connected to the digestion chamber and added with water (fig. 1 & 2). Biogas production is high, according to the owner.



Figure 1: feed chamber (for cow dung) (right) and entrance for human waste to the digestion chamber (left).



Figure 2: entrance for human waste.

Uses and maintenance of the digester

No other maintenance is performed on the digester.

Improvements and perspectives

Reparation of the slab and a new evacuation path can be performed (fig. 3 and 4).



Figure 3 : slab that can be repaired near the feed chamber.



Figure 4 : evacuation chamber (back left) and evacuation path that can be repaired.

g) Annexe 7 : rapport d'inventaire, digesteur de L. NTIVUGURUZA

31/05/2018	BURUNGA Cell, NYABIKENSE Village, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	NTIVUGURUZA Léonard, +250 722 458 930
Type of digester	Fixed-dome digester
Volume	4 m ³
Built by	Rwandan government (FONERWA)
Digester in service?	Yes
Type(s) of feed	Cow dung (planned for human waste)
HRT	n.d.
Biogas pressure	8kPa
Temperature	22°C
pH	7

Description of the situation

Built in 2017 by Rwandan government on the same model as previous digester reports, this digester uses cow dung and water as feed, and is planned for the utilisation of human waste (fig. 1). According to the owner, the biogas production is sufficient for light cooking, with a maximum gas pressure of 8 kPa.

A considerable distance has been identified between the digester and the house and may reduce the final maximal pressure.



Figure 1: planned entrance for human waste.



Figure 2: feed chamber, where cow dung is stirred.

Uses and maintenance of the digester

The digester is fed each day with the same amount of cow dung and water, though the exact quantities aren't known. The slurry is used as fertilizer after its release from evacuation room (fig. 3).



Figure 3: closed evacuation chamber.

Improvements and perspectives

No necessary improvement has been identified during the visit. An integrity control can be performed on evacuation chamber.

h) Annexe 8 : rapport d'inventaire, digesteur de E. NYANDWI

04/06/2018	RUHANDE Village, KAYENZI Cell, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	NYANDWI Eric, +250 783 454 506
Type of digester	Fixed-dome digester
Volume	4 m ³
Built by	Rwandan government (FONERWA), 2017
Digester in service?	Yes
Type(s) of feed	Cow dung 20kg, water 20L, every 2 days, planned for human waste
HRT	40 days
Biogas pressure	Max 15 kPa when feed is added
Temperature	22.5°C
pH	6.93

Description of the situation

The fixed-dome digester was built on the same model as the previous reports, in 2017 by Rwandan government. It is fed with cow dung and water (20 kg each), every 2 days. The produced biogas allows to boil water, milk and cook light food (potatoes, etc.). The digester is planned to accept human waste (fig. 1), though it is not in used.



Figure 1: planned entrance for human waste.



Figure 2: biogas exit from digestion chamber.

Uses and maintenance of the digester

According to the owner, the biogas pressure can reach 15 kPa on the manometer whenever feed is added into the feed chamber.

Otherwise, the owner signals no problem on maintenance.

Improvements and perspectives

A control can be performed on pipes and manometer, to control the maximal pressure supported. An integrity control can be performed on biogas exit (fig. 2).

i) Annexe 9 : rapport d'inventaire, digesteur de I. BITWAYIKI

04/06/2015	BUHORO Village, KAYENZI Cell, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	BITWAYIKI Innocent, +250 782 236 634
Type of digester	Plastic bag digester
Volume	2m x 4.5m x 0.5m
Built by	Rwandan government (FONERWA + District), 2017
Digester in service?	Yes
Type(s) of feed	Cow dung + water, 1x/week
HRT	n.d.
Biogas pressure	n.d.
Temperature	Entrance: 26°C (in the sun)
pH	Entrance: pH 9, exit: pH 8

Description of the situation

This plastic bag digester (fig. 1 & 2) has been built in 2017 by Rwandan government and is not finished: mixing chamber has not yet been placed at the head of the installation (fig. 3). The digester is fed with cow dung and water, 1x/week, after biogas has been used by the owner. According to him, he can cook light food and boil water. External dimensions are about 2 x 4.5 x 0.5 m.



Figure 1: external view of plastic bag digester.



Figure 2: internal view of plastic bag digester.



Figure 3: feed entrance, where mixing chamber should be added.

Uses and maintenance of the digester

No maintenance has been signalled on the digester. pH and temperature are abnormally high.

Improvements and perspectives

Mixing chamber should be added to the entrance of digester. Analysis can be performed on the slurry, trying to understand why the pH is high.

j) *Annexe 10 : rapport d'inventaire, digesteur de F. FASHAHO*

04/06/2018	RUHANDE Village, KAYENZI Cell, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	FASHAHO Félicien, +250 724 523 806
Type of digester	Fixed-dome digester
Volume	4m ³
Built by	Rwandan Government (FONERWA), 2017
Digester in service?	Yes
Type(s) of feed	Cow dung 20kg, water 20 L, 1x/day, sometimes cow urine
HRT	50 days
Biogas pressure	n.d.
Temperature	21°C
pH	7.54

Description of the situation

This fixed-dome digester has been built in 2017 by Rwandan government, on the same model as previous reports. Few months ago, the owner signals that he has used both cow dung and human waste (20kg), added with water (20L), 2x/day.

Due to his WC destruction, the owner hasn't the possibility anymore to add human waste and feed the digester only one time per day with cow dung (20kg). The owner signals to use sometimes cow urine in complement of water.

The biogas production has decrease after this fact, according to the owner, considering that the amount of feed as decreased as well.



Figure 1: feed chamber, including scale (50cm).



Figure 2: evacuation chamber, including scale (70cm).

k) Annexe 11 : rapport d'inventaire, digesteur de S. NTAGAHINDA

04/06/2018	RUHANDE Village, KAYENZI Cell, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	NTAGAHINDA Simon, +250 787 310 104
Type of digester	Fixed dome digester
Volume	4m ³
Built by	Rwandan government (FONERWA), 2017
Digester in service?	No
Type(s) of feed	Cow dung 60kg, water 60L, every 3 days
HRT	33 days
Biogas pressure	n.d. (too low)
Temperature	20°C
pH	6.54

Description of the situation

This fixed-dome digester has been built in 2017 by Rwandan government and is based on the same model as previous reports. According to the owner, only a small amount of biogas is able to reach the burner, not allowing any kind of cooking with it.

Despite this fact, the owner continues to feed the digester with 60kg cow dung and 60L water every 3 days.

Uses and maintenance of the digester

According to the owner, the biogas production was the same whenever he fed the digester with 20kg cow dung per day.

A smell of sulfur was discernible when the biogas tap (fig. 1) has been opened during the visit. The owner signals that the evacuation chamber (fig. 2) rejected slurry only 3 times since it has been built.



Figure 1: biogas tap, allowing the evacuation of condensated water in pipes.



Figure 2: slurry exit from evacuation chamber.

Improvements and perspectives

An integrity control must be performed on the digester, including pipes and manometer.

I) Annexe 12 : rapport d'inventaire, digesteur de la prison de Rubavu

12/06/2018	Rwanda correctional facility, village KITARIMWA, cell GIKOMBE, sector NYAKIRIBA, district RUBAVU
Contact on site	In charge of biogas maintenance, NDAHAYO Eliel, +250 784 631 295
Type of digester	Fixed dome digester
Volume	4x100m ³
Built by	Plan: IPRC-TUMBA, Finance: Rwandan Correctional Service + ICRC
Digester in service?	Yes
Type(s) of feed	Human waste (0.5kg/inmate/day) + cow dung (400kg/day) + soil water
HRT	80 days
Biogas pressure	12 kPa
Temperature	22°C
pH	7.26

Description of the situation

The fixed dome digester in the RUBAVU prison is based on the same model as the KIBUYE referential hospital (fig. 1). It is composed with 4x100 m³ digester, producing 70% of energy used in the prison, according to the person in charge of maintenance.

The 1st 100 m³ model was built in 2012 by RCS and ICRC, based on the plan from IPRC-TUMBA but it has been destroyed and repaired. According to the biogas expert from IPRC-TUMBA, this destruction is due to heavy rains which discovered the digester, causing its collapse in the absence of the soil support.

In 2016, 3 others 100 m³ digesters were built and connected altogether.

According to the person in charge, there is no relevant problem needed to be mentioned, except difficulties to take measurements without specific instruments.

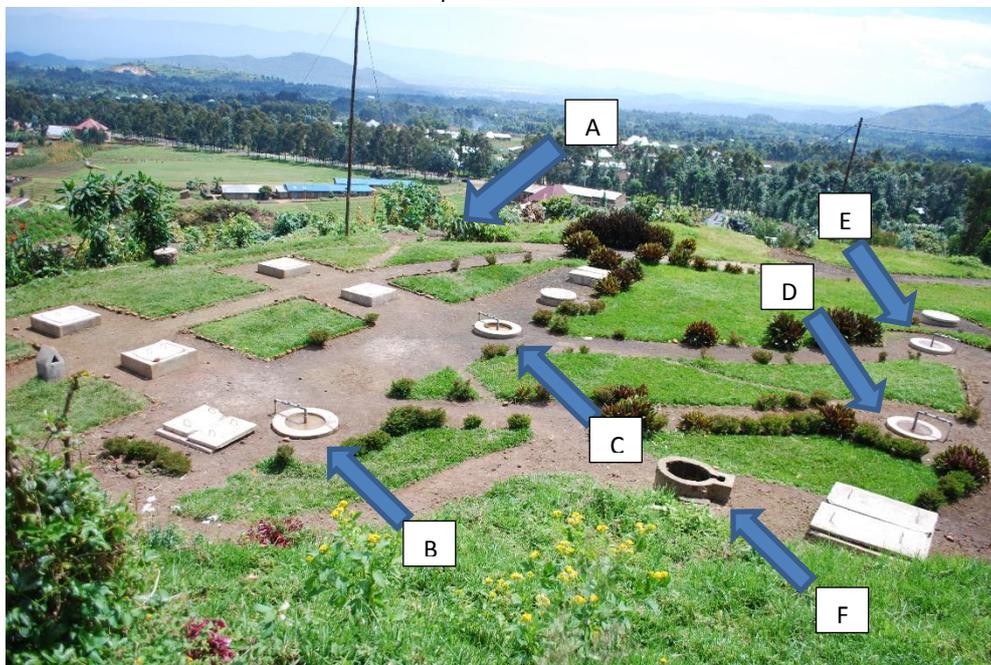


Figure 1 : 4x100m³ digesters installation in RUBAVU prison.

Caption: (A) to the retention pond. (B) to digesters 1 to 4. (F) feed inlet (cow dung + water).

Uses and maintenance of the digester

The feed is composed with 400 kg cow dung per day, and 0.5 kg human waste per inmate. Total inmates in the prison reaches about 6500 inmates, making a total of about 3400 kg human waste + 400 kg cow dung per day.

1L soil water is added per kg of total feed, with the cow dung. *The soil water (from WC) is separated from waste water (which contains soap, etc.) and contains human urine (fig. 2).*

The cow dung is manually mixed in the digester before it is added. No mixing is made on human waste (direct connection through pipes).

In the evacuation chamber, the slurry is also mixed, and impurities are removed from it. The slurry goes then into a retention pond from diameter 7 m and depth 1.5 m (fig. 3).

The produced biogas is used for light cooking, like vegetables or beans (in 400 L marmite, fig. 4 & 5), considering that the kitchen works 7/7, 24/24 for 3 years. Since it has been built, according to the person in charge, the consumption of wood has been reduced from 16 to 5 m³. According to the person in charge, the pressure can reach 12 kPa on the manometer (fig. 6).



Figure 2: evacuation of waste water (containing soap, etc.) from the prison.



Figure 3: retention pond, containing slurry evacuated from 4x100m³ digester (diameter 7m, depth 1.5m).



Figure 4: gas inlet for the 400 L cooker.



Figure 5: empty 400 L cooker with biogas burner.



Figure 6: manometer used for the 4x100m³ digesters. According to the person in charge, pressure can reach about 12 kPa.

Improvements and perspectives

No improvement or further analyses has been planned, yet. Further investigations may be performed on the slurry, if necessary.

The availability of specific measurements instruments would be useful for the person in charge of maintenance, to do his tasks.

m) Annexe 13 : rapport d'inventaire, digesteur de l'IPRC-Tumba

13/06/2018	IPRC-TUMBA, village RWANZU, cell KAYENZI, sector BUSHOKI, district RULINDO
Contact on site	Biogas expert, RAVI BAHNU Chhetri, +250 78 961 98 22
Type of digester	Fixed dome digester (Nepalese model, capsule)
Volume	42 m ³
Built by	IPRC-TUMBA
Digester in service?	Yes (for teaching purposes + cooking)
Type(s) of feed	Human wastes + cow dung
HRT	80 days
Biogas pressure	Min. 10, up to 100 cm water column
Temperature	35°C (in digestion chamber, inline sensors)
pH	6.5-7.0

Description of the situation

IPRC-TUMBA has built this digester, designed for teaching purposes and cooking. This school has also drawn the plans from the digester currently used in the RCS (Rwandan correctional services). The digester consists on a capsule digester, fed with human wastes and cow dung. The WC has been specifically built, allowing to optimize the use of human wastes, without soap or other chemical substances in the water.

Inline sensors are connected in the digestion chamber and the evacuation chamber (fig. 1), allowing the students to follow the digestion's evolution and optimize it.



Figure 1 : sensor connected on the evacuation chamber, allowing to measure biogas outlet.

Uses and maintenance of the digester

The produced biogas contains about 50 to 70% methane. According to the person in charge, this fluctuation is based on the season and the meals' composition. Feed is about 210 kg/day, with a loading rate of $210\text{kg/day} \cdot 42\text{m}^3 = 5\text{kg/m}^3$ roughly.

The HRT – according to the person in charge – is about 80 days spent in the digestion chamber. This duration seems to be necessary, to get rid of pathogen bacteria in the slurry.

The slurry is used as fertilizer, kept into a retention pond (fig. 2).



Figure 2 : retention pond where slurry is kept, before its utilization as fertilizer. Scale : 1 meter.

Improvements and perspectives

No need of improvements has been identified, as this digester is perfectly handled by IPRC-TUMBA's biogas specialists.

The IPRC-TUMBA seems to have many knowledges about biogas technology. According to the objectives of IPRC-KARONGI, it may be a good idea to build a collaboration between these schools, to develop and reinforce the common knowledge and experiences.

n) Annexe 14 : rapport d'inventaire, digesteur de la prison de Mageragere

14/06/2018	Rwanda correctional facility, MAGERAGERE sector, NYARUGENGE district, KIGALI province
Contact on site	Not defined
Type of digester	Fixed dome digester
Volume	4x100m ³ , 3x100m ³ and 2x100m ³ (total = 900m ³)
Built by	Plan: IPRC-TUMBA, Finance: Rwandan Correctional Service + CICR
Digester in service?	Yes
Type(s) of feed	Cow dung (60 kg/day) + human waste (1 kg/inmate/day) + cooking water
HRT	40 days
Biogas pressure	Max 15-16 kPa
Temperature	Not available
pH	Not available

Description of the situation

The MAGERAGERE prison digesters were built in 3 different phases in 2015, based on the plan by IPRC-TUMBA and financed by ICRC and RCS:

- During the first phase, 4x100 m³ digesters were built and connected (fig. 1), with two inlets for the whole installation: one for the cow dung (60 kg/d) and water (40 L/d), one for the human waste (estimated at 1 kg/inmate/d, not controlled) and waste water (urine + water from WC, not controlled).
- During the second phase, 2x100 m³ digesters were built and connected above the phase 1 digesters (fig. 2), reserved for women waste and based on the same plan. The feed is identical as the phase 1 digesters.
- During the third phase, 3x100 m³ digesters were built and connected below the phase 1 digesters (fig. 3), considering the increased number of inmates in the prison. The feed is based on the same organisation as for the phase 1 digesters.

The feed rate of human waste between phase 1 and phase 3 digesters is alternated every other day, working in parallel.

Every digester has a diameter of 6.20 m and a depth of 6 m. According to the person in charge of maintenance, an overpressure system has been added next to each installation, consisting of a holding tank where the slurry is pushed back when the pressure of the biogas becomes too great. When the pressure decreases, the slurry returns to the digester naturally.

Figure 2 : 2x100m³ digesters, built during phase 2 of construction and reserved for women waste.



Figure 1 : 4x100m³ digesters, built during phase 1 of construction.





Figure 3 : 3x100m³ digesters, built during phase 3 of construction, due to the increasing number of inmates in the prison.

Uses and maintenance of the digester

With a total of 7314 inmates in the MAGERAGERE prison, the total feed per day reaches about 7000 kg human waste, 60 kg cow dung, 40 L water + waste water (volume not controlled during the process), allowing to conclude that the digesters work almost exclusively based on human excretes.

According to the person in charge of the digesters, outlet biogas pressure reaches a maximum of 15-16 kPa on the manometer (fig. 4). This final pressure may vary in function of human alimentation and seasons.

The produced biogas is used for cooking (fig. 5). In the kitchen, 3 cookers (400 L each) are reserved for the phase 2 digesters (women waste), when 5 others are used with phase 1 and phase 3 digesters. The slurry is used as fertilizer.



Figure 5: 400 L marmite, used for cooking with biomass (wood or biogas) in the prison.



Figure 4 : manometer, used to measure biogas pressure. According to the person in charge, the outlet pressure can reach 15 to 16 kPa

Improvements and perspectives

As the contract is already finished for this prison and no problem has been signalled to IPRC-TUMBA, no improvement or further analyses has been planned, yet.

A monitoring system can be added to the installation, to control temperature, pH, biogas composition in order to optimize the system, but this one seems to work well, according to the collaborators in charge.

o) Annexe 15 : rapport d'inventaire, digesteur de l'église catholique de Kibuye

31/05/2018	Catholic church of Kibuye, cell KINIHA, sector BWISHYURA, district KARONGI
Contact on site	? (to be confirmed)
Type of digester	Fixed-dome digester
Volume	4 m ³
Built by	Rwandan government (FONERWA)
Digester in service?	No
Type(s) of feed	Cow dung
HRT	n.d.
Biogas pressure	n.d.
Temperature	n.d.
pH	n.d.

Description of the situation

This digester, visited after the inventory, has been built on the same model as the domestic fixed dome digester by the program FONERWA, though the year of construction is unknown.

There is currently no one in charge of the biogas plant at the catholic church, therefore, no official contact has been made between IPRC and the site.

A new priest, in charge of the church, should arrive this week (2-6th July).

After the building of the digester, about a year ago, the cow that was the only source of substrate died unexpectedly. For this reason, and since the owner did not know any alternative source of substrate, the digester fell out-of-service

The kitchen has two stoves connected to the biogas pipes (fig. 1), offering more possibilities to cook than many other sites. However, no information on the achieved biogas production levels could be provided by the people on site.



Figure 1: biogas pipes, where two stoves are still connected but not currently in use. A manometer is visible up right.

Uses and maintenance of the digester

As previously said, substrate fed to the digester while it was in service is cow dung.

As it is currently out-of-service, no information on temperature, HRT, pressure and pH is available.

According to the people present on site, very little information is left about the maintenance and usage of the digester when it was in service.

A rehabilitation seems to be possible though, since the installation seems to be in good condition. No leak or severe damage could be spotted, and a minimum amount of work - mostly removing the rust - would be necessary to fix the stirring device (see Fig. 2)



Figure 2: stirring equipment where rust should be removed before rehabilitation.

Improvements and perspectives

According to the people on site, they possess 25 pigs, and these would certainly be able to provide a sufficient amount of feedstock. The people there seem to be interested in a rehabilitation process, although no action seems possible before a new priest arrives on the site.

In this case, the rehabilitation of this digester and the monitoring of biogas production could be considered as a perfect practical case study to train people.

Explanations and lectures should be given accordingly, to provide the owner some basic knowledge on anaerobic digestion and the IPRC maintenance team a deeper understanding of the methanisation process.

This would also constitute a perfect case study for the IPRC students, who would find here a unique opportunity to follow the whole process from the beginning.

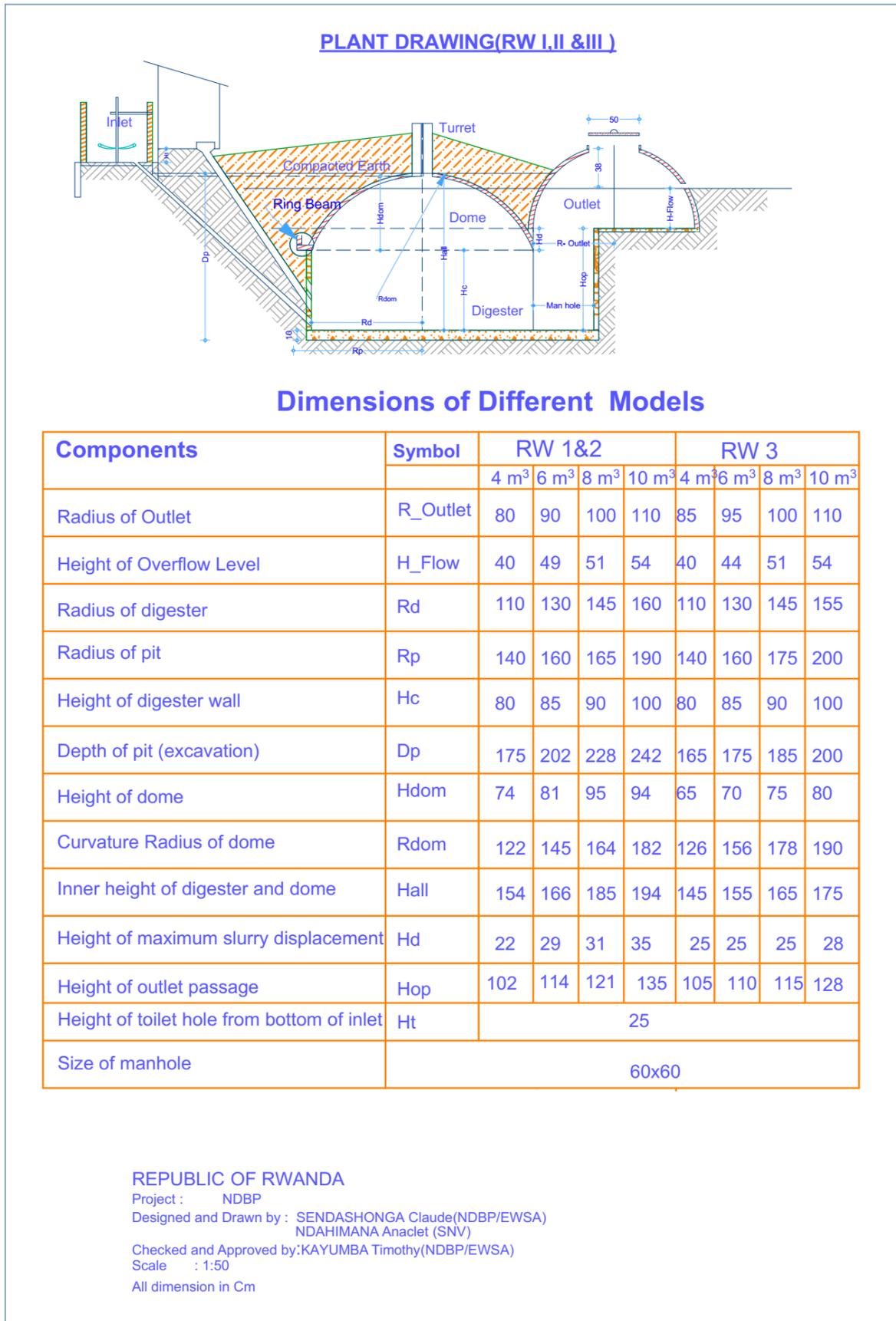
Before any rehabilitation work, the digester must be fully emptied and washed with a least 2x the total volume of water, as it is still filled with a slurry (fig. 3). This digestate is probably completely inert by now and should not be kept.

A full check of the installation, including airtightness and waterproofness should be obviously performed before the rehabilitation.

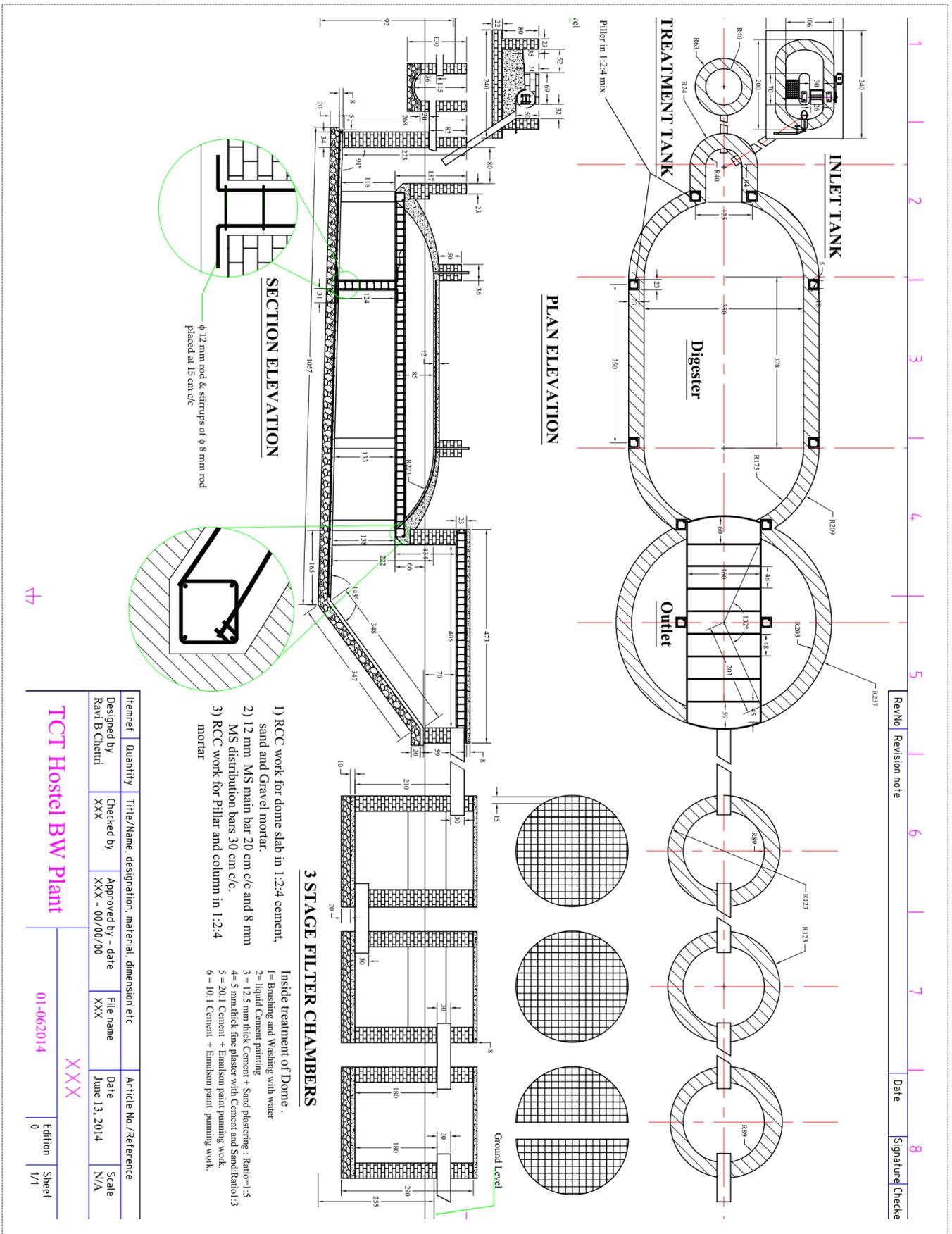


Figure 3: slurry in evacuation chamber (and probably digestion chamber) that should be removed before rehabilitation.

p) Annexe 16 : plan de construction d'un digesteur, programme NDBP



q) Annexe 17 : plan de construction d'un digesteur, IPRC-Tumba



Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.
 Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.



r) Annexe 18 : manuel d'utilisateur d'un digesteur à dôme fixe

Fixed dome digester – user's manual

Generalities

A digester contains bacteria using organic products (cow dung, human excreta, agricultural and food waste, ...) to produce biogas. Biogas is mainly composed (50-75%) of methane, a combustible gas. The other main component is carbon dioxide, which is inert with respect to combustion.

Figure 1 presents the general configuration of a fixed dome digester.

Chamber 1 (feed chamber) is the chamber used to integrate the feed into the digester after being homogenized. The Chamber 2 (digestion chamber), where the bacteria degrade the organic substances. The Chamber 3 is the evacuation chamber, where the slurry (digestate) is pushed out whenever biogas accumulates in compartment 2.

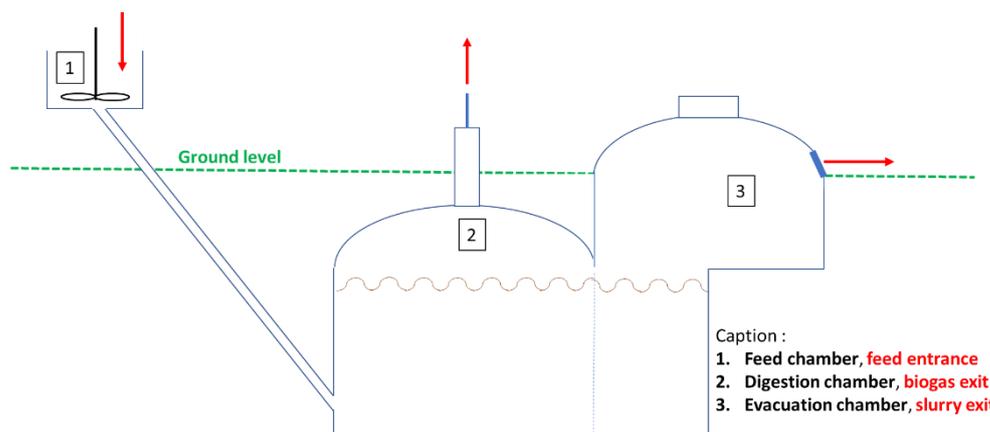


Figure 1: Showing the configuration of fixed dome digester.

What kind of feed can be used for the digestion?

😊 To recommend 😊

The recommended feed is cow/pig/chicken dung or human waste. A mixture can also be used.

It is also possible to add plants, such as the one presented in figure 2 (*Euphorbia tirucalli*). However, it must be finely chopped or crushed, and the quantity must not exceed 10% of total amount of water (2 kg for 20 L).

Food waste can also be used as feed, in the same way as plants.

😞 To avoid 😞

Avoid branches, leaves, rice or corn husks and mineral substances (sand, soil) in the feed. These elements won't be degraded and can clog de digester.

Do not use excreted from human or animal who consumed antibiotic or medicaments. These substances can kill the bacteria in the digester.

Do not replace water by (animal or human) urine, it may reduce biogas production and even kill bacteria in the digester. However, a small amount of urine (up to 30% of total volume of water¹) in the feed should not be a problem.



Figure 2 : *Euphorbia tirucalli*, which can be used for biodigestion.

¹ From HAQUE, N Naimul. Studies on the Effect of Urine on Biogas Production. Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research, [S.l.], v. 41, n. 1, p. 23-32, Aug. 2007.

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

When and how to feed the digester?

“The digester should be fed at least every day. Easiest is to mix inside the inlet structure [chamber (1)]. Close the inlet pipe, e.g. with a plastic bottle and plastic bag. Make sure that neither bottle nor bag goes into the inlet, as they might cause blockages. In case the needed amount is more than fits into the bucket, feed in two or three equal parts.

Measure the correct amount of dung, co-substrate (if applicable), and water. Co-substrate should be as finely ground as possible: when using e.g. kitchen wastes, it should be cut in small pieces before adding it to the mix. Water should be at the ambient temperature, to prevent temperature shocks when adding the mix to the digester. It may be best to fill a container of water each day, for use in the next day’s mixture. The ingredients should be put in the inlet bucket, allow to soak for 15-30 minutes, and then mixed thoroughly by hand. Any dry lumps (e.g. from the animal dung) should be broken and soaked thoroughly. When the mixture is a uniform slurry, pull the plug from the inlet to let the mixture flow into the digester.”²

What amount of feed per day?

The amount of feed is decided according to (in order of priority):

1. The dimension of the digester
2. The number of feedstocks available
3. The needs for biogas (either for cooking or lighting)

Any digester can only produce a limited amount of biogas, but this parameter has been already considered at the building of the installation, then nothing can be done about it.

The availability of feedstocks is an important parameter, since each substrate has a different biogas potential. The following list³ gives estimated biogas yields as well as the minimal amounts of substrate that are required to fulfil the needs of one person every day for the cooking of meals (ca. 250 L biogas/day):

Type of substrate	Liter per kg [L/kg]	Minimal amount per pers [kg/day]
Cow dung	30	9
Pig dung	50	5
Chicken dung	90	3
Human waste	20	13

Considering that a cow produces about 10 kg fresh dung per day, this feed should be mixed with co-substrates, like food waste (if available), plants (*Euphorbia tirucalli*, elephant grass), plants residues (rice, maize or wheat straws) or other type of dungs.

It is important to consider that chicken dung and human waste should not be used as main substrate or in too important quantity. Each kg of these substrates must be combined with at least 0.3 kg straw or 0.6 kg finely chopped *Euphorbia tirucalli*.

The water is usually added in the same amount as the total amount of (co-)substrates (ratio 1:1).

This water must have no trace of soap, chemical substances or drugs, but non-potable water can be used without restriction.

Therefore, for a household with 4 people, it is recommended to use 36 kg cow dung + 36 L water.

As previously said, mixtures can be used, adding food wastes, plants or other types of dung. In any case, these possibilities should be discussed with IPRC biogas team before use.

² From FACT Foundation, *Manual for the construction and operation of small and medium size biogas systems*, ADPP – Clube de Agricultores, Cabo Delgado, Bilibiza (2012), p. 30.

³ From Nakarmi A. *et al.*, *Biogas as Renewable Source of Energy in Nepal. Theory and Development*, Alternative Energy Promotion Center (AEPC), Khumaltar, Lalitpur (2015), p. 270.

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.



How to use the slurry?

The slurry (effluent) is the digested feed, rejected after the methanisation. It can be used as a fertiliser in garden or fields.

If human waste is used as feed, this slurry should NOT be used on fruits/vegetables that will be eaten raw, unless slurry was let in a pit during approx. 1 year or mixed and dried during 5-6 days with aerobic compost.

However, before using the slurry as fertilizer, it is advised to ask IPRC biogas team how to manage it properly.

How to use the biogas?

The biogas is continuously produced and goes out of the chamber (2), through pipeline. Whenever its amount increase, the pressure in this chamber will rise, and the slurry will be pushed in the chamber (3). On the manometer (figure 3) in the kitchen, the pipeline pressure should rise as well to about 8 kPa (middle of the manometer). A pressure raise can be observed whenever feed is added into the chamber (2) but should not rise higher than 12 kPa. In case a pressure higher than 12 kPa is observed, it might be due to some obstruction in a pipe or in the evacuation chamber. In such a case, a troubleshooting should be performed.



Figure 3: digester's pressure manometer.

Biogas can be used for cooking, on stoves, or for lighting. Usually, we count about 300 L/pers for cooking, and 150 L/hour for lighting.

How to maintain the digester?

Chamber (1) should be cleaned after each feed addition, and no soap should be used.

Chamber (3) exit should remain free at all time to allow the slurry to go out. On the top of chamber (3), the opening allows to observe the slurry: it should be homogenous and semi-liquid. Foam may appear on the surface.

The water condensate should be removed every day to prevent accumulation, by opening the tab (figure 4).



Figure 4: condensate tab to remove water from gas pipes.

An overall check should be made ideally once per day, after each feeding. The following elements should be checked:

- Is there any leakage on the biogas pipes or damages on the digester?
- Is the pressure normal (8kPa) on the manometer?
- Is the burning biogas producing a blue flame and is there no excessive soot deposit?
- Is the slurry level in the evacuation chamber at the height of the exit?
- Is the slurry aspect homogenous and semi-liquid? Is there unusual smell?

What to do if using human waste as feed?

There are two possibilities to use human waste:

- a. It is added manually as another type of feed (as a mixture or alone).
- b. The latrine is directly connected to chamber (2).

In case (a), the total amount of feed must remain the same every day.

In case (b), there is nothing to do, except to watch that the pipes leading the waste to the digester remain clean and free. They should be cleaned, if necessary.

s) *Annexe 19 : dépannage du digesteur de S. NTAGAHINDA*

28/06/2018 - 31/05/2018	RUHANDE Village, KAYENZI Cell, BWISHYURA Sector, KARONGI District
Contact on site	NTAGAHINDA Simon, +250 787 310 104
Type of digester	Fixed dome digester, 4m ³
Description of the situation	
<p>This 4m³ fixed-dome digester has been built in 2017 by Rwandan government in the frame of the program FONERWA. According to the owner, the biogas production has been weak since the beginning and allows only minimal use, without any possibility to cook something efficiently. The aim of the troubleshooting operation is to identify reasons of the weak biogas production, with multiple controls such as:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Integrity of the pipelines 2. Residual biogas potential (BP) <p>If necessary:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Integrity of the digester 4. Composition of biogas and outlet pressure 	
Troubleshooting operations	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Integrity of the pipelines: <p>A control has been performed on the pipelines, injecting water pressure inside the pipes. A pressure from 3 bars has been observed, according to the manometer. This control allows to confirm that there is no leakage on the pipelines. Teflon insulation and fittings were partially changed, to control airtightness. Underground pipelines have been partially dug up to control their condition and nothing relevant has been observed.</p> 2. Residual biogas potential (BP): <p>About 13 L slurry has been taken from the evacuation chamber and placed in a 20-liter jerrycan (fig. 1). About 500 g cow dung was then added as a substrate, and the jerrycan was sealed. An inflatable balloon was placed at the top to control the production of biogas. The jerrycan will be left like this for 3 days at room temperature and the produced biogas volume will be controlled.</p> <p>The following day, 500g cow dung is added, with about 0.5 L water. A small production of biogas is observed (fig. 1). 2 days after, the biogas production is controlled, but no production is observed. The balloon is replaced with a new one, as a leak is observed.</p> 	
	
<p><i>Figure 1: 20-liters jerrycan containing about 13 L slurry. The slurry is fed with about 1 L feed (cow dung, water, 1:1).</i></p>	

Preliminary conclusion and perspectives

After the control, it is possible to say that no leakage of the pipes is responsible for the low biogas production.

It was also possible to observe during the troubleshooting - while the dome outlet valve (fig. 2) was briefly open - that only a small amount of biogas was released, despite a production of several days, according to the owner.

Investigations should be made to determine whether the problem is due to the digestion process itself (altered microflora, detrimental pH value, inadequate substrate) or if the digestion chamber is damaged, allowing the gas to leak into the soil.

This being said, a 1-week delay should be observed, to see if the sample taken from the slurry produces any biogas at all and to measure the volume that is released every day. Investigations can possibly be made on the substrate and/or inoculum, trying to feed the slurry with cow dung from another origin: it is indeed possible that the initial problem comes from the source of nutrients itself.



Fig.2: dome outlet valve. Only a small amount of biogas was exhausted when it was opened.

Questions to the digester's owner and end of digestion control, 05.07.2018

After the digestion test, further investigations have been performed on the digester. On a new visit, more precise information on the digester feed was collected.

The owner feeds the digester twice a week with about 30 kg of cow dung and 30 L of water each time. He chooses to feed on Monday, and another day in the week that depends on the availability of substrate.

Also, according to him, he found that adding about 15 L of additional water tends to increase digestate release into the retention pit.

According to him, he is the only owner to have a problem of biogas production in the region, this information being partially corroborated by the visits made during the inventory on several neighbouring digesters.

Based on these observations, it was decided to dig and carry out a complete control of the integrity of the digester.

This control will be done by means of water and soap on the surface of the dome, in search of a gap producing bubbles.

A new control on the biogas production if performed on the jerrycan. A gas pressure can be observed in the balloon and on the jerrycan itself, as it is deformed by the total pressure. Additional measurements should be made with a manometer to accurately quantify this pressure.

Integrity control on the digestion chamber & intern pressure check, 11.07.2018

An integrity control has been performed on the digestion chamber and the dome outlet valve, using soap and water mixture.

No leakage has been identified, confirming the fact that the digester presents no damage.

Intern pressure (in the digestion chamber) was controlled, using a U manometer (fig. 3) filled with water. Using this tool, a pressure p from about 1.5 kPa ($\Delta h = 15$ cm) has been measured, with help of equation 1, where $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $g = 9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$:

$$p - p_{atm} = \rho g \Delta h = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.15 = 1.47 \text{ kPa}$$

As it was observed on other digesters (see inventory reports 2.1 to 2.15), a common outlet pressure from 8 kPa is expected on the kitchen manometer. A slightly higher pressure can thus be expected inside the dome.

According to the owner, this pressure results from 3 days feeding without any use of biogas in the kitchen. Therefore, it can be assessed that there seems to have a biogas production problem.



Figure 3: intern pressure check using a U manometer on the dome outlet valve.

Troubleshooting report conclusion and perspectives, 16.07.2018

In conclusion of the report, it could be confirmed by the investigations carried out during this troubleshooting that no leak could be observed on the installation itself.

The low gas pressure observed inside the dome (1.5 kPa) and the relatively low production of biogas during the jerrycan digestion control (without measurement) suggest that the problem can come from two sources:

- The feed of the digester is insufficient, and the amount of substrate (cow dung) provided is not enough to feed the bacteria.
- The nature of the substrate itself has nutrient deficiencies for bacteria.

In view of these investigations, two options have been proposed to the owner:

- complete the supply of substrates with methanogenic co-substrates such as the Euphorbia tirucalli plant (1:10 ratio of cow dung, approximately), food waste, agricultural waste or any other co-substrates capable of increasing production of biogas. It has been reported to the owner that any increase in biogas production will take several weeks and that the troubleshooting team should make regular checks to assess the increase in biogas production in the dome.
- completely empty the digester and start it again from the beginning, on the assumption that the bacterial population in the digestion chamber was the victim of a major problem at the beginning of the current methanation process.

Other possibilities exist, which however require more important works and contacts, such as:

- make a connection of the digester to the latrines of the house, given that direct access was planned at the origin of the installation of the facility on the site.
- obtain a larger quantity of cow dung, from another owner having this possibility, in order to support the bacterial population.

t) Annexe 20 : protocole de dépannage des digesteurs

Optimal parameters

Under normal operating conditions, the parameters of a digester (fig. 1), the parameters that should have the following values:

- pH should be in the range of 6.3 to 7.5 [-].
- temperature of the slurry should lie between 22 and 25°C (inside the digestion chamber about 35°C).
- outlet biogas pressure should be around 8 kPa but it might rise after feeding (up to 12 kPa).

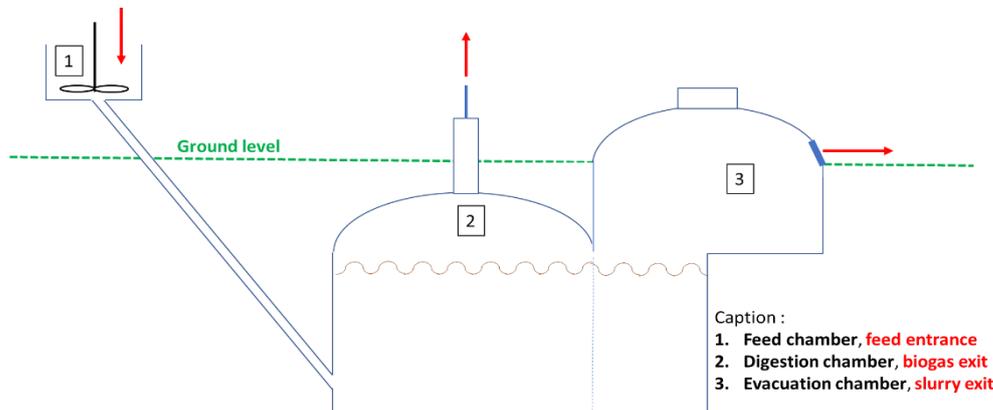


Figure 1: Showing the configuration of a fixed dome digester.

No biogas production, or no outlet pressure

No biogas production because of the anaerobic digestion:

- The following digestion parameters should be checked:
 - If the pH of the slurry is below 6.0, the digester has turned sour, meaning that the bacteria are probably dead. The digester should be washed with twice the total volume of the installation with water, emptied and started again. Special attention should be paid to the reasons for this phenomenon, to avoid a repetition in the future.
 - If the pH of the slurry is above 7.5, the digester has become alkaline, and the bacteria are probably dead. The digester should be washed with twice the volume of the total installation volume with water, emptied and started again. Special attention should be paid to the reasons for this phenomenon, to avoid a repetition in the future. One of the reasons for this phenomenon may be the presence of a high concentration of nitrogen in the slurry, which can be caused using urine or food wastes. If this is the case, it will be appropriate to reduce these amounts in order to avoid new occurrences in the future.
 - If the temperature of the slurry is below 20°C, the hydraulic retention time (HRT) is probably too long (>100 days) and the biogas production rate will be very low. Reasons for this low temperature should be found:
 - Is there a source of cold temperature nearby? (i.e. water source)
 - Is the dome well buried?
 - Is the feeding at room temperature (about 25°C) when added?
 In this situation, a slow increase of the temperature (through the feeding, for instance) up to 25°C may allow the digester to restart itself. Daily check should be performed on the slurry and temperature evolution should be monitored.
 - If the temperature of the slurry is above 25°C, it might be too hot for the mesophilic bacteria inside the digestion chamber. Reasons for the high temperature should be found:
 - Is the dome well buried?

- Is the digester heated by the sun more than necessary?
 - Is there a source of heat nearby?
 - Is the feeding at room temperature (about 25°C) when added?
- A digestion control can be performed on the slurry:
- About 15 L of slurry is taken from the evacuation chamber and placed in a jerrycan (fig. 2). It is necessary that the volume of digestate corresponds to about 2/3 of the total volume of the jerrycan (20 L => ~ 13 L), to leave room for the accumulation of biogas. The jerrycan should also be ideally made of pressure-resistant material (plastic should be avoided).
 - For a volume of 13 L of slurry, a mass of approximately 0.5 kg cow dung mixed with 0.5 L water is added to the slurry, corresponding to about 5 days feeding ratio, or 20 L biogas.
 - An inflatable balloon or manometer will be added to the main opening (sealed) to observe the increase in pressure.
 - The digester should be shaken after adding the substrate to allow a homogeneous distribution of the substrate.
 - The digester should be left in a ventilated area and at room temperature (avoid too much exposure to the sun).
 - Biogas production is expected every day, with the methanogenic potential of cow dung being about 40 L/kg and that of human dung about 20 L/kg. A lag phase of up to a few days might be observed before any biogas production occurs.
 - If the total volume of slurry becomes too high, it is possible to empty part of it until it comes back to about 2/3 of the total volume of the jerrycan. Unless it is possible to remove the digestate without loss of gas pressure, this action should not be performed unless necessary.
- The same experiment is performed in parallel with another jerrycan, filled with digestate from a well-working digester, and 0.5 kg of the same fresh cow dung.



Figure 2: digester used for the digestion control. Note that plastic jerrycan should be avoided.

A comparison is realised after 5 days between the two biogas productions, assessing if the production from the malfunctioning digester is normal or not:

- If the malfunctioning digester indicates a higher production of biogas, it means that the digester has the capacity to digest the substrate but that the hydraulic retention time is probably too short => it must therefore be reduced by decreasing the daily intake of substrate + water.
 - If it indicates a lower biogas production, this means that either the digester works well and only a low methanogenic potential remains (in this case, there should not be any necessary troubleshooting), or the bacteria present in the digestate are unable to digest the substrate. In this case, it may be necessary to wash the digester (see above) and start again.
- In the case of a spontaneous cessation of biogas production, and no leakage is observed on the installation, the most likely reason is the presence of a change in feeding habits, or the presence of a substance (drug, antibiotic, chemical, soap) that caused the death of the bacteria. In this case, either it is a question of returning to the previous habits of feeding or washing the digester and restarting digestion is the only conceivable consequence. **It is important to note that medications/antibiotics that have been consumed by humans or animals are still in their excrement!**

No biogas production because of the digester:

- A complete control on the installation should be performed, to find any kind of leakage on the pipelines or the chambers.
 - Airtightness should be controlled on the pipes, using either a dedicated device or using sprayed soap+water to control bubbles formation. The sealings should be checked one by one and possibly changed in case of a doubt (fig. 3).
 - The same controls should be performed on the dome, if nothing was found on the pipes:
 - The dome should be completely dug up and a systematic search for cracks and gaps should be made.
 - Junctions between digestion, feeding and evacuation chamber should be controlled on the same way.
- The purge valve (fig. 4) should be open for several minutes to remove as much moisture as possible from the pipes.
 - A check of the pressure gauge and the absence of obstruction in the gas pipes can be done by closing the gas outlet valve (stove side) and the digester valve and injecting air under controlled pressure (about 8 kPa or 0.08 bar) on the side of the purge valve.
 - The manometer can thus be controlled (the pressure on the manometer in the kitchen should be the same as what is injected with the device) while checking the absence of obstruction. If the pressure indicated on the manometer is wrong, a control could be performed with another manometer on the gas outlet (stove side). In that case, the manometer should be changed with a new one.

If a difference is still present with another manometer, the pressure loss may be due to the length of pipe between the digester and the kitchen. If this loss is too great, a study should be made to reduce this distance or by changing the diameter of the pipeline to reduce the pressure loss.



Figure 3: gas tap should be carefully controlled, due to the several joints on it.



Figure 4: purge valve that should be open every day at least few seconds.

Biogas is produced but it does not burn

Biogas is mainly composed of carbon dioxide (CO_2) and methane (CH_4), though only methane is a combustible gas. If the released biogas does not burn, it could mean that its methane content is too low.

- A control can be performed on the biogas composition, using a dedicated device (gas emission controller for motor vehicles for instance), controlling the CO_2 percentage. In this case, we can consider that all that is not carbon dioxide is methane. If the percentage of CO_2 is above 50%, there is not enough methane: a normal percentage of CO_2 in biogas is around 25 and 40%.
- If the digester was started recently, it may take some time for methane content in the biogas to be sufficiently high (few weeks). This gas should be completely evacuated, and the owner should carry on feeding the digester. Controls can be performed regularly (1x/week) until the biogas is able to burn and emptied as long as it is not.
- If the gas still does not burn after a longer term, it may mean that the amount of carbon is not sufficient.
- If the gas does not burn spontaneously, it may mean that the amount of methane has changed recently. It is therefore very important to identify the reason for this change (probably related to the digester feeding) and remedy if possible by returning to the previous method.

Biogas production is not enough for daily needs

Insufficient biogas production is a common problem of digester operation. **It must be checked first that there are no leaks on the pipes of the installation.**

If this is not the case (if yes, see above), it is necessary to analyze the supply to the digester and determine if it is sufficient.

In general, it is expected - for a digester of 4 m³ - a **minimum** feed of cow dung of 20 kg and 20 L of water per day. This quantity is low, which is why it is suggested to bring at least twice as much (40 kg of cow dung and 40 L of water per day).

Another solution is to use co-substrates with a high methanogenic potential. However, these substances should be carefully selected as some may have an impact on bacterial culture and their use is not without consequence.

An example is the *Euphorbia tirucalli* plant (fig. 5), which has been the subject of several studies and can be used for methane production. However, it is advisable to favor a ratio 1:10 between the quantity of this plant and the total quantity of remaining substrate. It should also be finely chopped and the use of the softer parts of the plant (green ends) should be preferred.

In any case, it must be considered that an increase in the production of biogas, in case of adaptation of the feeding quantity, rate or composition, might take place only several days, even several weeks after any change.



Figure 5 : Euphorbia tirucalli, which can be used for biodigestion.

u) Annexe 21 : étude de faisabilité de la construction d'un digesteur sur le site de l'IPRC-Karongi

21/06/2018

Subject Construction of a fixed dome digester

Location IPRC-KARONGI

1. Introduction

This feasibility study is part of the biogas development project in the Karongi district, in collaboration between the IPRC-KARONGI and the HES-SO Valais/Wallis under the supervision of Swisscontact. Its subject is the construction of a fixed dome digester on the IPRC-KARONGI site, for training and experimentation purposes that will enable teachers and students to develop their knowledge and practical skills in biogas technology.

This study will cover the following elements:

- selection of the construction site.
- assessment of the nature and quantity of available feed.
- sizing of the installation.
- estimation of biogas produced.
- establishment of the operating conditions necessary for anaerobic digestion.
- highlight of critical points to be clarified before work begins.

The production of biogas by anaerobic digestion is a natural fermentation process, which occurs in any environment compatible with living conditions and in the absence of oxygen.

This process takes place thanks to a bacterial consortium living in a syntrophic relationship that breaks down complex organic compounds into organic acids, then into compounds that make up biogas: mainly methane and carbon dioxide.

Several substrates can be used to carry out anaerobic digestion, considering that the bacteria present in a digester require optimal physicochemical conditions to achieve the formation of biogas. An imbalance can lead to a reduction of its production, even to a complete stop of the anaerobic digestion and the death of the bacteria.

Mesophilic anaerobic digestion, as described in this report, has an optimum temperature between 20 to 37°C [12]. The pH of the slurry is ideally located around neutrality (pH 7.0) but can vary from pH 6.3 to pH 7.5 [11]. It is also noted in the literature that the optimum carbon to nitrogen (C:N) ratio for anaerobic digestion is between 25 and 30 [27].

Considering that these parameters are mainly dictated by the nature and quantity of the feed(s) provided, a thorough knowledge of these is necessary to carry out a biodigestion process.

The goal of this project is to construct a digester using human excreta as the main substrate. These excrements will come from toilets located near the digester. Auxiliary access will be built on the digester to allow the addition of co-substrates (cow dung, rice husks, corncobs, food wastes, methanogenic plants, etc.).

The digestate (slurry), residue of the anaerobic digestion, will be evacuated from the digester by natural convection. The literature notes that effluents can be used as a fertilizer. It must be considered, however, that mesophilic anaerobic digestion may require subsequent hygienic treatment to eliminate pathogens from the slurry [21], [28].

The biogas produced can be used in kitchens, also located nearby, to boil water for instance. The flow diagram presented in figure 1 presents these steps.

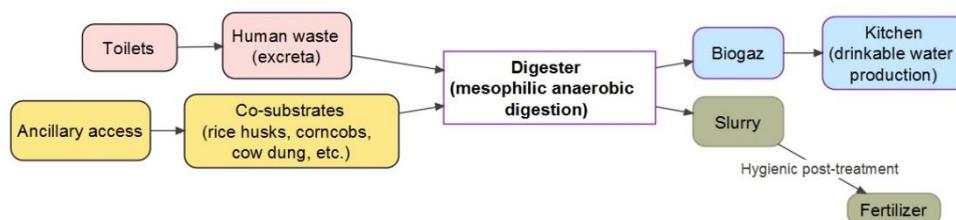


Figure 1 : flow diagram of biodigestion process, according to the project's final objectives.

2. Selection of the construction site

2.1. Before construction

The selected construction site (fig. 2) is located near the boys' toilets on the central part of the IPRC-KARONGI site.

The proximity of the kitchen and the students refectory allows an efficient use of human feces as a feed for biodigestion to provide biogas for cooking.

The digester will be placed on the current site of the septic tank and the slurry evacuation chamber instead of the *puits perdu*. The 10 m³ water tank nearby will not be used because its altitude is lower than the digester.

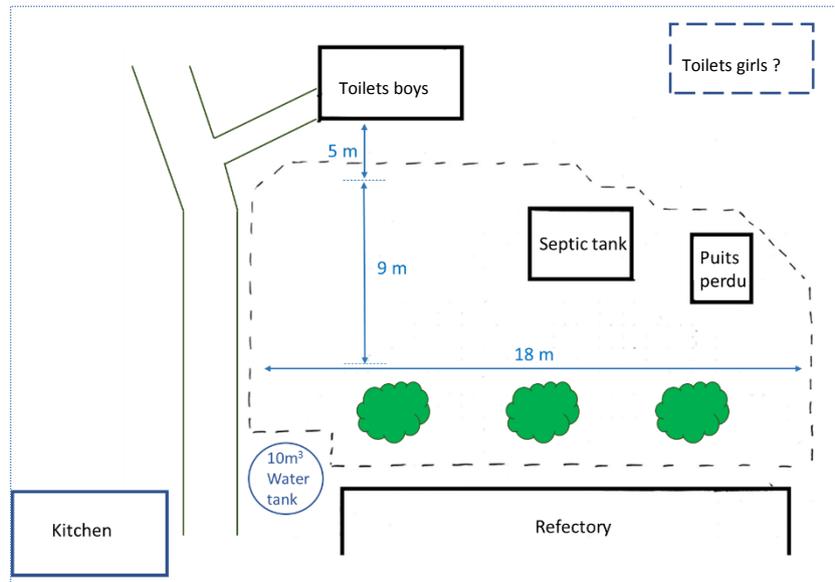


Figure 2: selected construction site for the digester, before construction.

The possibility of adding a ladies room nearby will be studied in the future, to increase the amount of substrate.

2.2. After construction

After construction (fig. 3), the site will have a digester connected to the boys' toilet for feeding.

A second entrance (A) will be built nearby, allowing the use of co-substrates as well as the addition of water.

These two inputs are connected to the digestion chamber (B). The evacuation chamber (C) collects the slurry at the end of fermentation, before it is collected for later use through a pipeline (D).

From the digestion chamber, a pipe (E) will transport the biogas to the kitchen.

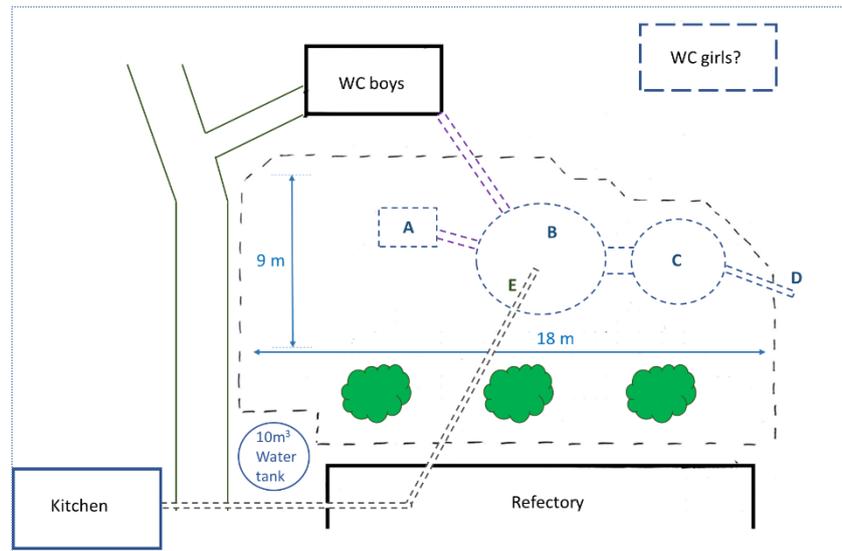


Figure 3: site for the digester, after construction.

Caption: (A) feed chamber for co-substrates, (B) digestion chamber, (C) evacuation chamber, (D) evacuation canal, (E), biogas pipeline.

3. Assessment of nature and quantity of available feed

According to the school administration, there are currently 467 students on the site, including 315 men, who will currently be the only ones to provide substrates for the digester. As mentioned in chapter 2.1, the installation of women's toilets near the digester will be studied in the future and is not part of this study.

It should be noted that the number of students on site will be subject to fluctuations, especially in view of academic vacations, multiple study programs and the growing number of students.

The estimates below are therefore to be considered with caution and should be updated at least annually.

Since the goal of this project is to use human excrement as the main substrate, a first estimate is made by considering it as a single substrate: according to the literature [21]–[23], a human from emerging countries produces a wet weight (WW) of excrement between 0.1 and 0.5 kg_{Feces, WW}·cap⁻¹·day⁻¹. No more precise standard could be found in the literature, which is why an average mass of 0.25 kg_{Feces, WW}·cap⁻¹·day⁻¹ will be used in the following calculations.

The pH of human excreta is between 6.1 and 7.3, according to the literature [22], and it has a carbon to nitrogen (C:N) ratio between 6 and 10 [21], when the urine is separated. This element is to be taken into account, considering the high content of ammonia in the urine [28] and the risks of inhibition of bacterial culture related thereto.

Considering the total number of male students in the school, it gives a total amount of $m_1 = 78.75 \text{ kg}_{\text{Feces, WW}} \cdot \text{day}^{-1}$. As these students are not present during the night on the site, only half of this amount is considered, namely $m_2 = 39.38 \text{ kg}_{\text{Feces, WW}} \cdot \text{day}^{-1}$, with 23% dry weight (DW), 85% volatile solid (VS) in it [21], [24], giving $m_{\text{Feces, VS}} = 7.70 \text{ kg}_{\text{Feces, VS}} \cdot \text{day}^{-1}$.

According to the operating manuals of a digester [6], [7], [12], an equal mass of water is added daily, for a daily total feeding of $39.38 \text{ kg}_{\text{Feces, WW}} \cdot \text{day}^{-1} + 39.38 \text{ kg}_{\text{Water}} \cdot \text{day}^{-1} = 78.76 \text{ kg}_{\text{Feed, WW}} \cdot \text{day}^{-1}$, including $7.70 \text{ kg}_{\text{Feces, VS}} \cdot \text{day}^{-1}$.

4. Sizing of the installation

According to the literature [7], it is also recommended to have a hydraulic retention time (HRT) – corresponding to the digester volume [m³], divided by the inlet flow [m³·day⁻¹] – of 90-100 days when using it as substrate, in order to eliminate pathogens. We also consider density of feedstock(s) as 1 kg·m⁻³.

With a minimal daily intake of $78.76 \text{ kg}_{\text{Feed, WW}} \cdot \text{day}^{-1}$, a feed volume of $7.876 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ is obtained. The total volume of the digester would therefore be $7.876 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1} \cdot 100 \text{ days} = 7.88 \text{ m}^3$.

Rounded to the existing upper dimension of the digester, this requires a minimal digester volume of 8 m³, with a HRT of 100 days.

In this option, human waste would be used as single substrate, with a C:N ratio of 8, which is not optimal for a culture which requires a C:N ratio about 20-30.

Considering a co-digestion – anaerobic digestion using multiple feedstocks – it is possible to maintain a C:N ratio of approximately 25, according to this kind of distribution:

- 4.4 kg_{ww}·day⁻¹ cow dung
- 31.1 kg_{ww}·day⁻¹ human waste
- 8.9 kg_{ww}·day⁻¹ *Euphorbia tirucalli* (a plant with a high biogas potential, easy to find in the region)

As a result, it would be a total co-substrates supply of about 44.4 kg_{ww}·day⁻¹, for an equivalent amount of water, and a feed total of 88.8 kg_{ww}·day⁻¹, including about 7.4 kg_{vs}·day⁻¹.

This distribution can obviously be adapted with other feedstocks (like rice straw or husks, corncobs, food waste) by respecting the C:N ratio. However, the variability in the composition of substrates will lead to fluctuations in the production of biogas.

5. Estimation of biogas produced

According to the literature [6], [21], human excreta has a methanogenic potential of 0.02 to 0.028 $\text{m}^3_{\text{biogas}} \cdot \text{kg}_{\text{DW}}^{-1}$.

Considering an 8 m^3 biodigester with human waste as single substrate, a daily production about 0.18 $\text{m}^3_{\text{biogas}} \cdot \text{day}^{-1}$ can therefore be expected.

In the case of the use of a single substrate, no room for adapting the culture conditions, limiting the performance of the digester to a suboptimal threshold or even partially inhibiting the culture.

Considering an 8 m^3 biodigester using co-substrates, the biogas yield strongly depends on the exact composition of the feed and the amount of each co-substrate. It is therefore difficult to estimate a specific volume without previous studies. It can however be asserted that the use of co-substrates allows a general improvement of the maintenance of the culture, by allowing the conservation of optimal operating conditions (i.e. C:N, pH) for anaerobic digestion.

In assessing the situation presented in Chapter 4, the average biogas potential (BP) of each substance is as follows:

- Cow dung 0.023-0.04 $\text{m}^3_{\text{biogas}} \cdot \text{kg}_{\text{DW}}^{-1}$ [7]
- Human excrement 0.02-0.028 $\text{m}^3_{\text{biogas}} \cdot \text{kg}_{\text{DW}}^{-1}$ [6], [21]
- *Euphorbia tirucalli* 0.055 $\text{m}^3_{\text{biogas}} \cdot \text{kg}_{\text{DW}}^{-1}$ [17]

6. Operating conditions

The operating parameters of the digester consider a retention time between 90 and 100 days, considering that it is a mesophilic anaerobic digestion (20-35°C) and that the main substrate - human excrement - is also the limiting one because it will offer only few possibilities of managing its inlet flow into the digester. The water used to clean the toilets (brown water) is estimated at about 1 L per person per use of the toilet.

Urine should, as much as possible, be separated from feces because of its high nitrogen content, which can inhibit the biodigestion process. This operation should be carried out upstream of the digester, i.e. at the toilets level [29].

The co-substrates and the amount of residual water will be added at a steady rate in order to avoid disrupting bacterial growth, preferably at the same time and at least once a day. Regarding water, the literature [14, p. 90] suggests adding 2 to 3 times the amount of human feces to obtain a correct dilution. Adjustments should be made in case of disturbances observed during operation, whenever feed is diluted only 1:1.

The biogas produced should also be used regularly to avoid excessive accumulation and consecutive ejection of the slurry through openings (inlet & outlet).

7. Critical points

According to the literature [14, p. 40], the slurry of an anaerobic digestion using human excreta carries significant risks of containing pathogenic microorganisms (helminths, protozoa, virus or bacteria).

To reduce the risk associated with these microorganisms, several methods are explored in the literature. These solutions must be evaluated carefully, the risk of bacterial contamination being all the higher as the kitchen and the students are very close.

In any case, the slurry should **NOT** be used as a fertilizer without adequate treatment, otherwise it could spread dangerous and potentially fatal diseases.

A selection of methods is listed here:

- mix aerobic compost with portions of the slurry to allow it to dry more quickly (5-6 days), knowing that the temperature of a compost can rise to more than 60°C [14, p. 40].
- dry the digestate in the sun on a bed of sand for 10-20 days [14, p. 39].
- install a retention pit where the slurry will have a residence time of at least 1 year [14, p. 47, 51].
- install a liquefaction tank under the toilet and before entering the digester, to retain helminth eggs while allowing only a pre-digested and liquefied portion of the substrate to enter the digester [14, p. 56].

Regarding the addition of water to supplement the intake due to the use of WC (brown water), it is necessary to develop a system allowing a regular supply of water at room temperature (cold water in large quantities can cause a thermal shock inhibiting bacterial growth). Construction of a new water tank near the digester may be necessary if there is no alternative water supply.

If the co-digestion solution is envisaged, using several types of feedstocks as substrates, their access should also be carefully evaluated to meet the regular daily demand. Concerning the engineering related to the digester, in order to limit unpleasant odors, it is suggested to add a vent pipe to allow the evacuation of odors and help excrement flow into the pipes [14, p. 93].

It is also advised to install a double valve system (fig. 4) To fill the digester during the day and to prevent the entry of oxygen and the loss of biogas. It also prevents the rise of unpleasant odors [30].

Investments in the analytical monitoring of anaerobic digestion should also be considered. These elements, concerning measurements carried out (if possible) online on:

- the temperature (by a probe inserted in the digester)
- the gas pressure inside the digester (manometer installed at the top of the dome)
- the gas pressure at the outlet of the pipes (manometer installed towards the kitchens)
- the pH (off-line to extend the probe's lifetime)

As mentioned in Chapter 1, as this installation's objective is mainly formative, this monitoring is important as it provides critical information regarding the evolution of bacterial culture.

This monitoring could also be done by computer to observe the evolution of the parameters over time, but the money investment should be considered with care.

In addition, a phase of analysis of the bacterial flora should be carried out on the slurry once the hygienisation step is completed, in order to verify its suitability to be used as a fertilizer without any health risks.

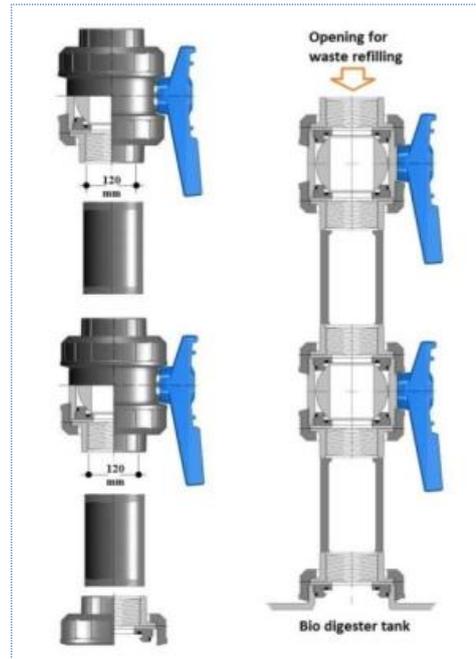


Figure 4: double valve system proposed to prevent entry of oxygen, loss of biogas and rise of unpleasant odour. [14]

8. Conclusion and perspectives of the study

In conclusion of this study, the construction of a digester fed mainly with human excrement, for purposes of teaching and understanding of anaerobic digestion is feasible.

According to the elements noted above, a dimension of 8 m³ seems adapted to these objectives, thus maintaining a moderate volume while allowing an easy implementation of the start-up and maintenance parameters. In view of this study and prior to the start of work, the following points should be considered:

- Construction plans for an 8 m³ digester, including access for human excreta and one for possible co-substrates and water. This access should be installed even in the absence of co-substrates to preserve a certain flexibility with respect to the type of power supply used or in case of maintenance of the toilets.
- Elements mentioned above concerning access to water and any co-substrates used. The potential cost represented by the purchase of each substrate should be evaluated.
- Alternatives concerning the hygienisation of the digestate, especially if it is used as a fertilizer on crops that will be consumed raw, must be studied and - if necessary - set up in parallel with the start of the digester
- When starting the digester, it is advisable to fill it halfway with a mixture of cow dung/human excrement and water in a 1:5 ratio. A period of two weeks should be observed then, before adding fresh substrate regularly.
- Analytical monitoring should also be considered as a means of monitoring bacterial culture and optimizing the process in the long term and should be carried out regularly. Some basic equipment and resources must be made available to conduct it with rigor, and to keep an overview of this process.
- A system to separate urine and solid excrement should be considered to maintain a sufficiently high C:N ratio.

9. 07 August 2018 - Updates and comments on the feasibility study

Following the revision of the study, several elements were identified as likely to be modified or improved according to the needs of the IPRC-Karongi. The points are listed below:

- IPRC-Karongi has expressed the wish to connect the toilets of the male dormitories, in addition to the boys' day toilets, to increase the substrate intake in the digester. Considering this element, the quantity of human waste taken into account is therefore $0.25 \text{ kg}_{\text{feces, WW}} \cdot \text{cap}^{-1} \cdot \text{day}^{-1} \cdot 315 \text{ caps} = 78.8 \text{ kg}_{\text{WW}} \cdot \text{day}^{-1}$, i.e. $15.4 \text{ kg}_{\text{DW}} \cdot \text{day}^{-1}$.
- it was decided to consider a higher ratio of water per kg of human excrement, i.e. 2L per kg of excrement (instead of 1 L per kg), to provide a greater margin of maneuver. Given this ratio and the daily mass of excretes, the digester will be supplied with $236 \text{ kg}_{\text{WW}} \cdot \text{day}^{-1}$ (considering a density of $\rho_{\text{feces}} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$).
- by adopting the two modifications mentioned above and considering a hydraulic retention time of 100 days, the useful volume of the digester is also increased by $236 \text{ L} \cdot \text{day}^{-1} \cdot 100 \text{ days} / 1000 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3} = 23.6 \text{ m}^3$. Considering also the volume required for the accumulation of biogas in the dome, the total volume of the digester should be about 30 m^3 .
- The dimensions of the digester come from [13]. The measurements are adapted from a 10 m^3 digester plan RW3 (made of bricks, concrete and stones, according to [31]) to a 30 m^3 digester, using a factor $\sqrt[3]{3}$, as presented on the table 1.

Table 1 : size adaptation from 10 to 30 m³ of digester drawing, according to [15]. All measures are in meters [m].

Components	Symbol	10 m ³	30 m ³
Radius of outlet	R_outlet	1.10	1.59
Height of overflow level	H_flow	0.54	0.78
Radius of digester	Rd	1.55	2.24
Radius of pit	Rp	2.00	2.88
Height of digester wall	Hc	1.00	1.44
Depth of pit (excavation)	Dp	2.00	2.88
Height of dome	Hdom	0.80	1.15
Curvature radius of dome	Rdom	1.90	2.74
Inner height of digester and dome	Hall	1.75	2.52
Height of maximum slurry displacement	Hd	0.28	0.40
Height of outlet passage	Hop	1.28	1.85
Height of toilet hole from bottom of inlet	Ht	0.25	0.36

It can be considered that almost all dimensions will be adapted, as shown in table 1, although some - like the radius of the pit Rp that will depend mainly on the size of the bricks - will not need it. It should not be necessary to adjust the size of the pipes, as it does not depend directly on the volume of the digester. **It is strongly suggested to verify these estimates by a specialist in masonry and civil engineering, to attest to the feasibility of this construction.**

Considering these modifications, the maximum biogas pressure would reach about 120 cm of water column, i.e. about 120 mbar or 12 kPa. It may be chosen to keep about 80 cm of water column, and in this case, the height of overflow level (H_flow) and height of maximum slurry displacement (Hd) dimensions should be kept similar to those of a 10m³ digester, just as the heights of the installation (Dp and Hop) will be adapted accordingly.

v) *Annexe 22 : détermination des coûts (Bill of Quantities) de l'étude de faisabilité réalisée par l'IPRC-Karongi*

Cost estimates for 8 m ³ digester with concrete dome but brick spherical outlet. (RW3)					
No	Designation	Unit	Qty	Unit [RWF]	Total [RWF]
1	Stones	m ³	10.0	12'000	120'000
2	Bricks	pcs	5'000.0	50	250'000
3	Gravel 20mm diameter maximum	m ³	4.0	20'000	80'000
4	Emylson ancrylic paint	Ltr	5.0	5'000	25'000
5	Clean coarse sand	m ³	5.0	15'000	75'000
6	Clean fine sand	m ³	4.0	15'000	60'000
7	Water proof cement	kg	20	1'500	30'000
8	Steel rods 6mm	pcs	2	3'000	6'000
9	Steel rods 8mm	pcs	2	6'000	12'000
10	Binding wire	kg	2	1'000	2000
11	PVC pipe 110 mm, PN 4	pcs	1	12'000	12'000
12	PVC pipes 20 mm, PN 16	pcs	10	2'500	25'000
13	Biogas stove	pcs	2	30'000	60'000
14	Gas valve 1/2"	pcs	4	4'000	16'000
15	Portland Cement	bags	25.0	10'500	262'500
16	Gas Turret pipe with 1 1/4-1/2 reducer	pcs	1	10'000	10'000
17	PVC elbow 20mm	pcs	7	500	3'500
18	PVC tee 20 mm	pcs	4	500	2'000
19	PVC socket 20 mm	pcs	4	500	2'000
20	PVC Adapter nipple ½	pcs	4	500	2'000
21	PVC Adapter socket ½	pcs	1	500	500
22	Tangit Glue	kg	1	8'000	8'000
23	Galvanized Nipple 1/2"	pcs	5	500	2'500
24	Galvanized Union	pcs	1	900	900
25	Galvanised Plug 1/2"	pcs	1	500	500
26	Gas hose pipe	m	2.5	4'000	10'000
27	Hosepipe Nipple	pcs	5	3'000	15'000
28	Hosepipe clamp	pcs	6	600	3'600
29	Pressure gauge	pcs	1	15'000	15'000
30	Teflon tapes	pcs	10	300	3000
31	Galvanised elbow	pcs	2	600	1'200
32	Wood screws	pcs	10	30	300
33	Screw holders 8 mm	pcs	10	30	300
34	Wall clamps 1/2"	pcs	5	500	2'500
35	Skilled labour & Supervision fees	person-day	15	10'000	150'000
36	Unskilled labour	person-day	30	3'000	90'000
37	Extra-works (Imprevus)	lumpsum	1	100'000	100'000
38	Transport of special materials	lumpsum	1	100'000	100'000
	Total cost of 8 m ³ digester				1'558'300
We say the total cost of One million Five hundred Fifty Eight thousands and Three hundred Rwandan francs (1,558,300 RWF).					

Cette détermination des coûts a été réalisée par KOMEZA Eric et IYAMUREMYE Pacifique, du département Ingénierie civile et technologies environnementales de l'IPRC-Karongi.

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.



w) Annexe 23 : Séminaire 1, présentation générale du projet

09/07/2018

IPRC-KARONGI

Objectives

Introduction to the biogas project, for all interested persons. General explanations of the work context and objectives associated with this project. General overview of completed work, and changes made over time.

Detailed description of the presentation

1 General presentation of the project, the stakeholders, the situation, and the team members.

The Biogas project is based on the desire of IPRC-KARONGI to develop anaerobic digestion technology in the school's region, and on the PROMOST program, managed by the NGO Swisscontact, which aims to develop the skills related to teaching in the Great Lakes region.

The HES-SO Valais/Wallis is supporting this project, by providing knowledge and (human) resources to achieve these objectives.

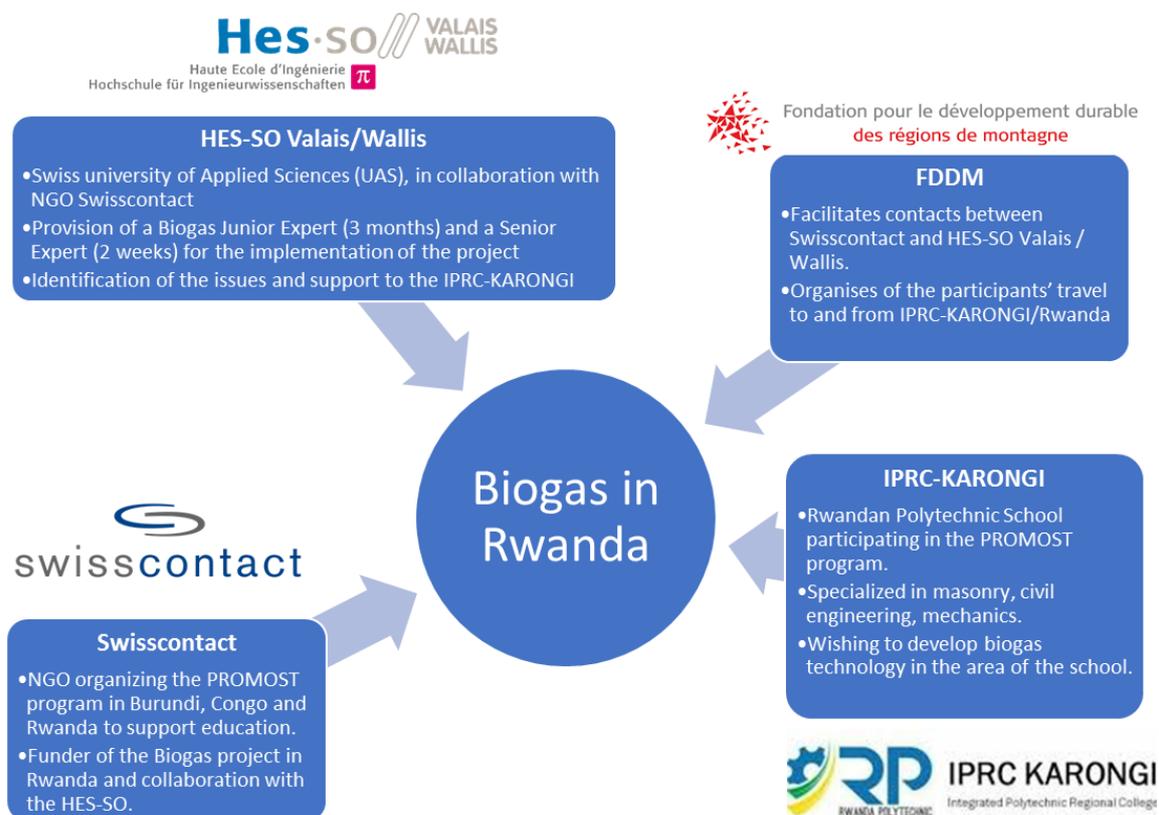


Figure 1: stakeholders involved in the Biogas project.

Several government programs have enabled the first development of biogas technology in Rwanda since the early 2000s.

Many private or institution sites have been identified as suitable for the construction of digesters. Despite this, malfunctions have been identified due to a lack of knowledge and understanding of the facilities by the population.

The fundamental objective of this project is therefore to provide the necessary autonomy for the IPRC-KARONGI to help the population exploit the technology of anaerobic digestion.

Members of the team:

- Prof. Dr. CRELIER Simon (biogas senior expert, professor UAS, head of unit Biotechnology at the HES-SO Valais/Wallis): Supports the Jr expert from Switzerland and comes on site for about 10 days.
- CORNILLET Alain (biogas junior expert at HES-SO Valais/Wallis): On-site biogas expert, identifies issues and develops biogas technology in partnership with IPRC-KARONGI.
- KOMEZA Eric (head of department Civil Engineering and Environmental Technologies at IPRC-KARONGI): Focal point of the Jr expert, holding the Biogas project in the continuity of its application.
- GAKUBA Aimable (professor of physics at IPRC-KARONGI): Supports the Biogas project in its application, the identification of issues and the search of solutions.
- IYAMUREMYE Pacifique (masonry workshop assistant at IPRC-KARONGI): Facilitates the work and contacts of the Jr expert with the people involved in the Biogas project.

2 Reminder of the project's main objectives initially set and their general deadlines. Overview of the workplan and the objectives adaptations.

The initial objectives, planned according to the collaborative framework, were:

- Inventory of malfunctioning digesters around Kibuye.
- Evaluation of the possibilities of putting digesters back into service.
- Creation a troubleshooting diagnostics procedure.
- Writing of a user's manual for biogas plant owners.
- Strengthen IPRC's skills in assisting with the exploitation of biogas and in repairing in the event of a loss of production.
- Rehabilitation of a digester prototype of about 200L.

After discussion with stakeholders, adaptations were made to the objectives, defining them as follows:

- Inventory of malfunctioning digesters in the Kibuye region.
- Attempt to troubleshoot 2 to 3 digesters.
- Establish a diagnostic procedure (for the members of IPRC) and a manual of the installations (for the owners), translated into Kinyarwanda.
- Feasibility study for the construction of a fixed dome digester at the IPRC-KARONGI site.
- Knowledge transfer through seminars organized on the IPRC-KARONGI site and training of a troubleshooting team.

The Biogas project with the Jr expert, has a duration of 3 months (21st May to 16th August 2018). The final report from the Jr expert is scheduled for 31st August in Switzerland. A delay is expected for the transmission of the results to the IPRC-KARONGI.

Detailed workplan was prepared at the beginning of the project, in agreement the IPRC-KARONGI and HES-SO Jr expert previsions. An actualised version is presented, which includes the proposed amendments.

These adaptations are linked with the time needed to inventory the digesters around Karongi, as well as the week spent visiting institution digesters in Rwanda.

The feasibility study, which was initially not planned in the collaborative framework, is another item that required adjustment to the workplan.

Week		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Activities	Sub-activities	28.05 - 03.06	04 - 10.06	11 - 17.06	18 - 24.06	25.06 - 01.07	02 - 08.07	09 - 15.07	16 - 22.07	23 - 29.07	30.07 - 05.08	06 - 12.08	13 - 19.08
Phase 1 : inventory	Proximity based digesters Concept note : inventory												
Phase 2 : maintenance	Digesters evaluation Troubleshooting												
Phase 3 : redaction	Protocol redaction Proofreading (troublesh. protocol) Users manual redaction Proofreading (users manual) Translation												
Phase 4 : digester building	Feasibility study redaction Proofreading (feasibility study) Construction												
Phase 5 : knowledge transm.	Seminar organisation Seminar execution												
Conclusion													
										Holidays	Sr Ex	Sr Ex	

Figure 2: adapted workplan, according to the current work.

3 Presentation of the achieved objectives and the expected deliverables.

The current objectives are the writing of a draft user manual, of a troubleshooting procedure and of a feasibility study (the latter having been submitted for review).

The inventory allows to depict a non-exhaustive portrait of the digesters dispersed around Karongi and the IPRC. 15 different sites were visited, including 4 institution digesters (Kibuye hospital, Rubavu and Mageragere prisons and Kibuye catholic church) and 11 domestic facilities.

Among these digesters, only three of them were out-of-service (#1, #11 and #15). Digester #1 and #11 have never worked without any obvious reason, and #15 stopped working because the only cow that was providing supply in feedstock died.

From this list, every digester is a fixed dome model, except #9, which is a plastic bag.

All domestic digesters were implemented by the Rwandan government as part of the FONERWA program in 2017, as well as the digester in the catholic church of Kibuye. Among the institution digesters, #1 was built by UNHCR in 2014 and was donated to the aforementioned hospital Kibuye. The digesters in the Rwandan correctional services (RCS) were built as part of a collaboration between IPRC-TUMBA and ICRC.

Most of these digesters use cow dung as main substrate, and only 4 of them use human waste as co-substrate (#6, #12, #13 and #14).

During the visits, it was found that most users received basic training for operation and maintenance. Nevertheless, it seems necessary to refresh and deepen this training, in order to:

1. Present the IPRC-KARONGI as capable and willing to manage the biogas technology and support the owners.
2. Allow all digester owners to optimize their production and limit the risk of failure by a few simple operating maneuvers.
3. Create a network of knowledge and exchange on biogas technology in the Karongi region.

Table 1: list of digesters inventoried during the biogas project 2018

#	Date	Type (D/I)	Owner	Location	Build by	Year	In service?
1	29.05	I	Referral Hospital	Kibuye Cell	UNHCR	2014	No
2	29.05	D	MADENDE Z.	Kiniha Cell	FONERWA	2017	Yes
3	31.05	D	NAIMURWANGO B.	Burunga Cell	FONERWA	2017	Yes
4	31.05	D	KAYITERA J.-B.	Burunga Cell	FONERWA	2017	Yes
5	31.05	D	KABERA G.	Burunga Cell	FONERWA	2017	Yes
6	31.05	D	UZABAKIRIHO T.	Burunga Cell	FONERWA	2017	Yes
7	31.05	D	NTIVUGURUZWA L.	Burunga Cell	FONERWA	2017	Yes
8	04.06	D	NYANDWI E.	Kayenzi Cell	FONERWA	2017	Yes
9	04.06	D (bag)	BITWAYIKI I.	Kayenzi Cell	FONERWA	2017	Yes
10	04.06	D	FASHAHO F.	Kayenzi Cell	FONERWA	2017	Yes
11	04.06	D	NTAGAHINDA S.	Kayenzi Cell	FONERWA	2017	No
12	13.06	I	RCS	Rubavu	TUMBA + CICR	2012	Yes
13	14.06	I	IPRC	Tumba	IPRC-TUMBA	n.d.	Yes
14	15.06	I	RCS	Mageragere	TUMBA + CICR	2015	Yes
15	03.07	I	Catholic church	Kiniha Cell	FONERWA	2017	No

The expected deliverables of the biogas project are the manuals, proofread and corrected, as well as a final version of the feasibility study available before July 20th. The manuals will then be translated in Kinyarwanda by members of IPRC-KARONGI.

According to the project objectives, it is also planned to try to troubleshoot at least three digesters in the school area.

4 Presentation of work in progress, expected results and deadlines.

As mentioned above, the troubleshooting of a digester is currently in progress. The causes of its malfunction (no biogas production since its installation) have not yet been clearly identified: no leakage could be found on the installation and the feeding mode of the digester seems to be identical to that of its neighbors.

If it is impossible to find a plausible reason for this malfunction until July 15th, the possibility of restarting the process will be evaluated according to the equipment available in the region and the wish of the owner.

A digester located at the Karongi Catholic Church was also identified during the inventory. Currently out of order, there is a possibility to rehabilitate it by using pig manure nearby.

This project would allow IPRC-KARONGI to directly train its troubleshooting team in the rehabilitation and handling of a domestic scale digester, train the owners and monitor the process from its inception. Some aspects of rehabilitation still need to be studied, such as the complete emptying of the current slurry and its filling with fresh cow dung, mixed with pig manure and water. The permission of the church must also be provided first by July 21st.

Regarding the construction of a fixed dome digester for training and experimentation purposes on the site of IPRC-KARONGI, the feasibility study will assess the resources needed to implement and the costs associated with the sub-project.

Based on the first estimation, this digester will be fed with human waste as main substrate and will have a total volume of 8 m³. According to the first evaluation, it will be situated near the students' kitchen (fig. 3) and the produced biogas can be used for boiling water, for instance. The possibility of adding a ladies' restroom nearby will be studied in the future, to increase the amount of substrate.

The slurry can be used as fertilizer, if a hygienic treatment is performed in order to avoid spreading potentially dangerous diseases from human waste (virus, helminth, bacteria, etc.).

The possibility of using co-substrates has been assessed in the same study; these would allow an increased production of biogas for the same digester volume and approximately the same total amount of feed.

Several propositions were made regarding installation modalities and operating conditions.

These elements can be implemented according to the needs and expectations of the IPRC-KARONGI, and in relation with the budget granted by SWISSCONTACT.

As previously mentioned, this feasibility study is currently undergoing review and correction and will be finalized by July 20th. Once it is finalized, the document will be forwarded to SWISSCONTACT for approval in order to begin the construction.

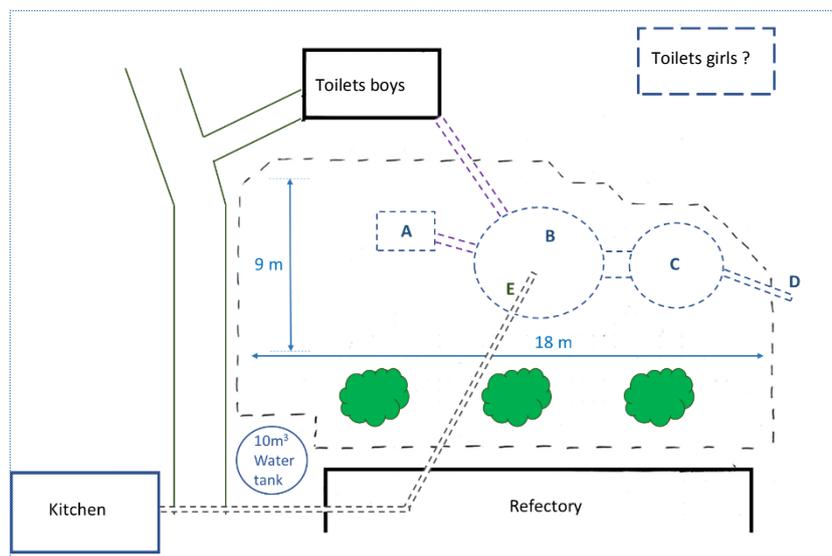


Figure 3: site for the digester, after construction.

Caption: (A) feed chamber for co-substrates, (B) digestion chamber, (C) evacuation chamber, (D) evacuation canal, (E), biogas pipeline.

5 Perspectives, according to the current work and the main objectives.

Based on the status of the work, troubleshooting of the out of service digester is still to be completed. Contact with the Catholic Church was resumed to obtain their permission to begin the study of the site, and an answer will be provided by July 21st.

The manuals and the feasibility study are still under review and will have to be completed by July 20th.

Current work also concerns training seminars on anaerobic digestion for those concerned and/or interested in the issue on the IPRC site.

Training sessions for the owners of biogas plants should also be organized by IPRC in order to provide them with the information they need to operate their digesters or refresh their knowledge.

An assigned troubleshooting team should be created now, in order to establish a reliable contact with the owners and to continue the work.

This team should have all the equipment needed for troubleshooting and should consist of at least a mason and a plumber with basic knowledge of anaerobic digestion and a specialist with a deeper understanding of the process.

More intensive contacts with IPRC-TUMBA should be established to encourage collaboration between the two schools on this technology. A transfer of knowledge should be organized between the two schools, to mutually benefit from everyone's experience in the field of anaerobic digestion.

Finally, all the documents that will be made available to the IPRC will be reviewed and corrected by the Jr expert, their final format being submitted in Switzerland by August 31st at the latest.

x) Annexe 24 : séminaire 2, présentation de la digestion anaérobie

12/07/2018

IPRC-KARONGI

Objectives

Introduce the principles of anaerobic digestion and situate the implications of basic parameters on the process.

Detailed description of the presentation

1 Principles of anaerobic digestion

Anaerobic digestion is the transformation of organic matter into a gas composed mainly of methane and carbon dioxide. This transformation is carried out by bacteria that live in syntrophic relationship, meaning that the waste produced by one strain constitutes the substrate of another.

There are four stages of anaerobic digestion (fig. 1):

- Hydrolysis, which breaks down complex compounds into simple compounds.
- Acidogenesis, which converts these compounds into organic acids.
- Acetogenesis, which use organic acids to create acetate and carbon dioxide.
- Methanogenesis, which produces biogas (methane and carbonic acid) from acetate.

Since each strain of bacteria has a particular role in these steps, the notion of equilibrium is critical to allow its execution.

Since this process is natural, the fundamental parameters of anaerobic digestion are relatively easy to achieve: any environment that is conducive to life and where oxygen is absent.

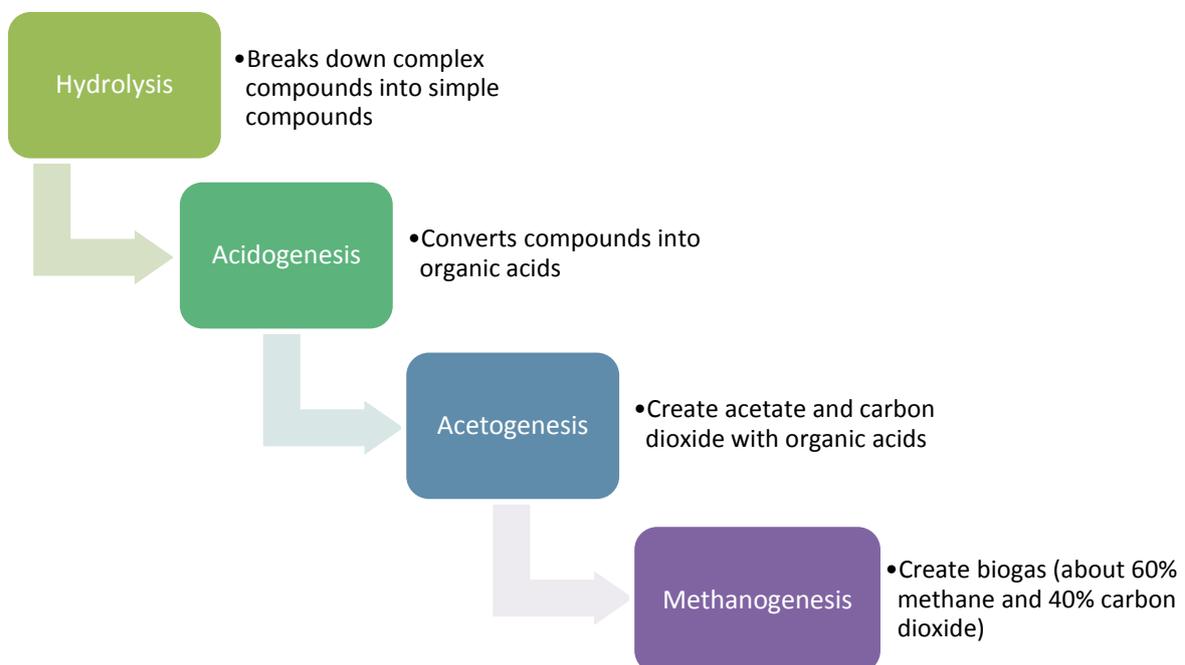


Figure 1 : key steps of anaerobic digestion.

The temperature conditions depend on the bacterial population and the resources used: the anaerobic digestion in mesophilic conditions have temperatures between 22 and 35°C. The most efficient process takes place in thermophilic conditions (55 to 65°C) but require an adequate equipment to maintain a constant temperature. Hydrogen potential (pH) is also a key factor and should normally remain between 6.3 and 7.5.

However, it must be taken into account that when the biogas yield becomes a key factor, optimization and process monitoring manoeuvres become necessary.

In any case, it is necessary to consider some absolute rules for the exploitation of bacteria:

- A change in the process is never without consequence.
- Any modification of the conditions will take time before being visible.
- These microorganisms can tolerate a wide range of operating conditions, but any modification must be carried out gradually (several days or even weeks).
- Avoid as much as possible to modify several parameters at a time, to clearly observe the influence of each one.

2 Parameters to consider in anaerobic digestion – Nature of the feed

A digester needs food, water and heat just like any other living thing. These elements are essential because they will determine the smooth running and the success of the process.

Table 1: non-exhaustive list of C:N ratios.

Raw materials	C:N ratio [-]
Human excreta	8
Goat droppings	10
Pig faeces	18
Cow dung	24
Straw (maize)	60
Straw (rice)	70
Straw (wheat)	90

Regarding feeding, bacteria in a digester essentially look for the carbon in organic compounds. This carbon is not always available for them, just as a human being cannot eat grass like a ruminant: humans do not have the enzymes needed to degrade plants. It is therefore to find compounds rich in carbon, while avoiding those rich in lignin (leaves, tree limbs, etc.). Compounds such as cow, goat or pig dung and human feces are naturally rich in carbon available for bacteria. Food waste also but the quantity varies according to the nature of this waste.

All varieties of agricultural waste (rice husks, maize and wheat, for example) also have a very high carbon content but may also contain a high proportion of lignin and should be used with greater caution. Nitrogen is also an essential compound for bacteria and is present in proteins or certain substances (e.g. urine).

To maintain a favorable balance to anaerobic digestion, the carbon to nitrogen ratio is generally considered. For an optimal process flow, it must be between 20 and 30, considering all the substrates supplied to the digester. By feeding the digester, it is therefore necessary to estimate the total C: N ratio by considering the ratio of each compounds, according to equation 1, where m_i is the quantity [kg] of a compound i and R_i is its ratio C: N.

$$\frac{m_i R_i + m_j R_j + \dots + m_n R_n}{m_i + m_j + \dots + m_n} = C: N_{total} \quad \text{eq. 1}$$

The table 1, from [7], contains a list of some compounds and their C:N ratio.

For example, if we take 10 kg cow dung and 10 kg human excreta as a mixture to feed a digester, we will have a C:N ratio of:

$$\frac{10kg \cdot 8 + 10kg \cdot 24}{10kg + 10kg} = 12 [-] \quad \text{eq. 2}$$

A ratio of 12 could prove to be too low compared to the needs. It would be a question of adapting the composition of the feed to obtain a C:N ratio of minimum 20. Considering that the quantity of human excrement is the same, it is necessary to calculate the amount of cow dung needed to obtain this ratio:

$$\frac{10kg \cdot 8 + m \cdot 24}{10kg + m} = 20 \rightarrow 10kg \cdot 8 + m \cdot 24 = 20 \cdot (10kg + m) \rightarrow 120kg = 4m \rightarrow m = 30kg \quad \text{eq. 3}$$

In addition to carbon and nitrogen, bacteria obviously need other compounds such as proteins and mineral salts. Most of these compounds are found naturally in several substrates that are used in anaerobic digestion (manure, food waste, etc.). However, it is important to avoid an excess of them, which can be as harmful to bacteria as a deficiency of these substances.

It must also be considered that drugs, and antibiotics are to be avoided in a digester, because they can have a very strong negative impact on bacteria. These substances can be found in the excrements of which consumed them. In a situation where a sick person or animal has been using drugs, it is therefore essential not to use these excrements for several days after the last dose.

Another point to consider is the biogas potential, i.e. the volume of biogas per kg of substrate, of each of the compounds of the feed.

Since this can vary greatly depending on the feedstock, it may be necessary to evaluate each of these potentials in case of optimization of the process. Table 2, from [7] and [17], provides a list of some biogas potentials of substrates commonly used in the region. The total biogas potential per kg feed can be estimated by calculating that of each substrate and respecting the proportions, according to equation 4, where X, Y, ... are the proportion of each substrate (comprised between 0 and 1, where 0 is 0% and 1 is 100%) and BP_x the biogas potential of substrate X.

$$X \cdot BP_x + Y \cdot BP_y + \dots + N \cdot BP_N = BP_{tot} \quad \text{eq. 4}$$

Table 2: short list of biogas potential from various feedstocks.

Feedstocks	Biogas [L/kg]	pot.
Cow dung	23-40	
Pig feces	40-59	
Human excreta	20-28	
Chicken droppings	65-116	
Euphorbia tirucalli	55	

3 Parameters to consider in anaerobic digestion – Hydraulic retention time

As a process, it is considered that everything that enters the digester comes out in one way or another (in the form of biogas or slurry). The flow diagram on figure 2 allows a simplified visualization of this process.



Figure 2: flow diagram of an anaerobic digestion.

The hydraulic retention time (HRT) is the way to characterize the "speed" of the digestion, or the time needed to digest the raw material injected into the process.

It is calculated according to the inflow and the total volume of the digester, using equation 4.

$$HRT [day] = \frac{V_{digester} [m^3]}{Q \left[\frac{m^3}{day} \right]} \quad \text{eq. 5}$$

Considering a digester with a volume of 4 m^3 (4000 L), which seems to be the most common model in Karongi region, and a loading rate of 40 kg cow dung + 40 L water, the calculation would be the following:

$$\frac{4000 \text{ L}}{40 \frac{\text{L}}{\text{day}} + 40 \frac{\text{L}}{\text{day}}} = 50 \text{ days} \quad \text{eq. 6}$$

It can be noticed that we consider 1 kg feedstock as 1 L to facilitate the estimation of the HRT.

An HRT of around 40 and 50 days is common for digester using mesophilic anaerobic digestion and having enough feedstock to adjust the loading rate [7]. However, an HRT can easily reach 70 to 80 days when feed adjustments are not possible.

Concerning digester using human waste as substrate, it is necessary to impose an HRT of at least 90 days [14], to get rid of pathogenic microorganisms that can spread potentially dangerous diseases when using the slurry as fertilizer.

HRT is also influenced by temperature, which can accelerate the process. The retention time should not be less than 40 days in the operating conditions of the region, to allow time for bacteria to feed.

4 Slurry stirring and long-term maintenance

In the case of long-term maintenance, parameters that are not immediately obvious should be considered. Among them, sedimentation of sludge is a critical element, as it can cause the process to stop.

The solid feed residues present in the digester can settle at the bottom of the chamber if no agitation is present. Since most of the digesters in the region do not have any system for stirring, it should be considered that the system may one day require general maintenance, including complete emptying of the digester.

Unfortunately, it is difficult to predict the occurrence of this phenomenon, as it depends on the accumulation of several parameters, including the quantity of inert compounds (highly ligneous compounds, sand, etc.), the natural convection of sludge in the digester, the temperature, etc. To limit or even prevent this sedimentation from occurring, it is preferable to strictly sort the substrate entering the digester, absolutely avoiding the presence of these inert compounds.

All organic substrates should be chopped or crushed as finely as possible and form a homogeneous mixture. This mixture should be at room temperature at the time of its injection into the digester, as well as the water with which it will be mixed.

This water should be as clear as possible, free of soil or sand.

y) Annexe 25 : Cahier des charges du travail de diplôme

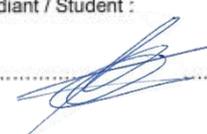
HES-SO Valais

SYND	ETE	TEVI
X	X	X

Données du travail de diplôme
Daten der DiplomarbeitFO 1.2.02.07.CB
haj/11/01/2016

Filière / Studiengang TEVI	Année académique / Studienjahr 2017/2018	No TD / Nr. DA bt12018\16
Mandant / Auftraggeber <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input checked="" type="checkbox"/> Swisscontact, Zürich	Etudiant / Student CORNILLET Alain Professeur / Dozent CRELIER Simon	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input checked="" type="checkbox"/> IPRC West, Kibuye (Rwanda)
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) GENOUD Stéphane, HES/SO Valais Wallis (IEM)	

Titre / Titel Mise en oeuvre et maintenance de biodigesteurs au Rwanda
Description / Beschreibung La production de biogaz à l'échelle domestique par digestion anaérobie de déchets organiques présente des atouts considérables pour le Rwanda en termes d'économie, de développement durable et de santé publique. Le candidat se rendra à l'IPRC West de Kibuye sous l'égide de Swisscontact en tant qu'expert junior, avec les objectifs suivants : <ul style="list-style-type: none"> Effectuer un recensement des équipements de méthanisation dans la région de Kibuye et identifier les causes des dysfonctionnements éventuels Mettre sur pied un laboratoire robuste pour le suivi et le diagnostic des méthaniseurs Evaluer l'opportunité de la remise en état – à des fins didactiques –des digesteurs de 200 L construits pendant le travail de diplôme de José Hoyos Munoz en 2016 Développer du matériel pédagogique (éléments théoriques, protocoles expérimentaux) à l'intention des professeurs et des étudiants de l'IPRC West Former 2 collaborateurs de l'IPRC à la gestion et au dépannage d'installations de méthanisation Coordonner le travail de rédaction de la méthode d'exploitation sur place. Rédaction, mise à disposition des protocoles pour le dépannage des méthaniseurs existants Réaliser une étude de faisabilité relative à la construction d'un digesteur de démonstration à l'échelle de 8 m³ env. sur le site de l'IPRC

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation / filière Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:  ¹ Etudiant / Student : 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 30.04.2018 Fin des travaux de diplôme dans les laboratoires de l'école / Ende der Diplomarbeiten in den Labors der Schule : 13.07.2018 Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: A définir (TD à l'étranger) Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: Non-pertinent (TD à l'étranger) Défense orale / Mündliche Verfechtung: dès la semaine 35 / ab Woche 35
---	--

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.

Rapport reçu le / Schlussbericht erhalten am Visa du secrétariat / Visum des Sekretariats

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.

Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

