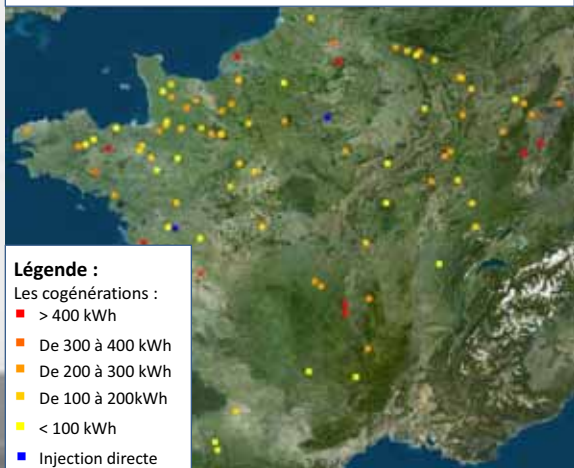


# Enquête sur la valorisation de la chaleur issue de la méthanisation avec cogénération en France

Dans le cadre de la transition énergétique, l'objectif est de développer à l'horizon 2020 la méthanisation à la ferme. Couplée à la cogénération, elle permet de produire de l'électricité et de la chaleur, apportant une diversification des activités de la ferme.

**En France, comment la chaleur produite par la cogénération est-elle aujourd'hui valorisée ?**

Répartition des méthaniseurs en France ayant répondu à l'enquête, suivant leur puissance électrique

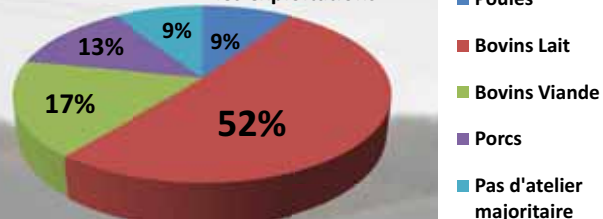


## Matériel et méthodes

- Recensement de 172 unités de méthanisations agricoles en fonctionnement, en construction et en projet
- 144 coordonnées récupérées, et 97 réponses d'agriculteurs à l'enquête
- Installations situées sur la carte ci-contre

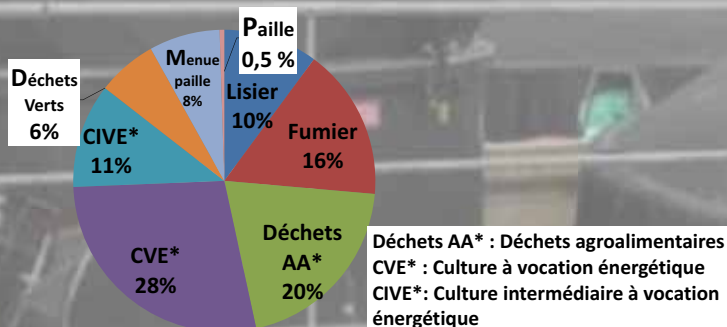
## Caractérisation des exploitations et des élevages interrogés

Atelier majoritaire pour la production de méthane sur les exploitations

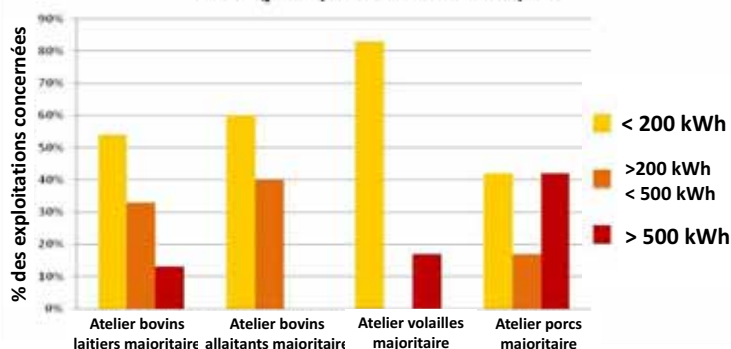


## Rationnement du méthaniseur

Origine du méthane produit dans l'ensemble des méthaniseurs étudiés

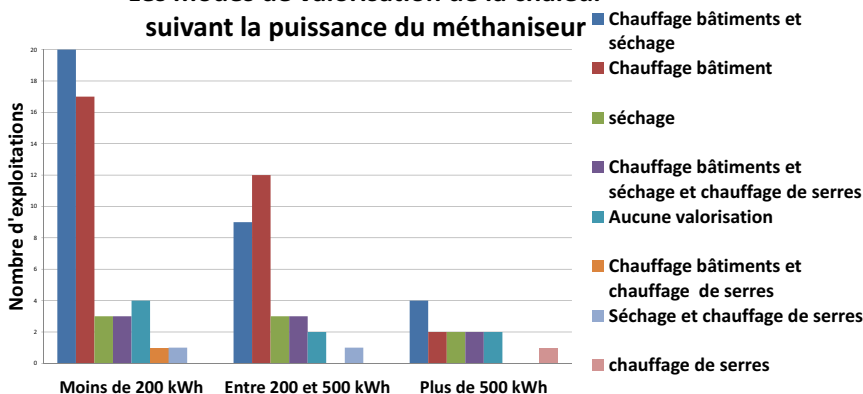


Répartition selon l'atelier majoritaire dans la production de CH<sub>4</sub> des puissances électriques



## Valorisation de la chaleur produite par la cogénération

Les modes de valorisation de la chaleur suivant la puissance du méthaniseur



Les modes de valorisation de la chaleur produite par la méthanisation choisis par les agriculteurs sont dans l'ordre décroissant :

- le chauffage des bâtiments agricoles et domestiques
- le séchage de bois, de fourrage et de céréales
- les serres (maraîchères et horticoles)
- la culture de champignons et de micro algues

**BILAN** : l'élevage est actuellement une condition indispensable à la méthanisation à la ferme, avec de nombreux schémas possibles (bovins lait, bovins viandes, porcs, volailles).

L'électricité et la chaleur issues de la cogénération permettent d'apporter une ou plusieurs sources de revenus à l'exploitant.

D'après le scénario Négawatt, la valorisation des effluents organiques d'élevage permet la production d'énergie renouvelable via la méthanisation, dont l'énergie produite devrait passer de 4 TWh en 2011 à 157 TWh en 2050, soit 157 milliards de kWh.



**Bibliographie Projet Pro**  
**2013-2014**  
**Energie et territoire :**  
**Valorisation de la chaleur produite par**  
**la méthanisation**

Tuteurs :  
LE ROUX Yves  
PACAUD Stéphane

# INTRODUCTION

La méthanisation résulte de la dégradation de la matière organique par des microorganismes. En France, la méthanisation se développe de plus en plus dans le secteur agricole, elle permet la production du digestat, riche en matière organique et inodore à partir des effluents d'élevage. En outre, elle produit aussi de l'énergie sous forme de biogaz, qui est reconverti totalement en électricité (injection de biométhane) ou reconverti en électricité avec production de chaleur (cogénération). L'injection de biométhane, bien qu'aisée proche des villes est impossible lorsque les fermes sont isolées, ce qui est le cas de nombreuses exploitations en France. Néanmoins, la méthanisation reste un investissement lourd, qui est rentabilisé par la prime de valorisation de la chaleur. Toute la question est de savoir comment valoriser cette chaleur. Cette valorisation peut permettre de créer une nouvelle activité au sein de l'exploitation et de générer des emplois dans des campagnes où la main d'œuvre est de moins en moins nombreuse. Elle peut également renforcer une activité déjà présente au sein de l'exploitation, pour permettre une autonomie de la ferme.

## SOMMAIRE

<u>Chapitre 1</u> : La méthanisation par NGUYEN DAI Kim Yen	p 1 à 7
<u>Chapitre 2</u> : Valorisation de la chaleur issue de la cogénération par le chauffage de bâtiments agricoles et domestiques par MASSAZA Michaël	p 8 à 14
<u>Chapitre 3</u> : Valorisation de la chaleur issue de la cogénération par déshydratation du digestat par SEGRET Emilien	p 15 à 20
<u>Chapitre 4</u> : Hygiénisation du digestat de la méthanisation par ROGÉE Pierre-Emmanuel	p 21 à 27
<u>Chapitre 5</u> : Valorisation de la chaleur produite par méthanisation : séchage fourrager par DAVID Laura	p 28 à 37
<u>Chapitre 6</u> : Valorisation de la chaleur produite par la méthanisation : le séchage de céréales par BAZIN Florian	p 38 à 43
<u>Chapitre 7</u> : Valorisation de la chaleur issue de la méthanisation par séchage de bois par PRUVOST Paul	p 44 à 47
<u>Chapitre 8</u> : Séchage de compost par valorisation de la chaleur par méthanisation par MOSSÉ Noémie	p 48 à 53
<u>Chapitre 9</u> : Valorisation de la chaleur issue de la méthanisation dans la fabrication du tourteau de colza par ROY Samuel	p 54 à 61
<u>Chapitre 10</u> : Valorisation de la chaleur produite par la méthanisation : les cultures sous serre par HEURAUX Thalie	p 62 à 69
<u>Chapitre 11</u> : Valorisation de la chaleur produite par la méthanisation : culture de microalgues, la spiruline par REGIMBART Amélie	p 70 à 75
<u>Chapitre 12</u> : Valorisation de la chaleur par le biais des champignonnières par JEZIORNY Thibaud	p 76 à 81

## **LA METHANISATION**

Les enjeux économiques et écologiques ainsi que le plan EMAA dans la gestion et du traitement de l'azote, mettent en avant l'importance de la méthanisation en France. Dans le cadre de ce projet pro, nous allons nous intéresser à la méthanisation et plus précisément à la valorisation de la chaleur produite par ce processus. Nous allons tout d'abord présenter la méthanisation et faire un état des lieux en France, puis exposer les aspects techniques de ce processus, et enfin traiter des aspects économiques, agronomiques, écologiques et des intérêts à valoriser la chaleur.

### **D) Présentation, état des lieux**

#### *A) Définition de la méthanisation*

La méthanisation (digestion anaérobie) est un processus de dégradation de la matière organique, sans besoin d'oxygène, ni de lumière, avec intervention de micro-organismes. La matière organique est alors transformée en deux résidus : le biogaz, composé à 60% de méthane ( $\text{CH}_4$ ), de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), et le digestat qui est constitué de matière organique non dégradée et de minéraux. Cette transformation naturelle (les micro-organismes intervenant dans ce processus sont déjà présent dans le substrat) peut être utilisée pour le traitement des déchets. Le digestat peut être répandu sur les cultures comme engrais, tandis que le biogaz peut être valorisé de différentes manières : il peut être transformé en électricité ou en chaleur.

#### *B) Puissances des méthaniseurs*

Pour notre projet pro, nous avons établi plusieurs niveaux de puissance des méthaniseurs : les petites puissances, avec une puissance inférieure à 200 kW électrique, les moyennes puissances situées entre 200 et 500 kW et enfin les grosses puissances, supérieures à 500 kW électrique.

#### *C) Etat des lieux actuel en France métropolitaine*

Il y a une centaine (nous en avons compté 99 dans notre étude) de méthaniseurs, à la ferme, qui sont fonctionnels ou en construction. Il existe d'autres types d'installations : des méthaniseurs sur des sites industriels, dans des stations d'épuration ou encore des méthaniseurs utilisant les ordures ménagères comme substrat. En prenant en compte tous ces

types d'installation, on compterait plus de 200 méthaniseurs. La région dans laquelle il y a le plus de méthaniseurs est la Bretagne. [1]

## II) Aspects techniques

### A) Les différentes phases de la méthanisation

La méthanisation peut se faire sous deux régimes de températures différents : le régime mésophile, qui se fait à une température de 30-40°C et le régime thermophile qui se fait à 50-60°C. Dans le cas de la digestion thermophile, la digestion des substrats est plus rapide, mais ce procédé est plus difficile à mettre en œuvre. Les trois phases principales de la digestion anaérobie sont :

- L'hydrolyse et l'acidogénèse
- L'acétogénèse
- La méthanogénèse

Lors de la première phase, les bactéries hydrolytiques transforment la matière organique complexe, comme les protéines, les lipides, des sucres tels que la cellulose ou l'amidon, en composés plus simples comme les acides gras volatils, ou encore des alcools. Il y a alors production de gaz ( $H_2$  et  $CO_2$ )

Lors de l'acétogénèse, les produits sont transformés en acide acétique ( $CH_3COO^-$ ) et en dihydrogène ( $H_2$ ).

Pendant la dernière phase, le  $CO_2$  est en partie transformé en méthane ( $CH_4$ ) par les bactéries méthanogènes hydrogénophiles et l'acétate est transformé en  $CH_4$  par les bactéries méthanogènes acétoclastes.

Les produits finaux de la méthanisation sont alors le  $CO_2$ , le méthane et du digestat (cf figure 1). [2]

### B) Installation, mise en place dans une exploitation

Les substrats (les déchets agricoles ou venants de l'industrie agro-alimentaire) sont collectés puis placés dans le digesteur, dans lequel se fait la méthanisation. Le digestat peut alors être épandu sur les cultures tandis que le biogaz peut, soit être injecté, on obtient alors du biométhane qui servira de carburant, soit être brûlé, ce qui produira de la chaleur dite « pure ». Cette chaleur peut être utilisée de différentes manières. Une autre solution est que le biogaz passe dans un cogénérateur, ce qui produira de la chaleur et de l'électricité (cf figure 2). [3]

### *C) Les types de substrats utilisables*

Il existe plusieurs sortes de substrats utilisables dans un méthaniseur : il y a tout d'abord les effluents d'élevage (lisier et fumier), les déchets agro-alimentaire, les cultures à vocation énergétique, les cultures intermédiaires à vocation énergétique, les déchets verts, les menus pailles ou encore les pailles.

### *D) Potentiel méthanogène*

Les différents substrats utilisables pour la méthanisation n'ont pas le même potentiel méthanogène. En effet, même si la plupart du temps, en exploitation agricole, les effluents d'élevage sont utilisés comme substrats, ces derniers ont un pouvoir méthanogène relativement faible (entre 20 et 150 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tonne de matière brute). Par contre, les produits de cultures comme le maïs ont un pouvoir plus élevé (230 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tonne de matière brute). Les produits les plus méthanogènes sont les graisses agro-industrielles avec 400 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tonne de matière brute. En Allemagne, les cultures à vocation énergétique sont les plus utilisées, en France, ces substrats sont limités car ils plutôt utilisés pour la filière agro-alimentaire (cf figure 3)

## **III) Aspects économiques, agronomiques, environnementaux et intérêts de valoriser la chaleur**

### *A) Intérêts économiques*

Il existe plusieurs avantages économiques à faire de la méthanisation. Tout d'abord, le digestat peut servir d'engrais, ce qui réduit le budget consacré aux produits à acheter. De plus, la méthanisation permet de créer (ou de maintenir) des emplois : pendant la construction du méthaniseur, des ouvriers peuvent être employés, et lors de son fonctionnement, des emplois peuvent être créés autour de l'installation (maintenance, etc). En recyclant ses déchets, l'exploitation agricole réduit ses coûts de traitement des déchets. Nous pouvons aussi ajouter que les entreprises améliorent leur image en recyclant les déchets et en utilisant une énergie verte plutôt qu'une énergie fossile.

### *B) Intérêts agronomiques et écologiques*

Grâce à la méthanisation, il y a réduction des émissions de gaz à effet de serre, en effet, le méthane (CH<sub>4</sub>) produit est capté puis valorisé en électricité, biométhane ou en chaleur. Ces formes d'énergies limitent l'utilisation des énergies fossiles et peuvent être directement utilisées par les exploitations ou revendues.

Quant au digestat, celui-ci peut être réutilisé comme fertilisant. De plus, comme le digesteur est hermétique, les émissions d'odeurs sont limitées. [4]

### *C) Intérêts de valoriser la chaleur*

L'installation d'un méthaniseur permet de percevoir différentes primes, la première étant une prime de 14cts/kWh. Les agriculteurs ayant une valorisation énergétique égale ou supérieure à 70% perçoivent une prime de 4cts/kWh. L'utilisation des effluents d'élevage est aussi valorisée par une prime : pour les installations d'une puissance de 150-300 kW, la prime est de 2,6cts/kWh, entre 300-500kW, les agriculteurs gagnent 2,1-2,6cts/kWh et pour les méthaniseurs de 500-1000 kW la prime se situe entre 0 et 2,1 cts/kWh.

Les méthaniseurs faisant de l'injection doivent être à proximité des réseaux d'ERDF et GRDF. La valorisation de la chaleur permettrait de surmonter cette contrainte. De plus en valorisant la chaleur et en utilisant cette énergie dans sa propre exploitation, l'agriculteur peut devenir plus indépendant. [5]

Dans les prochains chapitres nous allons traiter des différentes valorisations de la chaleur existant en France.

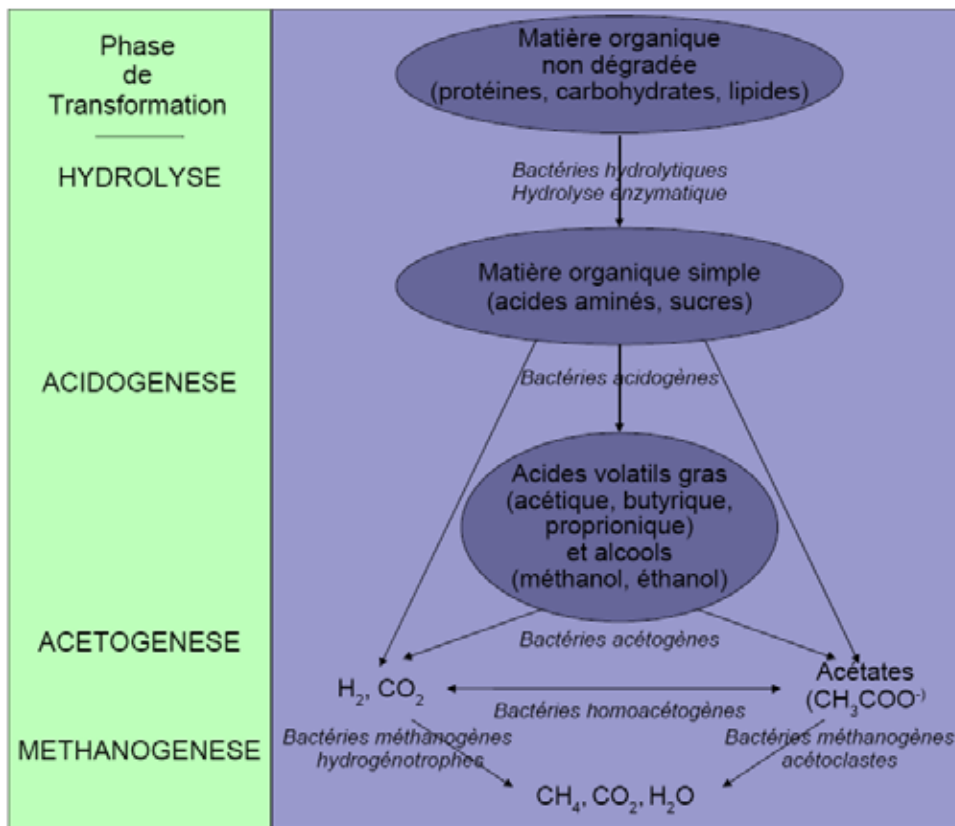
## REFERENCES

- [1] <http://atee.fr/biogaz/carte-des-installations-biogaz-en-france>
- [2] <http://www.methaneva.eu/la-methanisation-3.html>
- [3] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Comment-fonctionne-une-unite-de.html#prettyPhoto/0/>
- [4] [https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CEcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww2.ademe.fr%2Fservlet%2FgetBin%3Fname%3DA0C9979DE00295E678E526DB369886D9\\_tomcatlocal1316092602527.pdf&ei=0WDqUvO\\_Jufd7QaK-oHQBQ&usg=AFQjCNH2hDCts0dt8Y75qWWBLZFwoEd0dQ&sig2=qM0z4xcvkbtQmOUVxQRFJA&bvm=bv.60444564,d.ZGU](https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CEcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww2.ademe.fr%2Fservlet%2FgetBin%3Fname%3DA0C9979DE00295E678E526DB369886D9_tomcatlocal1316092602527.pdf&ei=0WDqUvO_Jufd7QaK-oHQBQ&usg=AFQjCNH2hDCts0dt8Y75qWWBLZFwoEd0dQ&sig2=qM0z4xcvkbtQmOUVxQRFJA&bvm=bv.60444564,d.ZGU)
- [5] <http://www.agrapresse.fr/agriculture-societe/la-prime-pour-la-methanisation-des-effluents-d-levage-revaloris-e-art361763-13.html>



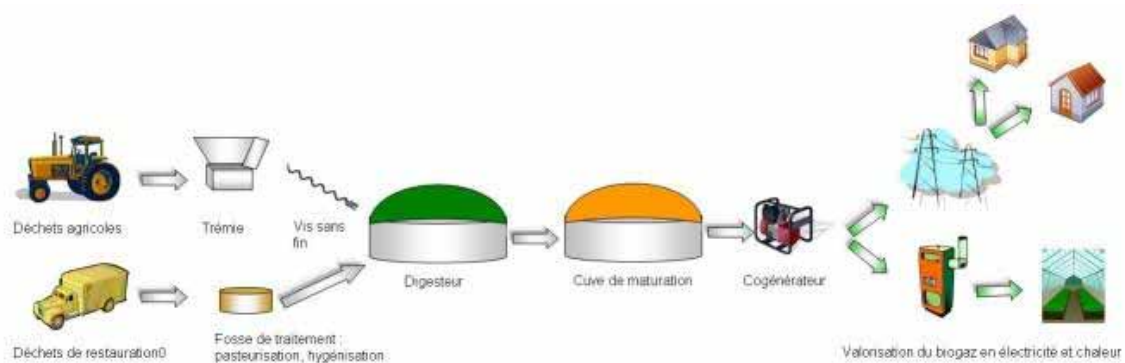
ANNEXES

Figure 1 : Etapes de la méthanisation



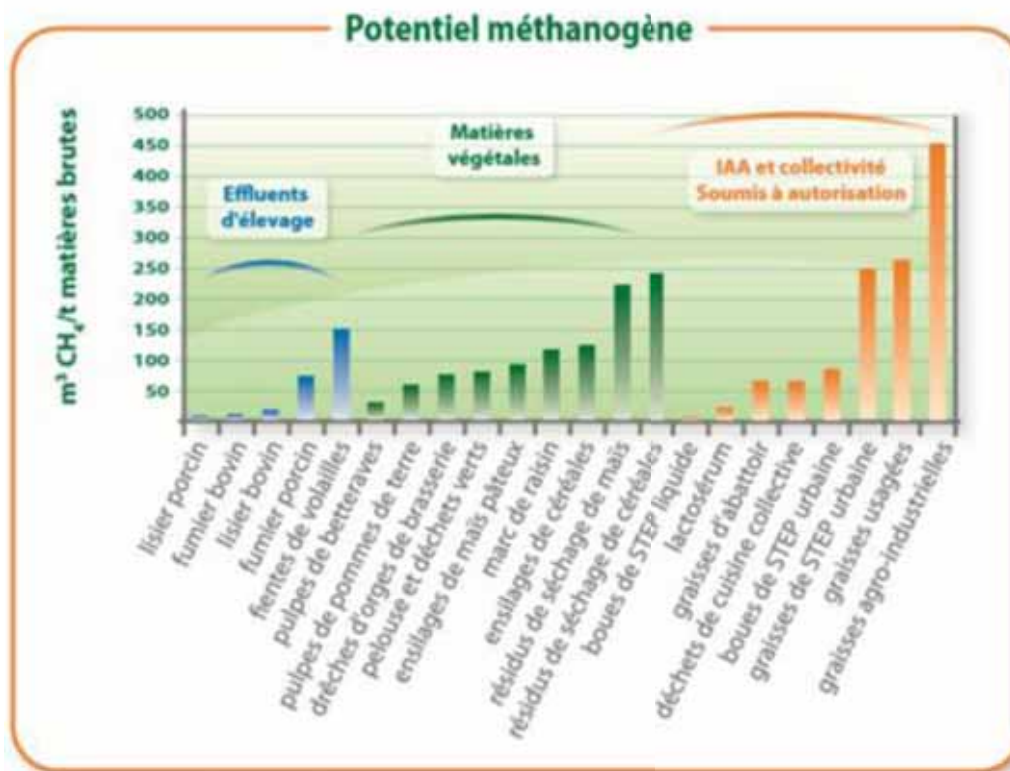
<http://www.methaneva.eu/la-methanisation-3.html>

Figure 2 : Installation d'un méthaniseur



[http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz\\_schema.html](http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz_schema.html)

Figure 3 : Potentiel méthanogène des différents substrats



Source: Methasim 2010

[https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CEcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww2.ademe.fr%2Fservlet%2FgetBin%3Fname%3DA0C9979DE00295E678E526DB369886D9\\_tomcatlocal1316092602527.pdf&ei=0WDqUvO\\_Jufd7QaK-oHQBQ&usg=AFQjCNH2hDCts0dt8Y75qWWBLZFwoEd0dQ&sig2=qM0z4xcvkbQmOUVxQRFJA&bvm=bv.60444564,d.ZGU](https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CEcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww2.ademe.fr%2Fservlet%2FgetBin%3Fname%3DA0C9979DE00295E678E526DB369886D9_tomcatlocal1316092602527.pdf&ei=0WDqUvO_Jufd7QaK-oHQBQ&usg=AFQjCNH2hDCts0dt8Y75qWWBLZFwoEd0dQ&sig2=qM0z4xcvkbQmOUVxQRFJA&bvm=bv.60444564,d.ZGU)

## Valorisation de la chaleur issue de la cogénération par le chauffage de bâtiments agricoles et domestiques

La valorisation de la chaleur issue de la méthanisation par le chauffage de bâtiments, agricoles ou domestiques, est à la fois la solution la plus directe et la plus répandue en France.

I)	<b><u>Présentation / état des lieux</u></b>	8
II)	<b><u>Aspect technique</u></b>	9
	A) <i>Principe (théorie)</i>	9
	B) <i>Installation / mise en place</i>	9
	C) <i>Adéquation avec la puissance du méthaniseur</i>	9
III)	<b><u>Aspects économiques, agronomiques et environnementaux</u></b>	10
	A) <i>Economiques</i>	10
	1) <i>Coûts</i>	10
	2) <i>Intérêts</i>	10
	3) <i>Subventions</i>	10
	B) <i>agronomiques / environnementaux</i>	10
	<b><u>Bibliographie – Annexes</u></b>	12

---

### I) **Présentation / état des lieux**

La chaleur est récupérée sous forme d'eau chaude à la sortie du moteur, forme sous laquelle elle sera exploitée afin de chauffer tous types de bâtiments.

Les bâtiments chauffés peuvent être agricoles (maternités, volaillères, porcheries, salles de traite) ou bien domestiques (maisons, casino, voire piscines). La plupart des unités de méthanisation permettent de chauffer plusieurs types de bâtiments.

En France, 65% des unités de méthanisation procèdent au chauffage de bâtiments pour valoriser tout ou partie de la chaleur dégagée.

Parmi ceux-ci, 75% chauffent au moins un bâtiment domestique, et 68% au moins un bâtiment agricole.

Dans la plupart des régions de la moitié nord du pays, le chauffage de bâtiments domestiques est quasi systématique : plus de 75% des installations. [Annexe 1]

Les bâtiments agricoles sujets à cette valorisation sont variés : les bâtiments d'élevage, notamment volaillères, porcheries, maternités pour veaux ou lapins, les bâtiments administratifs, ainsi que les bâtiments liés à la traite.

La puissance de cogénération n'est pas un facteur déterminant pour le chauffage des bâtiments : les mêmes proportions d'unités de cogénération chauffent les différents types de bâtiments [Annexes 2a et 2b].

## II) Aspect technique

### A) Principe (théorie)

Deux installations sont principalement utilisées :

La première, la plus simple, consiste à injecter directement l'eau chauffée par le moteur dans un système clos de chauffage. Ce type d'installation est adapté aux bâtiments d'élevage ne nécessitant que d'être chauffé et ne possédant pas de système de chauffage préexistant. [Annexe 3]

La deuxième installation vise à remplacer toutes les formes de chaufferie (ballon d'eau chaude, moteur au fioul etc.). Ainsi, le réseau d'eau chaude sortant du moteur permet de chauffer le système de distribution courant via un échangeur de chaleur. Ceci permet de chauffer l'eau destinée à l'usage domestique sans risque de pollution lié au moteur de cogénération. De plus, il ne nécessite que de faibles modifications du réseau existant. [Annexe 4]

Le chauffage de bâtiments d'élevage répond à des besoins spécifiques, comme la maternité pour lapins ou veaux, ou bien la salle de traite. Etant le plus souvent des bâtiments possédants de grandes ouvertures, leur chauffage est difficile. Il est pourtant nécessaire de prévenir la formation de gel dans les salles de traite, ou de prévenir toute température pouvant affecter le développement de jeunes animaux. Ainsi toute installation de systèmes chauffant doit être couplée à des efforts d'isolation des bâtiments. [1]

### B) Installation / mise en place

La mise en place d'un système de chauffage direct va le plus souvent de pair avec la création du système en lui-même, lors de la création ou de la rénovation d'un bâtiment agricole. Le circuit alimentant les chauffages est directement relié à celui chauffé par le moteur de cogénération [Annexe 3].

L'installation du système pour un bâtiment domestique implique des modifications du réseau d'eau. Un échangeur de chaleur remplace l'ancien système de chauffe. Cet échangeur sera l'interface entre le système d'eau sortant du moteur de cogénération et le système d'eau existant. Ceci permet d'utiliser l'eau dans tous les cadres domestiques (sanitaires, cuisine, chauffage) [Annexe 4].

### C) Adéquation avec la puissance du méthaniseur

La puissance moyenne nécessaire à maintenir  $1\text{m}^3$  à  $20^\circ\text{C}$  pendant 1 heure est de 40 W.

$$\frac{P_{th} \times 45\%}{365 \times 24} = \text{Puissance Thermique utilisable en Wattheure}$$

$$\text{puissance thermique nécessaire à maintenir } Y \text{ m}^2 \text{ à } 20^\circ\text{C en Wattheure} = \frac{Y \times 40}{2} \quad (\text{en considérant des pièces de 2m de plafond})$$

$$Y = \frac{P_{th} \times 45\% \times 2}{365 \times 24 \times 40} \text{ m}^2$$

Exemple à partir d'une petite unité de cogénération de 36KW<sub>el</sub> :

Par an : 393 MW<sub>th</sub> produits dont 43% à valoriser.

On peut alors chauffer 430 m<sup>2</sup> de bâtiments domestiques.

### III) Aspects économiques, agronomiques et environnementaux

#### A) économiques

##### 1) Coûts

Les coûts de modification du réseau d'eau peuvent être estimés à quelques milliers d'euros suivant la configuration de l'installation.

##### 2) Intérêts

Le chauffage des bâtiments par la chaleur permet de supprimer les dépenses liées à l'énergie.

En reprenant l'exemple précédent, la chaleur issue du moteur de cogénération permet de chauffer 430 m<sup>2</sup> de bâtiments. Dans le cas où ces mêmes bâtiments devraient être chauffés au fioul domestique, ils nécessiteraient environ 7500L de fioul par an, ce qui représente une facture de 6000 à 6500€. L'investissement paraît alors vite rentable.

##### 3) Subventions

Le chauffage de bâtiments entre en compte dans le calcul des subventions à l'achat de l'électricité issue de la cogénération.

#### B) agronomiques / environnementaux

Sans réel intérêt agronomiques, c'est avant tout écologiquement que ce système de valorisation est intéressant. Il permet de remplacer les énergies fossiles les plus couramment utilisées.

La valorisation de la chaleur par le chauffage de bâtiments est l'une des solutions les plus simples et des plus rapidement rentables. Elle participe aux efforts de réduction de l'utilisation des énergies fossiles préconisés dans la lutte contre le réchauffement climatique. Elle permet surtout à

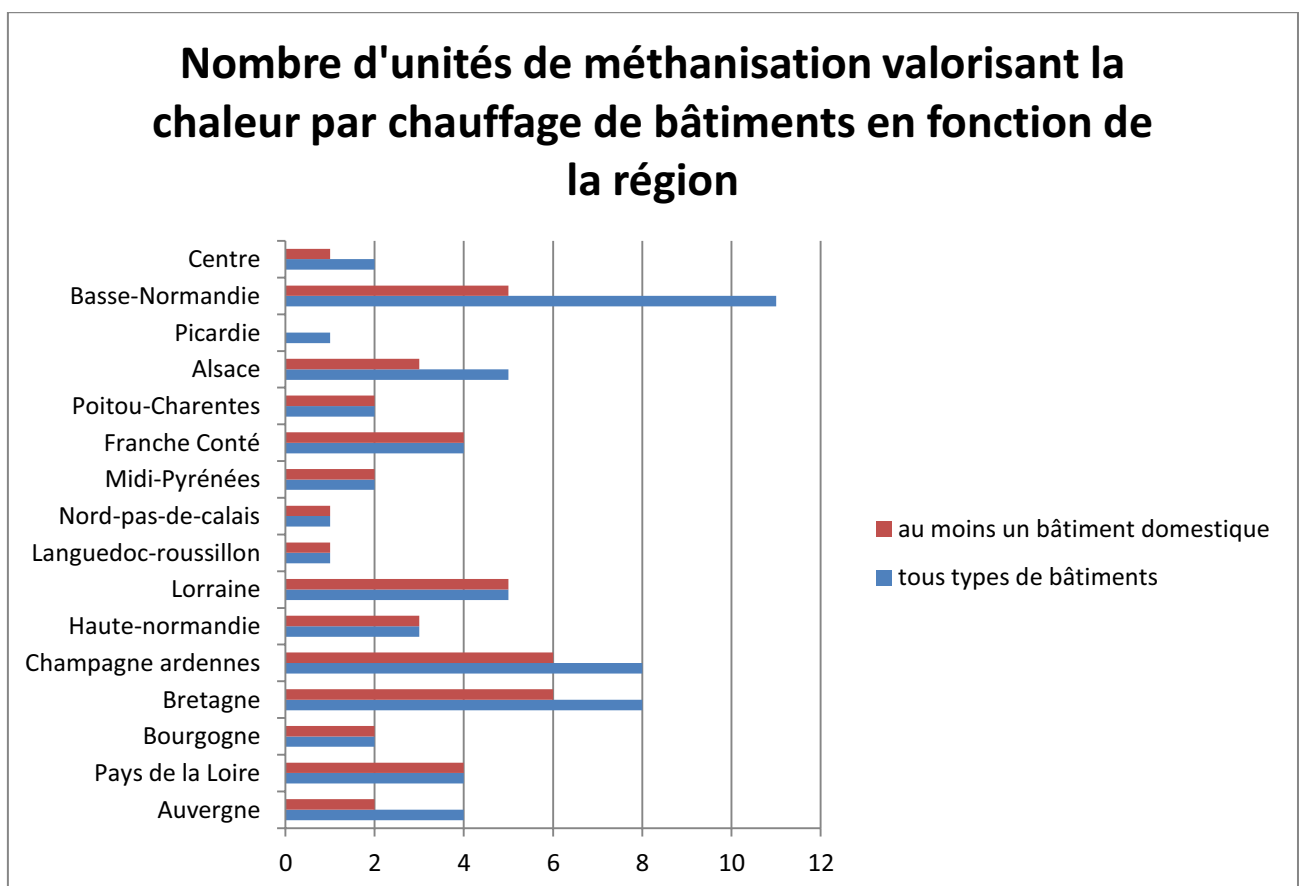
l'agriculteur de supprimer un poste de dépenses important. Sans création directe d'activités, elle est le plus souvent couplée à d'autres formes de valorisations de la chaleur issue de la cogénération.

## Références bibliographiques

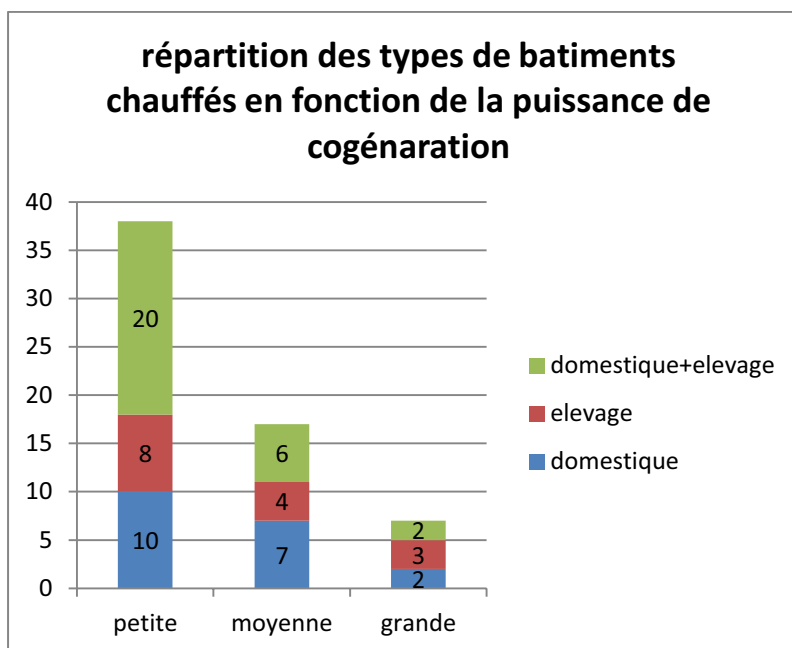
[1] *Risques en salle de traite*, GIE élevage de Bretagne, [www.gie-elevages-bretagne.fr/admin/.../Fiches\\_SdT\\_toutes\\_r\\_duit.pdf](http://www.gie-elevages-bretagne.fr/admin/.../Fiches_SdT_toutes_r_duit.pdf)

## ANNEXES

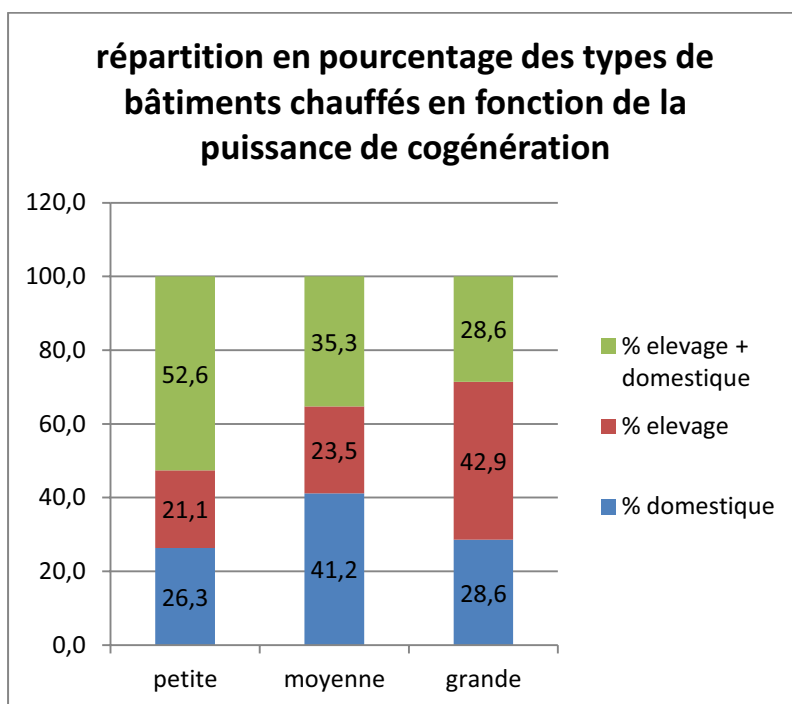
### Annexe 1



Annexe 2a



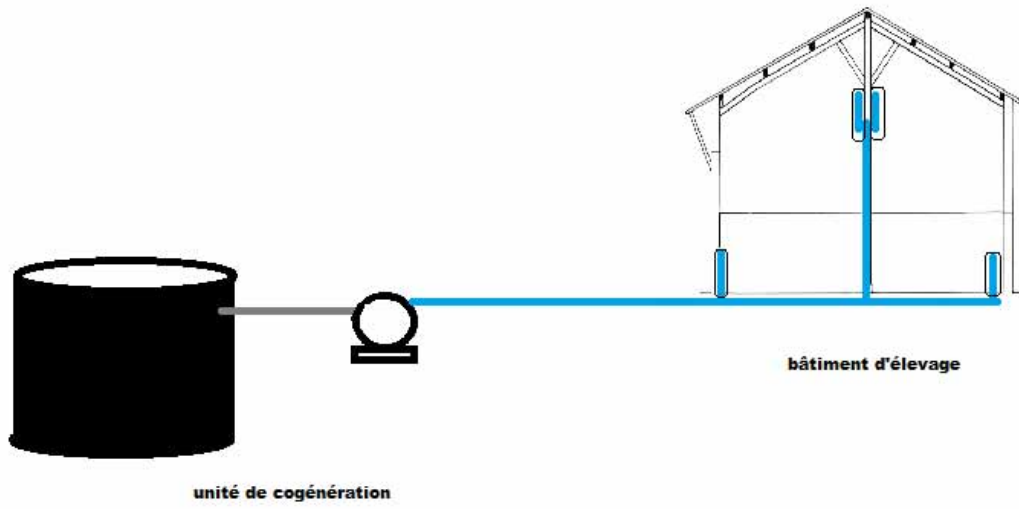
Annexe 2b



Remarque : Petite unité : <250 KWél; Moyenne unité : <500 KWél; Grande unité : >500 KWél

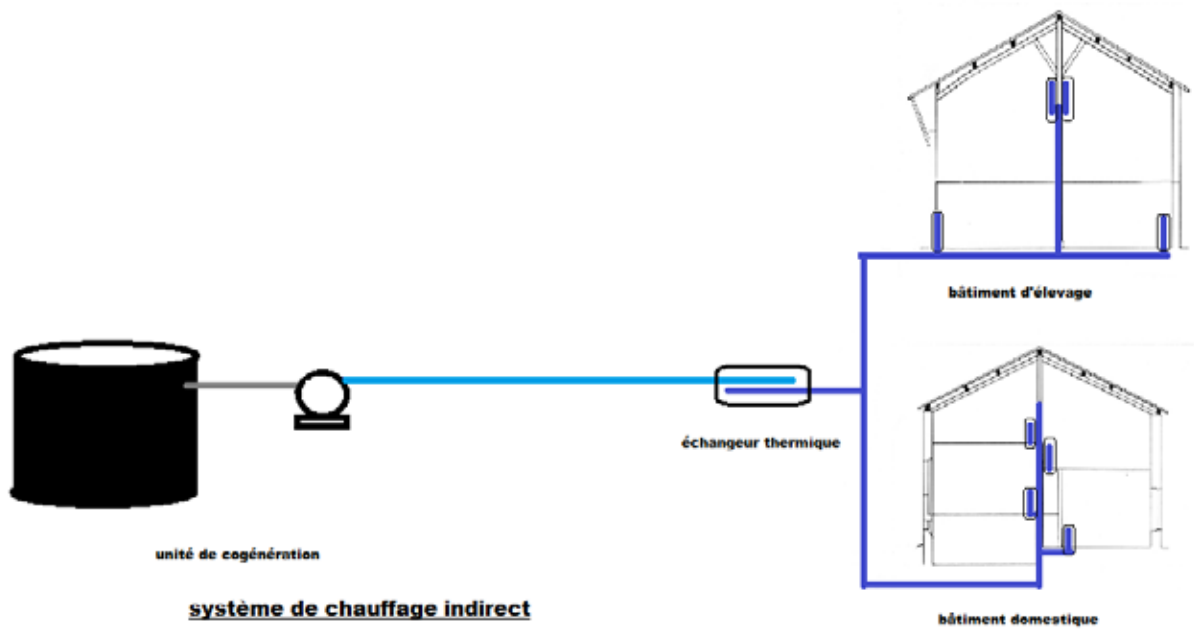


Annexe 3



systeme de chauffage direct

Annexe 4



systeme de chauffage indirect

## **Valorisation de la chaleur issue de la cogénération par déshydratation du digestat**

La concentration de l'élevage dans certaines régions a entraîné des obligations de traitement afin de réduire les excédents d'éléments fertilisants provenant du lisier. Ces procédés (par séparation biologique des phases) présentent l'inconvénient de détruire l'azote (élément fertilisant de plus en plus coûteux à produire) et ne permet pas la résorption des éléments solubles (K, Na). C'est pourquoi l'utilisation de la chaleur générée par la méthanisation, à des fins de déshydratation du digestat, pourrait constituer une solution de traitement durable des excédents. Cette voie devrait pallier aux inconvénients cités précédemment : conservation de l'azote, gestion des éléments fertilisants, et faciliter l'exportation.

Il existe une véritable association entre méthanisation agricole et résorption des excédents issus de l'élevage. Le traitement de ces derniers (qui ne générait jusqu'à présent que des coûts) pourrait se financer partiellement ou totalement par la vente d'électricité et une meilleure valorisation du coproduit. La méthanisation associée à de la déshydratation et exportation de la fraction solide présente tous les atouts d'une gestion durable des éléments fertilisants. Elle devrait se développer dans les zones où l'épandage est réduit pour des raisons écologiques.

D'où toute l'importance de cette filière qui se développe aujourd'hui, qui présente plusieurs aspects.

### **I. Aspect technique**

La finalité de ce procédé est la déshydratation du digestat. Or l'eau représente environ 80% de la masse de ce dernier, non traité. Elle se présente sous deux formes : l'eau libre, faiblement absorbée par la fraction solide, et l'eau liée, qui a établi des chimiques avec les particules solides et les bactéries (qui nécessite donc plus d'énergie pour être évaporée).

D'un point de vue énergétique, le séchage thermique du digestat directement après sa sortie du méthaniseur n'est pas intéressant. La matière solide n'est pas assez concentrée (10% du digestat), le séchage de ce produit brut serait trop coûteux. C'est pourquoi on distingue deux étapes dans la déshydratation d'un digestat pour limiter les besoins énergétiques et être en mesure de déshydrater une quantité significative de digestat :

- une pré-concentration mécanique et/ou thermique
- une phase de séchage thermique.

### A. La pré-concentration Cf figure 1

Les pré-concentrateurs mécaniques permettent de limiter la quantité d'énergie thermique nécessaire à la déshydratation en évacuant une fraction de la partie liquide.

Plusieurs techniques sont actuellement utilisées :

La décantation, méthode la plus connue et la moins onéreuse. Le principe est simple : les particules solides étant plus denses, se retrouvent au fond de la fosse. En pompant le surnageant, une fraction solide s'accumule au fond de la fosse.

Il faut ensuite sortir le solide, pompable. L'inconvénient est la teneur en matière sèche des sédiments est à peine plus élevée que la valeur moyenne de l'effluent. D'autre part, le taux de capture des éléments fertilisants demeure médiocre.

Les séparateurs mécaniques, qui regroupent les presses à vis, les décanteurs-centrifuges, les tamis vibrants, les tamis tangentiels, les presseurs rotatifs, et qui séparent physiquement phase liquide et phase solide. Ce procédé est lui aussi conservatif des éléments fertilisants, par contre le taux de capture dans la fraction solide est très variable.

Les séparateurs chimiques, qui s'ajoutent parfois à l'action des séparateurs physiques, et consistent à l'emploi de flocculants (type sels de fer ou d'aluminium) et coagulants (type polymères cationiques). Ils permettent d'agréger les colloïdes et particules fines en suspension qui habituellement ne sont pas retenus par les séparateurs mécaniques, améliorant ainsi leurs performances épuratoires. Ainsi, le taux de capture du phosphore d'un lisier de porc passe de 75 à plus de 90 voire 95 % avec l'ajout de tels additifs.

### B. Le séchage thermique

Les technologies de séchage thermique se divisent en trois catégories :

- les sècheurs directs (ou séchage convectif) dans lesquels les boues entrent en contact direct avec une source de chaleur telle que l'air chaud ou la vapeur surchauffée ;
- les sècheurs indirects (ou séchage par conduction) dans lesquels l'énergie nécessaire au séchage des boues est amenée par l'intermédiaire d'une paroi chauffée par un fluide caloporteur et sur laquelle reposent les boues ;
- les sècheurs mixtes utilisant à la fois les propriétés des sècheurs direct et indirect : la paroi est chauffée et l'air chaud permet d'évaporer la vapeur d'eau issue des boues.

La plupart des exploitations déshydratant leur digestat utilisent actuellement des sècheurs directs, avec notamment le sécheur à bande. Ce procédé de séchage consiste à introduire sur un tapis roulant perforé (les bandes) le matériau à sécher. De l'air chaud est alors introduit et circule parallèlement ou perpendiculairement aux tapis.

Après séparation des phases, la fraction solide est envoyée sur des tapis de séchage. Un courant d'air chaud circule parallèlement aux tapis avec un débit de 60 000 m<sup>3</sup>/h. La totalité du produit déshydraté est hygiénisée d'un point de vu réglementaire. Cf figures 2 et 3.

Il existe d'autres types de sècheurs directs tels que le sècheur à tambour. Cf figure 4 Ce type de sècheur est constitué d'un long cylindre rotatif légèrement incliné pour faciliter le déplacement du solide. Ce cylindre est précédé d'une chambre de combustion permettant de préchauffer l'air. Le séchage s'effectue par une circulation d'air chaud dans le même sens ou en sens inverse du digestat.

## **II. Étude de l'aspect économique**

### *A. Les pré-concentrateurs :*

Pour ce qui est de la décantation, cette technique a l'avantage du coût avec un investissement inférieur à 0,15 € / m<sup>3</sup> de lisier. Par contre, comme remarqué précédemment la teneur en matière sèche des sédiments est à peine plus élevée que la valeur moyenne de l'effluent.

Les techniques de séparation physico chimiques se limitent par le coût notable de leurs produits (plus d'1€ / m<sup>3</sup> d'effluent traité) et la qualité de la fraction solide qui demeure humide et pâteuse (difficilement compostable).

Toutefois il faut aussi voir l'importance du pré-concentrateur de manière plus globale : Pour évaporer l'eau d'un digestat l'énergie nécessaire est importante. A l'issue d'un prétraitement, le digestat peut atteindre une teneur en matière sèche d'environ 15 à 20 %. Dans le cadre de la méthanisation agricole, bien que l'énergie fournie puisse être conséquente, elle ne peut jamais être suffisante pour déshydrater la totalité du digestat produit de 10 à 70 % de Matière Sèche (valeur souhaitée).

La démonstration a été faite par l'ADEME : en prenant 1 m<sup>3</sup> de lisier porcin à 5 % de MS : Le pouvoir méthanogène du lisier est de 20 m<sup>3</sup> de biogaz par m<sup>3</sup> de lisier brut à 60 % de méthane (Solagro, 2006) soit 12 m<sup>3</sup> de méthane. Avec une quantité d'énergie libérée lors de la combustion du produit de 9,94 kWh / m<sup>3</sup> de méthane (Site Internet, Méthanisation.info), 1 m<sup>3</sup> de lisier peut donc produire  $9,94 \times 12 = 119,28$  kWh.

Or, en supposant des conditions de séchage parfaites (sans aucune perte), 119.28 kWh permettraient d'évaporer 164.5 kg d'eau. Ainsi, l'énergie disponible en méthanisant 1 m<sup>3</sup> de lisier permettrait de passer de 5% à seulement 6% de matière sèche pour cette même quantité. D'où l'utilité de la phase de pré-concentration qui permet de produire un digestat plus riche en matière sèche et donc moins couteux à déshydrater.

### *B. Les sècheurs thermiques*

Le sècheur direct est le plus adapté aux exploitations agricoles car le moins onéreux et le plus simple, les sècheurs mixtes et indirectes étant plutôt réservés aux séchages des boues de stations d'épuration.

Pour les sècheurs directs, la consommation d'énergie thermique est moins élevée que dans le cas des sècheurs indirects. Il faut compter en moyenne 9,74 kg d'air chaud pour évaporer 1 kg d'eau du produit à sécher, soit 0,981 kWh / kg d'eau évaporé. Cependant, selon le type de sècheur la consommation d'énergie est variable, de 0,830 kWh / kg d'eau évaporée pour des

sécheurs avec séparation préalable solide/liquide mécanique jusqu'à 1,138 kWh/kg pour les sécheurs utilisant de l'air chaud.

Il est très difficile d'évaluer clairement le coût de séchage du digestat toutefois on peut utiliser l'exemple de l'élevage porcin basé à Harzele et qui utilise un dérivé du tapis de séchage vu précédemment : La capacité de séchage est de 14 000 m<sup>3</sup> par an de digestat et produit 500-700 tonnes à 70 % MS. Pour 300 000€ d'investissements amortit sur 10 ans, on obtient un bilan de 97,0 € / tonne de MS produite, soit donc 2,9 € / m<sup>3</sup> de lisier traité. Il est ensuite très compliqué de quantifier ce que rapporte le digestat à l'agriculteur (économie sur le transport, sur la quantité d'engrais épandue,...).

### **III. Aspect écologique**

L'intérêt écologique est évident avec la conservation des éléments nutritifs azotés et phosphatés qui vont pouvoir être réutilisés et ainsi éviter l'utilisation de nouveaux intrants, toutefois cet effet est général à la méthanisation. L'autre aspect intéressant est la facilitation du transport de ce digestat. La déshydratation va permettre d'avoir un substrat plus concentré (donc masse moindre à exporter pour une même quantité d'éléments nutritifs) et plus léger, la combustion de carburants fossiles en est réduite. L'exportation est facilitée, la concentration des éléments nutritifs (qui polluent les écosystèmes des zones d'élevage intensifs) peut être réduite.

## Références:

-Rapport de l'ADEME, "Méthanisation dans la filière porcine, séparation de phases, séchage et normalisation d'un digestat" Coordoné par Julien Thual

- Article de l'INIST-CNRS "Déshydratation des digestats de méthanisation, analyse économique de 4 procédés", P LEVASSEUR ; A RUGANI ; M MARCON

## Figures:

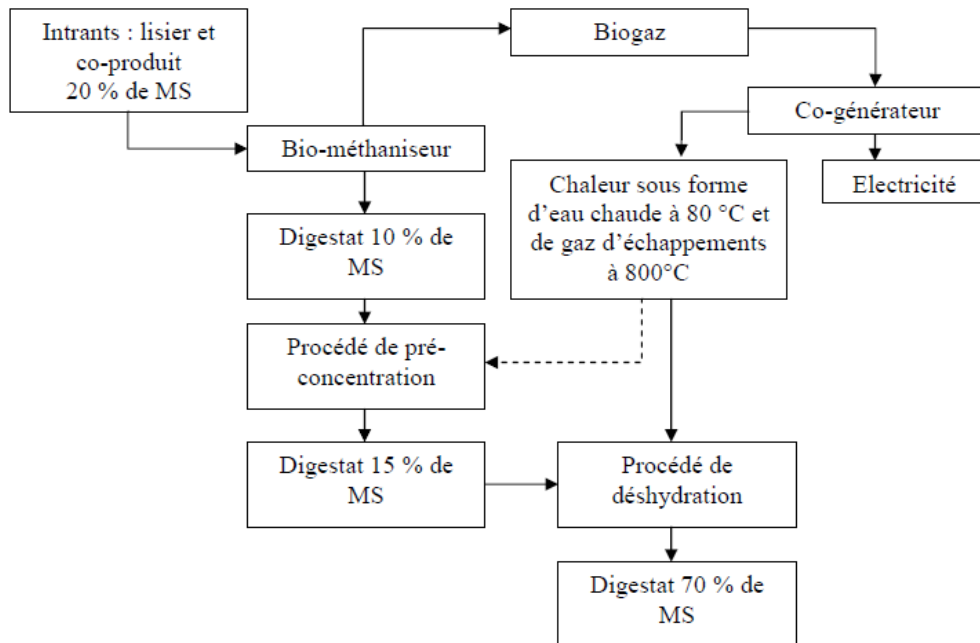
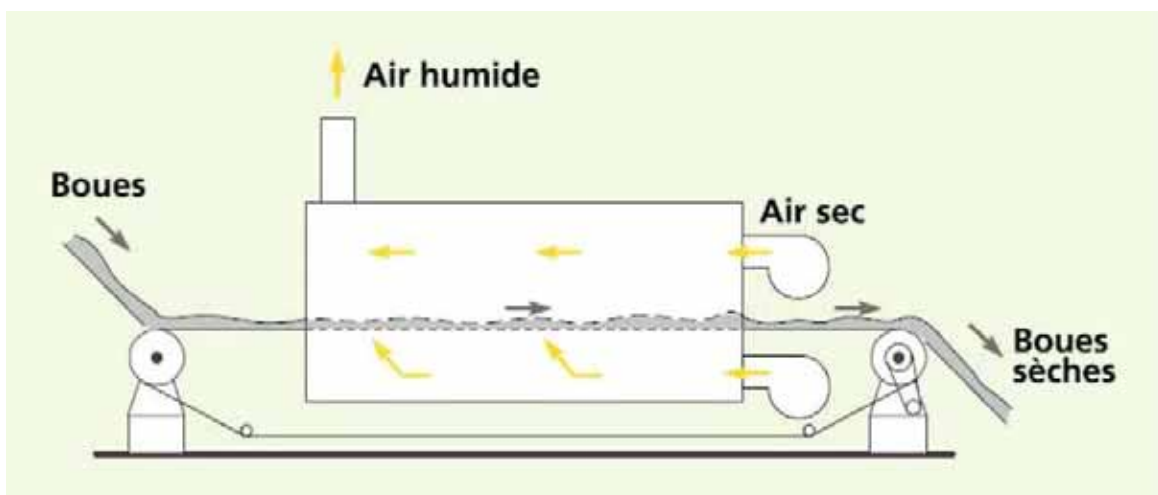


Figure 1: Organigramme de fonctionnement d'un système avec pré-concentrateur



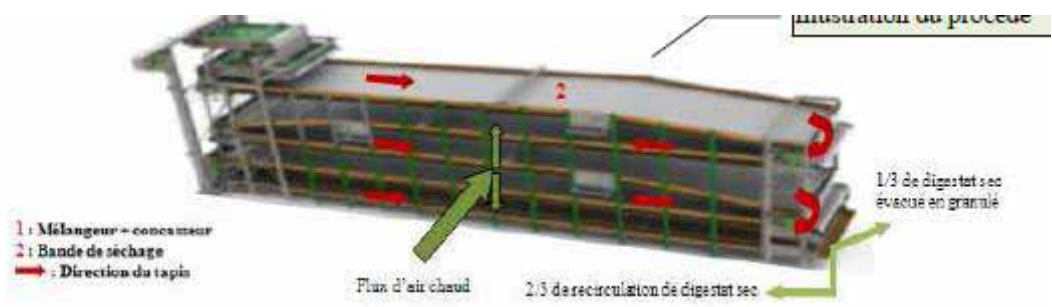


Figure 2 et 3: Sécheur à bande

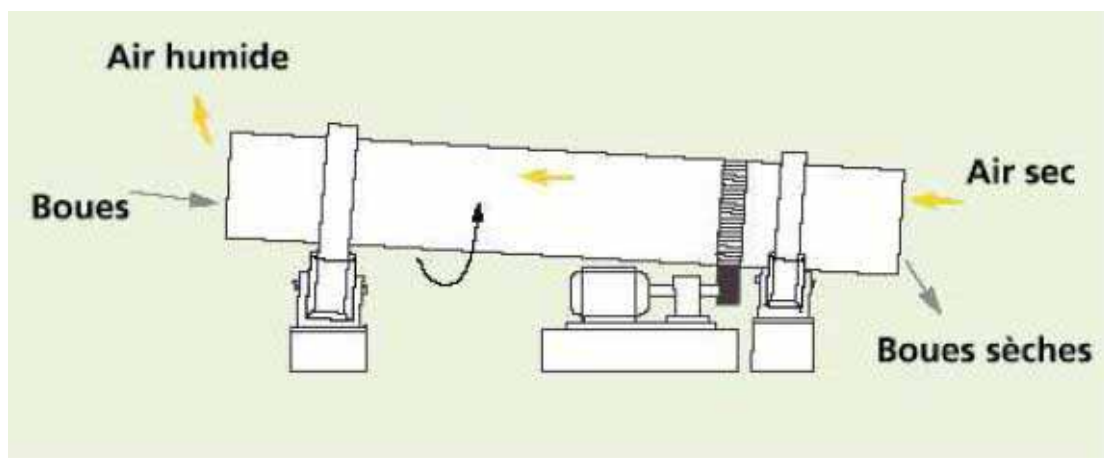


Figure 4: un sécheur à tambour

# Hygiénisation du digestat de la méthanisation

## introduction

De nombreux substrats organiques peuvent être insérés dans le digesteur afin d'y subir une méthanisation productrice d'énergie. Il s'agit par exemple du lisier, du fumier, de déchets verts etc. Néanmoins dans certains cas, selon la réglementation française, le substrat doit subir une hygiénisation préalable afin de ne représenter aucun risque sanitaire. Ces substrats spécifiques nécessitant une hygiénisation préalable sont les déchets de catégorie 3 : abas, sabots, sang d'animaux non malades, déchets alimentaires. En effet on ne peut risquer une contamination du méthaniseur par un agent pathogène. Il y a donc nécessité de réaliser un processus de pasteurisation pré-méthanisation permettant au substrat de posséder les critères nécessaires à son entrée dans le méthaniseur. Ce procédé de pasteurisation nécessite une chaleur de 70 degrés Celsius pendant 60 minutes. C'est dans cette optique que peut intervenir la chaleur produite lors de la cogénération. En effet, la chaleur dégagée par ce système est suffisante pour créer les conditions nécessaires pour la diminution significative des risques sanitaires.

Dans cette partie seront ainsi développées les différentes caractéristiques inhérentes à l'utilisation de la chaleur du méthaniseur pour l'hygiénisation..

## I) Hygiénisation:

### a) Généralités

Hygiénisation: définition : Traitement par des procédés physiques ou chimiques, qui réduit à un niveau non détectable la présence de tous les micro-organismes pathogènes dans un milieu (d'après l'arrêté du 8 janvier 1998). (1)

Ainsi, l'hygiénisation est l'ensemble des procédés permettant de détruire les microorganismes présent dans un substrat.

Le facteurs primordial de l'hygiénisation est le couple temps de séjour/température. Dans le cas de la pasteurisation du substrat par exemple, il est légalement obligatoire de chauffer le substrat à 70 degrés pendant 60 minutes (minimum) avant la méthanisation. En effet la réglementation concernant l'innocuité substrat du méthaniseur est très stricte. Des concentrations maximales en agent pathogènes sont ainsi autorisées dans le substrat.(normes ICPE).

### b) Quels sont les microorganismes pathogènes potentiellement présents dans le substrat?

les organismes présents sont nombreux et présentent un risque non négligeable pour la santé humaine et animale lors de l'épandage. Quatre grandes catégories se distinguent:

bactéries : *salmonella*, bactérie quantitativement la plus présentes au sein du digestat.

pouvant créer des entérites et très résistante (environ 6 mois de survie à 10 degré).

:*Escherichia coli* : présente dans l'intestin des ruminants et donc dans le lisier, cette bactérie, est dans la majorité des cas inoffensive mais peut



provoquer selon les souches, de nombreuses maladies.(ex: colite hémorragique).

parasites : *helminthes* (vers plats) et protozoaires

virus : dans notre cas les entérovirus, qui peuvent être responsable de méningites.(2)

Un taux légal de ces microorganismes est autorisé dans le substrat:

- salmonella est autorisée jusqu'à une concentration de 8 NPP/ par gramme de matière sèche
- les œufs d'helminthes sont autorisée jusqu'à une concentration de 3 œufs pour 10 grammes de matière sèche. (3)

## **II ) la pasteurisation , hygiénisation énergétiquement compatible avec la chaleur produite par le méthaniseur.**

la pasteurisation semble être le seul procédé hygiénisation techniquement réalisable avec la chaleur du méthaniseur. Cette méthode consiste à chauffer le digestat à une température définie pendant une durée spécifique, cela suivit d'un refroidissement rapide. Cela dans le but de détruire la majorité des microorganismes. Cette pasteurisation fait partie des pré-traitement précédent une méthanisation mésophile. Dans le cas d'une méthanisation thermophile, la pasteurisation est moins utile. En effet une partie des bactéries sont éliminée par la chaleur du méthaniseur. Néanmoins, en fonction de la quantité de microorganismes présents dans le digestat, il est parfois nécessaire de le réaliser.

### *a) Calcul du couple durée température de la pasteurisation*

Pour qu'une pasteurisation soit efficace, il faut déterminer le couple durée de séjour/température permettant de réduire sous un seuil légal la quantité de microorganismes du substrat.

On calcule ainsi la valeur pasteurisatrice  $VP = pZ 70(T)$  , qui est la durée en minute permettant d'obtenir , à 70 degrés , une réduction du nombre de microorganisme de  $10^{13}$  pour 10 grammes de produit. (4).

Ainsi le temps minimum nécessaire à la pasteurisation du substrat méthanisable est de 60 minutes à 70 degrés.(5)

### *b) Puissance nécessaire pour la pasteurisation à 70 degrés pendant 60 minutes*

Le moteur du méthaniseur va , via son système de refroidissement , produire de la l'énergie calorifiques (par exemple pour la ferme de la Bouzule , l'eau de sortie est à 90 degrés

La puissance produite par la chaleur de la méthanisation est par exemple:

- de 60 kWh thermique pour un moteur de 30 kW électrique

Partant du principe que l'on a 8000h de fonctionnement par an , l'énergie fournie est de 480000 kW par an.

(résultats provenant du questionnaire réalisé pendant les séances de projet)

Or l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'une cuve de pasteurisation pendant 1h à 70 degrés (pour une cuve de 500 litres ):4.8kw H (6)

*Nb*: il s'agit de l'énergie requise pour une cuve de pasteurisation laitière. Ainsi nous partons du principe , que la même énergie serait nécessaire pour pasteuriser le substrat de méthanisation.

Pour chauffer la cuve , on peut utiliser un échangeur de chaleur, utilisant directement l'eau chaude sortant du méthaniseur. Une dérivation du système de refroidissement menant l'eau jusqu'à la cuve , semble être le moyen de perdre un minimum de chaleur.

#### d) Méthode de visualisation des résultats de la pasteurisation.

Il est très difficile d'évaluer l'efficacité de l'hygiénisation pour tous les microorganismes du substrat. Ainsi pour avoir une idée du résultat post-pasteurisation , on utilise des microorganismes indicateurs . La disparition de ces microorganismes seront un véritable indicateur de la disparition d'une majorité des microorganismes du substrat.

Ces organismes sont sélectionnés selon plusieurs critères comme par exemple, leur présence en grande quantité dans le substrat.

il existe 2 types de germes indicateurs:

- ceux indicateurs de bactéries: E.coli
- ceux indicateurs de virus: entérocoques

### **III) Impact écologique, intérêt économique**

#### a) Impact écologique

Le but de la pasteurisation est donc d'épandre un digestat non nocif pour l'environnement. En effet le digestat est un amendement dont la valeur agronomique est supérieure à celle des matières entrantes.

Ce produit de méthanisation hygiénisé présente de nombreux avantages par rapport à l'épandage direct d'effluents d'élevages :

- une odeur moins forte que les effluents
- un risque sanitaire nettement amoindri , notamment après pasteurisation
- une augmentation de la germination des graines d'adventices ( car moins de pathogènes dans le substrat traité)
- une valeur fertilisante améliorée, donc moins de quantité à épandre.

Il est aussi beaucoup moins nocif que les engrais normalement utilisés. Ainsi sachant que la France est actuellement le septième pays consommateur d'engrais minéraux au monde (2% du marché mondial), l'utilisation d'engrais hygiénisé, permettra de limiter l'impact de l'agriculture sur l'environnement.

Enfin ajoutons que les déchets de catégorie 3 , normalement inutilisable , pourraient finalement servir , à la fois pour la production énergétique mais aussi pour la création d'un intrant "propre".

### b) Intérêt financier

l'hygiénisation permet d'introduire dans son digesteur , des déchets de catégorie 3 qui sont normalement interdit sans pasteurisation préalable. Ainsi l'investissement dans une cuve de pasteurisation permet d'augmenter les rendements de son méthaniseur en variant les substrats utilisables par ce dernier. De plus le fait de pasteuriser son substrat avec la chaleur provenant directement du méthaniseur , permet d'éviter toute dépense énergétique supplémentaire pour hygiéniser.

Néanmoins un problème non négligeable est que l'utilisation de la chaleur du méthaniseur pour traiter son propre substrat, ne permet pas d'obtenir la prime de 4 centimes sur la production d'électricité . En effet la prime chaleur n'est pas reversée par ERDF si la chaleur utilisée évite une consommation d'énergie.(7)

Un autre aspect économique négatif est le cout de l'installation. Par exemple, une cuve de pasteurisation de 400 litres coute dans les 4000 euros. Cet investissement est à prendre en compte dans le bénéfice total permis par l'installation de ce système.

Néanmoins une plus grosse quantité de substrat introduite dans le méthaniseur permet d'obtenir une plus grande quantité de digestat à épandre. Ce digestat permet ainsi de ne pas utiliser en grande quantité les engrais chimiques dont les couts sont élevés actuellement.

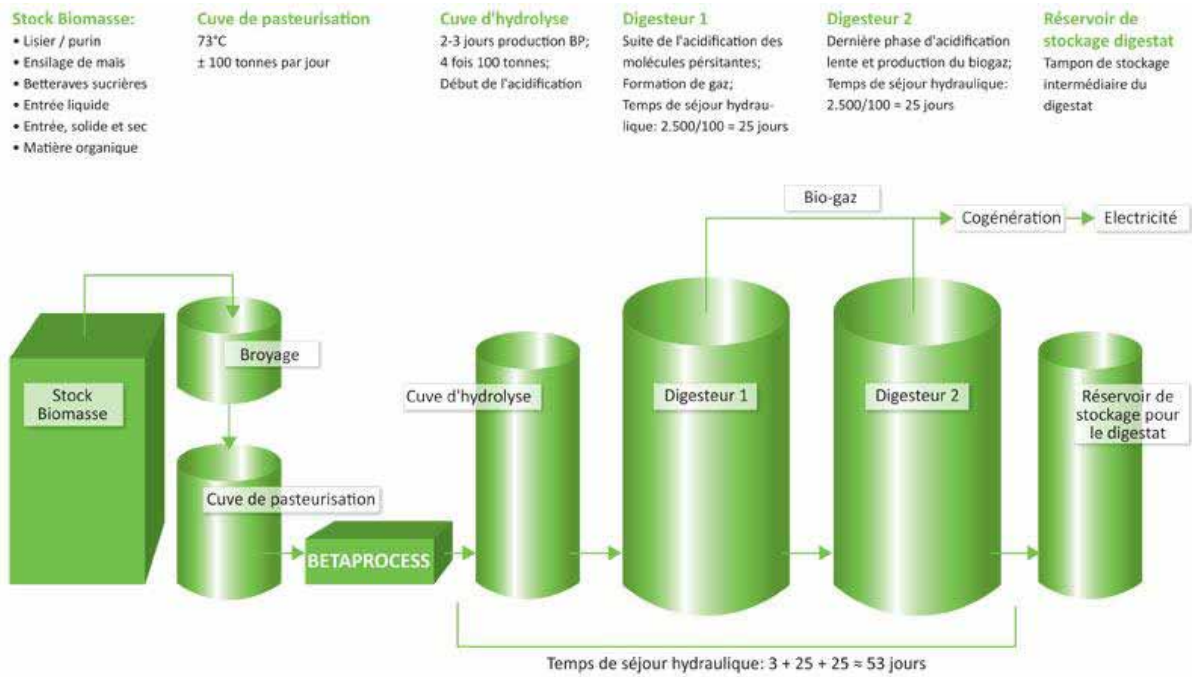
Par exemple le prix moyen payé par les agriculteurs français en engrais azoté (ammonitrate 33) est de 359 euros/tonne. Une utilisation d'une plus grande quantité de digestat comme intrant permettrait ainsi de diminuer les couts de production.

### **conclusion**

La pasteurisation semble bien être un moyen énergétiquement viable d'utilisation de la chaleur du méthaniseur. Cette hygiénisation permet l'utilisation de produit normalement interdit dans le méthaniseur et permet ainsi une production plus importante d'énergie et de digestat épandable.

le gain environnemental est important . En effet l'épandage d'un digestat propre permet une baisse de l'utilisation des engrais chimiques tout en évitant un danger sanitaire. Le seul obstacle à cette solution d'utilisation de la chaleur du méthaniseur est l'aspect économique. En effet aux vues des chiffres précédemment cités , est-il rentable pour un agriculteurs d'investir dans un système de pasteurisation couteux, sachant de plus qu'il n'obtiendra pas la prime de chaleur de la part d'ERDF? Un calcul de la rentabilité à long terme semble nécessaire pour valider totalement le procédé.

## annexe 1: intégration du de la pasteurisation au sein de la méthanisation (5)



## annexe 2: cuve utilisée pour la pasteurisation de déchets d'abattoir



annexe3: vis sans fin menant le substrat jusqu'a la cuve de pasteurisation



annexe 4: installation complète d'une unité de pasteurisation agricole (8)



## **Références bibliographiques**

- (1) <http://www.ademe.fr/partenaires/boues/pages/f15.htm>  
"les différents types de boues d'épuration et leur traitement"
- (2) <http://moletta-methanisation.fr/textes/rapportdestageHygienisationMyleneBesson.pdf>  
"Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires liés à l'épandage de digestat "
- (3) <http://moletta-methanisation.fr/textes/Digestionanaerobiealaferme,aspecthygienisation.pdf>  
"Aspects sanitaires de l'épandage de digestats issus de méthanisation à la ferme."
- (4) <http://archimer.ifremer.fr/doc/00126/23710/21566.pdf>  
"Etude, conception et experimentation d'un pasteurisateur industriel pour le préparation de plats cuisines en cycle court."
- (5) <http://www.betaprocess.eu/bio-gas-exemple-de-projet.php>  
"Une usine de biogaz, comprenant le procédé Betaprocess et l'hygiénisation"
- (6) [http://www.agrifit.com/boutique\\_us/images\\_produits/fFPP8001\\_1.pdf](http://www.agrifit.com/boutique_us/images_produits/fFPP8001_1.pdf)  
"PASTEURISATEUR A PLAQUES / TP-LC"
- (7) <http://www.web-agri.fr/machinisme-batiment/batiment-traite/article/comment-valoriser-la-chaleur-1157-89282.html>  
"Méthanisation - Comment valoriser la chaleur ?"
- (8) <http://www.biogaz-planet.fr/produits/hygenisation/>  
"Cuve d'hygiénisation PlanET"

# **Valorisation de la chaleur produite par la méthanisation :** **Séchage fourrager par ventilation**

## **INTRODUCTION**

La majorité des éleveurs de ruminants font du foin. De nombreuses qualités sont reconnues au foin, c'est un aliment diététique, facile à transporter par comparaison avec l'ensilage... Cependant, l'intensification et la mécanisation ont entraîné une certaine préférence pour l'ensilage d'autant plus que les aléas du climat rendent difficile le séchage au sol du foin. En outre, le séchage au sol entraîne des pertes de valeur nutritionnelle du foin. En effet, l'humidité persistante favorise le développement de microorganismes qui dégradent le foin. Les régions montagneuses cumulent le problème de pluviométrie importante et de difficultés de production d'ensilage de maïs mais ce sont majoritairement ces régions qui produisent du lait à destination fromagère, notamment des régions AOC, ce qui nécessite une qualité du lait optimal. Ce sont dans ces régions qu'est apparue dans les années 1970, la technique de séchage fourrager par ventilation, permettant la production d'un foin de bonne qualité.

Le séchage fourrager contribue à l'amélioration des pratiques agricoles et environnementales tout en valorisant la chaleur produite par la méthanisation.

### **I. État des lieux en France**

En France, il existe entre 3000 et 4000 unités de séchage fourragé [1]. Originaires des zones de montagne, la technique du séchage fourrager s'est perfectionnée au fil du temps. On distingue 4 zones principales de séchage fourrager : la zone Est (Rhône-Alpes et Franche-Comté), zone historique riche en AOC fromagères interdisant les ensilages, la zone Massif Central (Midi-Pyrénées, Limousin, Auvergne), [2] la zone Ouest (Bretagne, Normandie, Pays de la Loire, qui a reçu un essor récent avec l'installation de 80 séchoirs entre 2000 et 2008 [3], s'est développée à cause de conditions climatiques devenant de plus en plus difficile pour le séchage au sol avec le réchauffement climatique mais aussi par la volonté de développer l'herbe et l'agriculture biologique, la zone « Pyrénées », zone historique mais dont la rentabilité du séchoir est limitée par la taille des exploitations et des volumes à sécher. Enfin, il existe de nombreuses autres installations disséminées dans toute la France. [2]

Si les premières régions à s'intéresser au séchage fourrager présentaient une forte pluviométrie (plus de 2000 mm dans le Jura et la Savoie), on retrouve également la technique dans des régions souffrant de la sécheresse, dans lesquelles le séchage au sol entraîne de nombreuses pertes irrémédiables. Au sein des autres régions, les éleveurs qui utilisent le séchage fourrager recherchent une autonomie alimentaire maximale ou souhaitent réduire leur part d'ensilage maïs afin de réduire les coûts liés aux intrants azotés (car le foin ventilé est riche en protéines, donc en azote). Cette technique permet également le passage à une agriculture biologique pour tout éleveur qui le souhaite. [3]

Ces éleveurs ont minimum 30 vaches. Ce système reste économiquement viable avec des vaches ayant une production maximale de 8000 L/an. [3]

En décembre 2013, une enquête réalisée par des étudiants de l'ENSAIA sur la valorisation de la chaleur par la méthanisation a conduit à l'obtention des résultats suivants : sur les 92 agriculteurs ayant un méthaniseur en construction ou en fonctionnement, 12 font du séchage fourrager et 6 en feront après construction du méthaniseur. Globalement, ils sont présents dans toutes les régions de France. La puissance du méthaniseur n'est pas sélective puisqu'elle est comprise entre 30 et 890 kW électrique, néanmoins, de nombreux systèmes ont une puissance proche de 200 kW électrique. Sur les 12 en fonctionnement, 10 en sont satisfaits. Cependant, l'absence de rentabilité d'une unité de méthanisation trop petite est dénotée et même pour les agriculteurs ayant un méthaniseur à forte puissance (supérieure à 400 kW électrique), le coût se révèle cher, le méthaniseur étant seulement rentabilisé à 10 %. Sur les 18, la technique du séchage fourrager permet la création de 4 emplois.

### **II. Étude de l'aspect technique du séchage fourrager**

#### **A. Récolte du fourrage au champs et déchargement**

L'herbe est pré-fanée au champ 24 à 48 heures, contre 4 à 5 jours pour un séchage au sol soit un gain de 2 à 4 jours, la différence est grande pour des régions pluvieuses. L'herbe contient alors 45 à 65 % de matière

sèche. [4] La détermination de ce pourcentage peut se faire tactilement : à 50 % de matière sèche, le fourrage est encore souple et n'humidifie pas les doigts, à 60 %, les feuilles sont cassantes, la couleur de l'herbe est pâle. [5] Elle est ensuite récoltée avec une auto-chargeuse et emmener en grange. [Figure 1] La longueur idéale des brins de fourrage est comprise entre 15 et 25 cm, elle facilite la répartition du fourrage sur l'aire de ventilation. Il faut cependant veiller à ne pas tasser l'herbe encore humide, sinon la ventilation ne se fera pas correctement. [4]

Le déchargement [figure 2] se fait à l'aide d'un outil d'engrangement, dans la majorité des cas, il s'agit d'une griffe à fourrage avec un bras télescopique [figures 3 et 4], cet outil permet de disposer l'herbe sur toute la longueur et largeur de la cellule de séchage et non sous forme de tas mais aussi de décompacter l'herbe humide. L'herbe est déposée sur le caillebotis d'une cellule de séchage [figure 5] en couches successives. La première couche doit faire 2 mètres, puis les prochaines couches feront environ 1 mètre, le tout atteignant une hauteur de 6 à 7 mètres de haut. [3] Le caillebotis [figure 6] est un assemblage de liteaux et chevrons en bois sur 25 à 50 cm de hauteur, il couvre toute la surface horizontale de la cellule et permet de supporter le poids du fourrage et de répartir l'air sec et chaud du ventilateur sur toute la surface, [4] car il est à claire-voie. A la place de la griffe, un aérograngeur peut être utilisé : il permet la régularité des couches néanmoins, il ne permet pas le brassage du foin. [5]

Ainsi, le séchage fourrager modifie les pratiques de récolte habituelles : toute l'herbe ne peut être récoltée directement, il faut prendre en compte la capacité de la cellule de séchage ; s'il n'est pas nécessaire d'attendre que la première couche soit sèche pour en remettre une autre, il y a tout de même un temps de latence. La récolte du fourrage se fait au fil des jours, chaque jour, une petite surface est fauchée, ce qui permet d'éviter le gaspillage d'herbe et d'optimiser la productivité des prairies. [3]

#### *B. Principe du séchage en vrac*

Un ventilateur situé à la base de la cellule pulse l'air chaud et sec du réchauffeur d'air à l'intérieur de la cellule, qui se répartit de façon homogène grâce au caillebotis et remonte au sein de la cellule, emportant l'humidité vers le haut (ventilation dite verticale, système prédominant en France). Le foin est donc réparti de bas en haut de la façon suivante : un foin à 85 % de matière sèche, un foin à 65-85 % de matière sèche et un foin encore humide à 45-65 % de matière sèche. [6] Le ventilateur force l'air à entrer dans le fourrage, à capter l'eau du fourrage et empêche le fourrage humide de chauffer. [Figure 7]

Augmenter la température de 1 °C revient 0,24 kcal/kg d'air sec et à une baisse de l'humidité relative de 5 %. Pour avoir un foin à 85 % de matière sèche, il faut donc monter la température de l'air de 5 à 6 °C environ, néanmoins le réglage de la température se fait à l'aide de calculs, qui doivent tenir compte de nombreux paramètres, tels que l'humidité relative de l'air, connue par un psychromètre [figure 8] ou hygromètre, le choix du fourrage (sécher la luzerne est plus rapide que le séchage de Graminées par exemple), le fait que la récolte soit précoce ou tardive, la pression, la masse et épaisseur du foin, la vitesse de l'air, donnée par le débit du ventilateur... [5]

Le nombre de jours de séchage est variable. [Tableau 1] Il peut ensuite être distribué aux ruminants directement avec la griffe à fourrage ou resté stocké dans la grange. Étant séché à plus de 85 % de matière sèche, il peut être longtemps conservé. [3]

#### *C. Variantes du séchage en vrac*

Le ramassage de l'herbe peut aussi se faire en balles rondes ou balles carrées (bottes), mais la compaction qui en découle entraîne un risque accru de dégradation de la qualité et une résistance hétérogène à l'air, qui nécessite une forte teneur initiale en matière sèche (65 à 80 %). Ce dernier problème peut être contourné par l'utilisation d'un déshumidificateur, qui retire une partie de la vapeur d'eau contenue dans le flux d'air avant qu'il ne soit envoyé dans le fourrage à sécher. [5]

L'intérêt de cette méthode est qu'elle réduit le temps de travail : il n'est plus que de 3,5 heures par hectare contre 6 heures par hectare pour le séchage en grange (fauchage, parage, andanage, ramassage, mise en séchoir). [5] L'investissement initial est plus faible puisque le ramassage du foin se fait avec les appareils déjà présents à la ferme, cependant, les frais de fonctionnement sont plus importants que ceux du séchage en vrac. [2] Ce système est cependant moins présent en France : le séchage en vrac étant plus souple et plus économique en énergie. [5] Ainsi, plus de 93 % des exploitations utilisent le séchage en vrac. [2] [tableau 2]

#### *D. Couplage avec énergie provenant de la méthanisation*

La méthanisation produit de la chaleur qui peut être utilisée pour alimenter le ventilateur et le réchauffeur d'air. Un ventilateur peut sécher jusqu'à 2 cellules de séchage. Il fournit une puissance de 12 à 25 kW/h. [4] Ainsi, un méthaniseur à faible puissance peut largement être utilisé ; ce qui signifie aussi que pour des



gros systèmes, d'autres modes de valorisation de la chaleur devront être utilisés. La consommation d'énergie pour le système fourrager pour le séchage fourrager est d'environ 150 GWh/an. [2] [figure 9]

#### *E. Qualités requises pour la technique du séchage fourrager*

Le séchage fourrager n'est pas aisé à mettre en place, il est nécessaire d'avoir une bonne technicité de la gestion de l'herbe. Les éleveurs, qui l'utilisent sont soucieux de la qualité du fourrage récolté. Par ailleurs, la pratique du séchage nécessite un apprentissage notamment au niveau du rythme de remplissage des cellules, de la durée de ventilation, de l'appréciation, du niveau de séchage du fourrage, et aussi du déclenchement des fauches à des périodes peu habituelles au départ. [3] Durant le séchage, la pression doit être surveillée ainsi que l'état du foin ou l'éventuelle présence de moisissures. [4] Les réflexions sont à prendre au jour le jour, car il faut tenir compte de l'effet du climat, des obligations du quotidien et même au sein d'une journée, des changements sont à prévoir : l'humidité de l'air exigée est basse mais elle varie tout au long de la journée. [5] Une des difficultés des éleveurs est de déterminer l'arrêt de la ventilation. Un séchage insuffisant engendre une dégradation de la valeur alimentaire du fourrage et un risque d'incendie. Le contrôle se fait par observation visuelle et olfactive après démarrage du ventilateur (dégagement de buée, touché du fourrage, odeur...). [2]

*Le séchage fourrager ne demande pas seulement des compétences solides pour gérer le système, les bâtiments et le matériel de séchage ont un coût non négligeable, qu'il est important de prendre en compte.*

### **III. Étude de l'aspect socio-économique du séchage fourrager**

#### *A. Un investissement non négligeable*

La technique du séchage fourrager requiert une importante réflexion à la base, car l'investissement est lourd. Le coût d'investissement varie entre 50 000 € et 300 000 € selon les bâtiments existants pour le séchage en vrac. [3] Il faut compter la grange et les travaux de restructuration avec, la cellule de séchage, la griffe à fourrage, l'auto-chargeuse, le réchauffeur d'air, le(s) ventilateur(s). La durée de vie des investissements est généralement de plus de 20 ans, les éléments les plus rapidement renouvelés étant la mécanisation au champ. [2] La griffe et le ventilateur coûtent 26 600 €, une auto-chargeuse d'occasion revient à 3 000 €. [6] La grange doit être suffisamment haute : 6 à 7 mètres pour le foin et 2 à 3 mètres pour la griffe à fourrage, elle est composée de plusieurs cellules de séchage délimitées entre elles par des cloisons, une cellule de séchage ne doit pas excéder 200 m<sup>2</sup>. Le nombre de cellules dépend de la quantité de fourrage stockée. [3] En Bretagne, Jean-Yves Guémin sèche 140 tonnes de foin sur 2 cellules de 250 m<sup>2</sup>. [6] Les frais de fonctionnement sont toutefois peu élevés. L'amortissement est réalisé sur une période de 10 à 15 ans. [3] [tableau 3]

Pour le séchage en bottes, l'investissement varie de 20 000 € hors taxe à plus de 100 000 € hors taxe selon la taille du séchoir. Cependant, il faut également tenir compte du matériel de mécanisation, mais très souvent, il est déjà présent sur l'exploitation. En outre, les tracteurs et machines étant plus sollicités, il faut les remplacer tous les 6 à 8 ans. [2]

#### *B. Subventions accordées*

Le Plan de Modernisation des Bâtiments d'Élevage (PMBE) apporte 37 800 € à Jean-Yves Guémin via le Conseil général, le Conseil régional et l'ADEME. Une Mesure Agri-Environnementale (MAE) a pu être signée pour la production d'un « système fourrager économe en intrants » et rapporte 6 000 € pendant au moins 5 ans. [6] [tableau 4]

#### *C. Rentabilité du système*

Jean-Yves Guémin constate que son Excédent Brut d'Exploitation (EBE) a augmenté de 33 € pour 1000 L de lait. En outre, son ancien système utilisait 12 tonnes de soja en provenance d'Amérique du Sud tandis que son système actuel ne demande plus que 2,5 tonnes de tourteaux de colza originaire de France, ainsi le séchage fourrager lui permet d'économiser ce coût de transport : ce coût est passé de 44 à 29 € pour 1000 L de lait (son coût de concentrés a diminué de 24 à 15€ pour 1 000 L de lait et son coût fourrages de 20 à 14€ pour 1 000 L de lait). Il attend un retour sur investissement de 12 ans mais il pourrait être moins long compte tenu de la volatilité des prix du soja et du fioul. [6]

Enfin, puisque les animaux sont en meilleure santé, les frais liés aux vétérinaires sont moindres.

#### *D. Bien-être humain*

Jean-Yves Guémin observe une amélioration de ses conditions de travail. En effet, la griffe à fourrage facilite la distribution de fourrage aux ruminants : cela ne lui prend plus que 20 minutes par jour. [6] La distribution de la ration hivernale est simplifiée et le travail se fait à l'abri. [4]

*Le séchage fourrager requiert une grande technicité et des frais importants. Si le projet peut paraître ambitieux avec peu de retour, les intérêts agronomiques et environnementaux montrent au contraire un système prometteur et efficace.*

### **IV. Étude des aspects agronomiques et environnementaux du séchage fourrager**

#### *A. Amélioration du rendement des cultures*

Bien que le foin soit ramassé à un stade précoce, le rendement n'en est pas pour autant affaibli car les repousses sont plus abondantes et car un foin récolté au sol encore humide n'est pas cassant, ce qui limite les pertes de matières organiques. [7] En outre, étant ramassé au fur et à mesure, le foin n'est pas gaspillé.

#### *B. Respect de l'environnement*

La technique de ramassage du foin ne nécessite pas l'utilisation de déchets comme le plastique utilisé pour l'ensilage. Par ailleurs, moins d'engrais et de pesticides sont utilisés. Enfin, les machines agricoles utilisées sont moins lourdes, ce qui évite le compactage du sol. [4]

#### *C. Production d'un foin de meilleure qualité*

Le foin est ventilé mais non échauffé, il n'est pas dégradé par les rayons ultraviolets du soleil. Un foin ventilé est stabilisé 4 à 5 jours, il n'est alors plus dégradé par les microorganismes, en particulier, il n'est pas contaminé par les spores butyriques, qui provoquent des ravages sur les fromages. Le foin est ramassé à un stade précoce, par conséquent, il conserve toutes ses qualités nutritives : il est plus riche en protéines, ce qui augmente l'appétence des animaux, ainsi, les vaches en pleine lactation consomment jusqu'à 17 kg de foin par jour et le recours aux concentrés tel que le tourteau de soja est diminué. [7] En Franche Comté, une étude réalisée sur 1358 exploitations a permis une augmentation de la production de lait de 342 kg par vache et par an avec une augmentation du taux protéique du lait de 0,37 g/L. [5] Le foin ventilé contribue également à améliorer la santé des animaux, à augmenter leur longévité et abaisse le taux de boiteries. [7]

## **CONCLUSION**

Le séchage fourrager est une technique ancienne, héritée des zones de montagne mais qui n'a cessé de s'étendre depuis dans toute la France. Près de 20 % des agriculteurs ayant un méthaniseur ont choisi ce mode de valorisation au sein de leur exploitation. C'est un système performant permettant la production d'un fourrage de qualité, plus riche en énergie, appréciée par les animaux tout en étant respectueux de l'environnement. Toutefois, ce système reste complexe par sa technicité mais surtout reste fortement coûteux.

ANNEXES



Figure 1 : auto-chargeuse [1]



Figure 2 : déchargement [4]



Figure 4 : griffe à fourrage avec bras télescopique [1]



Figure 4 : déplacement du fourrage par la griffe [4]



Figure 5 : cellules de séchage [4]



Figure 6 : caillebotis [4]



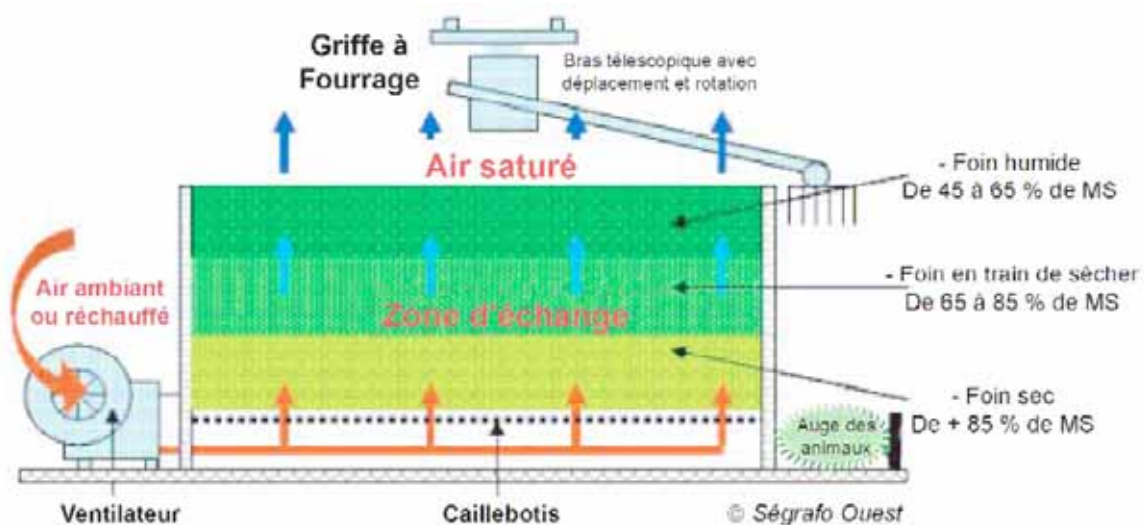


Figure 7 : schéma d'une cellule de ventilation de foin [3]

Nombre de jours de séchage en grange	Nombre de fermes		
	Coupe 1	Coupe 2	Coupe 3
1 à 4	4	4	4
5 à 9	2	6	9
10 à 14	4	5	3
15 à 19	4	0	0
20 à 24	3	3	0
25 à 29	0	0	0
>=30	1	0	0

Tableau 1 : nombre de jours de séchage en grange et coupes [2]



Figure 8 : psychromètre [4]

	Vrac	Balles rondes
Récolte/transport	Autochargeuse	Pressage + chargement remorques
Mise en séchage	Électricité pour la griffe Une seule manutention (stockage direct)	Chargeur sur tracteur pour installation sur séchoir et pour sortie du séchoir et mise en stockage
Séchage	Électricité : <100 kWh /tMS Combustible : faible ou 0 en solaire Coût : 5 à 7 € / tMS	Électricité : 100 à 150 kWh /tMS Combustible : 200 à 400 kWh /tMS Coût : 30 à 50 € /tMS
Distribution aux animaux	Électricité pour la griffe en général (1/4 h /jour)	Fioul pour tracteur
Globalement	Faible	Élevé

Tableau 2 : comparaison en terme d'énergie du séchage en vrac et du séchage en balles rondes

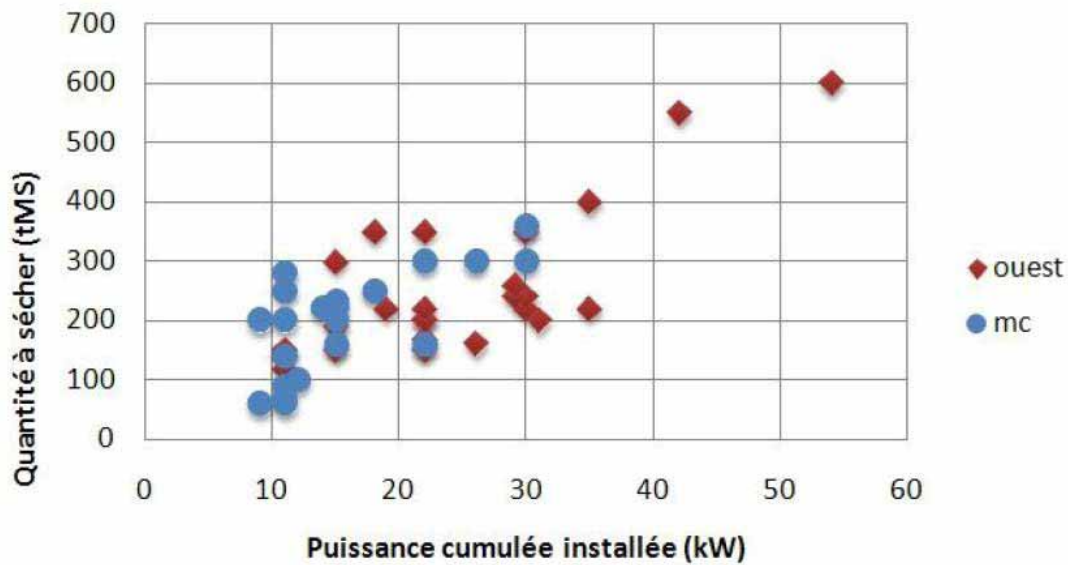


Figure 9 : Quantité de foin à sécher en fonction de la puissance [2] (mc : Massif Central)

Poste	Précision	Coût indicatif
Bâtiment	Neuf, possibilité souvent réduite d'aménagement dans un bâtiment existant	40 000 à 200 000 €
Aménagement intérieur du séchoir	Cellules, gaines de distribution, caillebotis	5 à 15 000 €
Manutention en bâtiment	Griffe à bras télescopique, possibilité d'alimenter directement les animaux ou obligation de passer par une remorque distributrice	25 à 45 000 €
Manutention du vrac au champs et transport	Remorque autochargeuse	30 à 50 000 € (neuf) 5 à 15 000 € (occasion)
Ventilateur(s), alimentation électrique et branchement	Ne pas oublier le raccordement électrique et / ou la modification du compteur	5 à 20 000 €
GAC	Capteur solaire à air sur hangar ou sur élevage, fioul, bois...	10 à 30 000 €

GAC : Générateur d'Air Chaud

Tableau 3 : coût des différents aménagements / matériaux

	Montant moyen (€)	Montant maxi (€)	Nombre de questionnaires renseignés
Montant bâtiment + capteur	106 954	310000	42
Montant manutention vrac (griffe ou pont)	30 294	115 000	39
Montant ventilation / électricité	11 419	26 750	30
Montant GAC* solaire	13 417	74 000	8
Montant GAC solaire et/ou fioul	4 100*	6 700*	2*
Montant autochargeuse	27 190	58 000	45
Montant faucheuse	11 469	33 000	26
Montant faneuse	7 935	15 000	17
Montant andaineur	9 230	16 500	18
<i>Aides sur bâtiment + manutention + ventilation + GAC</i>	30 938	102 840	25
<i>Aides sur matériel</i>	12 058*	20 000*	6*
<b>Montant investissement total</b>	<b>163 248</b>	<b>423 492</b>	<b>49</b>
<b>Montant aide total</b>	<b>37 757</b>	<b>140 000</b>	<b>34</b>

GAC\*: Générateur d'Air Chaud

Tableau 4 : montants des différents équipements et aides

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] SEGRAFO, Association de promotion et de développement de séchage du foin en grange dans l'Ouest, *Méthanisation et séchage en grange : Un couplage est-il possible ?*, 2011, [http://www.segrafo.com/documents/article\\_methanisation\\_segrafo\\_2011.pdf](http://www.segrafo.com/documents/article_methanisation_segrafo_2011.pdf) (Page consultée le 14 janvier 2014)
- [2] ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Utilisation rationnelle de l'énergie pour le séchage des grains et des fourrages : situation technico-économique du parc de séchoirs existant et leviers d'actions actuels et futurs, septembre 2011, <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=-1&cid=96&m=3&id=82324&ref=&nocache=yes&p1=111> (Page consultée le 14 janvier 2014)
- [3] KNODEN D, *Le séchage du foin en grange : principes de base*, 2009, [http://www.fourragesmieux.be/Documents\\_telechargeables/Le\\_sechage\\_du\\_foin\\_en\\_grange.pdf](http://www.fourragesmieux.be/Documents_telechargeables/Le_sechage_du_foin_en_grange.pdf) (Page consultée le 14 janvier 2014)
- [4] CARRIER Michel. *Le séchage en grange du foin à l'énergie solaire*, <http://www.agrireseau.qc.ca/Plantes-Fourrages/documents/Le%20s%C3%A9chage%20en%20grange%20du%20foin.pdf> (Page consultée le 14 janvier 2014)
- [5] HUYGHE Christian, DELABY Luc, *Prairies et systèmes fourragers : Pâturage, ensilage, foin, 2ème édition*, avril 2013
- [6] FALAISE D, LUSSEON J-M, *Pourquoi, comment, développer les énergies renouvelables à la ferme, Le SÉCHAGE SOLAIRE en grange des fourrage*, 2005, <http://www.agriculture-durable.org/wp-content/uploads/2010/05/nrjsechage.pdf> (Page consultée le 14 janvier 2014)
- [7] BOVAGNE Jean, CABON Gildas, GRILLOT Michel, *Le foin séché par ventilation : comprendre, calculer, conseiller*, mai 1985



# Valorisation de la chaleur produite par la méthanisation : le séchage de céréales

## Introduction

La méthanisation couplée à la cogénération permet de produire de l'électricité et de la chaleur via les gaz d'échappement du moteur à biogaz. L'une des principales valorisations de cette chaleur est le séchage de matière. Nous nous intéressons ici plus particulièrement au séchage de céréales, qui présente un grand intérêt lors des récoltes en conditions difficiles. En-effet, la météo peut s'avérer capricieuse en période de moisson, impliquant un retardement des récoltes céréalières, ou alors une récolte à un taux d'humidité trop élevé pour un stockage dans de bonnes conditions de conservation. En utilisant la chaleur produite par le méthaniseur pour sécher l'air ventilé dans les silos, on peut ainsi diminuer significativement le taux d'humidité du grain stocké pour un coût énergétique nul, et ainsi garantir la qualité du grain récolté, et donc éviter des pénalités lors de la vente future de la marchandise. Aujourd'hui, la plupart des séchoirs à céréales utilisés qui fonctionnent grâce la méthanisation sont en réalité des séchoirs polyvalents, pouvant aussi bien sécher des céréales que des plaquettes de bois, ou même du fourrage dans certains cas. On peut toutefois imaginer une adaptation des silos à séchage de céréales classiques, en remplaçant les brûleurs par des échangeurs de chaleur.

Comment peut-on coupler la méthanisation avec le séchage de céréales ?

Cette partie de l'étude présente les aspects techniques, économiques et agronomiques du séchage de céréales en tant que mode de valorisation de la chaleur d'un méthaniseur.

<b><u>I. Etude de l'aspect technique du séchage de céréales</u></b> .....	2
<i>A. Principe</i> .....	2
<i>B. Les différentes installations</i> .....	2
1. Les séchoirs polyvalents, ou séchoir à plat .....	2
2. Les séchoirs spécialisés pour les céréales.....	2
2.1 Séchoir avec brassage.....	2
2.2 Séchoir à séchage par le toit.....	3
<i>C. Adéquation avec la puissance du méthaniseur</i> .....	3
<b><u>II. Etude de l'aspect économique et agronomique du séchage de céréales</u></b> .....	4
<i>A. Prime de valorisation de la chaleur et subventions</i> .....	4
<i>B. Garantie de la qualité du grain vendu</i> .....	4
<b><u>Bibliographie</u></b> .....	5
<b><u>Annexe</u></b> .....	6

## **I. Etude de l'aspect technique du séchage de céréales**

### *A. Principe*

La chaleur produite par les gaz d'échappement du moteur à biogaz est récupérée grâce à un échangeur, qui transmet la chaleur des gaz à de l'eau, servant ici de fluide caloporteur. Cette eau chaude peut atteindre une température d'environ 90°C. L'eau chaude est acheminée vers le séchoir, où elle passe dans un radiateur qui permet de transmettre la chaleur de l'eau à l'air ambiant qui est propulsé à travers le radiateur par des ventilateurs. L'air chaud traverse ensuite les céréales contenues dans le silo. L'air ainsi chauffé voit son humidité relative diminuer, ce qui augmente son pouvoir évaporatoire, donc sa capacité à neutraliser l'humidité du grain. Il faut noter que l'air peut être chauffé jusqu'à une température allant de 50 à 55°C via la cogénération, certains séchoirs nécessitant une plus forte chaleur ne peuvent donc pas être adaptés.

### *B. Les différentes installations*

#### 1. Les séchoirs polyvalents, ou séchoir à plat

La plupart des séchoirs polyvalents sont d'une structure assez simple. Ils sont séparés en plusieurs cases, ou en un seul bloc, avec un sol perforé. L'air chaud est propulsé depuis un échangeur thermique, ou aérotherme en sortie de la cogénératrice, vers le sol de chaque case, ce qui permet un séchage par le bas. Ce type de séchoir est généralement appelé "séchoir à plat", et c'est le plus répandu. Le schéma n°1 en annexe présente la structure général d'un séchoir à plat. La photographie n°2 en annexe montre également un exemple de séchoir à céréales à plat.

#### 2. Les séchoirs spécialisés pour les céréales

##### 2.1 Séchoir avec brassage

On charge le séchoir par le toit, et le grain est réparti dans la cellule par un disperseur rotatif. L'air chaud est propulsé par le dessous par un ou plusieurs ventilateurs, à travers un plancher perforé. Il est possible qu'un autre ventilateur réaspire l'air par le haut de la cellule afin d'optimiser la circulation de l'air. L'air chaud humide est quant à lui évacué au niveau du toit par des aérateurs. Le phénomène de condensation est évité par des gaines perforées le long de la paroi.

L'air chaud doit avoir une température comprise entre 50 et 60°C, ce qui est compatible avec la chaleur produite par la cogénération.

Le grain est agité par plusieurs vis verticales, qui ont surtout pour effet de remonter le grain sec du bas vers le haut. Ces vis ne tournent pas seulement sur elles-mêmes, elles se déplacent sur un axe central via un système de roulement périphérique.

La vidange du séchoir se fait par le fond au niveau du plancher, via l'ouverture d'une trappe.

La vidange est complète grâce à l'action d'une vis racluse.

Le séchage dure entre 3 et 7 jours suivant le taux d'humidité du grain et le remplissage de la cellule.

Défaut de ce système : le séchage n'est pas uniforme dans la cellule. L'humidité au centre du séchoir est partiellement conservée, et le système de brassage par vis a tendance à ne faire remonter que le gros grain, tandis que le petit grain et les grains cassés s'accumulent en bas, dans la partie la moins remuée.

Ce séchoir peut avoir une capacité de séchage et de stockage allant de 85 à 700 tonnes de grain.

Le coût de l'installation va de 35 000 à 70 000 €, sans compter le montage.

La photographie n°2 en annexe montre un séchoir avec brassage en cours de fonctionnement.

## 2.2 Séchoir à séchage par le toit

Ce type de séchoir demande une température assez élevée, aux alentours de 70-80°C. La cogénération seule ne permet pas d'atteindre une telle température, c'est pourquoi ce type de séchoir ne peut être utilisé ici qu'en rajoutant un bruleur qui chauffe encore davantage l'air, en aval de la cogénératrice.

Le chargement se fait en 2 temps. Le grain humide est amené depuis le haut du séchoir, par petites quantités, et il est momentanément stocké sur un faux plafond. Le tas de grain doit avoir une hauteur d'environ 75 cm. Le faux plafond est perforé, et il est traversé par de l'air chaud envoyé par un ventilateur. Des aérations sur la base du toit servent à évacuer l'humidité. Lorsque le grain est sec, il est automatiquement basculé vers le fond de la cellule par des trappes de vidange. La place est alors libre sur le faux plafond pour accueillir un autre chargement de grain humide et commencer un nouveau cycle de séchage. Parallèlement, de l'air extérieur est propulsé par un autre ventilateur à travers le plancher qui est perforé, permettant de refroidir le grain tout juste séché, la chaleur récupérée est donc recyclée puisqu'elle sert elle aussi à sécher le grain encore humide situé sur la faux plafond.

Ce séchoir est capable de sécher entre 5,5 et 50 tonnes de grain par cycle, pour un stockage total de 125 à 700 tonnes.

Son prix varie de 50 000 à 80 000 € sans le montage.

### C. Adéquation avec la puissance du méthaniseur

Il faut 0,3 kcal de chaleur pour réchauffer de 1°C la température d'un m<sup>3</sup> d'air. Dans un séchoir, la vitesse de l'air doit être de 0,1 m/s. Si on prend l'exemple d'un séchoir couvrant une surface de 100 m<sup>2</sup>, le débit d'air doit être de 0,1 x 100 = 10 m<sup>3</sup>/s. Pour chauffer de l'air ambiant, considéré à 20°C de moyenne en période estivale, à une température de 50°C, le besoin énergétique par heure est de :

(débit x 3600 x (50-20) x 0,3) = 324 000 kcal = 377 kW de chaleur nécessaire par heure. On peut aussi en déduire une équation générale donnant la puissance nécessaire en fonction de la

surface de séchage désirée en m<sup>2</sup>:

(surface x (température désirée - température ambiante) x 0,126) = puissance nécessaire en kW.

## **II. Etude de l'aspect économique et agronomique du séchage de céréales**

### *A. Prime de valorisation de la chaleur et subventions*

La valorisation de la chaleur dégagée par la cogénération est récompensée par une prime, qui se traduit par un prix de rachat plus élevé par de l'électricité par ErDF. Cette prime est proportionnelle à la proportion de chaleur valorisée. Le montant maximum est un bonus de 4 centimes d'euros par kWh produit, et ce à partir de 70 % de chaleur valorisée. Avec un prix de base à 14 centimes/kWh, cela fait donc un prix de rachat de 18 centimes/kWh. Pour une cogénératrice de 250 kW électrique, la prime représente un bénéfice de 80 000 € par an.

L'avantage du séchage de céréales est qu'il permet de valoriser la chaleur en été, période de l'année où la demande de chaleur est très faible. Il est donc judicieux de combiner le séchage de céréales avec un réseau de chaleur, permettant ainsi de valoriser la chaleur aussi bien en hiver qu'en été. Un séchoir polyvalent peut aussi permettre de sécher du foin, ce qui permet aussi la valorisation de chaleur au printemps.

Le Fonds Chaleur Renouvelable de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) a été mis en place pour financer des projets de production de chaleur à partir d'énergies renouvelables, notamment par la méthanisation. Ce fond peut aider à mettre en place des installations de valorisation de la chaleur sur des unités de méthanisation. Le montant de ces subventions et leur éligibilité dépend du projet et de l'ADEME de la région correspondante.

### *B. Garantie de la qualité du grain vendu*

Il est parfois difficile pour les agriculteurs de récolter le grain avec le taux d'humidité adéquate. Bien souvent il leur faut attendre longtemps avant d'avoir les conditions optimales de récolte, et bien souvent ils attendent trop longtemps, d'où des pertes importantes. Avec un séchoir de céréales, la récolte peut se faire à un taux d'humidité un peu trop élevé, qui sera par la suite diminué par un passage de la récolte dans le séchoir. De plus, la livraison de grain trop humide à la coopérative entraîne des pénalités de frais de séchage assez importants. Les frais de séchage dépendent de l'humidité du grain, et sont variables suivant les organismes acheteurs et les régions. Le maïs présente un coût de séchage particulièrement important, allant de 25 € la tonne à 30% d'humidité, jusqu'à 35€ la tonne à 40% d'humidité. Les économies faites en séchant les céréales avant livraison sont donc très importantes.

## **Bibliographie**

-ASSOCIATION DE PROMOTION ET DE DEVELOPPEMENT DU SECHAGE DU FOIN EN GRANGE DANS L'OUEST, Segrafo [en ligne] Publié en novembre 2011. Disponible sur [http://www.segrafo.com/documents/article\\_methanisation\\_segrafo\\_2011.pdf](http://www.segrafo.com/documents/article_methanisation_segrafo_2011.pdf) [consulté le 17 janvier 2014]

-REUSSIR SA, Réussir grandes cultures [en ligne] Mis à jour le 5 octobre 2009. Disponible sur <http://www.reussir-grandes-cultures.com/actualites/sechage-et-stockage-du-grain-secher-des-gros-volumes-a-basse-temperature:RF5XDD0L.html> [consulté le 10 janvier 2014]

-TRAME, Par dessus la haie [en ligne] Mis à jour le 13 septembre 2013. Disponible sur <http://www.pardessuslaiaie.net/frontend.php/trame/781> [consulté le 17 janvier 2014]

-ABIBOIS, Abibois [en ligne] Publié en janvier 2014. Disponible sur [http://www.abibois.com/images/stories/newsletter/CR\\_visite\\_mthaniseur-schage\\_bois\\_Normandie\\_News.pdf](http://www.abibois.com/images/stories/newsletter/CR_visite_mthaniseur-schage_bois_Normandie_News.pdf) [consulté le 17 janvier 2014]

-CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA MAYENNE, Mayenne.chambragri [en ligne] Publié en janvier 2014. Disponible sur [http://www.mayenne.chambragri.fr/fileadmin/documents\\_ca53/internet/Agronomie/2013/2013\\_0131\\_document\\_marges\\_brutes\\_2012.pdf](http://www.mayenne.chambragri.fr/fileadmin/documents_ca53/internet/Agronomie/2013/2013_0131_document_marges_brutes_2012.pdf) [consulté le 30 janvier 2014]

-FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, Fao [en ligne] Mis à jour en 1992. Disponible sur <http://www.fao.org/docrep/t0522f/t0522f03.htm> [consulté le 17 janvier 2014]

-SARL LES MERGERS, lesmergers [en ligne] Mis à jour en janvier 2014. Disponible sur <http://www.lesmergers.fr/fr/stockage-a-plat/avantages> [consulté le 17 janvier 2014]

-MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT, développement-durable.gouv [en ligne] Publié en avril 2012. Disponible sur [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Dossier\\_de\\_presse\\_Methanisation.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Dossier_de_presse_Methanisation.pdf) [consulté le 30 janvier 2014]

Annexes

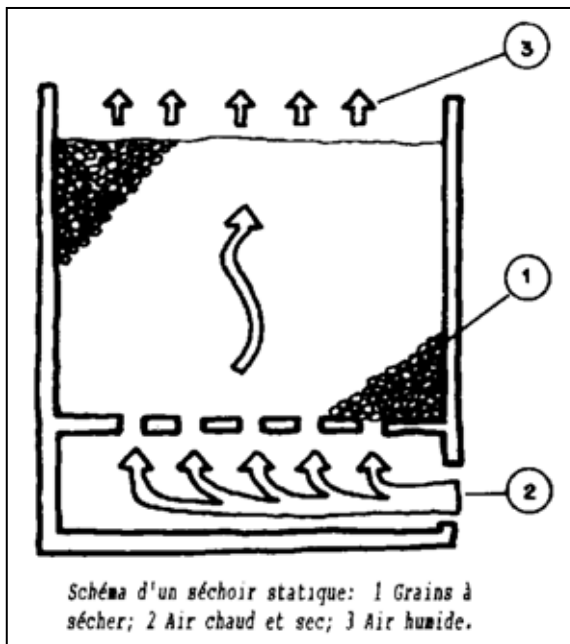


Schéma n°1: séchoir polyvalent avec séchage par le bas



Photo n°1: exemple de séchoir à plat



Photo n°2: séchoir en cours de brassage

## **Valorisation de la chaleur issue de la méthanisation par séchage de bois.**

On assiste depuis plusieurs années à un développement des chaudières à bois fonctionnant grâce à la combustion de copeaux de bois. Ces copeaux doivent être secs pour être utilisés, l'une des possibilités pour les sécher est l'utilisation de la chaleur produite par la méthanisation (qui elle aussi se développe depuis quelques années). Nous allons étudier ici les principes généraux de cette méthode d'utilisation de la chaleur.

### **I. Aspect technique du séchage de bois.**

Le principe du séchage de bois est d'accélérer l'évaporation de l'eau contenue dans le bois en le chauffant. La chaleur produite par la cogénération peut servir à sécher du bois d'œuvre ou du bois de chauffage.

Pour le séchage de bois d'œuvre la température et l'humidité de l'air devront être soigneusement choisies pour assurer un séchage homogène efficace et sans fissures dans le bois.

En ce qui concerne le bois de chauffage deux principaux types de conditionnement existent, les bûches et les plaquettes de bois.

Il faut 5 heures à des plaquettes mélangées pour passer de 50% à 35% d'humidité [1], en revanche à cause du gros volume des bûches et de la surface de contact moins importante il faut quatre jours pour sécher des bûches de 50% à 14% d'humidité [2]. Ces résultats sont bien sur variables entre les feuillus et les résineux et les espèces d'arbres. En général les résineux sont plus rapides à sécher. Le séchage grâce à la chaleur produite par la cogénération se fait selon 2 méthodes, le bois est stocké :

- dans des big-bags eux-mêmes disposés sur des grilles de ventilation,
- dans des bennes containers ventilées avec de l'air chaud.

(cf. **figure 1**)

### **II. Etude de l'aspect économique.**

Le coût des installations nécessaires au séchage de bois est variable en fonction de la taille de l'unité.

Ainsi au Gaec des Moulins de Kerollet un méthaniseur de 250KW a été installé pour un coût de 1,8 millions d'euros auquel il faut rajouter 650 000 euros pour l'installation d'un séchoir de bois polyvalent. Il a été construit à partir de bols mélangeurs d'occasions et est capable de sécher 10 000 tonnes de plaquettes de bois par an (cf. **figure 2**). Le fait d'acheter du matériel d'occasion a permis d'abaisser les

coûts. De plus ce séchoir est original car il permet de sécher du maïs grain et de la luzerne en brin courts d'où sa polyvalence. Le fonctionnement du séchoir fait qu'un camion de copeaux humides arrive tous les jours et le camion repart avec les copeaux secs séchés la veille. La manutention du bois requiert donc de la main-d'œuvre ce qui a conduit l'exploitation à embaucher un salarié.

Par rapport à un séchage naturel à l'air libre relativement lent (au moins un an en moyenne deux à trois ans selon l'essence et le type de bûche) le séchage artificiel permet de gagner du temps cela permet donc d'améliorer grandement la réactivité de production de bois sec et d'approvisionner plus facilement les acheteurs.

### **III. Etude des aspects écologiques et environnementaux.**

Ce type de valorisation de la chaleur présente de nombreux avantages environnementaux, en effet produire un bois très sec permet de diminuer la masse de matière à transporter puisqu'on ne transporte plus que principalement de la matière utile l'eau s'étant évaporée. De plus dans le cas d'un conditionnement en copeaux une perte d'eau se traduit également par une diminution du volume.

Cela permet de diminuer les émissions de gaz à effets de serre lors du transport du bois séché.

De plus le bois très sec présente de nombreux avantages par rapport au bois habituel :

-L'efficacité énergétique du bois sec est élevée car la combustion est plus facile [5] (le pouvoir calorifique du bois sec est 2 fois plus élevé que celui du bois humide. [4])

-La combustion est complète donc plus propre car moins de poussières et de monoxyde de carbone sont émis. Les appareils de chauffage s'encrassent donc moins facilement.

-Par ailleurs certains appareils récents de chauffage (chaudières à bois) nécessitent un bois très sec pour être plus performants.

Ces aspects, qui sont aussi valables pour le bois séché avec des machines thermiques classiques, sont complétés par le fait que la chaleur produite par la cogénération est plus propre et meilleur marché par rapport à celle produite par climatisation classique du local de séchage.



[1] <http://www.web-agri.fr/machinisme-batiment/batiment-traite/article/un-sechoir-polyvalent-au-gaec-des-moulins-de-kerollet-1157-89284.html>

[2] [http://www.abibois.com/images/stories/newsletter/CR\\_visite\\_mthaniseur-schage\\_bois\\_Normandie\\_News.pdf](http://www.abibois.com/images/stories/newsletter/CR_visite_mthaniseur-schage_bois_Normandie_News.pdf)

[3] <http://www.onfleroulley.fr/onf-le-roulley,fr,8,40.cfm>

[4] <http://www.planete-energies.com/fr/les-sources-d-energie/la-biomasse/le-bois-energie-93.html>

[5] [http://www.bois-chaleur-services.com/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=7&Itemid=9](http://www.bois-chaleur-services.com/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=7&Itemid=9)



**Figure 1** : deux types de stockage de bois utilisés au Gaec de Croisille. [3]



Figure 2 : séchoir à plaquettes de bois du Gaec de Kerollet. [1]



Figure 3 : pouvoir calorifique en fonction de l'humidité du bois.[5]

## Séchage de compost valorisant la chaleur produite par méthanisation agricole

Le compost est la dégradation aérobie de déchets organiques le plus souvent biodégradables d'origine végétale<sup>[1]</sup>. Le séchage est l'action de retirer l'eau résiduelle d'un corps solide. C'est un processus distinct de la déshydratation en ce sens que le séchage est partiel<sup>[2]</sup>.

Pourquoi et comment l'utilisation de la chaleur produite par la méthanisation peut-elle s'appliquer pour le séchage de compost ?

### Sommaire

#### I- État des lieux, présentation

- 1) Que faut-il savoir sur la pratique du compostage avant d'envisager de le sécher ?
- 2) Les filières de compostage et les débouchés de la technique de séchage du compost

#### II- Aspects techniques

- 1) Principe technique
- 2) Mise en place et installation

#### III- Aspect économique, agronomique et environnemental

- 1) Coût et subventions
- 2) Aspects environnemental et agronomique, adéquation avec la puissance du méthaniseur

### I. État des lieux, présentation

#### 1) Que faut-il savoir sur la pratique du compostage avant d'envisager de le sécher ?

Afin de provoquer la dégradation des déchets organiques, on cherche à réunir les conditions favorables au compostage : satisfaire la Demande Biologique en Oxygène<sup>[1]</sup>; la consommation maximale de dioxygène par heure et par gramme de matière sèche de compost va de 1 à 6 mg.

Pour la dégradation de matière organique, la température optimale est de : 50 à 55°C. Le compost se pratique en tas statiques (andains ou extension latérale des tas) que l'on retourne régulièrement afin d'oxygéner et d'homogénéiser la teneur en eau du compost. Cette aération mécanique permet une oxygénation de la flore responsable de la dégradation de la matière organique. Le compost peut en effet consommer au maximum 1 à 6 mg de dioxygène par heure et par gramme de matière sèche<sup>[1]</sup>.

Le composteur, que ce soit un bac à compost ou un autre contenant, est un système ouvert dans lequel l'apport de matière organique à dégrader s'accompagne du prélèvement de compost mûr (l'équivalent de l'humus des sols).

Empiriquement, la gestion de l'humidité se fait donc par apport de matière organique plus ou moins hydratée. Il se peut cependant que les installations à plus grande échelle aient besoin de recourir au séchage pour deux raisons majeures :

- extraction de trop-plein d'humidité<sup>[3]</sup>
- accélération de la cinétique de dégradation de la matière ou la maturation du compost en conditions contrôlées.

Les fermentations aérobies de la dégradation du compost fournissent une certaine quantité de chaleur, en partie responsable de l'évaporation de l'eau du mélange. Cette énergie thermique est la chaleur latente de vaporisation de l'eau : 570 à 545 kcal/kg d'eau ou 2382 à 2277 kJ/kg d'eau (*illustration 3*).

## 2) Les filières de compostage et les débouchés de la technique de séchage du compost

L'aération mécanique étant moins exigeante en énergie et en coût que le séchage thermique, les installations séchant du compost sont peu représentées. A fortiori, celles qui utilisent la chaleur de la méthanisation représentent une part négligeable des installations de séchage. Dans l'enquête téléphonique sur la valorisation de chaleur issue de la méthanisation par cogénération (Projet Professionnel Énergie et Territoire), à peine 1% de la centaine d'agriculteurs enquêtés disent valoriser leur chaleur par ce type de séchage, l'étude de ce cas servira d'exemple.

Les structures susceptibles d'avoir recours au séchage de compost sont les exploitations agricoles, les entreprises de valorisation de déchets et les entreprises de fabrication de produits fertilisants dérivés du compost. Toute installation agricole ou non en milieu rural peut appliquer le principe technique du séchage de compost de déchets biodégradables.

## II. Aspects techniques

### 1) Principe technique

Le séchage du compost consiste à en retirer l'humidité résiduelle sans en altérer les conditions, en particulier l'environnement de dégradation microbienne. Il faut alors forcer ou accélérer la réaction de changement d'état de l'eau de liquide à vapeur, puis chasser cette vapeur hors du système<sup>[3]</sup>.

La technique d'insufflation d'un fluide caloporteur est de loin la plus répandue puisque travailler avec des modifications de température élevée est moins compliqué que de changer la pression. Le principe est celui du sèche-cheveux ou de l'aérotherme, à la différence près que la résistance électrique responsable du réchauffement de l'air est remplacée par un échangeur thermique eau chaude-air<sup>[4]</sup>.

Remarque : il faut compter une vingtaine de kW pour un aérotherme carré d'1 m<sup>2</sup>. Or l'énergie responsable de la rotation du ventilateur est de nature mécanique, ce qui implique la présence d'un moteur. En utilisant un système de conversion, il est possible de valoriser l'énergie thermique mais avec un moindre rendement. On peut donc préférer :

- une aération active grâce à un moteur électrique ;
- un système d'aération directement relié à l'extérieur avec ou sans moteur (actif ou passif) ;

Dans l'idéal, un ventilateur en entrée met l'air en surpression alors qu'un deuxième ventilateur en sortie assure une poussée de l'air saturé en humidité.

Exemple : théoriquement, avec une puissance de cogénération de  $100 \text{ kW}=419 \text{ kcal/s}$ , on dégage assez de chaleur pour augmenter la température d'un volume d'air de  $140 \text{ m}^3$  de 10 degrés en une seconde.

L'agitation doit par ailleurs être compatible avec la lenteur des réactions de dégradation, c'est-à-dire qu'un compost en formation, s'il est suffisamment oxygéné, n'a pas besoin d'agitation supplémentaire. Le réglage du débit volumique d'air à chauffer doit donc être calibré à pour optimiser le séchage du compost sans entraver son activité biologique. La vitesse moyenne de l'air, pour une couche d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, est d'environ  $1,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[7]</sup>.

## 2) Mise en place et installation

On utilise la convection forcée de l'air chaud au-dessus d'une surface dimensionnée pour provoquer le changement d'état de l'eau résiduelle en surface du compost.

Les particules de compost perdent l'eau gravitaire jusqu'à atteindre la limite du point de flétrissement, pour lequel les forces de capillarité s'opposent plus fortement à l'évaporation de l'eau, ce qui oblige à une surveillance régulière de l'humidité du compost ou au recours à un système informatique pour une meilleure performance.

Le choix du séchoir<sup>[5]</sup> est à adapter aux contraintes du composteur et aux besoins des micro-organismes biodégradeurs. Si le compostage en bacs n'exclut pas l'insufflation d'air chaud via des tuyaux, l'efficacité du chauffage de séchoirs existant dans le commerce s'avère plus adaptée.

Il existe des séchoirs rotatifs<sup>[4]</sup> (*illustration 1*) qui conviennent mieux pour un compost mûr ; des séchoirs statiques de type étuve adaptés au séchage du compost en maturation<sup>[5]</sup> (*illustration 2*), avec ou sans agitation pour assurer une bonne oxygénation.

Les sécheurs à traversée d'air chaud ne peuvent être mis en œuvre que si la couche de compost est perméable (notamment grâce à une agitation légère) et une circulation d'air ascendante est couramment utilisée lorsque le produit est humide. Si l'influx d'air sec et la sortie d'air saturé en humidité sont insuffisants, l'installation de drains d'aération reste possible.

### **III. Aspect économique, agronomique et environnemental**

#### 1. Coût et subventions

35 à 40% de l'énergie du biogaz est valorisable (avec une part de 10 % de chauffage du digestat, ce sont en fait 40 à 50% de thermie issus de la cogénération de l'énergie du biogaz)<sup>[6]</sup>.

Exemple : on ne peut donc en fait valoriser que l'équivalent de  $40 \text{ kW}$  thermiques= $168 \text{ kcal/s}$  ; on peut augmenter la température de  $56 \text{ m}^3$  d'air de  $10^\circ\text{C}$  en une seconde.

On dispose d'eau chaude à  $90^\circ\text{C}$ , sachant que plus la quantité de chaleur valorisée est importante, plus les avantages financiers de la vente d'électricité sont élevés<sup>[6]</sup>. Or, les déperditions de chaleur entre l'unité de cogénération et l'échangeur du séchage sont non négligeables, mais elle doit être relativisée puisqu'à  $50\text{-}55^\circ\text{C}$ , l'optimum de vitesse du compost (frontière des bactéries mésophiles et thermophiles).

L'analyse du retour sur investissement, à l'image du choix de valorisation, doit tenir compte de la puissance de l'unité de méthanisation. L'investissement de séchage de compost peut convenir à tous les calibres de puissance de cogénération en ceci que la gamme de coût des installations est assez large.

L'investissement dans la valorisation du biogaz par cogénération ne représente que 28% du budget de l'unité de méthanisation agricole. Or, la prime à la valorisation est versée dès que la part de la ration dépasse les 60% d'effluents d'élevage (prime minimale), et est maximale dès 70% de chaleur valorisée. Les primes de traitement des effluents et d'efficacité énergétique rapportent respectivement 2 et 4 centimes d'euro au kW<sup>[7]</sup>.

Exemple : avec un projet de budget 800000€ pour une puissance de 100 kW en moyenne , seuls 320000€ sont investis dans la valorisation de chaleur<sup>[6]</sup>. En particulier, avec 60000€ pour un séchoir à stable à agitation <sup>[5]</sup>, le séchage de compost représente une valorisation plutôt abordable. La part de chaleur valorisée dans le séchage de compost est de 19,97€/kW<sup>[7]</sup>.

## 2. Aspects environnemental et agronomique, adéquation avec la puissance du méthaniseur

Puisque la chaleur de la méthanisation est une énergie renouvelable, la chaleur remplace les ressources fossiles utilisées le plus souvent dans les installations de séchage.

La détermination de la pertinence de la valorisation peut se faire par l'étude de la performance du réseau de chaleur : la densité thermique (énergie transportée par mètre linéaire de réseau de chaleur) doit donc être mesurée entre le début et la fin du circuit<sup>[6]</sup>.

Agronomiquement, le compost est une valorisation de matière organique biodégradable parallèle à la filière méthanisation, une valorisation d'effluents d'élevage et de leurs rejets (en gaz à effets de serre, bactéries,...). Le compost et la méthanisation sont deux débouchés différents et certains types de substrats conviennent pour les deux.

En effet, le digestat constitue un filtre à agents pathogènes et à vecteurs d'adventices tels que les graines de mauvaises herbes. De plus, le bois et les branches, dont la lignine n'est pas dégradable par les bactéries anaérobies du méthaniseur, mais par les bactéries aérobies du compost, n'est pas valorisable par compost. D'où la possibilité de composter le digestat artificiellement, ou par humification en plein champ<sup>[6]</sup>. Enfin, le carbone qui part sous forme de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> dans le brûleur de l'unité de méthanisation peut être « remboursé » via le compostage, afin de préserver l'apport de carbone aux sols.

Dès lors, plutôt que d'entrer en compétition, ces deux filières sont complémentaires l'une de l'autre et peuvent être couplées. L'aérobiose du compost ne pose pas de problème d'oxydation comme pour des produits de type alimentaire, ce qui fait en somme du compostage un débouché relativement accessible et donc, recommandable.

## Références bibliographiques

### Séchage compost

[1] Le Compost, gestion de la matière organique, M. Mustin, éd. François Dubusc, Paris.

[2] Introduction to industrial drying operations, R.B. Keey, Lavoisier.

**Webographie** (sites consultés entre décembre 2013 et janvier 2014) :

[3] Leopold FACY, « HUMIDITÉ » encyclopaedia universalis en ligne, consulté le 10/01/2014.

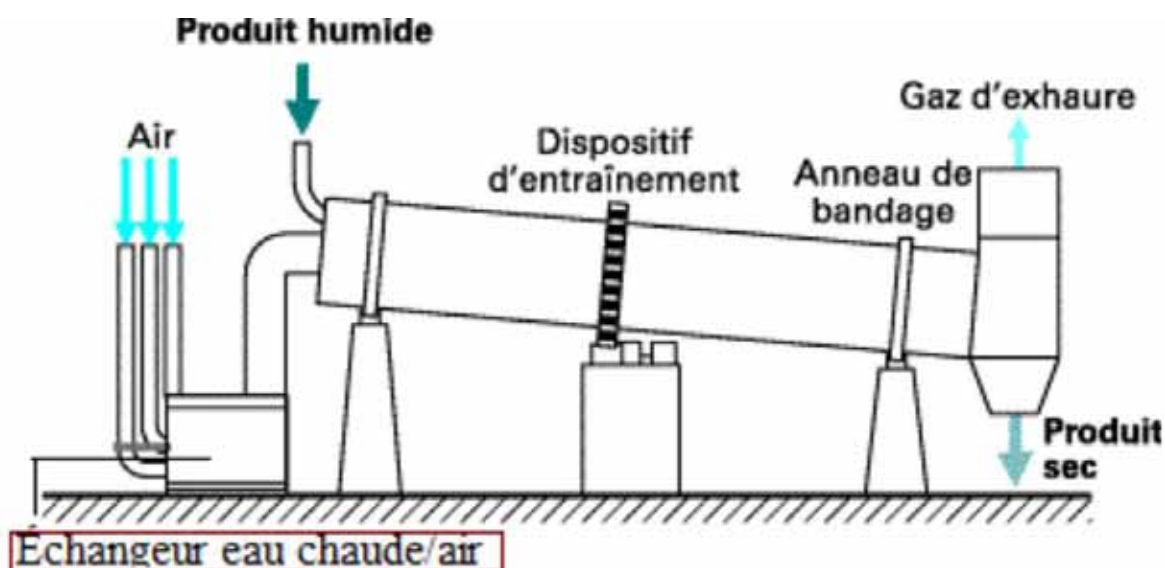
[4] <http://www.techniques-ingenieur.fr/bases-doc.univ-lorraine.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/operations-unitaires-evaporation-et-sechage>

[5] <http://www.scolarisrl.com/>

[6] [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr) guide de la méthanisation à la ferme, 2011.

[7] <http://www.lafranceagricole.fr/actualite-agricole/methanisation-les-nouveaux-tarifs-d-achat-de-l-electricite-issue-du-biogaz-sont-officiels-43327.html>

## Annexes



*Illustration 1: exemple d'évaporateur rotatif avec flux (adapté de [4])*





Illustration 2: Installation de séchage sans flux de matière mais avec brassage ([5]), environ 60000€.

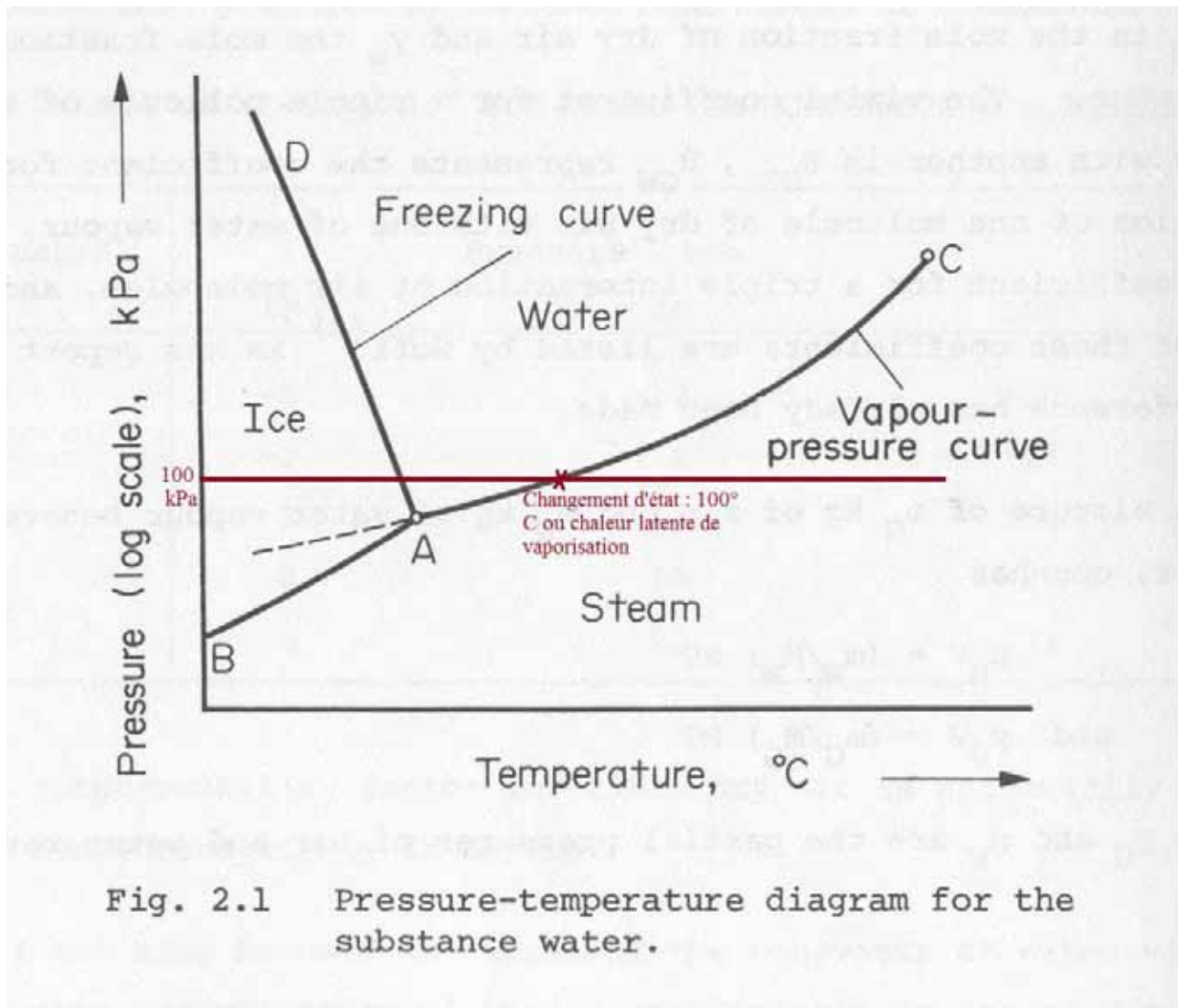


Illustration 3: Diagramme pression-température (adapté de [2]).



# Valorisation de la chaleur issue de la méthanisation dans le fabrication du tourteau de colza

## **I) Principe**

### A) Introduction

Définition : Les tourteaux sont des sous produits solides de graines oléagineuses. Ils sont obtenus après trituration (broyage et pressage) des graines. Ils représentent 50 à 70 % de leur masse. Leur débouché majeur est l'alimentation animale comme source protéique.

Ces tourteaux sont habituellement fabriqués dans des usines de trituration, qui en produisent de gros volumes, comme co-produits de l'huile végétale. Mais de plus en plus d'agriculteurs souhaitent valoriser leur production d'oléagineux, ce qui conduit à l'apparition d'unités de production de tourteau « fermier ». Elles sont en constante augmentation depuis 2000.

Nous allons nous intéresser à l'intérêt de la récupération de la chaleur issue de la méthanisation afin de l'intégrer dans les méthodes de trituration des graines de colza. Nous en détailleront donc les principes, puis nous verrons quels sont les aspects économiques et agronomiques liés à cette cogénération.

### B) Technique d'obtention

Les tourteaux de colza « fermier » ont une teneur en matière grasse à mi-chemin entre les tourteaux « industriels » (2,3%) et les graines entières (42%), avec un pourcentage qui s'élève entre 10 à 30 % selon le procédé de fabrication, et notamment de séchage du grain avant trituration. Au delà de 5 % de matière grasse, on parle de tourteaux gras.

Les industries, utilisent beaucoup de chaleur (cuisson des broyats, distillation...) lors de la transformation des oléagineux en huile et en tourteaux, ce qui leur permet d'avoir des tourteaux si peu gras. On parle de trituration à chaud. Celle-ci permet la production de tourteaux de colza appelés expeller contenant environ 7% de matière grasse. Lorsqu'elle est suivie d'une distillation, c'est à dire extraction de l'huile résiduelle par un solvant à une température de 120°C, les tourteaux obtenus sont dit déshuilés (2-3%). Mais les installations fermières sont rarement aussi performantes que les usines de trituration, car le coût des installations serait trop élevé. Les agriculteurs se contentent donc souvent de sécher les graines avant le broyage. C'est donc surtout ce point qui est intéressant dans une optique de cogénération avec la méthanisation. Parfois, les agriculteurs chauffent aussi leur matière première durant le pressage, ce qui améliore encore le rendement.

Avant toute opération, et pour garantir un tourteau de bonne qualité, les graines doivent être propres et sèches (moins de 2 % d'impuretés et moins de 9 % d'humidité). Si la quantité d'eau dans les graines est trop importante, celles-ci vont se dégrader rapidement durant leur stockage. Les impuretés quand à elles retiennent une partie de l'huile que l'on souhaite justement séparer de la phase solide. Il faut donc les éliminer pour optimiser le rendement de l'extraction.

L'exploitant doit donc prévoir un système de séchage du grain, dont le principe dépend de la teneur en eau dans les graines à la récolte. Entre 9 et 11 %, une ventilation de refroidissement permet de perdre de 1 à 2 points d'humidité. Entre 11 et 15 %, la ventilation séchante est possible. Au-delà de 15 %, il faut réaliser un séchage rapide des graines à 70°C maximum [2]. Ici, la chaleur de méthanisation peut être utilisée directement sous forme d'eau chaude circulant dans un séchoir à plaques de manière à chauffer la matière et provoquer l'évaporation de l'eau. L'évaporation est dans ce cas indirecte. Mais la plupart des séchoirs à grains utilisent de l'air chaud qui est soufflé sur le produit pour en extraire l'eau.

Ensuite, on cherche à obtenir des tourteaux contenant le moins d'huile végétale possible. Dans l'idéal, il doit rester entre 10 et 15 % d'huile suite à l'extraction dans tourteau gras fermier pour qu'il s'adapte bien aux rations. Les graines subissent un processus de trituration à froid dans une presse à vis (voir figure 1 en annexe) ou une presse à barreaux (voir figure 2) . La température ne dépasse jamais 80°C [1]. Le choix de la presse a également une influence sur la teneur en matière grasse du tourteau (voir Tableau 1 annexe). La gamme de débits s'étend de 20 à 300 kg d'huile par heure.

Avant l'extraction par le pressage, les graines sont chauffées afin d'augmenter la fluidité des lipides, et de diminuer la teneur en eau. Ce traitement permet également de détruire les structures de stockage de l'huile dans la graine, ce qui facilite son extraction.

## **II) Etude de l'aspect économique de la fabrication de tourteau fermier**

### **A) Cout de l'installation**

La fabrication de tourteaux à la ferme repose souvent sur l'utilisation de presses mobiles de faible capacité. De plus en plus d'éleveurs se décident à posséder leur propre presse plutôt que de recourir aux services d'un autre agriculteur ou de louer le matériel d'associations agricoles. Il en sont ainsi plus libres et obtiennent du tourteau plus frais. Malgré cela, il est souvent plus intéressant de se regrouper pour acheter une presse commune, d'autant que pour rentabiliser celle-ci, il est souhaitable qu'elle tourne le plus souvent possible. L'investissement est très variable selon la qualité de la presse et sa capacité de production. Par exemple une presse à vis ayant un débit de 50 kg/h coûte environ 9000 euros [5]. Il faut aussi investir dans des lieux de stockage efficace du tourteau, des graines et de l'huile. Pour plus de précisions, voir la tableau 2 en annexe.

L'investissement dans un système de cogénération dépend de la puissance du méthaniseur qui fournit la chaleur :

- la valorisation de la chaleur produite par un méthaniseur d'une puissance de 30 kWh nécessite une installation dont le coût s'élève à 56 000 euros.
- Pour un méthaniseur d'une puissance de 100 kWh, l'investissement de cogénération est d'environ 166 000 euros.

L'amortissement de tous ces investissements s'étend sur une dizaine d'années selon la situation financière de l'entreprise. C'est pourquoi il existe si peu de ce genre de cogénération.

## B) Interet économique

Avant toute chose, le fait que la chaleur soit valorisée est une source de revenus pour l'agriculteur. En effet, le prix de vente de l'électricité à EDF par celui-ci est fonction de la quantité de chaleur valorisée. Si au moins 70 % de la chaleur produite est valorisée, la prime à l'efficacité énergétique s'élève à 4 centimes d'euros par kWh.

Le tourteau de colza a une teneur moyenne en azote de 25% plus faible que le tourteau de soja importé et utilisé par de nombreux agriculteurs. Malgré cela, l'Institut de l'Élevage affirme qu'un kilogramme de tourteau de soja peut être remplacé par 1,5 kilogramme de tourteau de colza, sans perte de performance ni problèmes sanitaires. Pour que l'incorporation du colza à la place du soja soit financièrement intéressante, il est conseillé de l'acheter à 70 à 80% moins cher que ce dernier. Sachant que le tourteau de soja coûte actuellement 420 euros la tonne et le tourteau de colza industriel 357 euros la tonne, il n'est alors a priori pas plus économique de se tourner vers le tourteau de colza tout en gardant la même performance (cf : tableau 3 en annexe). Cela peut inciter l'agriculteur à produire lui-même sa source protéique. De plus, l'instabilité des cours de matières premières complique la gestion des exploitations (cf : graphique 1 en annexe). Une ressource stable en complément azoté permet de mieux gérer la production.

Le tourteau est un co-produit de l'huile végétale, et celle-ci est aussi valorisable en parallèle, c'est pourquoi il est important de l'intégrer dans cette étude. Certains choisissent d'utiliser l'huile en tant que carburant pour moteurs d'engins agricoles, d'autres préfèrent la vendre pour l'alimentation ou d'autres utilisations.

Si l'huile est destinée aux moteurs, un élément primordial est la qualité de la filtration. Les particules présentes dans l'huile ne doivent pas excéder 5 microns, voire même 1 micron. L'huile pure ne peut pas être substituée au gazole, et le moteur doit subir quelques modifications pour pouvoir être utilisé. Des kits d'adaptation allemands ou suisses ont vu le jour, le coût global de modification varie entre 3000 et 7000 euros [4]. Le prix de l'huile carburant varie actuellement entre 45 et 65 centimes d'euros le litre.

Une simulation réalisée par le pôle herbivore des chambres d'agriculture de Bretagne [3] montre que l'amélioration du revenu d'un agriculteur qui produit son tourteau à la ferme peut s'élever à 1200 euros selon le prix du tourteau de soja et du fuel pour une utilisation de 3800 L d'huile et 7,5 tonnes de tourteaux.

Le fait de ne pas recourir à une distillation post-trituration de l'huile ou à un chauffage trop important durant la trituration réduit certes le rendement mais permet à l'huile d'être qualifiée « d'huile de première pression ». La température doit être inférieure à 47°C [5]. Cela lui apporte de la valeur ajoutée si elle est destinée à la vente pour l'alimentation humaine. Tous les éléments nutritifs sont alors conservés (vitamines, acides gras essentiels, arômes...).

Enfin, le développement de cette filière permet de favoriser le dynamisme local, en créant une nouvelle activité. Si elle devient suffisamment importante, elle peut nécessiter la création d'emploi. Les agriculteurs peuvent également vendre leur surplus de production.

## **III) Aspect agronomique et écologique**

Dans une optique de rotation des cultures, les oléagineux sont de plus en plus cultivés. Leur valorisation sous forme de tourteau comme complément alimentaire animal et d'huile est très intéressante. De plus, la consommation de tourteau de colza a augmentée de 53% entre 1981 et 1998 et est toujours en constant accroissement. Un hectare de colza correspond à 30 quintaux de graines qui permettent de produire environ 2000 kg de tourteau et 1000 L d'huile. L'auto-production de ces ressources garantit plus d'autonomie à l'agriculteur comme le montre l'analyse économique précédente. Il faut aussi savoir que l'on attribue des vertus agronomiques au colza gras fermier que l'on ne trouve pas forcément dans les tourteaux issus de la trituration à chaud.

On peut comparer la quantité d'énergie disponible dans les tourteaux de colza gras, les tourteaux expellers (pression à chaud), et les tourteaux déshuilés (par distillation). Le tourteau de colza gras présente une teneur en matière grasse 9 fois supérieure au tourteau déshuilé et 3 fois supérieure aux expellers. L'énergie disponible pour la production de lait ou de viande y est donc nettement plus élevée. Selon une étude de l'Inra [6] sur la composition du tourteau gras, l'huile qu'il contient est très riche en acides gras insaturés (88,7% des acides gras) dont l'acide oléique (58%) et les acides linoléiques (20,5%) et linoléniques (9,8%) qui sont polyinsaturés. En complétant la ration des vaches laitières avec du tourteau gras, l'éleveur améliore les qualités nutritionnelles du lait.

Il existe quelques règles à respecter lorsque l'on souhaite compléter la ration alimentaire des vaches. En effet, elle doit rester limitée pour ne pas induire d'effets néfastes sur la flore cellulolitique du rumen, les ruminants étant particulièrement sensibles à une quantité de matière grasse supérieure à 6% dans la ration. Cela correspond à environ 2,5 kg de tourteau par vache laitière et par jour [5]. Il est ainsi important pour l'agriculteur de bien connaître et de bien contrôler le tourteau qu'il produit.

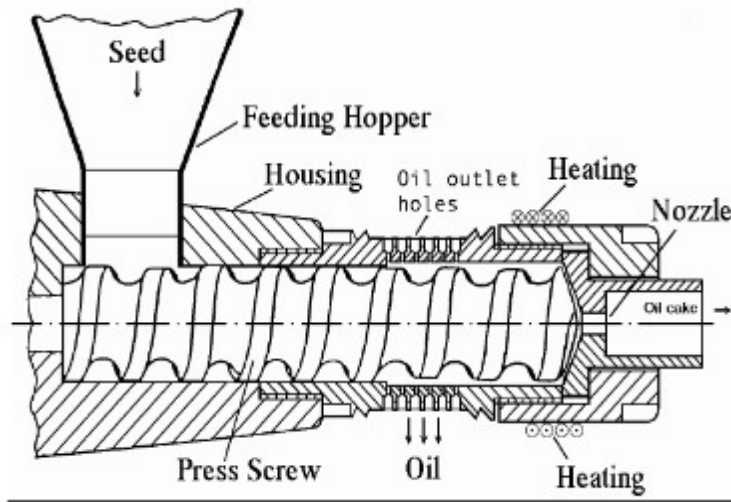
Il peut être également intéressant de valoriser le tourteau gras dans l'alimentation de porcs en croissance, mais le rendement énergétique de la digestion des monogastriques n'est pas aussi intéressant que pour les ruminants. Il faut trouver une autre source protéique.

Enfin, il est évident que valoriser la chaleur de méthanisation plutôt que de la rejeter dans la nature est écologiquement plus judicieux.

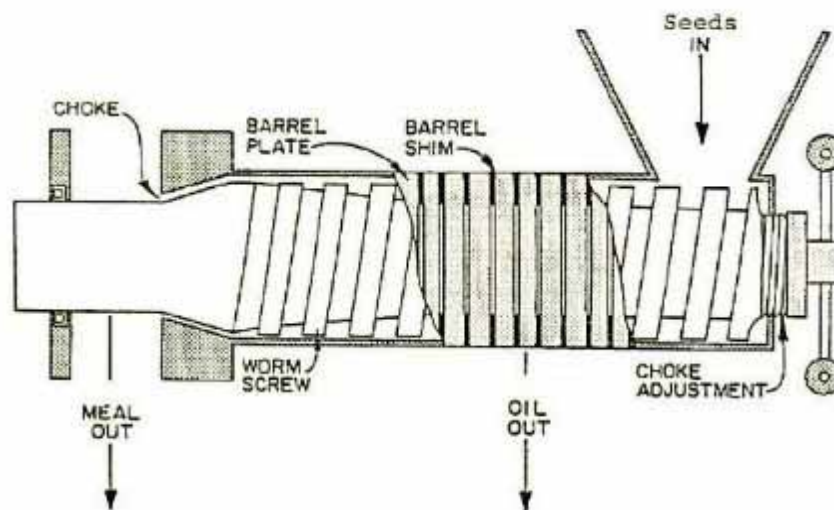
L'utilisation de la chaleur de méthanisation pour produire des tourteaux de soja est une voie intéressante de cogénération. Non seulement cela permet la diversification des cultures et des activités, mais c'est aussi un moyen pour le chef d'exploitation de gagner en autonomie alimentaire (tourteau) voir même en autonomie énergétique (huile). Si l'investissement initial peut être un frein à cette activité, on remarque que cela n'empêche pas beaucoup d'agriculteurs de s'y lancer. La combinaison de la méthanisation avec la trituration d'oléagineux reste tout de même rare.

Références :

- [1] [http://oatao.univ-toulouse.fr/4093/1/hartmann\\_4093.pdf](http://oatao.univ-toulouse.fr/4093/1/hartmann_4093.pdf)
  
- [2] <http://www.thomas-negoce.fr/Bonnes%20pratiques%20de%20Stockage/SPECIAL%20-%20stockage%20pour%20les%20graines%20de%20colza.pdf>
  
- [3] [http://www.bretagne.synagri.com/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/12292/\\$File/Autonomie%20protéique,%20un%20tourteau%20de%20colza%20fermier.pdf?OpenElement](http://www.bretagne.synagri.com/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/12292/$File/Autonomie%20protéique,%20un%20tourteau%20de%20colza%20fermier.pdf?OpenElement)
  
- [4] [http://polebiomasseenergie.fr/dmdocuments/F15\\_Production\\_tourteau\\_et\\_HVP.pdf](http://polebiomasseenergie.fr/dmdocuments/F15_Production_tourteau_et_HVP.pdf)
  
- [5] <http://www.cra-lorraine.fr/fichiers/energie-trituration.pdf>
  
- [6] [http://www.valbiom.be/files/library/Docs/Biocarburants/fiche\\_huile\\_colza07a\\_tourteaux\\_1193757593.pdf](http://www.valbiom.be/files/library/Docs/Biocarburants/fiche_huile_colza07a_tourteaux_1193757593.pdf)
  
- [7] <http://www.caiac.fr/accueil%20pdf/Cotations%20MP.pdf>



[1] Figure 1 : Presse à vis



[1] Figure 2 : Presse à barreaux

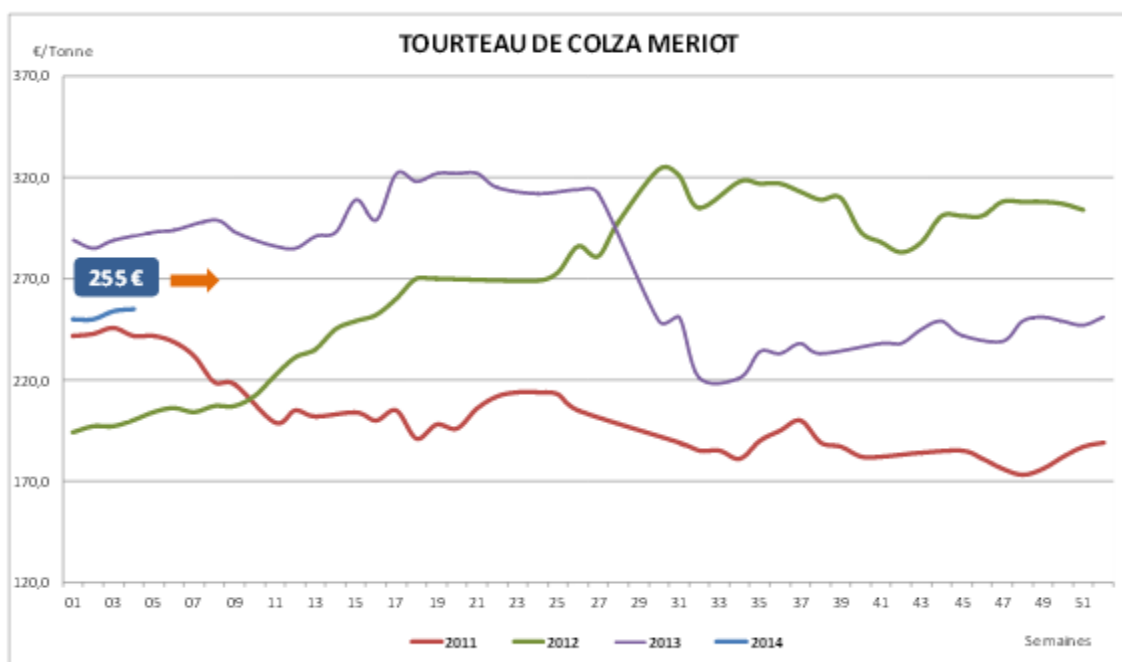
Choix de la presse	Caractéristiques	Tourteau produit
Presse à vis	petit débit de chantier	14-18 % de matière grasse (MG)
Presse à barreaux	meilleur rendement d'extraction	10-15 % de matière grasse (MG)
Choix du Système	Descriptif	Type d'usager
Presse à poste fixe	le grain et les produits sont transportés	particulier ou collectif
Presse itinérante	seul la presse se déplace	collectif ou prestataire

[5] Tableau 1

Presse	Débit	Prix € HT	Remarque
Presse à vis	5-50 kg/h	1 500-10 000 €	Petites installations
Presse à vis	50-150 kg/h	9 000-20 000 €	
Presse à barreaux	30-100 kg/h	6 000-20 000 €	Convient aux groupes d'agri
Presse à barreaux	100-300 kg/h	17 000-60 000 €	
Filtre	Débit	Prix € HT	Remarque
Filtre à cartouches	50-200 l/h	15 – 150 €	Coût des cartouches
Filtres à plateaux	200-500 l/h	5 000-20 000 €	Nécessite de la maintenance
Adaptation moteur	Prix € HT	Remarque	
Kit bicarburation	2000 €	Fonctionne en partie à l'huile	
Modification moteur	3 000-6 000 €	Fonctionne à 100 % d'huile	

Ces prix sont donnés à titre indicatifs pour donner quelques repères sur les investissements à réaliser

[5] Tableau 2



[7] Graphique 1

### Exemple de prix d'intérêt du tourteau de colza industriel pour vaches laitières

Prix du tourteau de soja (€/tonne)	Prix maximum en-dessous duquel le tourteau de colza est plus intéressant (€ /tonne)	
	Ration à dominante ensilage de maïs	Ration à dominante herbe
450	360	315
500	400	350
550	440	385
600	480	420
650	520	455

Tableau 3 : Source : Institut de l'Élevage

Pour lire ce tableau : avec un tourteau de soja à 450 € la tonne, le tourteau de colza à moins de 360 € la tonne est économiquement plus intéressant pour des rations à dominante ensilage de maïs.

Remarque : ce tourteau est un tourteau industriel. Pour un tourteau gras fermier, le prix est d'environ 150-200 euros la tonne [5].

Acide gras	Colza (% AG)
myristique C14:0	0,1
palmitique C16:0	4,2
palmitoléique C16:1	0,4
stéarique C18:0	1,8
oléique C18:1	58,0
linoléique C18:2	20,5
linoléinique C18:3	9,8
Total AG insaturés	88,7

Tableau 4



# **Valorisation de la chaleur produite par la méthanisation :**

## **Les cultures sous serre**

### **INTRODUCTION :**

La méthanisation est un moyen de valoriser des déchets organiques en énergie par une production de biogaz. Cette fermentation en milieu anaérobique de matières organiques produit du méthane. Si le méthane produit est utilisé pour fabriquer de l'électricité, il va subir une combustion dans un cogénérateur. Une grande partie de l'énergie de la combustion du gaz va être dissipée sous forme de chaleur. La culture sous serre est un moyen de valoriser cette chaleur.

Une enquête a été réalisée auprès des agriculteurs réalisant une méthanisation, 9 sur 99 agriculteurs interrogés utilisaient une partie ou la totalité de la chaleur excédentaire de la cogénération pour chauffer des serres agricoles. Dans deux cas, l'agriculteur qui possédait un cogénérateur d'une puissance de 250kW/h utilisait une partie de la chaleur pour chauffer 1ha de serre. Un autre agriculteur ayant la même puissance de cogénérateur valorise uniquement la chaleur dans le chauffage de serre et chauffe une superficie de 1,5ha.

La culture sous serre est dépendante d'énergie pour permettre un maintien de la température optimale à la croissance des végétaux. La méthanisation apporte une solution alternative aux énergies fossiles. De plus, ce mode de valorisation de la chaleur est particulièrement intéressant car il permet, si la taille des serres est conséquente, la création d'emploi au niveau de la culture agricole sous serre.

Pour que ce mode de valorisation de chaleur se développe, il est tout d'abord nécessaire de connaître les aspects techniques puis économiques et les aspects agronomiques et environnementaux de la culture agricole sous serre.

## **I. Étude de l'aspect technique de la culture sous serre**

### **1. Présentation générale de la culture sous serre**

La culture sous serre est une technique qui permet de créer le climat optimal à la croissance des végétaux en maîtrisant les paramètres comme la température, l'humidité et la lumière. Ce type de cultures permet de cultiver et de produire à tout moment dans l'année des légumes, des fruits et des plantes vertes.

Pour améliorer cette technique de production agricole, le chauffage de serre a été créé dans les années 60. La technique la plus ancienne de chauffage consiste à chauffer de l'eau à haute température (80°C) puis la faire circuler à l'intérieur des serres dans des tubes métalliques aériens (chauffage par thermosiphon). (1)

De nos jours, environ 10 000ha sont consacrés aux cultures sous serre en France.

Sous les serres, deux types de cultures sont principalement observées, soit la culture directement en pleine terre, soit une culture hors sol. Ce terme regroupe toutes les techniques qui font abstraction du sol en place.. La culture en pleine terre limite les coûts liés aux installations car les végétaux sont directement cultivés dans le sol sous la serre. La culture hors sol permet une nutrition parfaitement contrôlée en eau et minéraux des plantes.

### Différents types de serres :



[www.tunisienumerique.com](http://www.tunisienumerique.com)

Serre de type :  
Tunnel plastique



[www.serresvaldeloire.com](http://www.serresvaldeloire.com)

Serre de type :  
Serre en verre



[www.rufepa.com](http://www.rufepa.com)

Serre de type :  
Multichapelle plastique

### Différents échangeurs de chaleur utilisés dans les systèmes « Haute température » :



<http://devel.tomaviso.com/serres-et-equipements>

Chauffage produit par des  
Thermosiphons placés au sol



<http://www.rezspec.com/fr/de>

Chauffage produit par  
un aérotherme

## 2. Installations liées à la culture sous serre

La culture sous serre exige d'importantes installations. Une structure permettant de confiner un espace pour permettre ensuite le contrôle des différents paramètres à l'intérieur des serres. La serre doit être équipée d'un système de chauffage, d'un système d'irrigation et de ventilation. Certaines cultures nécessitent d'autres installations comme des bacs ou des tables de culture chauffante.(3)

Il existe plusieurs types de structures pour les serres.

La structure la plus courante dans le monde est tunnel plastique (5). On peut la trouver en forme d'ogive ou en demi-cercle. Cette structure est certes peu onéreuse et facile à chauffer mais d'un point de vue agronomique elle n'est pas très efficace car on peut observer des hétérogénéités au sein du tunnel. De plus, peu d'équipements supplémentaires peuvent être ajoutés.

Pour la structure de la serre en verre, les caractéristiques sont les opposés du tunnel plastique ; Les serres ont un climat parfaitement contrôlé et homogène, les coûts d'installation sont plus élevés, une luminosité supérieure et de nombreux équipements peuvent être ajoutés (injecteur de CO<sub>2</sub>, écrans thermiques ou d'ombrage,...)

La multi chapelle en plastique est un mélange des deux structures précédentes. Elle se caractérise par un espace intérieur plus vaste et un système d'aération plus efficace que les tunnels et un prix moins élevé, une charpente moins lourde qu'une serre en verre. (1)

La structure d'une serre doit bien évidemment correspondre au contexte de l'exploitation (production avec un fort rendement donc besoin de peu d'espace) et au type de production que l'on souhaite y effectuer (diversifié ou non).(6)

Les différents types d'aérations dépendent du type de structures utilisées par ouverture du faîtage ou écartement des laizes pour les tunnels ou par aération en continue ou en tabatière pour les deux autres structures. En revanche, dans les serres, l'irrigation se fait par irrigation ou par goutte-à-goutte quelque soit le type de structure utilisée.

Les végétaux présents dans les serres sont réchauffés par différent système de chauffage. Le système « basse température » est un système alimenté par de l'eau à 50°C, le réseau des échangeurs de chaleur est situé alors au plus près des végétaux sans risques de les brûler. Ce système peut être attrayant car les volumes d'air à chauffer étant moins important (échangeur situé au plus près de la plante). Néanmoins, la chaleur récupérée du cogénérateur et qui arrive dans le système de chauffage est à 90-80°C. Il faut donc se tourner vers un système « haute température » pour valoriser cette chaleur excédentaire de la méthanisation.

## 3. Utilisation de la chaleur excédentaire de la méthanisation

La chaleur produite par le cogénérateur est récupérée par le biais de l'eau qui est chauffée jusqu'à 80-90°C. Cette eau circule en circuit fermé via le biais de canalisations. Les serres ne doivent alors pas se situer trop loin du cogénérateur pour minimiser les pertes thermiques. L'eau qui arrive alors au niveau des serres entre 80 et 90°C va être utilisée dans un système haute température. Soit directement en circulant à l'intérieur des serres au sein de tubes métalliques (thermosiphons). Anciennement les tubes avaient une position aérienne, maintenant, pour des questions d'optimisation d'énergie, ils plutôt placés au sol (chauffage-rail) (ANNEXE 1). Ce type de chauffage est plutôt utilisé dans les serres en verre. Soit via un aérotherme qui est un échangeur de chaleur muni d'un ventilateur qui brasse de l'air en direction de l'eau chaude apportée par le méthaniseur. Cet aérotherme fournit donc un flux d'air chaud qui convient plus au chauffage des tunnels plastiques.

## **II. Étude de l'aspect économique de la culture sous serre**

### *1. Coût des installations et de la production des cultures*

Les coûts liés aux installations dépendent du type d'installation que l'on décide de construire. Par exemple, un tunnel plastique sera beaucoup moins cher qu'une structure en verre mais son étanchéité vis-à-vis de l'air extérieur donc de la performance de la serre sera perceptible. (4) Donc la production sera moins bonne. Il faut aussi prendre en compte les installations pour l'irrigation.

Une fois les installations prêtes à accueillir une production, les charges opérationnelles et de cultures directes apparaissent dès que la culture commence. Ces charges englobent les charges d'exploitation, la charge salariale, ... (ANNEXE 2) Il faut savoir que dans une serre classique, les dépenses énergétiques peuvent représenter jusqu'à 30% du coût de production, l'alternative de chauffage proposée par la méthanisation devient très intéressante.

### *2. Intérêt économique de ce type de culture*

Il y a plusieurs intérêts économiques à ce type de culture. Le premier qu'il est possible de décrire concerne le rendement obtenu. En effet, la méthode de culture sous serres permet une meilleure optimisation des cultures ce qui permet un rendement plus élevée qu'en plein air. De plus, il y a une possibilité de faire plusieurs récoltes et productions par an. Ce qui est impossible au sein d'un climat tempéré. Cet intérêt économique est limité s'il faut chauffer les serres avec des énergies fossiles car le coût des carburants représente une part non négligeable des dépenses de l'entreprise agricole notamment dans les coûts de production.

Si la chaleur produite par le méthaniseur est valorisée alors ces coûts importants disparaissent et la production agricole sous serre devient très intéressante économiquement.

## **III. Étude de l'aspect agronomique et environnemental de la culture sous serre.**

### *1. Aspect agronomique*

La culture sous serre présente de certains avantages sur le point de vue agronomique. Cette technique permet la culture de végétaux hors de leur zone d'origine et elle rend possible aussi une production hors saison. De plus, comme tous les paramètres sont maintenus pour une croissance optimale de la plante, la culture sous serre a des rendements supérieurs à des végétaux cultivés en plein air. Pour l'agriculteur, les serres peuvent aussi présenter un avantage car les conditions de travail sont plus agréables (chaleur constante).

Toutefois, des contraintes à cette pratique sont à noter car les investissements sont importants et le système de production étant complexe, il nécessite du personnel qualifié.(2)

La deuxième contrainte est à nuancer si la serre est créée dans un objectif de valorisation de la chaleur issue de la méthanisation, cela aboutira sûrement à un emploi.

## 2. Aspect environnemental

La culture agricole sous serre n'est pas respectueuse de l'environnement d'un point de vue énergétique quand elle est chauffée avec des énergies fossiles, c'est la principale cause de pollution des serres.(1)(5) Or, si la culture est couplée avec de la valorisation de la chaleur de la méthanisation, cet argument est mis à mal. De plus, comme le milieu dans les serres est maîtrisé et qu'il y a peu d'air extérieur qui rentre à l'intérieur, les produits phytosanitaires sont utilisés de façon minimale, voir nulle. La culture sous serre nécessite cependant de grandes quantités d'eau.

## **CONCLUSION :**

En présence d'une unité de méthanisation, la valorisation de la chaleur produit par la cogénération est surtout motivée par un but économique (toucher les 4ct/ kW/h en plus). Un moyen de valoriser cette chaleur est de l'utiliser pour le chauffage de serre agricole. Cette technique de valorisation à l'avantage de remplacer directement les énergies fossiles qui étaient nécessaires pour chauffer l'eau à haute température. Cet abandon des énergies fossiles a une répercussion sur la rentabilité de l'activité mais aussi au niveau de l'environnement. De plus, la création de cultures sous serres peut amener à créer des emplois supplémentaires dans l'exploitation agricole. Les installations et les investissements restent néanmoins un frein au développement de ce mode de valorisation de chaleur. Néanmoins, les aspects économiques d'une telle activité sont très attractifs. Même si la valorisation de chaleur par le chauffage de serre peut être très attractif, il faut savoir que beaucoup d'autres modes de valorisation de chaleur existent.

## **BIBLIOGRAPHIE :**

(1) Valorisation des rejets thermiques industriels et agro-industries  
INNOVAGRO consultants

(2) Les cultures sous serre  
Les Producteurs de Légumes de France

(3) <http://www.actu-environnement.com>  
AGRI-RESEAU

(4) Cultures sous abris (serres et tunnels) [agriculture.gouv.fr/](http://agriculture.gouv.fr/)

(5) Peut-on concilier production sous serre et développement durable ?  
[www.journees.astredhor.fr/Thierry\\_BOULARD](http://www.journees.astredhor.fr/Thierry_BOULARD)

(6) Structures de serres  
Guide de gestion globale de la ferme maraîchère biologique et diversifiée

Les aérothermes  
<https://www.regaz.fr>

Chauffage pour serre horticole et maraîchère  
[www.serre-pro.com/](http://www.serre-pro.com/)

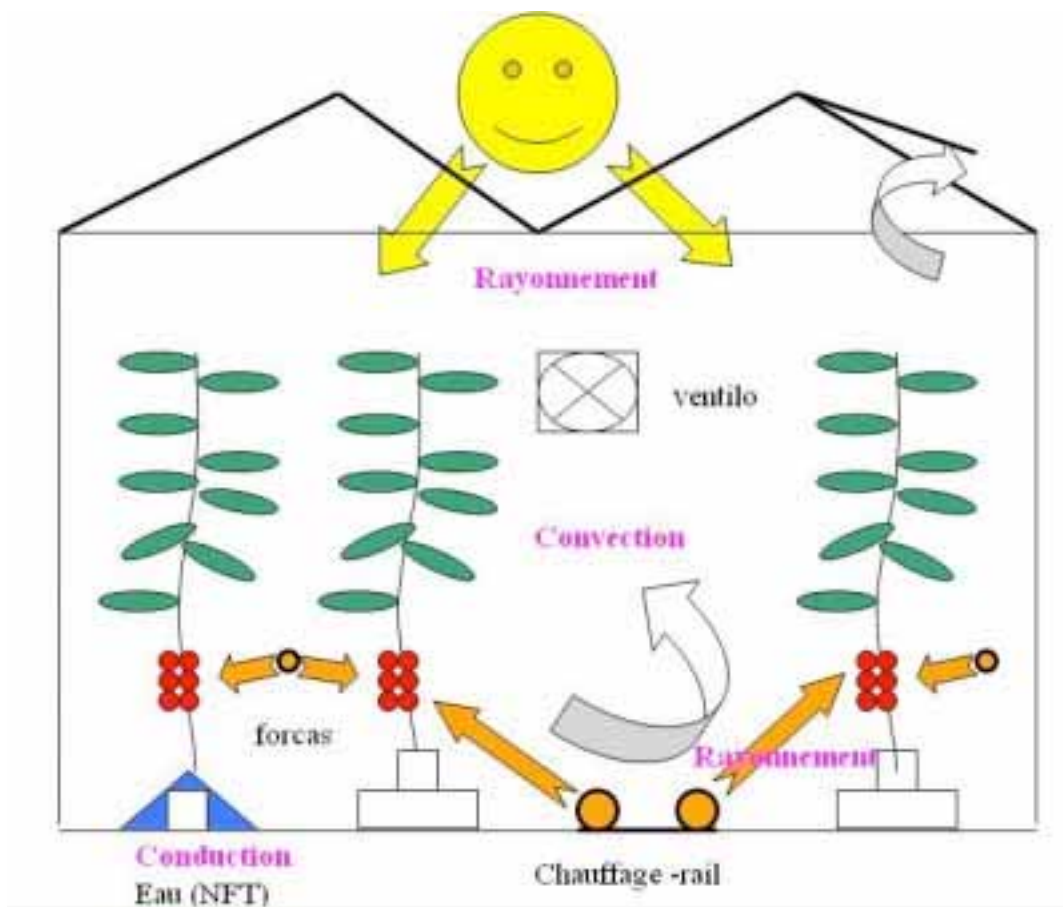
Créer une activité de maraîchage en circuits courts  
<http://www.synagri.com>

<http://www.graines-agriculteurs.com>

## ANNEXE 1 :

Schéma illustrant un système de chauffage :

Sur le schéma, Les forcas représentent le système de chauffage « basse température »  
Le chauffage rail représente le système de chauffage « haute température »



<http://devel.tomaviso.com/serres-et-equipements>

## ANNEXE 2 :

### Coût de production d'une structure maraîchère :

#### Charges opérationnelles :

Semences et plants  
Godets  
Terreau  
Compost et fumures  
Traitements (herbicides, fongicides, insecticides)  
Emballages (sacs, cagettes)

#### Charges de structures directes :

##### Mécanisation :

Fuel / gasoil  
Entretien du matériel  
Petit outillage

##### Foncier :

Bail  
Taxes foncières  
Amendements (chaux)

##### Bâtiments :

Location  
Entretien des bâtiments

##### Main d'œuvre :

Salariés (salaires + MSA)  
MSA de l'agriculteur

##### Divers :

Assurances  
Honoraires (comptable, notaire)  
Communication (affiches, tracts, annonces, site Internet ...)  
Electricité  
Eau  
Téléphone et internet  
Frais postaux  
Fournitures



## **Valorisation de la chaleur produite par la méthanisation : culture de micro-algues, la spiruline.**

### INTRODUCTION :

En France, dans le cadre de la transition énergétique, l'objectif est de développer à l'horizon 2020 la méthanisation à la ferme. Celle-ci produit du biogaz. La combustion de ce dernier permet la production d'électricité et de chaleur, qu'il est possible de valoriser. [1] Plusieurs modes de valorisation existent, et sont encouragés par une prime à l'efficacité énergétique.

La culture des micro-algues, notamment la spiruline, semble être une des solutions choisie par certains agriculteurs. En Bretagne, un agriculteur a opté pour ce type de valorisation. La spiruline, ou *Arthrospira platensis*, est une cyanobactérie filamenteuse, ayant une activité photosynthétique, se développant dans des eaux chaudes douces et peu profondes, avec un fort pH alcalin.

Comment la chaleur produite par la méthanisation est-elle valorisée à travers la culture des micro-algues ?

Dans ce rapport, l'étude portera sur les aspects techniques, économiques et agronomiques de la culture de spiruline, permise par la chaleur produite par la méthanisation.

### **I. Étude de l'aspect technique de la culture de spiruline.**

#### *A. Présentation de la spiruline et conditions de culture.*

La spiruline est une cyanobactérie filamenteuse réalisant la photosynthèse. Elle se développe dans une eau peu profonde (de l'ordre du centimètre) ayant un pH alcalin. L'eau doit être douce et chaude. Cette micro-algue est observable dans des régions tropicales ou semi-tropicales, notamment dans des lacs alcalins d'Afrique (Éthiopie, Tunisie, Tchad), en Amérique latine (Pérou, Mexique) et en Asie (Inde, Sri Lanka, Thaïlande). La spiruline est une algue photo autotrophe : elle puise dans son milieu des sels minéraux, de l'eau ainsi que de l'O<sub>2</sub> et du CO<sub>2</sub> tout en utilisant l'énergie solaire pour se développer. La température de croissance des micro-algues se situe entre 35°C et 42°C, avec un optimum à 37°C [3]. En dessous de 20°C, la croissance est stoppée. Leur développement nécessite un apport d'azote et de phosphore. Des tests sont actuellement réalisés afin d'utiliser l'azote du digestat, mais certains problèmes apparaissent (coloration de l'eau des bassins...).

#### *B. Installations nécessaire à la production de la spiruline.*

La culture de spiruline est réalisée sous serre, dans des bassins d'une profondeur d'une vingtaine de centimètres. La production de micro-algues demande de la chaleur ainsi qu'un

certain ensoleillement. Il ne faut pas un soleil direct, des zones d'ombres sont donc aménagées. Les bassins sont construits en béton. Des bâches sont utilisées, leurs rôles étant de retenir l'eau. Une pompe est nécessaire, ainsi qu'un tamis muni de mailles d'une cinquantaine de microns afin de récolter les spirulines. Une gelée verte est obtenue. Elle est pressée en pâte, extrudée en filaments qui doivent être ensuite séchés dans une armoire. Le milieu de culture est un système fermé, l'eau contenant les spirulines est pompée et recyclée dans le circuit. Il n'y a ainsi pas de perte en eau. La pompe permet d'homogénéiser le milieu par brassage. [3]

### *C. Utilisation de la chaleur issue de la méthanisation lors de la culture de spiruline.*

La culture de spiruline est saisonnière, elle se déroule d'avril à octobre [3]. Elle a besoin de beaucoup de chaleur. L'apport de chaleur produite par la méthanisation permet d'éviter l'arrêt de la production pendant la période hivernale, et d'avoir une production de micro-algues toute l'année, avec un rendement plus faible en hiver dû à un faible ensoleillement. La chaleur est utilisée pour chauffer la serre et l'eau des bassins de culture. Des canalisations doivent être construites pour transporter la chaleur jusqu'à la serre et aux bassins. La chaleur peut être aussi utilisée lors du séchage des filaments de spiruline. En Normandie, une unité de méthanisation de 100 kW va être installée pour fournir la chaleur nécessaire à la culture de spiruline déjà existante. La surface cultivée est de 200 mètres carrés et est chauffée par des pompes à chaleur de 9 kW électrique et de 35 kW thermique. [5] Pour cultiver la spiruline sur des surfaces économiquement intéressantes, la puissance du méthaniseur conseillée est de l'ordre de 100-150 kWe.

La culture de spiruline est technique : il faut surveiller régulièrement le pH de l'eau, la température et vérifier que la quantité d'azote et de phosphore apportée est suffisante. C'est une tâche quotidienne. Néanmoins, certains systèmes permettent de faciliter la gestion des serres. Ainsi une serre de 600 mètres carrés nécessite 350 heures de travail par an.

## **II. Étude de l'aspect économique de la culture de spiruline.**

### *A. Coût de l'installation de bassins de spiruline et de sa production.*

Les installations nécessaires à la culture de spiruline représentent un investissement important pour les agriculteurs. Par exemple, à Mignéville en Lorraine, un projet de ce type est étudié. Il réunit 7 agriculteurs en polyculture élevage. En parallèle de la construction de l'unité de méthanisation de 500kW, des serres de 2 300 mètres carrés consacrées à la culture de micro-algues seraient installées. La chaleur nécessaire à la production proviendrait du processus de co-génération. Néanmoins, c'est un investissement lourd : 3,2 millions d'euros pour l'unité de méthanisation et 1,2 millions d'euros pour les serres de spiruline. [6] Les serres ne doivent pas se situer trop loin du méthaniseur à cause des coûts des canalisations.

La surface cultivable de spiruline dépend de la puissance électrique du méthaniseur, et des autres modes de valorisation de la chaleur choisis par l'agriculteur (chauffage des bâtiments, séchage de foin...). [7]

### *B. Intérêt économique de la production de spiruline.*

La culture de spiruline nécessite une attention particulière et un certain niveau technique pour s'en occuper. Elle permet ainsi de créer une nouvelle activité sur l'exploitation, et donc de créer des emplois. A Mignéville, l'unité de méthanisation et les serres permettraient de créer 5 emplois. [5]

De plus, la production de spiruline présente un intérêt économique. Elle a des débouchés dans le secteur de l'alimentaire comme complément, de la pharmaceutique, de la cosmétique et de la chimie verte avec les biocarburants de nouvelle génération. Néanmoins, la spiruline ne bénéficie pas d'une grande publicité mettant en avant ses valeurs nutritionnelles auprès du grand public, et son coût en pharmacie reste élevé. D'après une étude réalisée en 2000 par le bureau Tractebel Consult associé au Centre Universitaire de Biotechnologie Algale en Belgique, la production de spiruline a augmenté depuis 1995.[8] La spiruline produite en France est vendue 150€ le kg. Certaines entreprises installant le système de valorisation de chaleur peuvent racheter la production de spiruline de l'agriculteur.

La culture de spiruline représente donc un lourd investissement pour l'agriculteur, mais elle possède des débouchés dans plusieurs secteurs. L'organisation mondiale de la santé (OMS) a officiellement reconnu les propriétés de la spiruline pour lutter contre la malnutrition.

## **III. Étude de l'aspect agronomique et environnemental de la culture de spiruline.**

### *A. Les enjeux agronomiques de la production de spiruline.*

La spiruline est une micro-algue riche en protéines et en vitamines, mais aussi en oligo-éléments i.e. en minéraux et en antioxydants. Elle peut donc présenter un intérêt dans le secteur de l'alimentation animale, notamment en aquaculture. En effet, la spiruline peut être utilisée comme complément dans la nourriture des poissons d'élevage, sensibles à des infections virales et bactériennes. Elle permettrait aussi d'augmenter la pigmentation des crevettes et des poissons. [8] De plus, des études sont réalisées afin d'utiliser la spiruline comme ressource méthanisable. Les fractions de micro-algues non utilisées ou ayant un niveau de qualité faible pourront être méthanisées. D'après une étude réalisée par l'ADEME, le pouvoir méthanogène des micro-algues est de l'ordre de 50-70 tMS/ha. La phase liquide du digestat peut être utilisée comme support de culture aux micro-algues et le CO<sub>2</sub> issu de la combustion du biogaz peut être utilisé comme substrat par ces dernières. [9] La méthanisation des micro-algues reste pour l'instant en phase d'expérimentation, et n'est économiquement pas rentable.

### *B. La spiruline, un faible impact environnemental.*

La culture de spiruline nécessite peu d'eau, elle a donc un faible impact sur cette ressource. Les micro-algues n'exigent pas d'être cultivées sur des terres arables, elles ne

rentrent pas en concurrence avec d'autres cultures. Elles permettent ainsi de valoriser des terres peu fertiles. Leurs cultures n'impliquent pas l'utilisation de pesticides ou d'herbicides. De plus, les spirulines utilisent comme substrat le CO<sub>2</sub> issu de la cogénération, évitant ainsi son rejet dans l'atmosphère. En cas de non étanchéité des bassins, la spiruline ne pourrait pas se développer dans les cours d'eau : c'est une algue tropicale non adaptée au climat français.

#### CONCLUSION :

La culture de spiruline semble être une des solutions possibles pour valoriser la chaleur produite par la méthanisation. Elle permet de valoriser 95 % de la chaleur. C'est une culture technique, nécessitant des installations adaptées à sa production. Elle demande une surveillance quotidienne, et ainsi peut être source d'emploi. L'agriculteur sur son exploitation crée une nouvelle activité ayant plusieurs débouchés économiques : pharmaceutiques, cosmétiques, alimentaires... Les micro-algues présentent aussi un intérêt agronomique, notamment dans l'alimentation animale. La spiruline peut être aussi utilisée comme matière organique digérée dans le méthaniseur, produisant ainsi du biogaz. La culture de la spiruline a un faible impact environnemental.

Face aux problèmes liés aux énergies fossiles, les biocarburants apparaissent comme une solution. Néanmoins, les cultures de maïs consacrées à la production d'éthanol sont polluantes et très gourmandes en eau. Mais des biocarburants d'une nouvelle génération sont en train d'émerger : les algocarburants. Ces derniers seront-ils une réponse efficace à l'épuisement des ressources fossiles ?

#### REMERCIEMENT :

Je remercie M. Benjamin BORNET de l'entreprise Algae Green Value pour avoir répondu à mes questions.

## BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ; Domaines d'intervention ; Déchets ; Traitements biologiques ; La méthanisation,  
<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?catid=15555>
- [2] Spiruline d'Aquitaine, La spiruline, c'est quoi ?,  
<http://www.spirulineaquitaine.com/spiruline.php>
- [3] La spiruline (algue bleue ou micro-algue), interview de Nicolas FISK, cultivateur de spiruline, [http://www.dailymotion.com/video/xgewk0\\_la-spiruline-algue-bleue-ou-micro-algue\\_webcam](http://www.dailymotion.com/video/xgewk0_la-spiruline-algue-bleue-ou-micro-algue_webcam)
- [4] La spiruline de Haute Saintonge, EARL CARPIO, La culture de spiruline,  
<http://www.spiruline-fr.com/Culture-de-la-spiruline.htm>
- [5] HyES, bureau d'étude, <http://www.hyes.eu/>
- [6] Groupe BLE Lorraine, Méthanisation et micro-algues dans la Vallée de la Seille,  
<http://blogerslorrainsengages.unblog.fr/2013/08/23/methanisation-et-micro-algues-dans-la-vallee-de-la-seille/>
- [7] Spiruline France, <http://spirulinefrance.free.fr/Resources/pndec2012a.pdf>
- [8] « La Spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique ? »,  
Loïc Charpy, Marie José Langlade, Romain Alliod  
[http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Spiruline\\_synthese\\_et\\_compilation\\_DGPAAT\\_2008.pdf](http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Spiruline_synthese_et_compilation_DGPAAT_2008.pdf)
- [9] « Estimation des gisements potentiels de substrats utilisables en méthanisation. »  
[http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=9&ved=0CGQQFjAI&url=http%3A%2F%2Fwww2.ademe.fr%2Fservlet%2FgetBin%3Fname%3D7FCE0DF5FE3725E17ACCD513615EB559\\_tomcatlocal1374157020401.pdf&ei=iqjeUqnkKeiY1AX7iYG4CA&usg=AFQjCNFgKAKxr3g0-I4LgnzmfR46tvu\\_hA&sig2=in\\_6e5h2XM2qUAAFmotnLQ](http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=9&ved=0CGQQFjAI&url=http%3A%2F%2Fwww2.ademe.fr%2Fservlet%2FgetBin%3Fname%3D7FCE0DF5FE3725E17ACCD513615EB559_tomcatlocal1374157020401.pdf&ei=iqjeUqnkKeiY1AX7iYG4CA&usg=AFQjCNFgKAKxr3g0-I4LgnzmfR46tvu_hA&sig2=in_6e5h2XM2qUAAFmotnLQ)

ANNEXES :

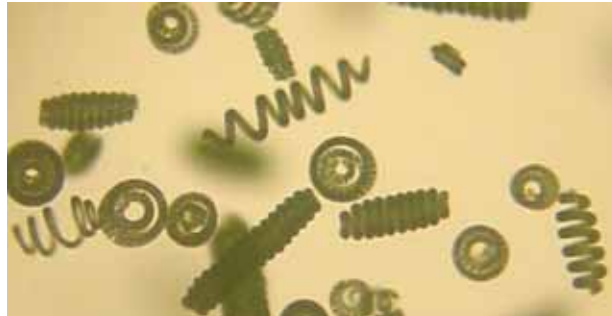


Figure 1 : Observation au microscope de la spiruline agrandissement x100 [2]

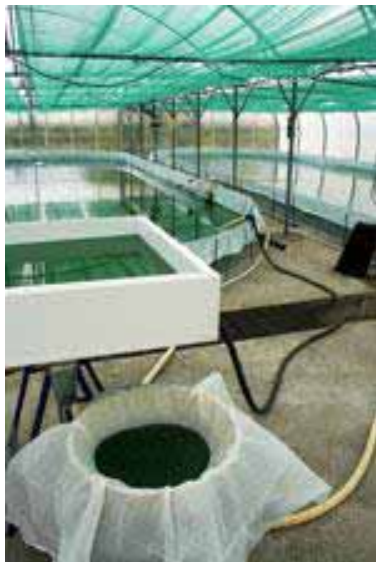


Figure 2 : à gauche, bassin de culture et à droite, filaments de spiruline. [4]

## Valorisation de la chaleur par le biais des champignonnières

<b><u>I-Présentation/état des lieux</u></b> .....	P76
<b><u>II-Aspects techniques</u></b> .....	P77
<i>A/ Principe</i> .....	P77
<i>B/ Installation/ mise en place</i> .....	P77
1) Température.....	P77
2) Humidité.....	P77
3) Désinfection.....	P78
<b><u>III- Aspects économiques, agronomiques et social</u></b> .....	P78
<i>A/ Aspects économiques</i> .....	P78
<i>B/ Aspects agronomique et social</i> .....	P78
Bibliographies.....	P79
Annexes.....	P80

### **I-Présentation/état des lieux**

Les champignonnières sont les lieux de culture des champignons. On peut y faire de l'élevage de plusieurs champignons (cf Illustration1) comme par exemple : les Champignons Brun (ou Blanc) de Paris (cf Illustration2), la Pleurote, les Pieds Bleus ou encore les Shiitakés.

Les exploitations peuvent être soit souterraines dans des anciennes carrières soit en extérieure dans des serres. Pour des raisons pratiques la culture souterraine dans des anciennes carrières est préférable.[1] En effet, être sous terre permet de mieux garder la chaleur et donc de dépenser moins pour le chauffage. Une exploitation présente généralement plusieurs chambres de culture. Chaque chambre étant séparée par une porte ou une bâche en plastique. Le fait de séparer les cultures en différentes chambres permet d'éviter la propagation d'une maladie quand celle-ci se développe dans une partie de la culture. Elle permet aussi un meilleur contrôle de l'humidité et de la température des cultures.

Les champignons ont des besoins variables en température et en humidité au cours de leur développement. Les besoins sont différents lors de l'incubation, de la formation des primordia ( apparition des sporophores jeunes) et de la fruitaison.

Voici l'exemple de deux champignons :

- La température pour les Pieds Bleus (cf Illustration3) varie de 10°C à 25°C et les besoins en humidité de 80% à 95%. [2]
- Autre exemple, la température pour les Champignons de Paris Brun varie de 16°C à 25°C et les besoins en humidité de 85% à 99%. [3]

Les chambres doivent être désinfectées pour éliminer les maladies et nettoyer les chambres (stérilisation de l'air). [4]

On a donc trois postes sur lesquels, la valorisation de la chaleur peut se faire :

- Sur la température des chambres de culture
- Sur l'humidité des chambres de culture
- Sur la désinfection et le nettoyage des chambres

## **II-Aspects techniques**

### *A/ Principe :*

Les champignons sont sensibles à la température et à l'humidité. La chaleur produite par le méthaniseur est sous forme d'eau chaude. Cette chaleur permet de maintenir une température adéquate pour la culture de champignon en hiver comme en été et d'arroser les chambres de culture pour permettre d'avoir le taux d'humidité adéquate.

### *B/ Installation / mise en place :*

#### 1) Température

**En hiver**, la température est maintenue par le biais de gros radiateurs à eau (cf Illustration4). L'eau est habituellement chauffée par des chaudières. On relie la champignonnière par le biais de canalisation pour que l'eau chaude produite par le méthaniseur aille directement dans de gros radiateurs répartis dans les différentes salles.[1] De gros ventilateurs diffusent l'air chaud dans les chambres. (cf Illustration5)

**En été**, certains exploitants réfléchissent à utiliser la chaleur du méthaniseur pour produire du froid [5]. Cela se fait grâce à la mise en place de réseaux de froid. [6]

#### 2) Humidité

L'humidité est maintenue par un arrosage régulier des cultures. L'arrosage se fait généralement à l'eau froide grâce à des citernes.[1]

La valorisation de la chaleur produite par un méthaniseur dans une champignonnière étant peu répandue ce qui suit n'est que supposition sur ce qui pourrait marcher. Une



pulvérisation à l'eau chaude pourrait permettre une meilleure efficacité dans le maintien de la température. Des cuves d'eau chaude régulièrement alimentées par le méthaniseur permettrait de fournir en eau des brumisateurs industriels couplés à des ventilateurs pour une meilleure répartition de la chaleur dans les chambres de culture.

### 3) Désinfection

Pour nettoyer les chambres, on utilise de l'eau chaude qui est nébulisée pour obtenir de la vapeur qui sera projetée. Pour nébuliser on peut soit utiliser une chaudière soit un nébuliseur.

*Remarque :* Il doit être noté qu'il faut prévoir des canalisations plus ou moins calorifugées en fonction de la distance champignonnière/méthaniseur pour éviter les pertes de chaleur.

## **III-Aspects économiques, agronomiques et social**

Nous prendrons l'exemple de l'exploitation de EARL de Guernequay à Mousois-Remungol.

### *A/ Aspects économiques*

Les coûts pour la mise en place de l'installation de la valorisation sont faibles par rapport à l'investissement du méthaniseur. Dans notre exemple, 15 000 euros ont été investis pour le réseau de chaleur soit environ 2% de l'investissement total pour la valorisation dédiée à la champignonnière. [5]

L'intérêt d'une telle valorisation est de toucher la prime à l'efficacité énergétique. La prime est définie de la manière suivante : il n'y a pas de prime si moins de 35 % de la chaleur disponible est valorisée. En revanche, pour une valorisation supérieure à 70%, il est possible d'obtenir une prime de 4 c€/kWh. [7]

Il est possible de se faire subventionner par : « Le Fonds Chaleur Renouvelable de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. [...] Il peut soutenir les équipements de valorisation de chaleur des installations de méthanisation, ou les investissements de raccordement ou de réalisation d'un réseau de chaleur. Les points d'entrée pour les porteurs de projets sont les Directions régionales de l'ADEME. » [8]

### *B/ Aspects agronomique et social*

La valorisation peut permettre l'installation et la création de cultures. Le projet n'aurait pas forcément vu le jour si le méthaniseur n'était pas présent à proximité. En effet, le méthaniseur permet de réduire les coûts de fonctionnement de la champignonnière en éliminant par exemple le coût de l'apport d'énergie fossile pour faire chauffer les chaudières.

Sur l'aspect social, dans notre exemple, la présence du méthaniseur et de son besoin de valorisation de chaleur à permis l'installation d'une agricultrice et de la création de cinq emplois. [5]

#### Bibliographies :

[1]

[http://troglos.free.fr/dossiers\\_val\\_de\\_loire/dossier\\_vdl\\_carriere\\_champi/dossier\\_chapitre\\_1.html](http://troglos.free.fr/dossiers_val_de_loire/dossier_vdl_carriere_champi/dossier_chapitre_1.html)

[2] <http://champignonscomestibles.com/tricholome-pied-bleu-ou-lepista-nuda>

[3] <http://champignonscomestibles.com/agaricus-bisporus-brunnescens>

[4] <http://www.agrireseau.qc.ca/banqueplans/Documents/Feuillet%2060602.PDF>

[5]

<http://www.pardessuslahaie.net/uploads/sites/ba36ed159a6a238839453defc9653ba903e7362d.pdf>

[6] <http://www.reseauxdechaleurrhonealpes.org/boite-a-outils/guides/Guide-Summer-Heat-Produire-du-froid-avec-du-chaud>

[7][http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024042984&dateTexte=&categorieLien=id)

[cidTexte=JORFTEXT000024042984&dateTexte=&categorieLien=id](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024042984&dateTexte=&categorieLien=id)

[8][http://www.developpement-](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Dossier_de_presse_Methanisation.pdf)

[durable.gouv.fr/IMG/pdf/Dossier\\_de\\_presse\\_Methanisation.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Dossier_de_presse_Methanisation.pdf)

Annexes:



Illustration 1: Cultures de Champignons, Caves aux Moines, <http://www.ot-saumur.fr/>



Illustration 2: Culture des "Champignons de Paris Brun", [champignonscomestibles.com](http://champignonscomestibles.com)



Illustration 3: Culture des champignons "Pieds Bleus", Cave aux Moines, <http://www.ot-saumur.fr/>



Illustration 4: *Radiateurs*, [www.troglos.com](http://www.troglos.com)



Illustration 5: *L'air est soufflée par ces gros ventilateurs*, [www.troglos.com](http://www.troglos.com)