Rapport Projet
Biométhaniseur Low-Tech

UE Projet d'ingénierie

Agathe Ménage, Quentin Lefebvre, Zoé Jobard, Mayeul Beauquier, Grégoire Richard, Paul Rebourseau, Laurie Ferreira, Jeanne Kuhn

SOMMAIRE

PARTIE TECHNIQUE 4

1. Introduction 4

2. Principe du bio-méthaniseur et recherches bibliographiques 4

2.1. La chimie du processus et les intrants 5

2.1.1. Théorie réactions chimiques mises en jeux lors de la méthanisation 5

2.1.2. Les différents intrants en pratique 6

2.2. Filtrage du gaz 8

2.2.1. Filtrer le soufre 8

2.2.2. Filtrer l'eau (H2O) 9

2.2.3. Filtrer le dioxyde de carbone (CO2) 10

2.3. Réservoir de gaz 10

2.3.1. Présentation des solutions 10

2.3.2. Solution choisie et calculs associés 11

2.4. Brûleur et gazinière 12

2.4.1. Propriété du méthane 12

2.4.2. Injecteurs 13

3. Choix effectués pour le différents éléments 14

4. Réalisations et expérimentations 15

PARTIE ETUDE D'IMPACT 17

1. Aspect économique 17

2. Aspect environnemental 18

2.1 Émissions équivalent CO2 évitées comparés à l'utilisation du gaz de ville 18

2.2 Emission évitées et avantages du recyclage de nos déchets 19

PARTIE GESTION DE PROJET 20

1. Présentation rapide de l'équipe 20

2. Répartition des rôles 20

3. Structuration du projet 21

4. Comment avancer efficacement durant le projet ? 21

5. Gestion du budget 22

6. Gestion des ressources 22

7. Risques potentiels durant le projet 23

8. Gestion de crise du Covid-19 23

9. La suite 24

PARTIE ANNEXES 24

ANNEXE 1: PROFILS TYPES D'UTILISATION ET PRODUCTION DE BIOMÉTHANE ASSOCIÉE 24

ANNEXE 2 : CALCULS DE DIMENSIONNEMENT DU RÉSERVOIR 27

ANNEXE 3 : CALCULS DE DIMENSIONNEMENT DU BRÛLEUR 28

Calcul du temps nécessaire pour faire bouillir de l'eau de 20 à 100°C sans pertes 28

Calcul des pertes thermiques dans la casserole 28

Conclusion et choix du brûleur 29

ANNEXE 4 : LISTE MATÉRIEL, BUDGET ET PROTOCOLE DE RÉALISATION 30

Matériel 30

Notice et plans de construction 30

2.1 Protocole pour la partie digesteur 30

2.2 Protocole pour la partie réservoir 37

2.3 Protocole pour la partie filtrage 40

ANNEXE 5 : PARTIE GESTION DE PROJET-DIAGRAMMES DE GANTT 42

ANNEXE 6 : PARTIE GESTION DE PROJET-CR DE REUNION 43

PARTIE TECHNIQUE

1. Introduction

Les Low-Tech comme le dit J-M Jancovici sont "une optimisation fine de ce qu'on sait déjà". Ce sont des technologies respectueuses de l'environnement, car elles sont durables, utilisent très peu d'énergie et sont majoritairement faites en matière recyclée et recyclable.
Mais notre objectif aujourd'hui est de montrer que les low-tech ne sont pas juste des savoir-faire manuels. Nous voulons faire comprendre que derrière la construction, il y a une vraie partie recherche et théorique très éducative.
C'est donc ce que nous avons fait lors de ce projet. Nous avons construit un biométhaniseur low-tech, avec un travail conséquent de bibliographie au préalable, ce qui nous a permis de construire un réel prototype du biométhaniseur et un manuel qui pourra répondre à de nombreuses questions que pourront se poser les utilisateurs.

2. Principe du bio-méthaniseur et recherches bibliographiques

Le design de biométhaniseur low-tech que nous avons choisi de prendre suit le schéma ci-dessous:

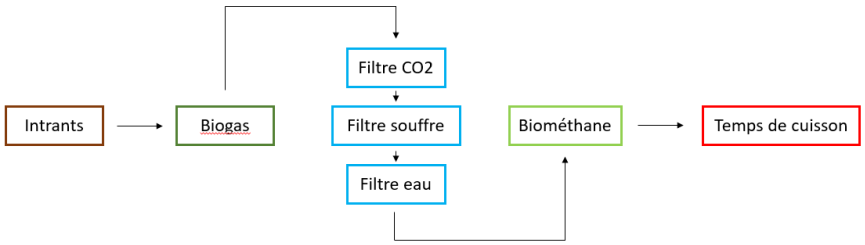


Figure 1: Diagramme d'architecture du bio-méthaniseur

Cet organigramme nous a mené à en choisir la composition schématisée ci-dessous:

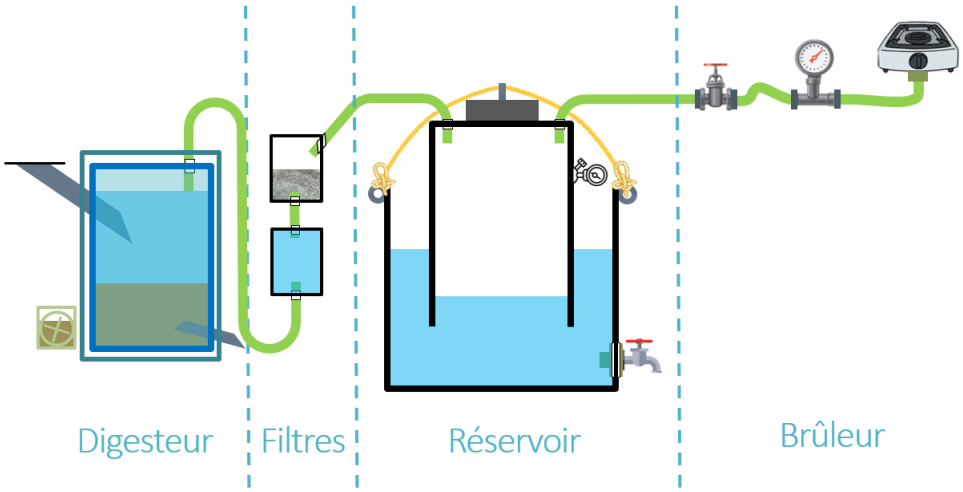


Figure 2: Schéma du bio-méthaniseur

Pour le dimensionnement de chaque élément, nous nous sommes basés sur les études bibliographiques, menées sur chaque segment du bio-méthaniseur comme détaillé dans les parties suivantes.

2.1. La chimie du processus et les intrants

2.1.1. Théorie réactions chimiques mises en jeu lors de la méthanisation

La réaction chimique de méthanisation est décrite dans le schéma ci-dessous, elle est divisée en 4 à 5 étapes (dépendant de la séparation d'une d'entre elle ou non) et est schématisée comme ci-dessous:

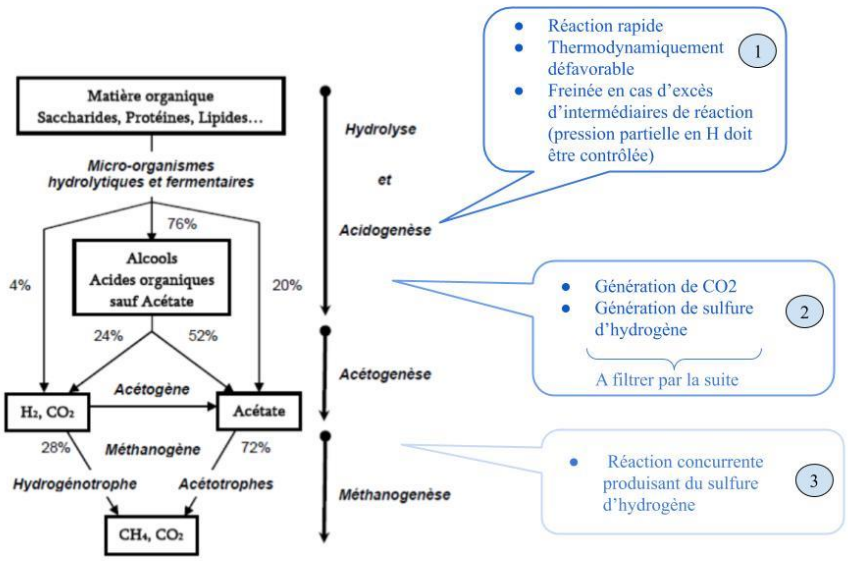


Figure 3: Schéma de principe de la digestion anaérobique

A chaque étape de réaction, des contraintes sont mises en lumière, contraintes qu'il faudra

considérer lors du dimensionnement et de l'exploitation de notre biométhaniseur.

Lors des réactions d'acidogenèse et d'acétogenèse (voir contrainte de réaction indexée 1 et 3), de nombreuses contraintes sont mises en avant:

- L'acidogenèse étant rapide tandis que l'étape suivante est lente, il faut prendre garde aux intermédiaires de réaction générés. En effet, une accumulation trop importante d'intermédiaires sature le bidon et couperait l'ensemble de la réaction. Ainsi, la pression en H_2 (produit de la réaction) se doit d'être maintenue entre10^{-4}et10^{-6} atm.
- La réaction d'acidogenèse est thermodynamiquement défavorable, il faut donc que l'enceinte soit maintenue à une certaine température (comprise entre 30 et 60°C en raison des éléments thermophiles)
- La réaction concurrente de sulfato-réduction due à la présence de bactéries sulfato-réductrices lors de l'acétogénèse (index 3), intervient à pH bas et autour de 30°C, crée des ions sulfure et du sulfure d'hydrogène, il faut donc maintenir le pH autour de 7 pour l'éviter.

Lors des différentes étapes de réaction (index 2), il y a création d'autres gaz comme le dioxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène, ces gaz devront être filtrés par la suite (voir partie suivante concernant les filtres à gaz).

L'enchaînement de ces réactions conduit à la génération d'un mélange de biogaz constitué à environ 70% de méthane et de 25 à 45% de dioxyde de carbone, après filtrage il conduira à la production de bio-méthane utilisable.

2.1.2. Les différents intrants en pratique

2.1.2.1. Théorie

En fonction des substrats utilisés, les rendements en méthane et la composition du biogaz peuvent varier. Ainsi, le potentiel méthanogène des matières entrantes est très variable, les déjections animales (lisiers, fumiers) ayant le potentiel le plus faible: en effet, ces matières sont déjà issues d'une digestion biologique partielle dans l'intestin de l'animal (ruminants principalement). De plus, les lisiers contiennent beaucoup d'eau, et à poids égal la production de méthane par ces matières est fortement réduite. En revanche, les déjections animales sont intéressantes pour la méthanisation à cause de leur flore bactérienne, très riche, et de la stabilité qu'elles apportent au processus de méthanisation.

Les déchets de l'industrie agroalimentaire, les graisses notamment, permettent une production de biogaz élevée et sont souvent utilisés comme co-produits entrant dans le digesteur. Ces matières entrantes peuvent présenter un désavantage puisque leur utilisation peut être limitée pour des raisons de disponibilité et elles acidifient le biodigesteur, ce qui entraîne la mort des bactéries. Au contraire, les plantes énergétiques dont le potentiel méthanogène est important sont plus facilement disponibles et

présentent une qualité de substrat plus constante. Ces végétaux sont souvent ensilés et le biogaz qui en résulte présente des concentrations variables en CH_4 et H_2S, en fonction de leur nature.

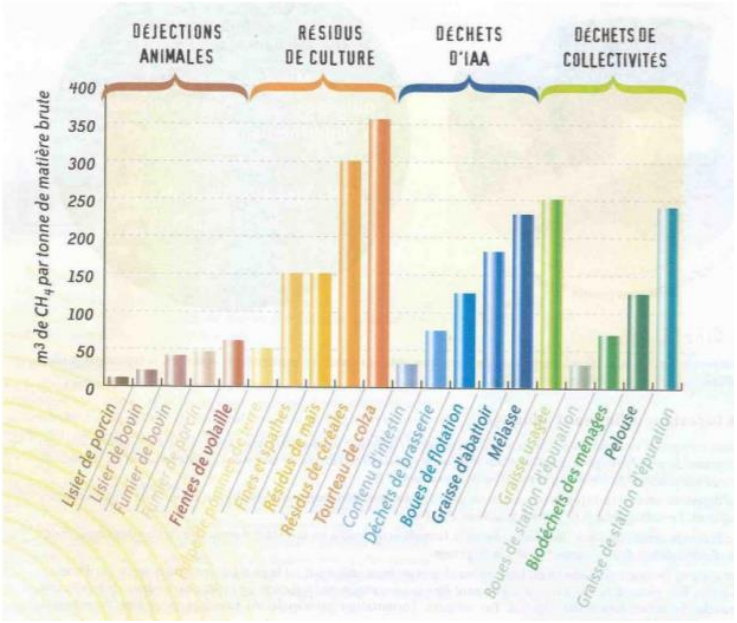


Figure 4: Classement des digestats

2.1.2.2. Initialisation du méthaniseur

On “initialise” notre digesteur, pour créer les bactéries qui serviront à produire notre biogaz, à l’aide d’excréments d’animaux herbivores.

Liste des excréments les plus riches pour former du méthane :

- poule (mais est très riche en ammoniac donc est assez peu utilisé pour la production de biogaz)
- porc
- vache
- cheval
- lapin
- chèvre
- buffle
- mouton

Il faudra remplir entièrement le réservoir du digesteur avec de l’eau, puis introduire un mélange de fumier et d’eau tel que : on prend 6,7% du volume du digesteur en quantité de fumier d'animal que l’on mélange avec de l’eau pour obtenir un lisier cohérent. (pour notre bidon de 60 L il faudra prendre 4 L de fumier). Une quantité égale de liquide s'écoule par la sortie de l'engrais.
L'appareil commencera à produire du gaz dans les 1 à 3 semaines suivant l'alimentation initiale avec du fumier d’animal.

Une fois que les bactéries sont créées, on peut alimenter notre méthaniseur avec à peu près toute sorte de déchets. Mais certains auront un plus grand potentiel méthanogène que d’autres.

En se basant sur ces recherches, nous avons établi des profils types d'utilisateur ainsi que leur production potentielle afin d'établir les gains ainsi que les profils d'utilisation. Ces profils ainsi que leur production associée sont donnés en Annexe 1.

2.2. Filtrage du gaz

Une fois que l'on a obtenu notre biogaz dans le digesteur, il reste encore à utiliser divers processus pour passer du biogaz, qui est un mélange de différents gaz, au biométhane. Dans le biogaz obtenu précédemment, on doit soustraire le dioxyde de carbone (CO_2), l'eau (H_2O) et le soufre (H_2S) en particulier, les autres gaz étant présents dans le mélange en proportions faibles.

Pour obtenir du biométhane, il faut obtenir une proportion de 95 à 98% de méthane et le reste en dioxyde de carbone, les composés énoncés précédemment doivent donc être éliminés.

Composant	**Pourcentage**
CH4 -- Méthane	40-75%
CO2 -- Dioxyde de carbone	15-60%
H2O -- Eau	5-10%
H2S -- Sulfure d'hydrogène	0.005-2%
NH3 -- Ammoniac	< 1%

Tableau 1. Composition du biogaz avant l'utilisation de filtres

2.2.1. Filtrer le soufre

Il faut filtrer en particulier le sulfure d'hydrogène (H_2S). En effet, c'est un gaz mortel à l'inhalation. De plus, il a un impact sur la durée de vie des équipements : l'association d'H_2S avec de l'eau crée de l'acide sulfurique, qui est corrosif et cela engendre des dommages à l'installation.

Afin de filtrer les sulfures d'hydrogène H_2S, on dispose de plusieurs méthodes dont deux principales:

- Utilisation d'oxydes/hydroxydes de métaux (à travers de la laine de fer par exemple)
- Adsorption sur du charbon actif

2.2.1.1. Utilisation d'oxyde/hydroxyde de métaux

Cette méthode consiste à remplir un réacteur circulaire avec des hydroxydes de fer ou oxydes de fer / de zinc. Puis, on injecte le gaz par le haut. La réaction qui se produit est alors la suivante :

$$Fe_2O_3 + 3\ H_2S \rightarrow 2\ Fe_2S_3 + 3\ H_2O$$

Cette formule nous montre que l'association des hydroxydes de fer avec le sulfure d'hydrogène permet de faire disparaître ces derniers en créant du sulfure de fer (Fe_2S_3) qui réagit de nouveau avec de l'oxygène pour reformer les hydroxydes de fer, comme le montre l'équation ci-dessous.

$$Fe_2S_3 + 3\ O_2 \rightarrow 2\ Fe_2O_3 + 6\ S$$

Cette méthode nécessite d'avoir deux réacteurs en parallèle, un qui épure le biogaz (disparition du H_2S) et l'autre qui se fait régénérer (production de Fe_2O_3). Il y a des inconvénients à cette méthode : une grande quantité de chaleur est générée, et l'efficacité est amoindrie si le biogaz contient une grande quantité d'eau. L'avantage est que l'hydroxyde se régénère avec une double réaction, et donc il n'y a pas besoin de ré-alimenter le système régulièrement.

2.2.1.2. Adsorption sur du charbon actif

Le sulfure d'hydrogène peut également être adsorbé sur du charbon actif. Le charbon dans ce cas est un catalyseur. Il s'agit de placer du charbon actif (en billes) dans un récipient, et faire passer le biogaz dans ce récipient. Le charbon actif se charge ensuite de capter les composants tels que le H_2S. La réaction chimique qui se fait est la suivante :

$$2\ H_2S + O_2 \rightarrow 2\ S + 2\ H_2O$$

Puisqu'il faut changer le charbon actif régulièrement, sans vraiment savoir la fréquence optimale à contrario de la méthode précédente, on privilégiera l'utilisation d'oxydes de fer pour le moment qui nous paraît la plus simple, bien qu'elle ait un problème d'efficacité. Nous opterons pour la méthode par charbon actif si nous remarquons qu'il y a un réel problème. De plus, il est plus facile de se procurer des oxydes de fer (laine de fer) que du charbon actif.

2.2.2. Filtrer l'eau (H2O)

Concernant le filtrage de l'eau dans le biogaz, il faut passer par une augmentation de la pression ou une diminution de la température. On peut citer deux méthodes principales pour cela :

- Par condensation de l'eau : on sépare l'eau condensée, et les gouttes d'eau sont capturées puis éliminées. Pour ce mécanisme, il y a plusieurs techniques existantes, par exemple l'utilisation d'anti buée, d'un séparateur cyclonique (système assez complexe) ou encore des collecteurs d'humidité où l'on utilise l'expansion du gaz.

- Par séchage du biogaz : cette méthode repose sur plusieurs techniques, notamment la réfrigération du gaz qui se saturera en excès en eau dans des échangeurs thermiques. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite des températures extrêmes, et donc n'est pas très pratique dans notre cas. (création de low-tech)

On a donc choisi d'utiliser la méthode de condensation : il faut condenser le biogaz pour en extraire l'eau. La condensation est le phénomène de changement d'état de la matière d'un état gazeux à un état liquide. Concrètement, la condensation va avoir lieu dans le réservoir ainsi que dans le tuyau avant le réservoir. Dans le réservoir, de petites gouttelettes vont se former sur la paroi et redescendre dans la cuve. Le même phénomène va opérer dans le tuyau. Afin que l'eau ne stagne pas, il est important que le tuyau avant le réservoir ait une "pente" suffisante afin que l'eau puisse couler dans le tuyau et tomber soit dans le digestat soit dans le réservoir.

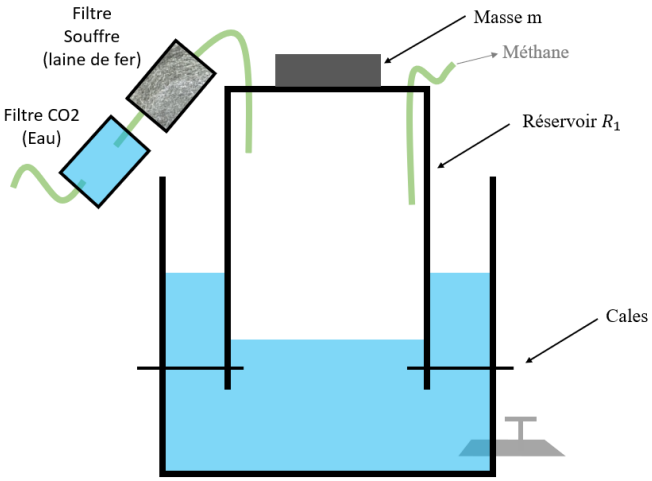


Figure 5: Schéma du réservoir

2.2.3. Filtrer le dioxyde de carbone (CO2)

Dans le mélange de gaz initial, il y a entre 15 et 60 % de CO2. Le but est de réduire autant que possible ce pourcentage. Le gaz va passer dans un filtre à eau (bouteille/bidon rempli d'eau), il faut faire attention à ce que la hauteur d'eau dans le bidon ne soit pas trop grande pour ne pas avoir une pression trop importante. Bien que le méthane soit légèrement soluble dans l'eau (8% va se dissoudre dans l'eau), le dioxyde de carbone est bien plus soluble ce qui va permettre d'obtenir un gaz presque sans CO_2 . Le gaz aura à peu près la même teneur en CO2 que l'air, c'est à dire 0.04% d'après l'Association Nationale pour la Prévention et l'Amélioration de la Qualité de l'Air, ce qui est largement acceptable.

2.3. Réservoir de gaz

2.3.1. Présentation des solutions

Suite à nos recherches concernant le réservoir de méthane pour notre biométhane, on a découvert différentes possibilités :

- La première est de construire un réservoir en dur et d'utiliser un compresseur pour réguler la pression à l'intérieur.

- La seconde est d'utiliser un réservoir souple, de type chambre à air ou citerne à eau souple, et soit d'utiliser à nouveau un compresseur pour réguler la pression, soit d'utiliser des masses (sac de sable) qu'on posera dessus.

- La troisième et dernière solution est celle que nous avons choisie (cf. schéma). On insère un réservoir (R_1) dans un (R_2) plus grand qui est rempli d'eau. On plante de manière étanche un tuyau (arrivée du méthane) à l'intérieur du réservoir 1. Le méthane ne peut alors plus sortir et va soulever le réservoir 1. On pose une masse (cf. dimensionnement ci-dessous) pour avoir une pression de 2000 Pa à l'intérieur de R_1. Des cales sont présentes pour que le réservoir R_1 ne se renverse pas totalement et laisse le méthane s'échapper. Dans ce cas limite, on pose une soupape de sécurité pour que l'eau ne déborde pas (30 mbar max.)

2.3.2. Solution choisie et calculs associés

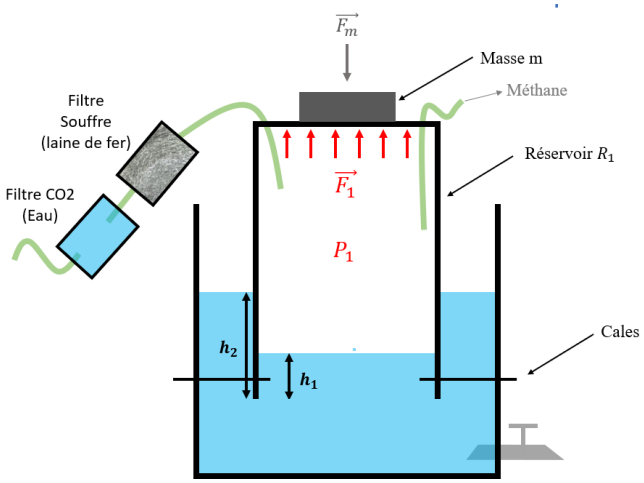


Figure 6: Schéma de fonctionnement du réservoir

Le gaz à l'intérieur du réservoir 1 doit être à une pression P_1 de 2000 Pa et on souhaite avoir un réservoir d'environ 100 L (cf. Partie 3). Pour avoir une pression constante, on posera une masse inférieure à 25 kg (pour des soucis pratiques) sur le dessus du réservoir 1. A partir de ces informations, on peut dimensionner R_1 (surface, hauteur). On détaillera les calculs pour m = 25 kg mais on effectue ces mêmes calculs pour toutes les masses allant de 5 à 25 kg sur un tableur. On note S la surface du réservoir 1.

Les calculs associés sont donnés en Annexe 2 et permettent le dimensionnement final de la solution en partie 3.

2.4. Brûleur et gazinière

Dans cette partie nous nous intéressons à “l'arrivée”, autrement dit l’étape de combustion du méthane obtenu dans le brûleur via le circuit antérieur. Pour cela, nous commençons par lister les propriétés de combustion du méthane.

A titre indicatif et pour les calculs qui suivront, nous utiliserons les valeurs suivantes:

- pour chauffer 1 L d’eau de 1°C il faut 4180 J. soit 1.16 Wh (Cm = 4,18 kJ / kg °C)
- Pour chauffer 1 L d’air de 1°C, il faut 1,2 J.

2.4.1. Propriété du méthane

Au niveau des différents gaz utilisés en combustion, on a comme énergie libérée par la combustion à titre indicatif :

Combustible	Energie de combustion par gramme de gaz	Energie de combustion par litre de gaz
Méthane CH_4	56 kJ/g	37 kJ/L de gaz
Butane C_4H_{10}	50 kJ/g	120 kJ/L de gaz
octane (essence) C_8H_{18}	48 kJ/g	228 kJ/L de gaz
Dihydrogène H_2	143 kJ/g	11 kJ/L de gaz
Glucose $C_6H_{12}O_6$	16 kJ/g	- - -

Tableau 2. Energie libérée par la combustion de différents gaz

Or, $V_m = 22{,}414\ L.mol^{-1}$ d’où l’énergie molaire $E_m = 802\ kJ.mol^{-1}$, l’énergie volumique par litre de méthane $E_v = 37{,}78\ kJ.L^{-1} = 37{,}78.10^3\ kJ.m^3$

Sachant que le bio-méthane représente 70% du biogaz, on aura l'énergie libérée par mètre cube de biogaz, soit : $E_{v-biogaz} = 23{,}724.10^3 kJ.m^3$si nous ne le filtrons pas. Sachant que nous le filtrons, nous aurons une énergie relâchée de $E_v = 37{,}78\ kJ.L^{-1} = 37{,}78.10^3\ kJ.m^3$

2.4.2. Injecteurs

Le choix de l'injecteur se fera sur la base de la pression, en effet, il faut une pression de G20 : 20 mbar ou G25 : 25 mbar pour un gaz naturel (Méthane) pour les brûleurs. Etant donné que la teneur du gaz naturel en méthane est de 70 à 100%, on considérera qu'il faut une pression de 20 à 25 mbar de méthane pour verser dans le brûleur. *cf (tableau, fiche technique brûleur)*

On a essentiellement trois types de brûleurs de différents diamètres, différents débits nominals et donc différentes consommations (les données sont une moyenne des différents types de brûleurs rencontrés dans le commerce).

On peut régler le débit d'un brûleur directement sur celui-ci également, cela va donc directement influencer le puissance émise.

Dans le tableau ci-dessous, en s'appuyant sur les calculs de puissance volumique du méthane effectués précédemment, on donne les caractéristiques en débit nominal, pression et énergétique des différents injecteurs:

	Rapide	**Semi rapide**	**Auxiliaire**
Débit horaire G20 (l/h)	220	150	90
Débit horaire G25 (l/h)	300	170	100
Diamètre ustensile (mm)	180-260	160-240	120-140
Diamètre brûleur (mm)	115	75	50
Puissance thermique nominale (kW)	2.9	1.6	1
Energie libérée pour une heure de fonctionnement - G20 (kJ)	35.78*220=7871.6	5367	3220.2
Energie libérée pour une heure de fonctionnement - G25 (kJ)	10734 kJ	6082.6	3578

Tableau 3. Caractéristiques des trois types de brûleurs

Les calculs de dimensionnement du brûleur qui mèneront aux choix détaillés en partie 3 sont donnés Annexe 3.

3. Choix effectués pour le différents éléments

Dans cette partie, nous choisirons les différents éléments en s'appuyant sur la partie précédente. Pour cela, nous partirons de "la fin", c'est à dire des besoins en gaz pour une installation standard. Nous souhaitons avoir une capacité de fonctionnement d'une heure à pression nominale de 20 mbar. De ces caractéristiques imposées, les choix qui en découlent sont résumés dans le tableau suivant :

Éléments	Choix effectués	Raison	Modèle	Référence
Brûleur	Semi-rapide, débit nominal 150 l/h, pression 20 mbar	Permet de porter un litre d'eau à ébullition en 3,4 minutes et fournir 5367 kJ en une heure, brûleur le plus accessible		Annexe 3 *Partie 2.4*
Tuyaux d'acheminement au brûleur	Tuyaux de type tuyaux d'arrosage, fortement étanche	Permet de transporter le gaz depuis le réservoir jusqu'au brûleur		*Parties 2.3 et 2.4*
Filtre à H_2S	Filtrage par laine de fer	Filtre plus permanent que le charbon actif	Laine de fer dans un bidon au sein du circuit (avant réservoir)	*Partie 2.2*
Filtre à eau	Filtrage par condensation	Solution la plus simple directement intégrée au réservoir	Tuyaux incliné (matériaux indifférent)	*Partie 2.2*
Filtre à CO2	Filtrage par dissolution dans l'eau du réservoir	Solubilité du dioxyde de carbone plus importante que celle du méthane et cette solution est la plus simple.		*Partie 2.2*
Réservoir	Stockage par "flottaison" (solution 3)	Encombrement, prix, accessibilité, besoin d'un volume suffisant pour assurer le débit sortant	Réservoir de 60 L dans 120 L	Annexe 2 *Partie 2.3*
Bio-digesteur	Bidon troué étanche, équipé d'un robinet de vidange	Volume suffisant pour que les réactions soient assurées et vidange du digestat possible	Bidon d'au moins 60 L pour être en accord avec le réservoir	Annexe 1 *Partie 2.1*

Tableau 4. Récapitulatif des choix effectués en se basant sur les recherches bibliographique

En se basant sur ces choix, nous avons mené des recherches de matériaux et mis en place un protocole de réalisation d'un biométhaniseur low-tech accessible et réalisable par n'importe qui. Notre liste de matériel ainsi que le protocole de réalisation sont donnés en annexe 1.

4. Réalisations et expérimentations

Réalisation d'un digesteur Low-Tech (expérience 1) :

Durant le confinement, on a trouvé de quoi faire un digesteur qui est plus ou moins semblable à celui de notre tutoriel.

Pour ce qui est de la bouche et de la sortie de gaz, on a fait la même chose que dans le tutoriel. Concernant l'étanchéité, on a utilisé des joints au lieu d'utiliser de la pâte à joint. Cela fonctionne très bien et rend bien étanche le digesteur. Pour le trop plein et la vidange, on a directement utilisé un T, puis bouché avec un bouchon d'un côté et un tuyau d'arrosage de l'autre côté. Cela fonctionne parfaitement bien. Nous n'avons eu pour l'instant aucun résultat, car le digesteur n'était pas à une température suffisamment élevée pour que la réaction se fasse. Voici quelques images illustrant l'essai. On va remettre une nouvelle réaction en route afin d'avoir cette fois-ci des résultats et essayer de construire un réservoir pour stocker le gaz créé.

Réalisation d'un mini biodigesteur (expérience 2) :

Durant le confinement, on a souhaité construire un mini-biodigesteur pour tester le fonctionnement de la réaction. On a donc récupéré 2 bouteilles en plastique de 1,5L. La première bouteille (à gauche sur la photo) est remplie entièrement de fumier et d'eau. On a ensuite fermé la bouteille en attendant que la réaction se mette en route. A l'apparition des premières bulles, on a vidé une partie de la bouteille et rajouté 200 grammes d'épluchures de patates ainsi que de l'eau. On a relié la première bouteille à la seconde. La seconde bouteille est ouverte en dessous et est plongée dans l'eau. Après 48h, la seconde bouteille s'est soulevée, preuve que la réaction a produit une certaine quantité de gaz (difficile à déterminer ~ 0,75L). Sur la photo, le trait noir sur la seconde bouteille indique le niveau de l'eau au début de la réaction.

PARTIE ETUDE D'IMPACT

Étudions maintenant l'impact qu'aurait notre prototype à la fois en terme économique et environnemental.

1. Aspect économique

Si on prend un brûleur de puissance P = 1.6 kW (brûleur que l'on aurait choisi) et qu'on l'utilise 20 minutes par jour, cela fait une énergie utilisée de$1.6 * \frac{20}{60} = 0.53\ kWh$ par jour.
Si l'on ramène cette énergie consommée par mois (en multipliant par 7 et par 4), cela nous donne **14.93 kWh consommés en 1 mois par le brûleur.**

On peut alors regarder le prix du kWh fourni par EDF, il est d'environ 0.155 € (pour simplifier, entre 0.14 et 0.16€).
On arrive à un total de 14.93*0.155 = **2.31€ par mois** : coût de l'électricité par mois pour faire fonctionner le brûleur par rapport à notre consommation.
Si on regarde alors à l'année, cela donne un coût total de 27.72€ et **sur 3 ans**, cela équivaut à un total d'un peu plus de **83€** (83.16).

Le biométhaniseur ne paraît donc pas très rentable économiquement si on utilise "peu" notre brûleur de base, on va dépenser beaucoup à la construction (entre 200 et 500€ selon la récupération de matériaux effectuée) de notre modèle, et la rentabilité à court terme ne sera pas assurée.

Bien sûr, la rentabilité de faire un biométhaniseur low-tech dépend du type de brûleur que l'on avait de base. En terme économique, si l'on a un brûleur qui a une puissance assez élevée et que l'on utilise fréquemment, on peut gagner beaucoup à faire un biométhaniseur low-tech (à condition que celui-ci soit assez alimenté en déchets alimentaires pour fonctionner)

En prenant alors un autre cas : un brûleur de 3 kW, assez classique sur le marché, en supposant que l'utilisateur va s'en servir en moyenne 10 minutes le matin, 15 minutes le midi et 15 minutes le soir.

Ainsi, on utilise notre brûleur de 3 kW pendant 40 minutes par jour, ce qui équivaut à une énergie journalière de $\mathbf{3 * \frac{40}{60} = 2\ kWh\ par\ jour.}$ Si l'on ramène ça au mois, on arrive à un total de **56 kWh consommés par mois.**

En sachant qu'1 kWh est fourni à 0.155€ environ par EDF, cela nous donne un coût de 8.68€ par mois pour cette utilisation du brûleur. Si l'on ramène ça à l'année et sur 3 ans : à l'année, cela représente un coût de 104.16€, tandis que **sur 3 ans, cela représente un coût de 312.48€.**

Pour récapituler, voici deux tableaux qui résument les consommations de chacun des brûleurs, avec les économies possibles par mois et par an.

Pour un brûleur d'une puissance de 1.6 kW :

Utilisation/ jour	NRJ / jour	NRJ / mois	€ par mois	€ par an
20 min	0.53 kWh	14.93 kWh	2.31€	27.72€
40 min	1.06 kWh	29.86 kWh	4.62€	55.44€

Pour un brûleur d'une puissance de 3 kW :

Utilisation/ jour	NRJ / jour	NRJ / mois	€ par mois	€ par an
20 min	1 kWh	28 kWh	4.34€	52.08€
40 min	2 kWh	56 kWh	8.68€	104.16€

Cela paraît être une bonne idée de faire un biométhaniseur low-tech si on a une grande utilisation de notre brûleur et que celui-ci a une forte puissance… Les économies réalisées en électricité seront alors de l'ordre de 300€, si l'on voulait faire fonctionner ce brûleur pendant 3 ans à une consommation de 40 minutes par jour. A terme, le biométhaniseur est effectivement bien rentable. Mais l'aspect économique n'est pas le seul aspect à traiter, et le plus important reste l'aspect énergétique.

2. Aspect environnemental

2.1 Émissions équivalent CO2 évitées comparés à l'utilisation du gaz de ville

Sur le site EDF, on peut voir les émissions de CO2 équivalent par kWh selon le mois de l'année :

Par exemple, pour le mois de février 2020, on peut noter une émission de 15 grammes de CO2 par kWh. On peut choisir une valeur d'en moyenne 20 grammes de CO2 équivalent émis par kWh d'électricité fourni par EDF.

Ce qui nous amène à une consommation équivalente de 20*56*12 = **13.4 kg de CO2eq par année** pour un brûleur classique de 3 kW.

Ce total de 13 kg de CO2 équivalent par an pour ce type d'utilisation assez "intense" (40 minutes par jour, tous les jours), peut paraître assez faible si l'on compare à d'autres pôles d'émissions qui peuvent être fortement diminués.

Cependant, une autre source donne une valeur moyenne de 90 grammes de CO2 équivalent par kWh électrique, ne comptant pas simplement l'électricité fournie par EDF mais l'ensemble du cycle de vie, cela représente environ **60 kg de CO2** émis pour le même brûleur que précédemment, ce qui est un peu plus conséquent. A titre de comparaison, manger 1 plat contenant 100 grammes de boeuf émet 3 kg de CO2 équivalent.

Ces émissions de gaz à effet de serre évitées parce que l'on n'utilise pas le gaz de ville ne sont pas les seules. En effet, il faut aussi prendre en compte les émissions évitées par la valorisation des déchets, c'est-à-dire les intrants de notre bio-méthaniseur.

2.2 Emission évitées et avantages du recyclage de nos déchets

D'après un rapport de l'Ademe sur les émissions évitées par la valorisation des déchets, on peut les valoriser, entre autre grâce à la production de biométhane.

Cette valorisation peut être effectuée via :

- Le méthane produit directement, sous forme de chaleur ou d'électricité
- Le compost : une fois que la méthanisation a eu lieu, les déchets organiques récupérés peuvent être utilisés comme compost, en lieu et place d'engrais synthétique.

Concernant le méthane, l'Ademe a calculé l'énergie produite et les émissions évitées pour une certaine masse de déchets traitée par méthanisation : ramener ces calculs à 1 tonne de déchets, cela représente 44 kg CO2eq par tonne de déchet.

De plus, si l'on s'intéresse au compost, on produit approximativement 510 kg de compost par tonne de déchets. En supposant que ce compost produit prend totalement la place d'engrais synthétique, on peut économiser des émissions équivalentes de 33 kg CO2eq par tonne de déchet.

Au total, pour 1 tonne de déchet, ce seront 77 kg de CO2 équivalent qui seront évitées, et ce simplement en considérant la valorisation des déchets.

En connaissant les tonnes de déchets alimentaires jetés chaque année, que ce soient par foyer ou dans la restauration collective notamment, on est maintenant sûr que le dispositif sera très intéressant : si par exemple, le prototype du biométhaniseur utilisait les déchets organiques produits par le Crous de GreEn-ER (restaurant universitaire de l'Ense3), alors l'impact en terme d'émissions de CO2 équivalent serait assez élevé, et donc cela paraît très intéressant de développer le méthaniseur à grande échelle, notamment pour utiliser toute cette masse de déchet non valorisée.

Il est cependant difficile d'estimer les émissions évitées par un biométhaniseur pour un foyer unique, mais on peut dire que celui-ci permettrait d'éviter chaque année entre 5 et 20 kg de CO2 équivalent émis, selon l'utilisation, et pour une estimation basse.

PARTIE GESTION DE PROJET

1. Présentation rapide de l'équipe

L'équipe du projet *Lowtech - Biogas producer* est constituée de 8 membres : 8 étudiants de deuxième année à l'ENSE3. Nous venons de diverses filières de cette école : 5 membres viennent de la filière *Hydraulique Ouvrages et Environnement* (HOE) : *Mayeul, Paul, Grégoire, Zoé* et *Laurie,* 2 membres du projet viennent de la filière *Systèmes Energétiques et Marché* (SEM) : *Jeanne* et *Quentin,* et un membre vient de la filière *Mécanique et Energétique* : *Agathe*. Cette diversité de provenance des filières, avec 3 filières de l'école représentées nous a permis d'avoir un point de vue plus global sur notre projet.

De plus, outre les compétences techniques développées durant notre scolarité, par exemple la mécanique des fluides pour les HOE et ME, des compétences annexes telles que la réalisation de dessins ou la rédaction viennent se greffer à celles-ci et permettent une réelle efficacité dans le projet.

En ce sens, notre équipe fait preuve d'une vraie complémentarité, certains étant plutôt doués pour rédiger des rapports, d'autres pour faire des croquis à la main ou via ordinateur, et d'autres encore pour du montage.

2. Répartition des rôles

Pour une organisation efficace, nous avons dès le premier jour et le lancement des projets d'ingénierie fait une réunion durant laquelle nous avons nommé des responsables : une chef de projet, il s'agit de *Jeanne*. Nous avons également un responsable technique : *Mayeul,* un responsable finance : *Quentin* et enfin une secrétaire : *Agathe*.

Chacune de ces responsabilités est essentielle au bon fonctionnement du projet. La chef de projet se doit d'avoir un regard global sur le projet, elle doit pouvoir donner des directives, relancer les différents pôles si cela n'avance pas assez vite, et finalement coordonner les membres, c'est notamment elle qui dirigeait les réunions selon l'ordre du jour prévu.

Le responsable technique s'occupait, comme son nom l'indique de toute la partie technique. Il a donc supervisé le projet dès que l'on avait terminé la partie bibliographie, en donnant des directives sur les plans à fournir pour notre prototype, et il était disponible pour répondre aux éventuelles questions.

Le responsable finance, lui s'occupait du budget du projet. Il devait passer les commandes auprès du service finance de l'Ense3 et s'assurer que le budget du projet était respecté. Il s'agissait donc

de tenir des comptes et d'envoyer des mails régulièrement pour pouvoir récupérer les bons de commande.

Enfin, la secrétaire se chargeait de rédiger les comptes rendus de chaque réunion que l'on faisait, pour garder une trace écrite de tout ce qui se disait et pour savoir quelle tâche était affiliée à telle personne. Cela permettais à tous les membres du projet, mais aussi au porteur de projet de suivre l'avancement du projet. La secrétaire s'est aussi chargée de faire des bilans de chaque journée de travail. On peut voir un exemple de compte-rendu en annexe 6 (page 45)

3. Structuration du projet

Ces divers rôles servent donc à structurer le projet et nous permettent d'atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés. Il s'agissait notamment de constituer une bibliographie scientifique crédible et référencée, d'éditer une notice complète de construction de notre prototype, de construire ce prototype et de présenter le projet durant une conférence centrée sur les Low-tech ayant lieu début juin. En outre, pour atteindre ces objectifs, nous nous sommes appuyés sur des outils de gestion de projet, et notamment la création d'un diagramme GANTT qui nous a permis de planifier chacun des objectifs, avec des sous-objectifs à atteindre pour toujours rester dans les clous et avoir les livrables demandés à temps. Le diagramme GANTT est disponible en annexe 5 (page 44), il y en a deux versions : la première faite dès les premières semaines et qui nous a permis de suivre une ligne directrice et qui a été très utile, notamment pour le rendu des premiers livrables, cette version ayant été mise à jour tout au long des semaines si l'on prenait un peu de retard dans les diverses tâches.

La seconde version du diagramme GANTT est l'adaptation que l'on a dû faire du projet suite à la pandémie de Covid-19 sévissant depuis Mars 2020 en France. Nous ne pouvions par exemple pas construire le prototype du biométhaniseur comme nous l'avions prévu au début de l'année, mais à la place, nous avons essayé de faire des expériences sur des parties séparées du prototype pour vérifier notre étude théorique. Ainsi, nous avons réussi à trouver de nouveaux objectifs malgré la situation assez critique pour nous, nous allions entamer la construction de notre prototype à l'annonce de la fermeture de l'école, ce qui nous a quelque peu ralenti, mais nous avons réussi à proposer des livrables intéressants, que ce soit la bibliographie assez complète ou la notice de construction de notre prototype qu'un futur groupe d'étudiants pourrait utiliser.

4. Comment avancer efficacement durant le projet ?

Nous avions une journée entière prévue pour avancer sur le projet, tous les Mercredis, nous nous réunissions en début de journée. La première chose que nous faisions était une réunion entre les membres du projet uniquement pour mettre toutes les choses à plat : ce qui a été fait ou pas encore fait durant la semaine qui s'est écoulée, les avancées de chacun et un retour des divers pôles qui auraient

été définis auparavant. Cette réunion permettait aussi de préparer la journée à venir : quels sont les objectifs du jour, qu'est-ce que l'on veut avoir fini à la fin de cette journée. Cette journée dédiée chaque semaine devait être bien organisée, il ne fallait pas perdre de temps et les rôles décrits précédemment permettaientt cela. Si besoin, nous organisions des réunions ponctuelles, en visioconférence le week-end, par exemple en période de rush, si l'on devait rendre un livrable en début de la semaine qui suivait. Un exemple de CR de réunion est donné en Annexe 6.

En plus des réunions que nous faisions donc en début de journée avec les membres du projet, nous avions un autre temps dans la journée avec le porteur de projet, Martial Balland, qui nous remotivait chaque semaine et donnait ses retours sur notre avancée, voire corrigeait certaines parties. De manière occasionnelle, Kévin Loesle assistait à ces réunions et apportait un point de vue supplémentaire.

5. Gestion du budget

Nous avions, comme tous les projets d'ingénierie proposés par l'école, un budget alloué fixé à 250€ de base mais qui pouvait aller jusqu'à 500€. Concernant notre projet, un des objectifs était de récupérer un maximum de matériaux (et donc d'en acheter le moins possible) pour construire notre prototype en restant dans l'idée des low-tech. Le budget initialement prévu pour notre projet est disponible à l'annexe 4 (page 32), le budget prévu pour ce projet était donc d'un peu moins de 300€, dépassant les 250 initialement autorisés, mais compte-tenu de l'envergure du prototype à réaliser, c'était bien justifiable.

Ce budget a été atteignable par la récupération d'une partie non négligeable du matériel nécessaire, matériel que nous avons récupéré avant le confinement et qui pourra être récupéré soit par le Low-tech lab de Grenoble qui ont proposé le projet à l'école, ou bien au prochain groupe d'étudiants, s'il y en a un, l'année prochaine. En effet, nous n'avons pas pu entamer la construction du prototype et n'avons pu commander qu'une partie du matériel.

6. Gestion des ressources

Nous avions de nombreuses ressources à notre disposition, ressources qu'il fallait bien gérer. La première ressource, nous l'avons déjà abordée, mais c'est la pluralité des membres constituant le projet, venant de diverses filières, chacun apporte ses compétences et son expertise. Nous avons également des ressources humaines extérieures au projet : notre porteur de projet, Martial Balland et son collègue fondateur du Low-tech lab de Grenoble, Kévin Loesle qui nous ont donné de nombreux conseils tout au long du projet, en nous replaçant sur la bonne direction quand il le fallait.

Concernant des ressources matérielles, chacun des membres a effectué en début de projet la formation pour pouvoir accéder au Fablab, et nous comptions utiliser celui-ci, dont l'ouverture était

prévue en février-mars pour la partie prévue pour les « gros travaux ». Nous aurions pu utiliser ce local comme espace de stockage pour notre matériel et nous servir de ce lieu pour pouvoir avancer sur le prototype tous ensemble. Nous avions également un accès au Low-tech lab de Grenoble, qui aurait pu nous prêter des outils dont nous aurions eu besoin, mais également un peu d'espace si nécessaire, pour construire des parties du prototype. Malheureusement, nous n'avons pas pu profiter pleinement de ces ressources matérielles en raison du confinement.

Enfin, pour les ressources documentaires par rapport à notre sujet, elles étaient très limitées : en cherchant un peu au début, les essais sur le prototype que nous voulions créer étaient assez rares, et nous avons dû créer cette bibliographie qui n'existait pas encore de façon complète et détaillée sur internet, bibliographie qui permet de présenter les choix que l'on a effectué, les justifications de ces choix, que ce soit par optimisation en terme de facilité d'obtention des matériaux, ou en terme de rentabilité.

7. Risques potentiels durant le projet

Le risque principal que nous avions identifié au départ était le manque de documentation concernant ce type de technologie et surtout le manque de documentation synthétique et certifié. Ainsi nous devions construire notre plan et nos calculs en se basant sur des chiffrages et des ressources théoriques parfois un peu "bancales". Ce risque a été clairement identifié dès le début du projet et a également représenté une motivation puisque notre porteur de projet nous a challengé à ce sujet. Le but du projet était donc non seulement de produire un biométhaniseur mais également de développer un outil théorique et une notice solide afin de promouvoir les low-tech comme véritable enseignement scientifique. Le rendu de notre travail étant alors censé être : un document en open-source, ce rapport, un prototype ainsi qu'une intervention lors d'une conférence "La place des low-tech dans l'enseignement".

Une fois l'obstacle du dimensionnement et des recherches théoriques franchi, le risque suivant s'est présenté lors de la liste de matériel. En effet, trouver l'ensemble du matériel, dans les bonnes dimensions, en récupération et/ou à faible coût a été un nouveau défi pour notre équipe.

Enfin, le risque qu'aucun d'entre nous n'avait identifié au départ était que nous ne puissions pas produire de prototype. C'est cependant ce qui est arrivé puisque la crise du Covid-19 nous a empêché de passer commande et de construire (comme expliqué en partie structuration du projet). Nous développerons plus en détail ce problème dans la partie suivante.

8. Gestion de crise du Covid-19

Suite à l'annonce du confinement, survenue à l'aube du début de la construction, nous nous sommes retrouvés face à la problématique du manque de matériel, de l'impossibilité de le commander et du manque de lieu de travail où se regrouper. La première solutions nous a semblé être d'enrichir

notre partie théorique, cependant cela ne correspondait pas à l'esprit du projet et du challenge que nous avait lancé notre porteur de projet de promouvoir efficacement les low-tech. Ainsi, nous avons relancé des démarches pour commander le matériel, avons accéléré le processus de rédaction de la notice et de dessins des plans afin d'être prêts si l'opportunité se présentait. Encore une fois, nous nous sommes trouvés dans l'impossibilité de commander le matériel. Nous avons donc mené en parallèles quelques recherches technico-économiques pour étoffer notre étude et lui ajouter un bagage supplémentaire à notre argumentaire.

Nous avons ainsi produit plusieurs documents théoriques, notices, … afin que, malgré la fin de l'année scolaire, Martial ou nos successeurs sur ce projet aient à disposition tout le bagage théorique et la notice pour pouvoir construire le prototype.

Concernant la conférence qui a lieu en Juin, nous devions trouver la manière de promouvoir les low-tech, étant amputés de notre prototype. Nous avons donc fait le choix pour la conférence qui aura lieu sous forme de webinar d'axer la réflexion sur notre retour d'expérience et sur une promotion des low-tech en général, tout en mettant l'accent sur le travail qu'il reste à faire.

9. La suite

La conférence webinar aura lieu le 10 Juin, conférence au cours de laquelle nous ferons une intervention. Cette intervention aura pour but de valoriser cette expérience, rendre compte de notre investissement et de l'impact positif que ce projet a eu lors de notre formation. De plus, nous mettons en open-source sur le site du Low-tech lab ce rapport, la notice, ainsi qu'une vidéo qui valorisent les low-tech dans l'enseignement. Cette vidéo aura la forme de questions posées avec plusieurs réponses assez courtes, à la manière des vidéos Konbini.

Nous restons disponibles et prêts à aider les futurs constructeurs (via la communauté du Low-tech lab ou au sein de l'école) s'ils ont besoin de précisions additionnelles sur notre travail, voir même collaborer avec eux lors de la construction.

PARTIE ANNEXES

ANNEXE 1: PROFILS TYPES D'UTILISATION ET PRODUCTION DE BIOMÉTHANE ASSOCIÉE

Dans cette annexe, nous avons détaillé les différents profils types d'utilisateur, les intrants à leur disposition et ainsi le potentiel de production de méthane.

Masse volumique du méthane = 0,656 kg/m3

2.1.3.1. Pour un citadin

déchets accessibles	Nm^3 CH_4/tMO (volume de méthane en normal m^{3*} par tonne de déchet)	L de méthane pour 1 kg de matière (sous 1020 mbar, à 20°C)
fruits et légumes	310	31
huile alimentaire usagées	705	70,5
avoine	355	35,5
épluchures pomme de terre	350	35
orge	355	35,5
maïs	350	35
fane de betterave	350	35

Tableau 5. Intrants recommandés pour un citadin

2.1.3.2. Pour des habitants avec jardin

déchets accessibles	Nm^3CH_4/tMO (volume de méthane en normal m^{3*} par tonne de déchet)	L de méthane pour 1 kg de matière (sous 1020 mbar, à 20°C)	Remarques
fruits et légumes	310	31	
épluchures pomme de terre/ fane de betterave/ maïs	350	35	
huile alimentaire usagées	705	70,5	
Céréales	345	34,5	Orge (355)> Blé (345) > Seigle (313) > triticale (225)
Oléagineux	320	32	Colza (335)> Tournesol (300)
Gazon (Ray grass)	390	39	
paille	250	25	
trèfle vert	315	31,5	
prairie	310	31	

Tableau 6. Intrants recommandés pour un habitant avec jardin

Attention : Le colza dont les rendements en méthane peuvent être de 60%, s'accompagne de la concentration la plus élevée en H2S (600 ppmv) comparativement au blé d'hiver, au triticale, au seigle, au topinambour, au tournesol, à l'avoine de printemps et au maïs. Ainsi, la nature des végétaux utilisés en substrat principal ou en co-substrat est un facteur important pour la composition du biogaz.

2.1.3.3. Pour des habitants en pleine campagne

déchets accessibles	Nm^3CH_4/tMO (volume de méthane en normal m ^{3*} par tonne de déchet)	L de méthane pour 1 kg de matière (sous 1020 mbar, à 20°C)	Remarque
fruits et légumes	310	31	
épluchures pomme de terre/ fane de betterave/ maïs	350	35	
huile alimentaire usagées	705	70,5	
Céréales	345	34,5	Orge (355) > Blé (345) > Seigle (313) > triticale (225)
Oléagineux	320	32	Colza (335) > Tournesol (300)
Fourrage	300	30	Gazon (390) > Trèfle (350) > prairie (230)
paille	245	24,5	
Fumier	200	20	

Tableau 7. Intrants recommandés pour un habitant en pleine campagne

* N m ^{3} = normal mètre cube. Mètre cube de gaz dans les conditions normales de température et de pression (20°C - 103 mbar)

ANNEXE 2 : CALCULS DE DIMENSIONNEMENT DU RÉSERVOIR

On a $M = 25\ kg$,

$$F_1 = mg = P_1 * S$$

$$S = \frac{245{,}25}{2000} = 0{,}125\ m^2$$

Pour une surface circulaire, on a alors :

$$R = \sqrt{S/\pi} \sim 20\ cm$$

Pour une surface carrée, on a alors :

$$a = \sqrt{S} \sim 35\ cm$$

On cherche donc un réservoir 1 avec une base circulaire de 20 cm de rayon et une base carrée de 35 cm de côté.
On peut alors trouver la hauteur correspondante pour avoir un volume de 100L. avec la base précédente, on trouve h = 0,82 m.

On effectue les mêmes calculs sur un tableur et on trouve ceci :

Données		m	S (m²)	R (m)	a(m)	hauteur(m)	V(m3)
g	9,81	30	0,147	0,216	0,384	0,680	0,1
pression	2000	29	0,142	0,213	0,377	0,703	0,1
		28	0,137	0,209	0,371	0,728	0,1
		27	0,132	0,205	0,364	0,755	0,1
		26	0,128	0,201	0,357	0,784	0,1
		25	0,123	0,198	0,350	0,815	0,1
		24	0,118	0,194	0,343	0,849	0,1
		23	0,113	0,189	0,336	0,886	0,1
		22	0,108	0,185	0,328	0,927	0,1
		21	0,103	0,181	0,321	0,971	0,1
		20	0,098	0,177	0,313	1,019	0,1
		19	0,093	0,172	0,305	1,073	0,1
		18	0,088	0,168	0,297	1,133	0,1
		17	0,083	0,163	0,289	1,199	0,1
		16	0,078	0,158	0,280	1,274	0,1

Tableau 8. Dimensions possibles du réservoir

Pour une masse inférieure à 16 kg, on trouvait des hauteurs de R1 beaucoup trop importantes.
Pour des raisons pratiques, on réduit le volume des deux réservoirs à 60L pour le plus petit et 120L pour le plus grand. En effet, suite à nos recherches, il s'est avéré beaucoup plus simple de réunir un bidon de 120L et un de 60L plutôt que un de 100L et un de 200L, notre réservoir sera donc plus accessible, moins cher et moins encombrant. On pourra stocker moins de gaz, nous verrons les résultats lors de nos essais pratiques. Connaissant la surface, on dimensionne une masse de 14kg pour maintenir la pression requise.

ANNEXE 3 : CALCULS DE DIMENSIONNEMENT DU BRÛLEUR

Calcul du temps nécessaire pour faire bouillir de l'eau de 20 à 100°C sans pertes

Il faut une puissance de minimum 1,16 Wh pour faire chauffer l'eau de 1°C, de plus, il faut 334 kJ pour faire passer de l'eau de 20°C à 100°C (pour 1L d'eau) à 1 bar. Pour 5 L d'eau (500 g de pâtes) il nous faudra donc 1670 kJ pour faire chauffer l'eau de 20 à 100°C.
(Remarque : on ne prend pas ici en compte la chaleur latente de l'eau dans l'apport d'énergie nécessaire car il n'est pas nécessaire que l'eau soit pile à 100°C pour faire cuire des pâtes, il suffit que celle-ci en soit proche (nous approximerons dans nos calculs cette valeur par 100°C)
On calcule alors le temps de chauffage de l'eau en en utilisant les puissances des différents brûleurs :

	Rapide	**Semi rapide**	**Auxiliaire**
Temps de chauffage d'un litre d'eau de 20 à 100°C	334/2.9 = 115s = **1.9 min**	208.7s = **3.4 min**	334s = **5.6min**
Temps de chauffage pour 5L	1670/2.9 = 575s = **9.6min**	1043.75 = **17.4min**	1670s = **27.8min**

Tableau 9. Temps de chauffe de l'eau en fonction des brûleurs

Remarque : Ces temps de cuisson sont définis par les plaques et les différents types de brûleur, il y aura donc le même temps de cuisson sur un brûleur semi-rapide pour une plaque fonctionnant avec du gaz de ville.

Calcul des pertes thermiques dans la casserole

Pour les pertes, on a deux types de pertes au niveau de notre casserole, les pertes de chaleurs dues aux flux conducto-convectif et les pertes de chaleurs dues au flux de rayonnement. On considère que notre casserole est en inox et fait 16 cm de diamètre et 12.5 cm de hauteur, d'où la surface d'échange avec l'extérieur $S = 0{,}146\ m^2$.
En négligeant le flux de conduction de la casserole car il est très faible devant les autres, on a :

- $\varphi_{rayonnement} = e * 5.67e - 8 * S * (T^4 - Tmur^4)$ avec e=émissivité=0.32 pour l'inox
  d'où $\varphi_{rayonnement} = 0.2645\ J/s$ soit une perte de 158.7J par rayonnement en dix minutes

- $\varphi_{convection} = h * S * \Delta T$ avec $h = 10\ w/(m^2 * K)$)
  d'où $\varphi_{convection} = 10 * 0.146 * 80 = 116.8W$ soit une perte de 70 kJ par convection en dix minutes

On en déduit que les pertes représentent environ 1,3 % de l'énergie apportée par un brûleur semi-rapide, elles peuvent donc êtres négligées dans le temps d'une cuisson.

Conclusion et choix du brûleur

Théoriquement, nous préconisons selon les résultats précédent un brûleur semi-rapide avec un débit nominal de 150 l/h (et une pression de 20mbar)

On a donc une puissance fourni par celui-ci de 1.6 kW et une énergie libérée pour une heure de fonctionnement qui est de 5 367 kJ.

Avec ce brûleur, nous avons les temps de cuisson suivants :

- Pour passer 2.5 L d'eau de 20 à 100°C : Il faut une énergie de 835 kJ et donc, avec notre brûleur fonctionnant en puissance nominale un temps de 8,7 minutes pour chauffer l'eau.
- Puis, 10 minutes pour cuire des pâtes (on peut largement fournir l'énergie nécessaire pour maintenir l'eau à 100°C et ainsi contrer les pertes de chaleurs qui sont de 70 kJ pour 10 minutes)

Exemple type :

Une famille de 4 personnes veut se cuisiner des pâtes avec du steak, est-ce possible et en combien de temps ?
Nous préconisons pour ce genre de repas 400g de pâtes soit 100g par personnes et donc 4 litre d'eau. Si l'eau versée dans la casserole est froide (20°C), celle-ci va mettre sur un brûleur semi rapide (que ce soit sur une plaque de cuisson lambda ou avec notre biométhaniseur) environ 14 minutes à chauffer. Pour ce qui est des 4 steaks, si nous considérons que nous les faisons cuire 2 par 2, il faudra environ 8 minutes pour les faire cuire (4 minutes par steak pour une cuisson à point)

Vous pourrez donc manger après 32 minutes. C'est le même temps que si vous n'aviez qu'une seule plaque et que vous fonctionniez avec du gaz de ville ou Butane.

Remarque : si l'eau sort déjà chaude des conduits (50-60°C), le temps de chauffe sera bien inférieur.

Au niveau énergétique : il nous faut environ 1400 KJ pour faire cuire les pâtes ainsi que 768 kJ pour faire cuire les quatres steaks soit : 2168 kJ pour la totalité du repas.
Notre méthaniseur est donc capable de fournir l'énergie nécessaire pour effectuer cette cuisson.

ANNEXE 4 : LISTE MATÉRIEL, BUDGET ET PROTOCOLE DE RÉALISATION

1. Matériel

Après avoir mené des recherches bibliographiques et dimensionné notre biométhaniseur, nous avons tout d'abord cherché à rassembler le maximum de matériel de récupération, afin de s'inscrire dans une démarche low-tech. Suite à nos recherches, nous avons dressé une liste de matériel acquis et manquant et cherché les matériaux correspondant à notre dimensionnement chez les fournisseurs partenaires de l'école. Cette liste figure ci-dessous:

**** LISTE DE MATÉRIEL + BUDGET ** LOWTECH BIOGAS**

	ON L'A OU PAS ?	QUANTITE	MATERIAU	CARACTERISTIQUES	SITE WEB OU LE TROUVER	Prix à l'unité	Prix total
PARTIE DIGESTEUR	1	1	Colle PVC	*Tube de 125 mL*	eroymerlin.fr/v3/p/produits/colle-en-tube-pvc	3,30 €	3,30 €
	1	1	Pâte à joint plomberie	*Tube de 20 mL*	otable-20-ml-geb-e1401469338?fbclid=IwAR2	8,35 €	8,35 €
	1	1	Tuyau pour gaz (butane/propane)	*Longueur 5m, diamètre qq mm trop petit*	/v3/p/produits/tuyau-flexible-5-m-butane-prc	30,90 €	30,90 €
	1	1	Bouchon PVC	*Diamètre de 50 mm*	erlin.fr/v3/p/produits/bouchon-en-pvc-a-colle	1,02 €	1,02 €
	1	2	coude 90°	*Diamètre de 50 mm*	3/p/produits/coude-90-en-pvc-a-coller-femell	1,21 €	2,42 €
	1	1	coude 45°	*Diamètre de 50 mm*	3/p/produits/coude-45-en-pvc-a-coller-femell	1,52 €	1,52 €
	X	1	Palette		A trouver en récup?		
	X	1	Contre plaqué	*Plaque de contreplaqué 250*122cm*	duits/panneau-contreplaque-ordinaire-ep-10-	12,90 €	12,90 €
	X	1	Vis		ts/lot-de-100-vis-acier-tete-fraisee-pozidriv-sp	6,10 €	6,10 €
	1	1	Isolant		// RECUP // RECUP // RECUP //		
	1	1	Tuyaux PVC	*Diamètre de 50 mm et longueur d'1m*	.fr/v3/p/produits/tube-d-evacuation-pvc-dian	6,15 €	6,15 €
	X	1	Manchon PVC à coller	*Diamètre 50 mm*	r/v3/p/produits/manchon-en-pvc-a-coller-fen	0,60 €	0,60 €
	X	1	Raccord Y	*Diamètre 50 mm F-F*	roduits/culotte-de-branchement-45-en-pvc-a-	2,70 €	2,70 €
	X	1	Gros réservoir	*Volume de 60L*	/p/produits/fut-de-maceration-aerien-garanti	28,30 €	28,30 €
	X	1	Bouchon PVC	*Diamètre de 63 mm*	nerlin.fr/v3/p/produits/bouchon-en-pvc-a-coll	5,85 €	5,85 €
	X	4	Raccord droit à glissement pour tube per	*D 16 sorti 15*21*	https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/raccord-dr	2,30€	9,20 €
	X	1	mamelons à visser laiton M 15 x 21	*Diamètre de 15 mm*	https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/lot-de-2-m	1,95€	1,95 €
	X	6	Ecrout de 15mm	*Diamètre de 15 mm*	https://stmartindheres.entrepot-du-bricolage.fr/p-e	2,65€	15,90 €
	X	1	ccords coudés à visser laiton F 15 x 21/M 15 x 2	*Diamètre de 15 mm*	https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/lot-de-2-ra	4,50€	4,50 €
	X	1	Charnière		/p/produits/charniere-universelle-acier-pour-e	1,70 €	1,70 €
	X	1	Tuyaux bis	*Diamètre 15 mm*	https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/tuyau-cao	23,90 €	23,90 €
	X	4	Bagues de serrages	*Diamètre de 15 mm*	https://www.castorama.fr/2-colliers-de-serrage-dia	4,1	16,40 €
PARTIE FILTRE	1	4	Laine de fer	*Paquet de 100g*	ama.fr/paille-de-fer-fine-gerlon-100g/316398	3,59 €	14,36 €
	X	2	Bidons	*Volume entre 2 et 5L*	A trouver en récup?		
PARTIE RESERVOIR	1	1	Petit réservoir	*Volume de 60L*	// RECUP // RECUP // RECUP //		
	X	1	Gros réservoir	*Volume de 120L*	ama.fr/tonneau-de-chantier-bleu-120l/366097	29,90 €	29,90 €
	X	1	Débitmètre	*?*	?		
	1	1	Corde		// RECUP // RECUP // RECUP //		
	1	1	Attache pour la corde		// RECUP // RECUP // RECUP //		
	X	2	Vanne à gaz	1/2 Male male	https://stmartindheres.entrepot-du-bricolage.fr/p-v	2,90 €	5,80 €
	X	1	Robinet		https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/raccord-dr	19,20 €	19,20 €
PARTIE BRULEUR	X	1	Plaque de cuisson	*gaz de ville, 1 ou 2 feux*	?	- €	
	X	1	Manomètre	*Manomètre+réducteur de pression*	-%7c305250579545&gclid=CjwKCAjwmKLzBRE	34,50 €	34,50 €
	X	1	Lot de joints plan	*Lot de 10 joints caoutchouc 15mm*	https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/lot-de-10-j	2,00 €	2,00 €
	X	1	Raccord femelle/femelle pour le réducteur	*?*	?		
MATERIEL	X	1	Lot de scie cloche	*25 à 62 mm*	https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/scie-cloch	8,00€	8,00€
						TOTAL :	297,4 €

2. Notice et plans de construction

2.1 Protocole pour la partie digesteur

Plan général

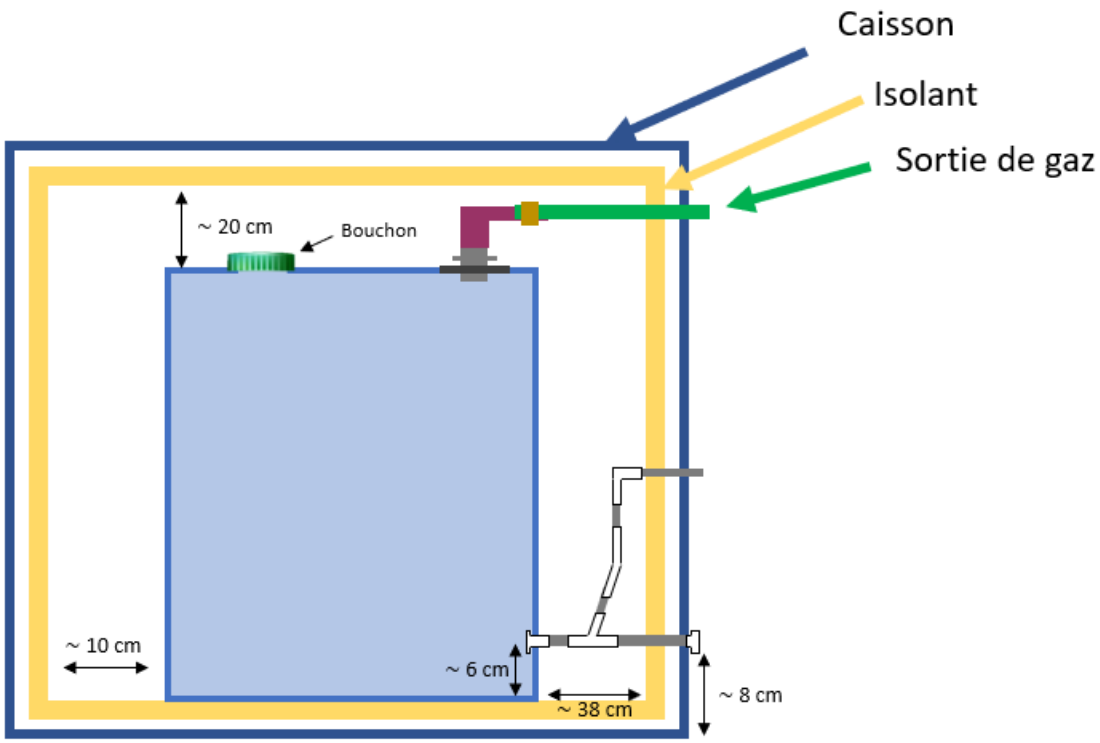


Photo d'un prototype pas totalement conforme au tutoriel

Matériel

1. Manchon PVC diamètre 50 mm
2. Raccord Y PVC diamètre 50 mm F-F
3. Coude 45° PVC diamètre 50 mm F-F
4. Coude 90° PVC diamètre 50 mm F-F
5. Tuyau PVC diamètre 50 mm

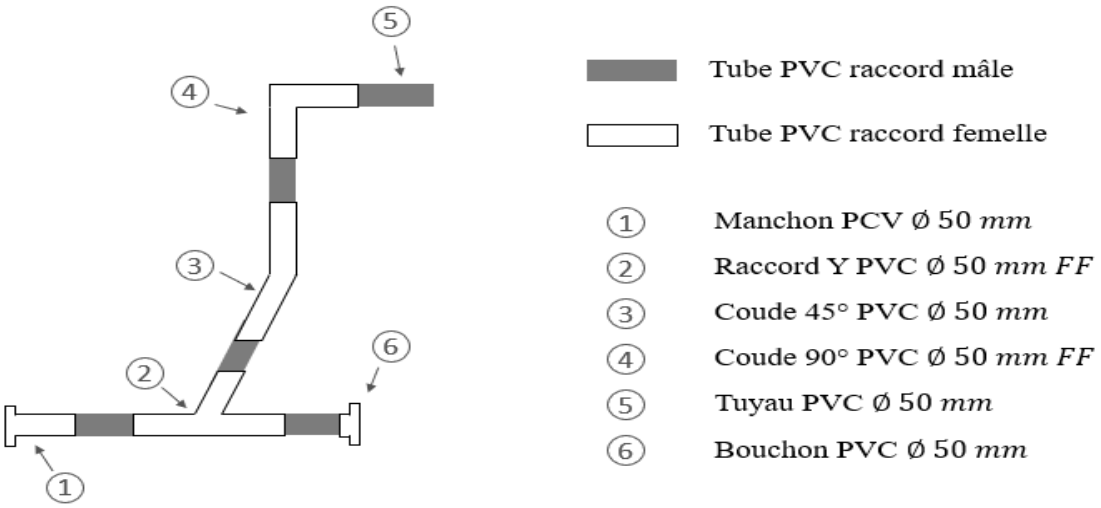
6. Bouchon PVC diamètre 50 mm
7. Bouchon pour intrant, PVC diamètre 63 mm
8. Mamelon à vis Mâle-Mâle diamètre 15/21 mm
9. Ecrou diamètre intérieur 21 mm
10. Raccord coude 90° Mâle-Femelle diamètre 15 mm
11. Tuyaux diamètre interne 21 mm
12. Plaque de contreplaqué 250*122 cm
13. 6 unités d'isolants de dimensions similaires à celles des découpes du contreplaqué
14. 12 cales en bois (parallélépipédique de côtés ≈ 5 cm) :
    a. 4 cales de longueur 875 mm
    b. 4 cales de longueur 600 mm
    c. 4 cales de longueur 900 mm
15. Palette pour le dessous du caisson

Outils conseillés et matériel supplémentaire

- Scie
- Scie cloche Ø=15 mm
- Colle PVC
- Perçeuse et embout adapté à vis

Montage

Étape 1 - Circuit de vidange



Trop-plein

Par analogie, le trop-plein représente le terminus du système digestif. A chaque fois que le système est nourri, un même volume de digestat quitte le biodigesteur. Pour faciliter l'entretien une sortie basse est réalisée. Elle permet de vidanger le digesteur.

- Faites un trou de 50mm de diamètre à 6 cm du bas du fût en plastique
- Placer le manchon PVC à l'intérieur de celui ci avec la collerette dans le fût en plastique. Appliquez de la col et de la pâte à joint afin que le raccord soit bien étanche au niveau du trou.
- Faire pénétrer un tuyau PVC (50mm) d'une dizaine de centimètre dans la prise femelle du manchon. Celui ci servira pour la vidange si besoin
- Mettre sur celui ci un raccord Y
- La partie horizontale du raccord est prolongée par un tube PVC (50 mm) d'une dizaine de centimètre puis muni d'un bouchon PVC (50 mm), c'est la vidange,
- Faire remonter la deuxième branche jusqu'au ⅘ du haut du biodigesteur. Pour cela, placé un tube pvc de 2,3 cm raccord mâle sur le Y. Puis placer à son extrémitée un coude à 45° (FF 50mm) afin d'être vertical. Placer sur celui ci un tuyaux en PVC de environ 45/50 cm. Puis un coude à 90 (FF 50mm) et enfin la sortie ou se deversera le digestat avec un tuyaux PVC de 5cm environ , Un tube PVC part vers l'extérieur, c'est par là que se déverse le digestat,
- Le trop-plein est plus bas que le couvercle du digesteur, il permet de maintenir un « ciel gazeux » et de ne pas avoir de matière organique dans le circuit de gaz.

<u>2ème possibilité pour le trop plein :</u>

- Faites un trou de 50mm de diamètre à 6 cm du bas du fût en plastique
- Placez le manchon/passe parois en y ajoutant des joints, du téflons (autour des raccords) ou du silicone afin d'être bien étanche. Puis placer un T sur la sortie.
- Bouchez un côté du T (cela servira pour la vidange), de l'autre côté placez un tuyaux d'arrosage montant jusqu'en haut du bidon qui servira de trop plein (bouchez le bien lorsque vous ne rajoutez pas d'aliment dans le biodigesteur).

Collage et étanchéité

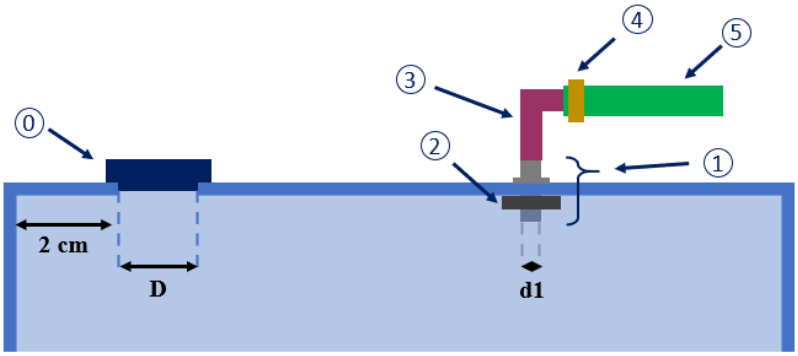
Si le système monté à blanc est satisfaisant il faut coller les éléments de PVC entre eux :

- Marquer chacun des raccords en faisant une croix sur la jonction, cela permet de remonter le système en respectant les alignements,
- Nettoyer les zones à coller,
- Coller à la colle PVC,
- Laisser sécher,

Il faut à la suite tester l'étanchéité :

- Boucher provisoirement la sortie du trop-plein (ex : chambre à air + collier de serrage), visser le couvercle d'entrée matière, visser le bouchon de vidange,
- Mettre le système sous pression à l'aide d'un compresseur en soufflant par la vanne gaz,
- Asperger les jonctions à l'aide d'un spray d'eau savonneuse, si des bulles se forment le collage n'est pas étanche, il faut le revoir.

Étape 2 - Sommet du bidon



⓪	Bouchon pour intrants, PVC Ø 62 mm
①	Mamelon à vis mâle-mâle Ø 15 mm
②	Ecrou Ø 15 mm
③	Raccord coude 90° M-F Ø 15 mm
④	Bague de serrage
⑤	Tuyau à gaz Ø 15 mm

Bouchon d'entrée des intrants (partie gauche)

Il s'agit de la partie qui permettra de remplir l'estomac avec les intrants. Il faut procéder de la façon suivante:

- Mesurer le diamètre extérieur du bouchons 7., D
- Percer la face extérieur du bouchon du bidon au diamètre correspondant (diamètre D mesuré précédemment) à une distance de 2 cm du bord du bidon
- Ajuster l'enfoncement du bouchon jusqu'à butée et compléter avec des la colle

Circuit de gaz (partie droite)

Ce circuit sera positionné à l'autre extrémité du bouchon et permettra de relier l'estomac au reste du bio-méthaniseur, notamment au réservoir. Il faut procéder de la façon suivante:

- Percer le trou pour le tuyau de gaz:
  - Mesurer le diamètre extérieur du mamelon d1
  - Percer le trou au diamètre d1
  - Enfoncer le mamelon 8. puis rajouter un joint plan et visser l'écrou 9. par l'intérieur
  - Si nécessaire, renforcer à la pâte à joint
- Visser le raccord coude femelle 10. sur le mamelon 8.
- Emboîter le tuyau de gaz 11. sur le raccord mâle et ajouter la bague de serrage

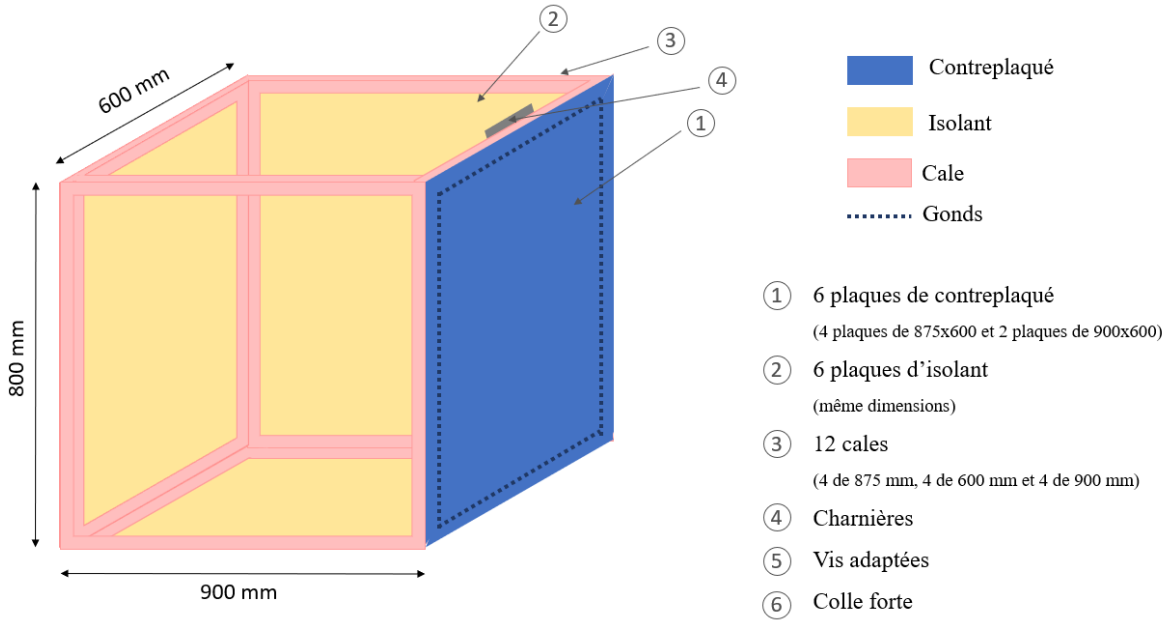
Photo du sommet du bidon (non raccordé au réseau)

Fixage final du bouchon du digesteur

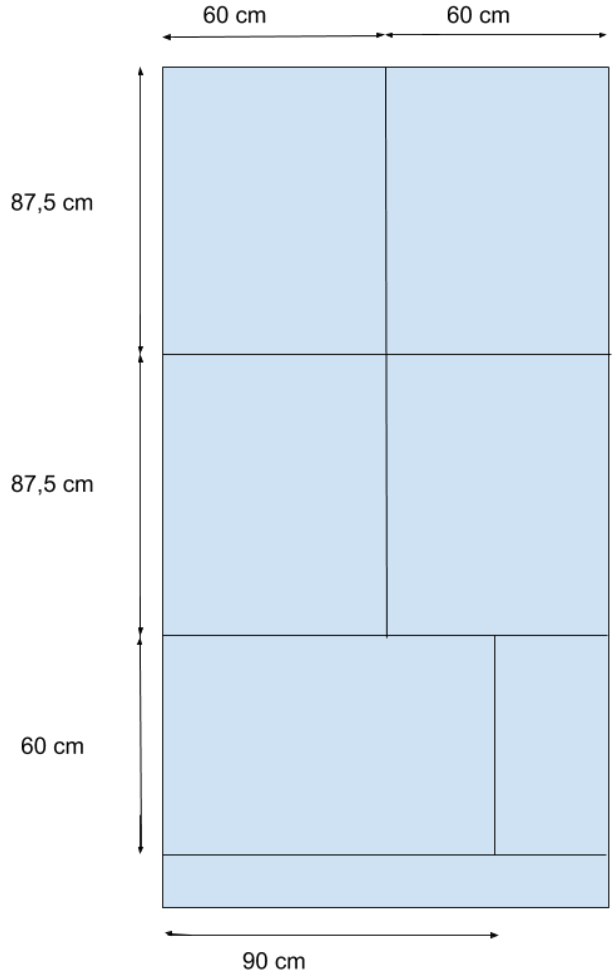
- Une fois le montage complet terminé, fixer le bouchon avec de la colle sur le bidon et renforcer avec la pâte à joint

A la fin du montage total du dio-méthaniseur, tester l'étanchéité du circuit gaz avec de l'eau savonneuse

Étape 3 - Caisson

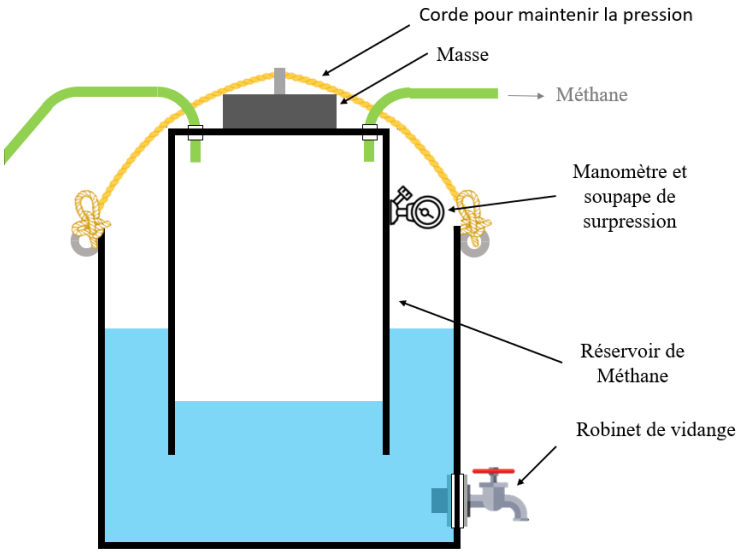


Nous avons choisi une plaque de contreplaqué de dimension 250 x 122 cm, à découper selon les mesures suivantes (pour les 4 faces latérales et le couvercle).



Pour le fond, utiliser une palette ou du bois de récupération.

2.2 Protocole pour la partie réservoir



Matériel nécessaire

1. Réservoir de 120 L
2. Réservoir de 60 L
3. Robinet avec passe paroie
4. corde (préciser la longueur dans la liste de matos)
5. Attaches pour la corde
6. Tuyaux diamètre interne 21 mm relié au digesteur
7. Tuyaux diamètre interne 21 mm relié au brûleur
8. Manomètre
9. Soupape de surpression
10. Pâte à joint
11. 2 vannes à boisseau
12. Masse de 14kg
13. Mamelon à vis Mâle-Mâle diamètre 15/21 mm
14. Ecrou diamètre intérieur 21 mm

Outils conseillés

- Scie
- Scie cloche Ø=15 mm

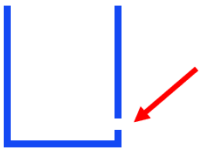
Montage

ETAPE 1 - *Préparation des bidons*

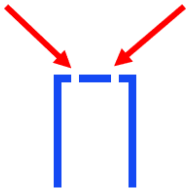
1. Ouvrir le dessus du gros bidon et le dessous du petit bidon

2. Faire un trou* sur le côté du gros bidon à 30 cm du dessous pour y insérer par la suite le robinet.

- Le diamètre va dépendre du robinet que vous avez acheté. Chez Leroy Merlin, vous pouvez acheter un kit robinet + passe paroi. Le diamètre du passe paroi détermine la taille du trou à faire.



3. Faire 2 trous de 15 mm de diamètre sur le dessus du petit bidon, une pour l'entrée de gaz et une pour la sortie.



ETAPE 2 - *Installation du robinet*

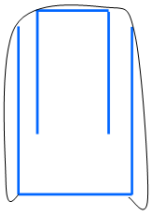
- Mettre le passe paroi adapté au robinet au niveau du trou du gros bidon.
- Visser le robinet sur le passe paroi

ETAPE 3 - *Installation du manomètre et de la soupape de surpression*

- Insérer la soupape de surpression sur un tuyau entrant ou sortant du réservoir (découpage du tuyau au préalable). Il faut effectuer la même manoeuvre pour le manomètre.

ETAPE 4 - *Mise en place des réservoirs et de la corde*

- Imbriquer le “petit” réservoir dans le grand
- Mettre la corde au dessus du petit bidon. Faire en sorte que la corde soit “lâche”



Remarque : la corde attachée tel quel est seulement pour illustrée l’instruction. Il peut être pratique d'attacher la corde autrement en fonction de la géométrie du bidon.

ETAPE 5 - *Branchement des tuyaux*

- Placer les mamelons dans les trous du petit réservoir.
- Visser un écrou à l'intérieur avec un joint
- Colmater avec de la pâte à joint
- Cf étape 2 partie digesteur pour plus de précisions.

ETAPE 6 - *Initialiser le réservoir avec le remplissage d'eau*

- Mettre de l'eau dans le réservoir de telle sorte que le niveau dans le chapeau et dans le réservoir soit à la même hauteur (cela se fait naturellement normalement). Faire en sorte de remplir quasiment en entier le petit réservoir (réservoir retourné).

ETAPE 7 - *Comment gérer le réservoir avec la masse pendant l'utilisation*

- Il peut être parfois nécessaire de changer l'eau. Pour cela, dès que vous le jugez nécessaire ouvrez le robinet tout en remettant de l'eau. (Si le niveau d'eau descend sous le bas du chapeau, tout le gaz produit sera perdu !)

2.3 Protocole pour la partie filtrage

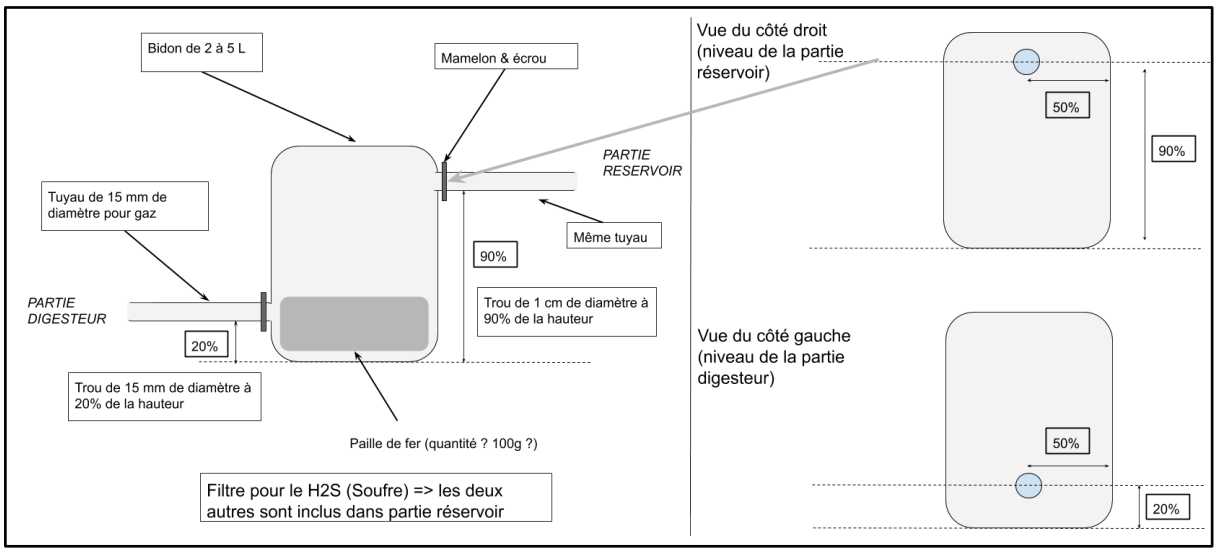
Matériel

1. Bidon de 2 à 5 litres
2. Laine de fer

Outils

- Scie cloche de diamètre 15 mm

Plan



Montage

ETAPE 1 - *Paille de fer*

- Mettre la paille de fer dans le bidon, 100 grammes comme précisé dans le dessin pour que le gaz passe dedans et soit filtré en soufre.

ETAPE 2 - *Percer les deux trous dans le bidon*

De la même manière qu'à la page 4 pour la partie estomac :

- Percer le trou pour le tuyau de gaz (voir pages 3 et 4, exactement même principe)
    - Mesurer le diamètre extérieur du mamelon d1
    - Percer le trou au diamètre d1
    - Enfoncer le mamelon 1. puis rajouter un joint plan et visser l'écrou 2. par l'intérieur
    - Si nécessaire, renforcer à la pâte à joint
    - Emboîter le tuyau de gaz 4. sur le raccord mâle et ajouter la bague de serrage

=> Cette étape s'effectue pour les deux trous que l'on peut voir sur le dessin ci-dessus, pour raccorder les parties estomac et digesteur à notre bidon qui sert de filtre.
On effectue la même démarche pour le filtre au dioxyde de carbone en remplissant le bidon d'eau.

ANNEXE 5 : PARTIE GESTION DE PROJET - DIAGRAMMES DE GANTT

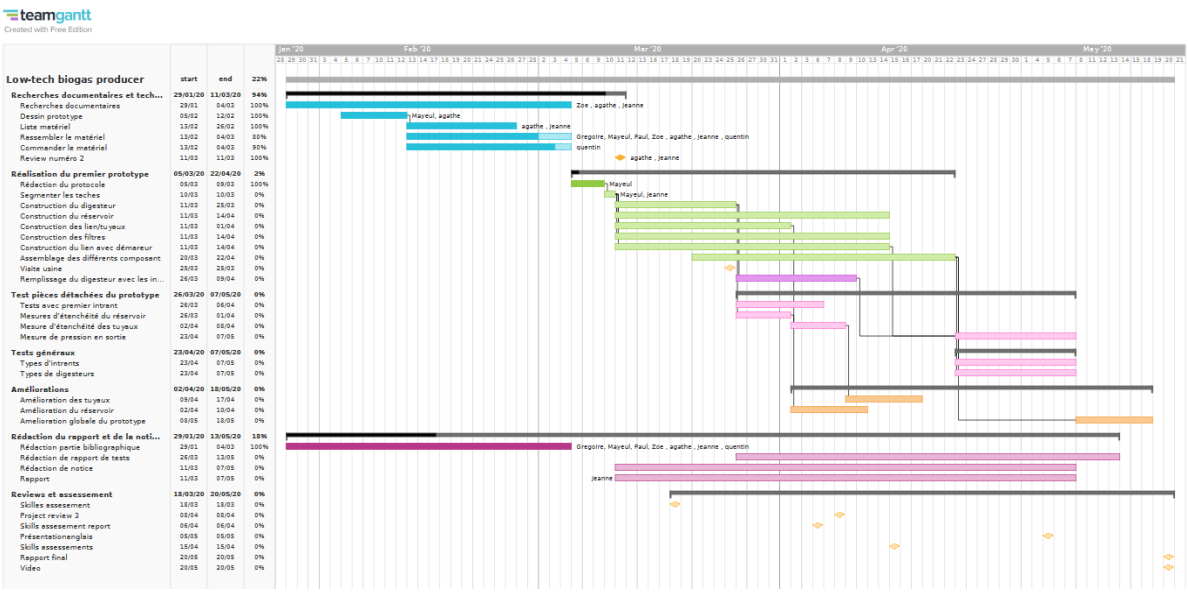


Diagramme de Gantt avant confinement

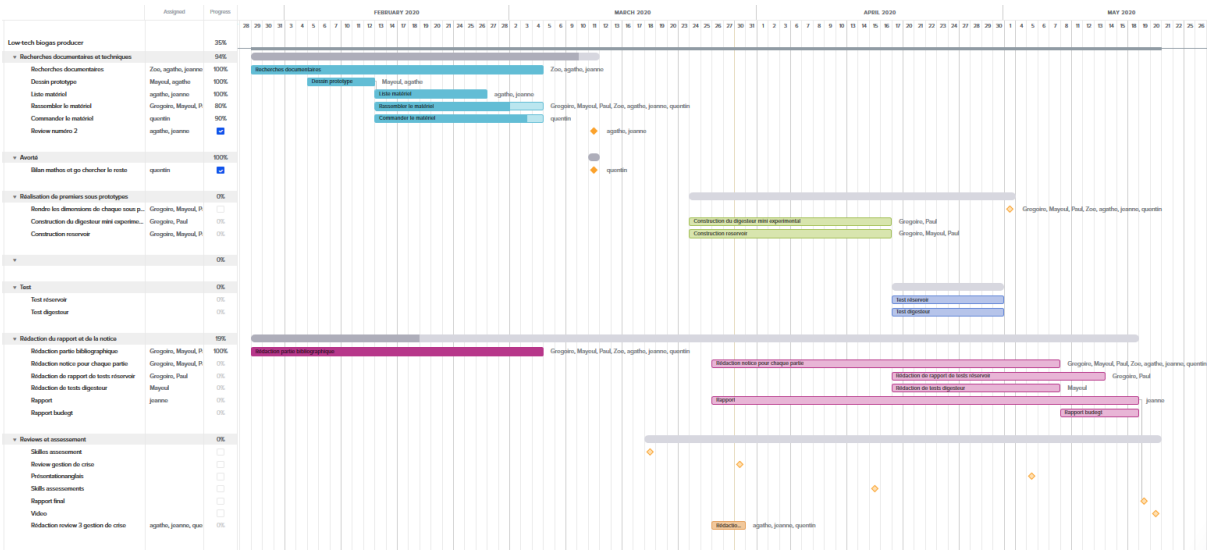


Diagramme de Gantt pour la gestion du confinement

ANNEXE 6 : PARTIE GESTION DE PROJET-CR DE REUNION

Compte rendu de réunion 2020_03_04

Réunion reporté au 25 mars à 14h
-> prévenir Martial et Kévin
-> demander à la dame de la visite d'être accompagné par l'expert et leur envoyer la liste de questions
-> Filmer la visite si possible

A faire aujourd'hui (fin de journée):
→ aller chercher commande chez Leroy Merlin (Mayeul + Quentin)
→ aller récup matos chez euroconfort (qui veut)

A faire pour la réunion prévue ce week end:
→ relecture de chacune des partie de la bilio par son auteur respectif ainsi que le tableau récap page 3 (tous)
→ relecture et reformulation du livrable pour la semaine prochaine (dans le dossier présentation) (tous)

A faire lors de la réunion prévue ce week end:
→ retour sur les relectures et conclusion rapport + diapo + compte rendu
→ définition du protocole de réalisation
→ affectation des tâches pour mercredi

A faire d'ici la prochain séance:
→ entraînement pour la présentation (lundi ou mardi midi)

Notes et références

[1] **François PERRON**, Novembre 2010. *Potentiel énergétique et gains environnementaux générés par la biométhanisation des matières organique résiduelles au québec, Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement.*
https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2010/Perron_F__17-11-2010_.pdf

[2] **Christophe MAGDELAINE**, Dossier mis à jour le 21/05/2018. *La méthanisation ou fermentation des déchets pour produire du biogaz / biométhane*
https://www.notre-planete.info/ecologie/dechets/methanisation-biogaz.php

[3] **Guillaume Bastide pour l'ADEME**, Mis à jour février 2015, *Fiche technique de la méthanisation*
https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique-methanisation-201502.pdf

[4] **Jean-Jacques GODON,** *Aspects biochimiques et microbiologiques de la méthanisation*
https://complements.lavoisier.net/La_methanisation_Extrait_du_chapitre_2.pdf

[5] **Site NENUFAR**, *Traitement du biogaz*
http://nenufar-biogaz.fr/note-technique-2-le-traitement-du-biogaz/

[6] **Fabienne MULLER pour l'ADEME**, publication en octobre 2011, *Qualité agronomique et sanitaires de digestats.*
https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/79519_qualite_digestat_rf_octobre_2011.pdf

[7] **Bureau d'étude SAS Saint-Louis energies,** Dossier établie en 2017 avec le concours du bureau d'étude, *Dossier de demande d'autorisation environnementale*
http://www.isere.gouv.fr/content/download/37656/271655/file/2%20-%20Lettre-demande_SLE_v2_29012018.pdf

[8] **GRDF**, *Outils de simulation du potentiel de production de bio-méthane*
https://www.grdf.fr/acteurs-biomethane/estimer-potentiel-production-biomethane

[9] **Wendy LAPERRIERE**, Février 2018, *Évaluation des limites d'un digesteur biogaz pour une utilisation flexible dans un réseau local de production d'énergie, Thèse présentée à l'université de Montpellier*
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01704573/document

[10] **Grégoire NOBLE**, le 01/12/2017 et modifié le 22/10/2018, *Un méthaniseur domestique pour transformer ses déchets en électricité*

https://www.batiactu.com/edito/un-methaniseur-domestique-transformer-ses-dechets-electricite-46640.php

[11] Auteur inconnu, Site instructable living, *Biogas Digester*
https://www.instructables.com/id/Biogas-Digester/

[12] **Site du low-tech lab open source**, Publié le 01/03/18 et mis à jour le 222/10/19, *Notice de conception biodigesteur*
https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Biodigesteur/fr

[13] Rapport par **GRDF et ADEME**, Version 19/08/201, Faisabilité du projet d'injection – Considérations générales
http://www.smartgrids-cre.fr/media/documents/dossiers/biomethane/Techniques_d_epurations.pdf

[14] **Nicolas DUPONT**, Avril 2013, *Valorisation du biogaz de fermentation : combustion catalytique, Thèse délivrée à l'université Claude Bernard LYON 1*
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00816867/document

[15] **Whirlpool,** Tableau de puissance injecteur, page 6, *Mode d'emploi injecteur Whirlpool*
https://docs.whirlpool.eu/_doc/501971901248F.pdf

[16] **Sogedis**, *Fiche technique utilisation brûleur*
https://pdf.sogedis.fr/notice/VEST%2052038106.pdf

[17] **Boulanger**, *fiche technique utilisation brûleur Brandlt*
https://www.boulanger.com/ecommerce/notices/8/3660767539068_n_0.pdf

[18] **Continental Edison**, *Fiche technique brûleur continental edison*
https://i6.cdscdn.com/imagesOK/notice/continental-edison-cectg4wix-table-gaz-4-foyers-3606509412480.pdf

[19] **Ademe**, *Emissions évitées par la valorisation des déchets*
https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?emissions_evitees.htm

* Ce document est en open source sous licence Creative Commons CC-BY[1].
Vous êtes libre de partager : copier, distribuer et communiquer le matériel par tous moyens et sous tous formats ; vous pouvez adapter : remixer, transformer et créer à partir
du matériel pour toute utilisation, y compris commerciale.
Vous devez créditer l'OEuvre, intégrer
un lien vers la licence et indiquer si des
modifications ont été effectuées à l'oeuvre. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que Le Low-tech Lab Grenoble vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé
son OEuvre.
1. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Ce document est en open source sous licence Creative Commons CC-BY[1].

Vous êtes libre de partager : copier, distribuer et communiquer le matériel par tous moyens et sous tous formats ; vous pouvez adapter : remixer, transformer et créer à partir du matériel pour toute utilisation, y compris commerciale.

Vous devez créditer l'OEuvre, intégrer un lien vers la licence et indiquer si des modifications ont été effectuées à l'oeuvre. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que Le Low-tech Lab Grenoble vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son OEuvre.

1. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/