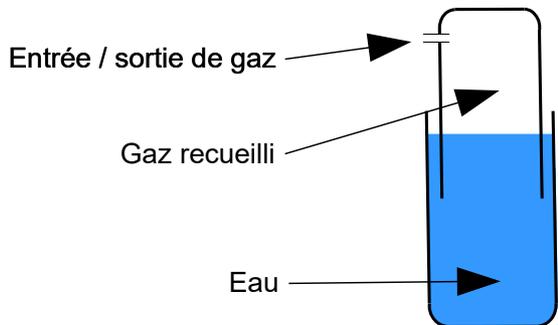
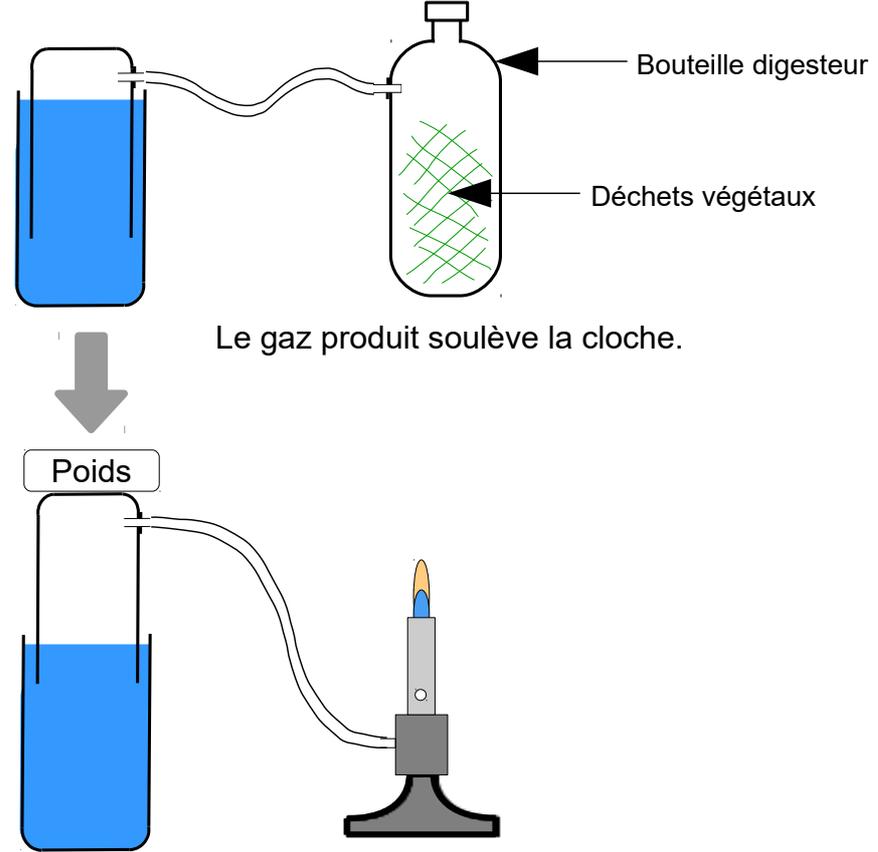


Journal de nos expériences

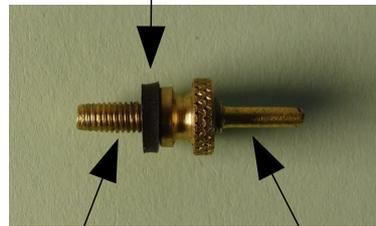
Lundi 05/10/15	<p>Pendant la première heure de T.P.E. en classe : recherche des expériences déjà réalisées au sujet de la méthanisation.</p> <p>Conception de notre propre expérience, élaboration du protocole et choix du matériel. Le (ou les) digesteurs seront constitués de bouteilles de 2L avec un goulot large, facilitant l'insertion des déchets végétaux. Le gaz sera recueilli sous une cloche s'inspirant du principe du gazomètre :</p>
	 <p>La cloche, constituée d'une demi-bouteille, coulisse dans une autre demi-bouteille. L'étanchéité est assurée grâce à l'eau.</p>
	<p>Ce système peut servir à la fois pour recueillir le gaz produit lorsqu'il est connecté au digesteur, et à faire sortir le gaz sous faible pression, en plaçant un poids sur la cloche et en la connectant à un brûleur :</p>
	 <p>Le gaz produit soulève la cloche.</p>
	<p>Une fois la cloche pleine, on la connecte à un brûleur pour tester la présence de méthane.</p>
Lundi soir	<p>Fabrication de la cloche « gazomètre » à partir de deux demi-bouteilles en plastique coulissant l'une dans l'autre.</p>



Les deux parties du système de récupération du gaz, séparées puis réunies

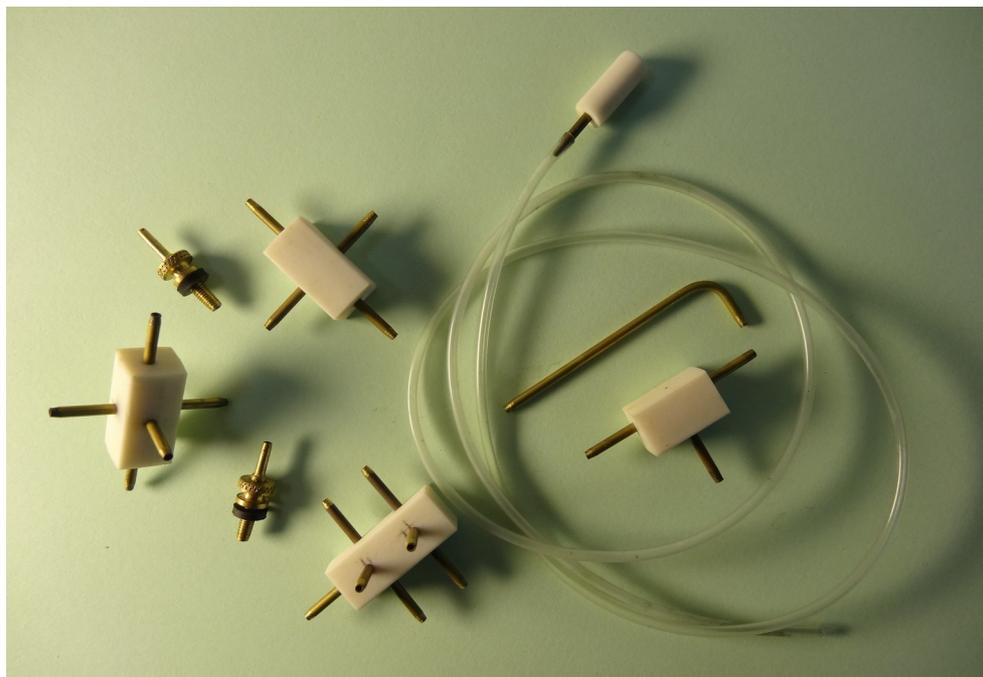


Joint d'étanchéité



Filetage pour visser dans le plastique de la bouteille

Raccord pour connecter les tuyaux souples



Raccords, tubes et accessoires utilisés pour relier les bouteilles

Essai du système avec du butane.



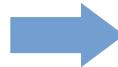
Remplissage de la cloche avec le butane, puis combustion du gaz

Mardi 06/10	Remplissage d'une bouteille de 2L avec des déchets végétaux. Fermeture hermétique avec le bouchon.
Mardi soir	Ouverture de la bouteille pour rajouter des déchets. Lors de l'ouverture, un gaz s'échappe de la bouteille. Il y a eu dégagement gazeux. On connecte la bouteille à la cloche.
Du 06/10 au 09/10	On observe chaque jour un volume de gaz produit d'environ 100 à 150 mL. A chaque fois que la cloche est remplie, on la connecte au brûleur pour vérifier la présence de méthane. Mais le gaz produit est ininflammable, il n'y a pas ou très peu de méthane dans ce gaz.
Samedi 10/10	On décide de réessayer avec plusieurs bouteilles de déchets connectées à la cloche. Réunion du groupe pour remplir 5 bouteilles. On décide d'ajouter de l'eau distillée dans chaque bouteille. On pense qu'il ne faut pas mettre de l'eau du robinet car le chlore qu'elle contient serait susceptible de détruire les micro-organismes responsables de la méthanisation.
Du 10/10 au 21/10	Chaque jour, on observe une production d'environ 1/2 cloche, soit environ 500 mL de gaz. On tente à nouveau de l'enflammer mais sans succès. Après quelques recherches, on apprend que le gaz produit est essentiellement constitué de méthane et de dioxyde de carbone. On se propose de réaliser un test à l'eau de chaux pour vérifier la présence de dioxyde de carbone. En effet, l'eau de chaux est une solution saturée d'hydroxyde de calcium, de formule $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Elle forme un précipité blanc de carbonate de calcium CaCO_3 en présence de dioxyde de carbone, selon l'équation : $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ On choisit de réaliser nous même de l'eau de chaux en suivant le protocole suivant : - On verse une cuillère à café de chaux de maçonnerie dans un verre d'eau. - On mélange à l'aide d'une spatule. - Une fois la solution saturée en chaux, on filtre l'excédant de chaux à l'aide d'un entonnoir et de papier filtre. On obtient une solution limpide saturée en chaux. On prélève une partie de notre eau de chaux pour la tester : sachant qu'on rejette du dioxyde de carbone en expirant, on souffle dans le volume de solution prélevé à l'aide d'une paille. On observe bien la formation d'un précipité blanc. Nous faisons alors barboter le gaz issu de la cloche dans le reste de l'eau de

chaux : on observe à nouveau la formation d'un précipité. Le gaz produit contient bien du CO_2 .



Préparation de l'eau de chaux



L'eau de chaux préparée se trouble en présence de l'air expiré

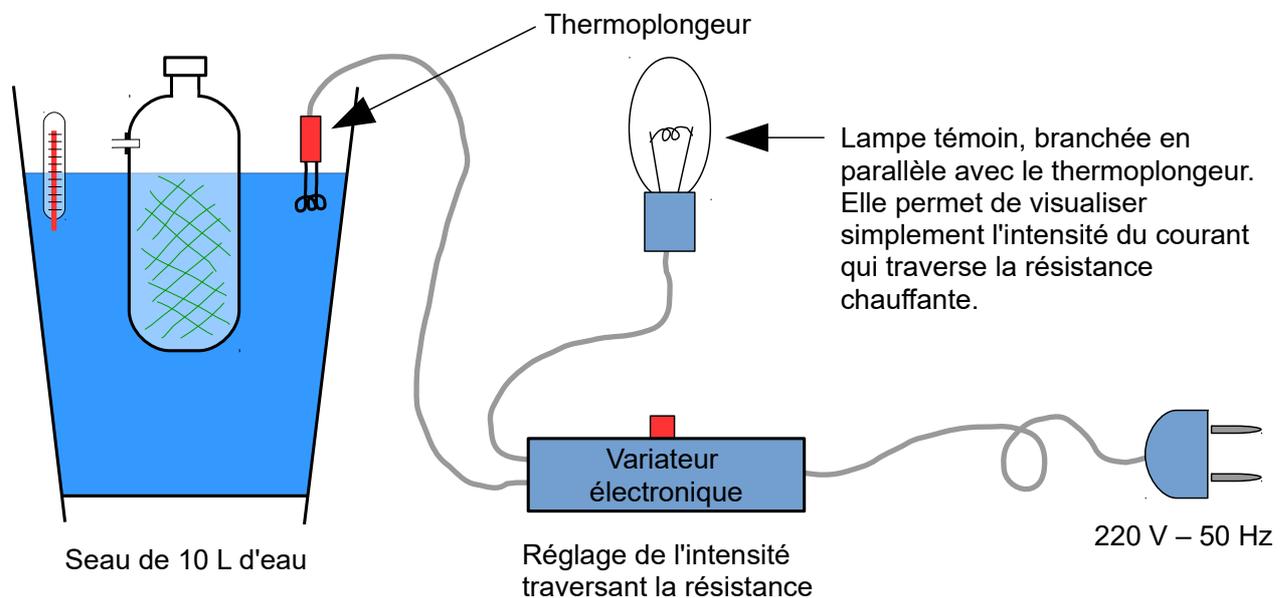
Conclusion de ces premières expériences

- Les déchets, aussi bien en milieu sec que mélangés à de l'eau distillée, ont produit un gaz. Mais, les déchets mélangés à l'eau semblent produire de plus grandes quantités de gaz.
- Le gaz produit contient du dioxyde de carbone.
- Le gaz ne s'enflamme pas. Deux hypothèses :
 - Notre gaz ne contient pas de méthane.
 - Il ne contient que peu de méthane : la proportion méthane / dioxyde de carbone ne permet pas au gaz de s'enflammer. Les conditions de notre expérience ne sont peut-être pas optimales pour produire du méthane.

Nous nous concertons alors pour trouver une autre piste. Nous effectuons des recherches sur internet au sujet de la méthanisation. Nous trouvons sur le site de l'ADEME un document expliquant les fondamentaux de la méthanisation, et les conditions favorables à la production de méthane :

- Un milieu anaérobie, c'est à dire sans dioxygène. Cette condition était déjà remplie dans nos expériences, puisque les déchets étaient en milieu clos, le dispositif était étanche.
- Une température adéquate. Il existe deux plages de températures favorables à l'activité des micro-organismes :
 - 35 - 40°C : méthanisation dite mésophile
 - 50 - 65°C : méthanisation dite thermophile
 Cette condition n'était pas remplie dans nos expériences : la température était comprise entre 17 et 19°C.

Nous devons donc chauffer les bouteilles contenant les déchets. On choisit la plage de température 35 - 40°C. On dispose d'un thermoplongeur, une résistance chauffante utilisée (notamment au bureau...) pour faire chauffer l'eau du café. On réchauffera donc les bouteilles à l'aide d'un bain-marie chauffé par ce thermoplongeur. Pour régler la température, on utilisera un variateur électronique de courant.



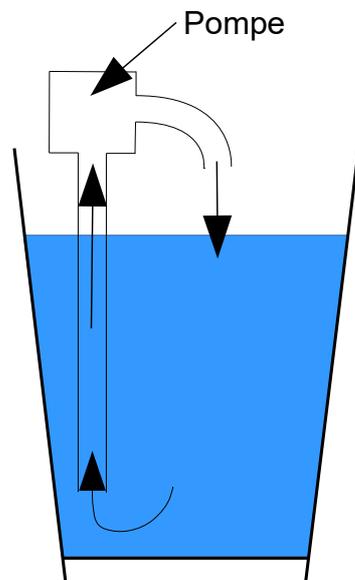
<p>Mercredi 21/10</p>	<p>Fabrication du variateur électronique à partir d'un module commandé dans une boutique d'électronique que l'on installe dans un boîtier plastique pour des raisons de sécurité.</p> <p>The diagram shows the internal wiring of the electronic variator. A 220V - 50Hz power source is connected to a 2A fuse. A lamp is connected to the variator module. A metal screw is connected to the wire.</p>
---------------------------	--



Notre variateur électronique

Pour faire varier l'intensité du courant, il suffit de toucher la vis, et de la lâcher lorsque l'intensité est celle désirée par l'utilisateur.

Après avoir fabriqué le variateur, on réalise l'expérience schématisée précédemment. Après plusieurs dizaines de minutes, on s'aperçoit que l'eau située en surface est nettement plus chaude qu'au fond du seau. Comme la résistance chauffante est placée en surface, la température de l'eau n'est pas homogène. On doit donc brasser l'eau du seau pour obtenir une la même température partout. On utilise une pompe qui prélève l'eau au fond du seau et la refoule à la surface.



Après de nouveaux tests, on s'aperçoit que la température de l'eau est homogène grâce à la pompe. Grâce au variateur, on peut contrôler la température à + ou – deux degrés.

Mardi
27/10

L'expérience de la mise en bouteille des déchets nous ayant paru longue, fastidieuse et sale, nous envisageons de remplacer les bouteilles par une cocotte minute. En effet, une cocotte minute dispose d'une plus grande ouverture, d'une grande capacité et est étanche. De plus, le modèle dont nous disposons possède une sortie, normalement destinée à la soupape, que l'on

pourrait connecter à la cloche qui recueille le gaz. Pour chauffer un si gros récipient, la solution du bain-marie nous semble inadaptée. Nous envisageons de chauffer la cocotte à l'aide d'un brûleur à gaz.



Mais, même en utilisant le plus petit brûleur dont nous disposons et en réglant la flamme au minimum, la température de la cocotte et de son contenu dépasse la température requise : elle avoisine les 50°C.

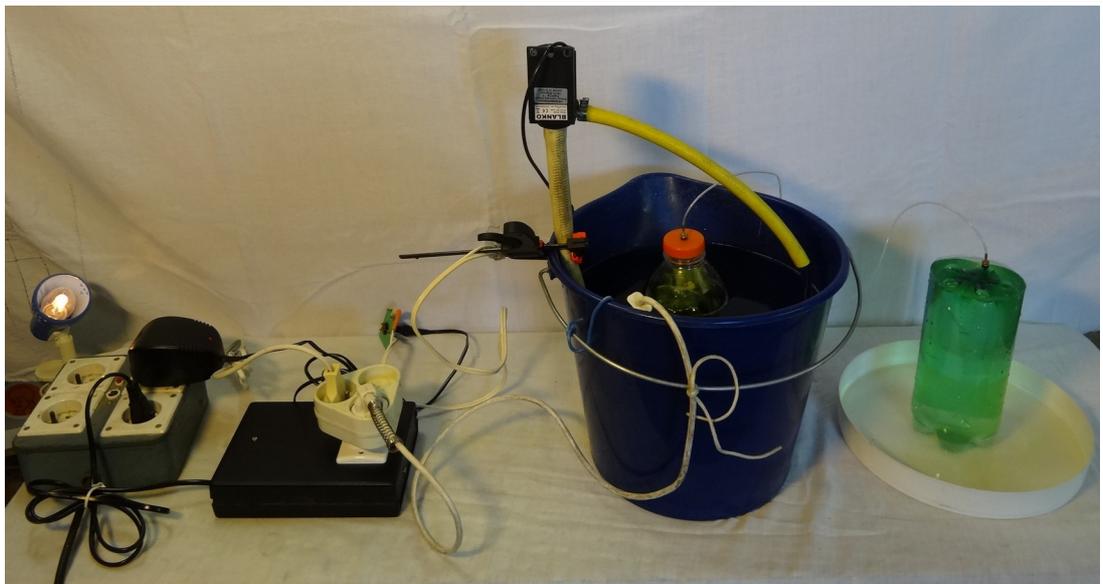


Flamme réglée au minimum

Nous décidons donc d'abandonner l'idée d'utiliser cette cocotte et de revenir au système des bouteilles.

Jeudi
29/10

Nous remettons en place le bain-marie présenté précédemment. Nous remplissons une bouteille de déchets végétaux et d'eau distillée, que nous plaçons dans le bain-marie. Nous la relierons à la cloche.

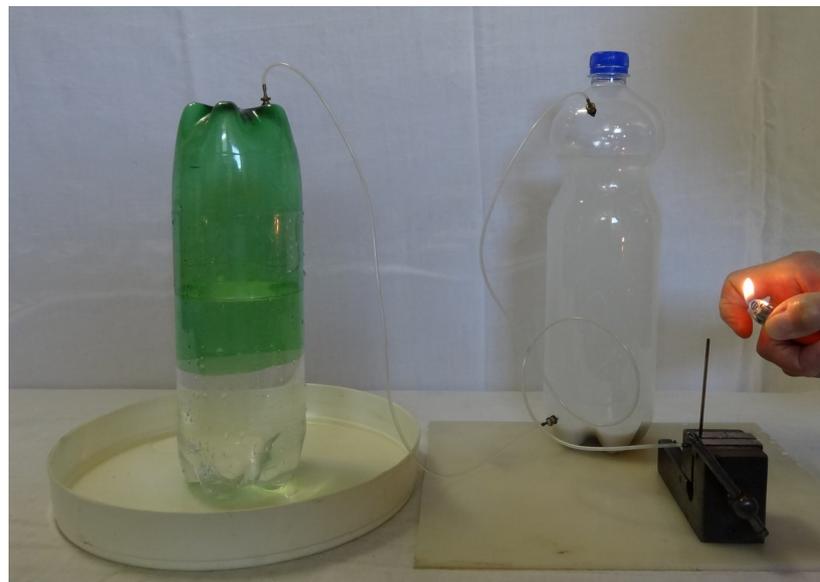
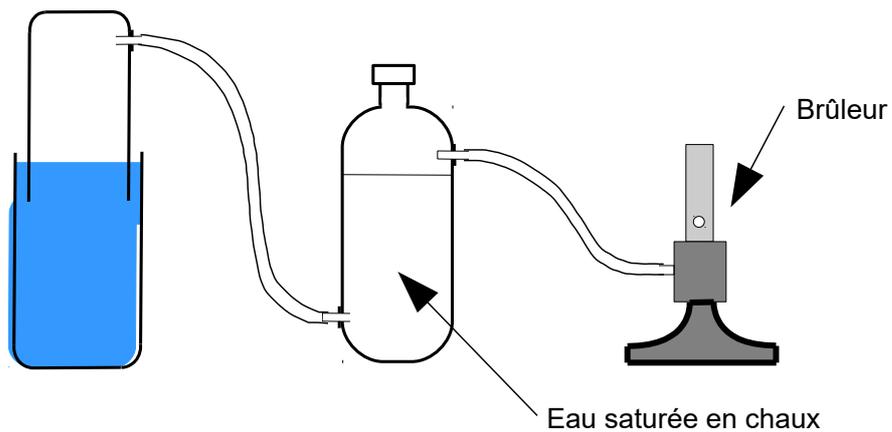


Vendredi
30/10
matin

On observe déjà une production de gaz d'environ 400mL. On essaie d'enflammer le gaz, en vain. La proportion de dioxyde de carbone par rapport au méthane est toujours trop importante.

Vendredi
soir

Pour tenter de débarrasser le gaz produit d'une partie de son dioxyde de carbone, on tente de le faire barboter dans une solution saturée en chaux.



	<p>Mais cette méthode est un échec : on ne parvient pas à éliminer suffisamment de dioxyde de carbone pour que le gaz puisse s'enflammer.</p>
<p>Du 30/10 au 02/11</p>	<p>La production s'arrête le lundi 02/11, et n'aura duré que 4 jours. Chaque jour, on obtient environ 500 mL de gaz, qui refuse obstinément de brûler. Nous nous demandons donc si le gaz produit contient vraiment du méthane, et si oui, en quelle proportion. On se propose de déterminer approximativement cette proportion. Pour ce faire, on essaye d'enflammer des mélanges de butane (car le méthane n'existe pas en bouteilles dans le commerce) et de gaz carbonique, en proportions variées.</p>
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;"><u>Préparation du mélange de butane et de CO₂ dans la cloche</u></p> <p>En dessous de 25 % de méthane pour 75 % de dioxyde de carbone, le mélange ne s'enflamme pas. Flamme obtenue aux alentours de cette proportion :</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>En supposant que méthane et butane ont des caractéristiques similaires, le gaz que nous produisons contient moins de 25 % de méthane.</p>
<p>Mardi 03/11</p>	<p>Nous lisons sur la page Wikipédia relative à la méthanisation, que les graisses ont un fort pouvoir méthanogène : « [les] graisses dont le pouvoir méthanogène est fort ». Peut-être, en rajoutant de l'huile végétale à notre mélange de déchets, pourrions-nous obtenir de plus fortes concentrations en méthane. Nous mettons donc en place une nouvelle bouteille de déchets végétaux, contenant également 400 mL d'huile.</p>
<p>Du 04/11 au 10/11</p>	<p>La production de gaz a duré une semaine. Nous observons à nouveau une production d'environ 500 mL par jour. Mais, cette fois-ci, nous remarquons que la flamme du briquet devient légèrement plus bleue lorsqu'on l'approche du brûleur. Néanmoins, le test n'est pas concluant.</p>

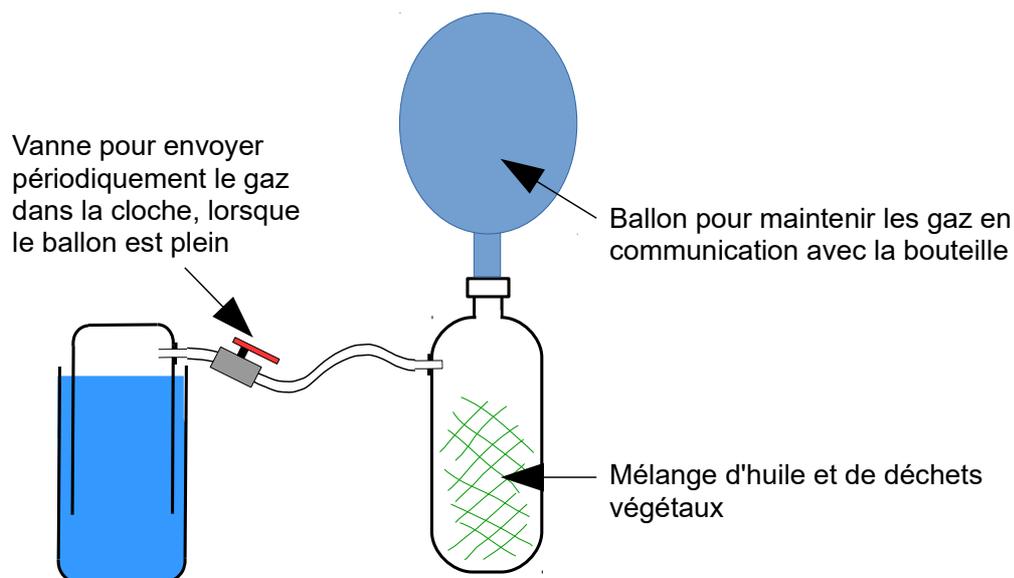
Conclusion de ces expériences

- Les déchets végétaux, aussi bien en milieu sec que mélangés à de l'eau ou à de l'huile, ont produit un gaz.
- A température ambiante (17 °C) ou en régime mésophile (35 - 40 °C), les déchets produisent un gaz. Mais, la production est plus importante et plus rapide lorsque la température est plus élevée.
- Le gaz produit contient du dioxyde de carbone.
- Le gaz produit à partir de déchets végétaux à température mésophile contient moins de 25 % de méthane. Il est ininflammable.

Hypothèses pour obtenir une production plus importante de méthane

- L'expérience est peut-être réalisée à trop petite échelle. La quantité de déchets serait trop faible pour que toutes les phases qui conduisent à la production de méthane puissent avoir lieu. Mais il ne nous est pas possible de réaliser des expériences avec de plus grandes quantités de déchets.
- En relisant le diagramme des phases de la méthanisation (http://tpe.methanisation.free.fr/processus_biologique.htm), on se rend compte qu'une partie des autres gaz produits (dioxyde de carbone, dihydrogène) lors des premières phases de la méthanisation sont utilisés lors de la phase de méthanogénèse pour la production de méthane. Or, dans notre système, les gaz produits sont immédiatement envoyés dans la cloche. Peut-être qu'en laissant un ciel gazeux, en maintenant les gaz dans la bouteille de déchets, pourrait-on augmenter la proportion de méthane produit ?

On conçoit alors une nouvelle expérience :



La bouteille de déchets est à nouveau placée dans le bain marie à 40 °C.

Le ballon permet de maintenir les gaz plus longtemps en présence des déchets et des micro-organismes. Une fois le ballon rempli, on envoie les gaz dans la cloche en ouvrant la vanne.

Ce système s'inspire des digesteurs industriels dont la cuve est surmontée d'une membrane élastique. (http://tpe.methanisation.free.fr/unite_methanisation.htm)

Vendredi 01/01/16	Mise en place de ce nouveau système. Les déchets sont, cette fois-ci, mélangés à environ 800mL d'huile.
Du 01/01 au 03/01	Pendant ces deux jours, on observe aucune production de gaz. En revanche, on peut sentir une odeur de déchets dans la pièce où se déroule l'expérience. On en déduit que le ballon est poreux. On abandonne donc ce système.
Du 03/01 au 14/01	On remplace le bouchon surmonté du ballon par un bouchon normal. Mais, même en revenant ainsi au système précédent, on observe toujours aucune production de gaz. Nous nous demandons donc si toute matière organique est vraiment méthanisable.

Nouvelle hypothèse pour expliquer la faible quantité ou l'absence de méthane :

La plupart de nos expériences ont abouti à la production d'un gaz. Nous savons que ce gaz est riche en CO₂. Les premières phases du processus de digestion anaérobie auraient donc bien lieu, mais pas la dernière qui aboutit à la production de méthane : la méthanogénèse. Les bactéries méthanogènes seraient donc absentes de nos mélanges de déchets.

Nous décidons donc de retenter l'expérience, mais cette fois-ci en utilisant des déchets végétaux ayant séjourné durant plusieurs mois dans un compost.

Du 14/01 au 20/01	Mise en place du système dans les mêmes conditions que précédemment, avec les déchets cités. On observe une production de gaz d'environ 300 mL par jour. Mais, le gaz est toujours ininflammable.
----------------------	---

Cette expérience est aussi un échec : les bactéries du compost sont aérobies, alors que les bactéries méthanogènes nécessaires pour la production de méthane sont anaérobies.

Conclusion de nos expériences

Les expériences ont été menées en respectant les conditions favorables à la méthanisation (anaérobie, milieu humide ou sec, température...). Le gaz obtenu contenait majoritairement du dioxyde de carbone, et était ininflammable. L'hypothèse qui nous semble la plus plausible est la suivante : les bactéries méthanogènes, qui aboutissent à la formation de méthane à partir des composés produits par d'autres micro-organismes, seraient quasi absentes de nos mélanges de déchets végétaux. Ces bactéries sont naturellement présentes dans le système digestif des animaux, notamment des ruminants comme la vache. Pour que la méthanogénèse puisse avoir lieu, il faudrait un mélange contenant des déjections de ruminants, ou alors introduire des bactéries issues de cultures. Toutes les matières organiques sont peut-être méthanisables, mais certaines nécessitent un apport externe de bactéries.

Transformer des déchets en méthane est donc plus complexe que ce beaucoup de sites web veulent nous faire croire : il ne suffit pas de mettre des végétaux dans une bouteille, et de patienter !

De nouvelles expériences

Nous ne devons pas réaliser de nouvelles expériences après cette conclusion. En effet, comme expliqué dans la conclusion, pour produire du méthane, il faudrait ajouter aux mélanges de déchets des déjections de ruminants, ou des bactéries issues de cultures. Or, nous n'avons accès à aucun de ces éléments.

Mais, nous avons découvert que les fosses septiques fonctionnaient sur le principe de la digestion anaérobie. Nous nous sommes également rendu compte que certains « activateurs biologiques pour fosses septiques » contenaient des bactéries et des enzymes.

Le produit en question, disponible en grandes surfaces :



Nous avons remis en place notre système dans les mêmes conditions que précédemment, mais cette fois-ci en utilisant du fumier de cheval (nous ne souhaitons pas renouveler encore une fois l'expérience sale et fastidieuse de la mise en bouteille des végétaux). Nous avons rajouté de l'eau distillée et le contenu d'un verre de granules d'« activateur biologique ».

Comme le fumier est pasteurisé, il ne contient plus de bactéries. Si nous produisons un gaz combustible, cela signifie que l'« activateur biologique » contient des bactéries méthanogènes.

Mercredi 03/02	Mise en place du système, dans les mêmes conditions que précédemment (température : 38°C)
-------------------	--

Du 03/02 au 08/02	On observe une production de gaz d'environ 400 mL au bout de ces 5 jours. On tente d'enflammer le gaz, il ne brûle pas.
Du 08/02 au 12/02	<p>Durant ces 4 jours, 250 mL de gaz ont été produits. Mais cette fois ci, le gaz est combustible : il produit une petite flamme bleue (environ 5 mm de haut, avec un poids de 125g faisant pression sur la cloche), qui est très instable et s'éteint souvent.</p>  <p>Cette flamme est similaire à celle obtenue en mélangeant 75 % de CO₂ et 25 % de butane. On en déduit le gaz obtenu contient environ 25 % de méthane.</p> <p>L'« activateur biologique » contient bien des bactéries méthanogènes.</p>
Du 12/02 au 15/02	Durant ces 3 jours, 250mL de gaz ont été produits. La flamme est plus stable et plus grande (environ 1cm, avec le même poids sur la cloche). Selon les tests réalisés avec du butane et du dioxyde de carbone, on en déduit que le gaz contient plus de 50 % de méthane.
Du 15/02 au 18/02	On observe une production de 200 mL durant ces 3 jours. La flamme est similaire à la précédente.
Du 18/02 au 22/02	250 mL de gaz ont été produits durant ces 4 jours. La flamme observée mesure toujours 1 cm environ.
Du 22/02 au 29/02	Durant ces 7 jours, on observe une production de 350 mL environ. La combustion de ce gaz produit une flamme identique aux précédentes. On remarque donc qu'après une phase d'augmentation de la proportion de méthane dans le gaz, la composition du mélange se stabilise.

Conclusion de ce journal

Grâce à cette dernière expérience, nous avons pu démontrer l'hypothèse formulée dans la conclusion : en ajoutant des bactéries méthanogènes à de la matière organique dans les conditions adéquates, celle-ci peut être transformée en méthane.