

Sources des documents : Gaz de Fumier. E. LESAGE, P. ABIET, La diffusion nouvelle du livre.1952 (très larges extraits). Etude sur les cogénérateurs TOTEM alimentés au gaz issus de la méthanisation de déchets organiques : S. BOUX de CASSON. Rapport de stage, université Joseph FOURIER UFR de Chimie, IUP GSI 2000 (très larges extraits).  
Bio méthane de Bernard LAGRANGE, EDISUD/énergies alternatives 1979 Tomes 1 & 2.  
Elaboré le 30/10/03 modifié en 2013 par G. BOUSIGUE.

Participation aux essais de production d'électricité grâce à un réseau isolé construit par Electriciens Du Monde, groupe électrogène à gas-oil de 60 kVA, résistances de charges de 50 kW et générateur TOTEM de 15 kVA sur un site ARIA/EDEN à COLOMIERS en Haute-Garonne.

## **Principe du fonctionnement du moteur bio gaz.**

### **Sommaire :**

<b>1 – Le mécanisme de la fermentation méthanique.</b>	
<b>Etude des conditions du milieu.</b>	<b>page 2</b>
1 – 1 – Généralités.	2
1 – 2 – Processus de la fermentation méthanique.	2
1 – 3 – La fermentation méthanique de la cellulose du coton.	4
1 – 4 – La fermentation méthanique des pailles.	5
1 – 5 – La fermentation méthanique des fumiers.	6
<b>2 – Caractéristiques et propriétés du gaz de fumier.</b>	9
2 - 1 – Composition.	9
2 – 2 – Propriétés physiques du gaz de fumier.	9
2 – 3 – La combustion du gaz de fumier.	10
2 – 4 – Les utilisations du gaz de fumier.	10
2 – 5 – Equivalences.	10
2 – 6 – Application au calcul des consommations.	10
<b>3 – Application « Le biogaz » et « le digesteur »</b>	11
3 – 1 – Les réacteurs discontinus	11
3 – 2 – Les réacteurs continus	12
<b>4 – Le cogénérateur. Exemple le TOTEM</b>	13
4 – 1 – Le TOTEM	13
4 – 2 – Fonctionnement	14
<b>5 – Elimination des gaz « parasites »</b>	20

## 1 – Le mécanisme de la fermentation méthanique. Etude des conditions du milieu.

### 1 – 1 – Généralités.

Le fumier et, d'une façon générale, tous les déchets cellulosiques sont à l'état naturel le siège de phénomènes physiques, chimiques et biologiques très complexes que l'on désigne sous le terme vague de « fermentation ». Tout agriculteur connaît, pour les avoir observées lui-même, les transformations que subit un fumier que l'on a placé sur une plate forme, à sa sortie de l'étable. Ces transformations se traduisent extérieurement par des modifications dans la couleur, la consistance, la température, l'odeur de la masse. De même tout habitant près de marais connaît l'émission de gaz inflammable des vases recouvertes d'eau.

Elles sont provoquées par des organismes microbiens appartenant à des espèces variées et dont les rôles dans l'évolution de la matière sont très différents, parfois même opposés.

Schématiquement, on peut définir six groupes de fermentations se produisant simultanément ou successivement :

- Les fermentations ammonisantes,
- Les fermentations nitrifiantes,
- Les fermentations dénitrifiantes qui sont subies par les matières « azotées »,
- Les fermentations acidifiantes,
- Les fermentations oxydantes,
- Les fermentations méthanisantes qui sont subies par les matières « hydrocarbonées » dont le type est la cellulose.
- 

De ces différentes fermentations, seules nous intéressent :

- Les fermentations ammonisantes qui donnent naissance à des sels d'ammoniaque solubles, utilisés par des micros organismes pour leur nutrition et leur prolifération.
- Les fermentations méthanisantes qui produisent du méthane, gaz combustible.

La formule théorique de la décomposition de la cellulose est la suivante :



Ainsi, la fermentation de 162 grammes de cellulose fournirait 135 litres d'un gaz à 50% de gaz carbonique CO<sub>2</sub> non combustible et 50% de méthane CH<sub>4</sub> combustible.

Un kilo de cellulose entièrement décomposé pourrait donner 830 litres de gaz dont 415 litres de méthane.

En, réalité, une partie du gaz carbonique se trouve fixée par les bases du milieu libérées au cours de la fermentation (en particulier la potasse, la chaux et l'ammoniaque provenant des matières azotées).

On recueille un gaz contenant 50 à 60% de méthane.

Un kilo de cellulose pourra donc donner environ 700 litres de gaz à 60% de méthane.

De même, une tonne de fumier à 80% d'eau et 20% de cellulose pure devrait produire 140 m<sup>3</sup> de gaz à 60% de méthane. Nous verrons que le rendement réel est d'environ la moitié du rendement théorique.

### 1 – 2 – Processus de la fermentation méthanique.

Les corps entrant dans la composition des matières organiques hydrocarbonées ont des formules chimiques différentes. Certains ont des formules complexes et un poids moléculaire élevé : on dit qu'ils sont polymérisés ou qu'ils présentent un degré de polymérisation élevé. D'autres, au contraire, sont peu polymérisés.

On a pu constater que la dégradation des matières est d'autant plus rapide que leur degré de polymérisation est plus faible.

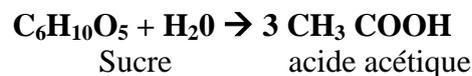
Ainsi, des substances peu polymérisées comme des sucres, les amidons et même les hémicelluloses sont susceptibles de se décomposer rapidement dans un milieu privé d'oxygène, en produisant des acides organiques dont le type est l'acide butyrique. L'accumulation rapide de ces acides dans le milieu provoque sa stérilisation. Aucune autre fermentation ne peut plus se produire.

Par contre, les matières fortement polymérisées ou « condensées » se décomposent assez lentement pour que les acides formés soient à leur tour décomposés au fur et à mesure de leur production. On peut alors obtenir du méthane en quantité et d'une façon continue.

La méthanisation des sucres et des amidons peut se faire en milieu dilué en trois phases, suivant deux chemins différents :

### Voie 1.

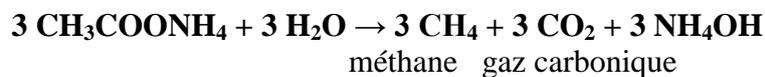
1° **Acidification** : Le sucre est hydrolysé et transformé en acide gras.



2° **Salification** : Cet acide se combine aux bases du milieu pour donner un sel d'acide gras.



3° **Méthanisation** : Ce sel se décompose en donnant du gaz carbonique et du méthane.



### Voie 2.

1° **Acidification**: Comme précédemment.

2° **Gazéification**: L'acide formé se décompose en gaz carbonique et hydrogène.



3° **Méthanisation** : Le gaz carbonique et l'hydrogène se recombinaient pour donner du méthane.

On voit que la **phase méthanisante est sous la dépendance de la phase acidifiante.**

Si pour une raison quelconque, la chaîne des transformations se trouve interrompue, on doit observer dans le milieu la présence de divers acides gras pu d'hydrogène. C'est bien ce que l'expérience permet de vérifier.

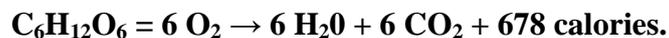
Cette interruption pourra être en particulier provoquée par une accumulation d'acides provenant d'un début de fermentation trop rapide ou de la présence d'une trop grande proportion de corps peu polymérisés et facilement hydrolysables.

Dans les deux cas la proportion d'acides gras augmente rapidement et avec elle d'acidité du milieu : les ferments méthaniques, qui n'ont pas le temps de réduire le stock grandissant d'acides gras, se trouvent bientôt débordés et la méthanisation cesse par stérilisation acide.

Dans ces conditions, si l'on détruit par fermentation préalable au contact de l'air (fermentation aérobie) les corps les moins compacts, tels que les sucres et les amidons, on évitera une acidification trop élevée au départ de la fermentation.

L'expérience a prouvé que cette pré fermentation à l'air permettrait d'obtenir après mise en cuve un démarrage rapide de la fermentation méthanique proprement dite.

La fermentation aérobie dégage de la chaleur – on dit qu'elle est « exothermique ». On peut la représenter par la formule :



Le dégagement de chaleur est de 4 150 calories par kilogramme.

### 1 – 3 – La fermentation méthanique de la cellulose du coton.

Les premières expériences systématiques faites par DUCCELLIER et ISMAN ont porté sur le coton, matière homogène, simple, constituée de cellulose presque pure et dont le processus de dégradation méthanique devait être simple.

La fibre de coton est constituée par une cellulose très pure mais aussi très polymérisée - formule  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ . La vitesse d'acidification est donc faible et la fermentation méthanique s'établit sans difficulté.

On immerge 20 g de coton dans 300 cc de liquide maintenu à 35°C.

Au bout de 15 jours, la méthanisation peut être observée.

Pendant un mois, on recueille en moyenne 250 à 300 cc de gaz. (jusqu'à 400)

Pendant le second mois, la production diminue, 120 à 150 cc.

Pendant le troisième mois, diminution importante, 50 à 25 cc.

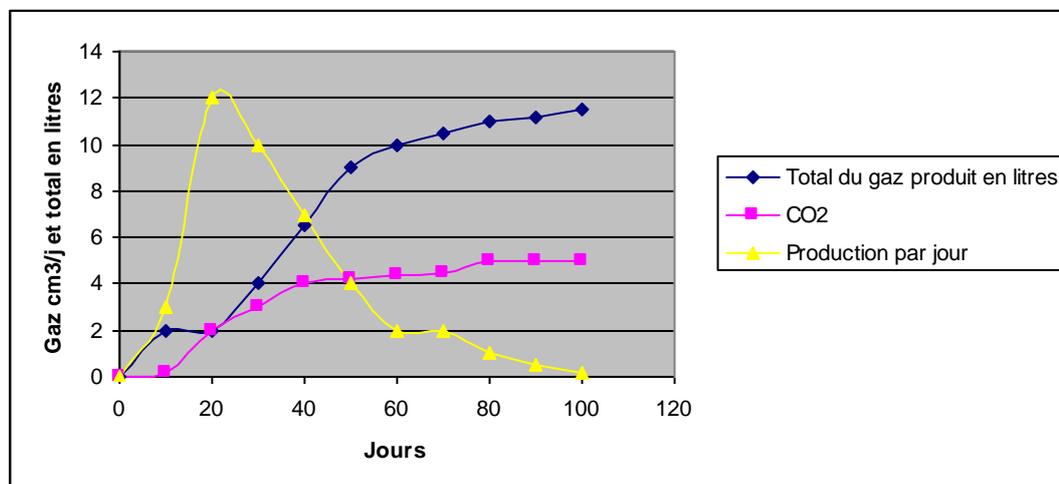
La destruction peut atteindre 85% avec production de 11,86 litres de gaz à 40% de  $\text{CO}_2$ .

Un kilog de matière dégage 596 litres de gaz contenant 354 litres de  $\text{CH}_4$ .

En cours de fermentation, l'aspect de la fibre se modifie par suite de la disparition progressive de la cellulose.

On peut éviter que, en hydrolysant la cellulose par voie chimique ou diastasique, la matière moins polymérisée s'hydrolyse et se butyrisse rapidement. La fermentation stoppe dès que le milieu renferme 2% d'acides gras mesurés en acide acétique, le pH descendant vers 4,5.

Le graphe suivant donne une courbe expérimentale de fermentation méthanique de 20 g de fibre de coton.



## 1 – 4 – La fermentation méthanique des pailles.

A l'étude de la décomposition méthanique du coton a succédé celle de la décomposition des produits hydrocarbonés complexes.

A cette catégorie se rattachent les déchets de productions végétales les plus importantes comme : pailles de riz, blé, avoine, orge, tiges de sorgho, seigle, lin, lentille, fanes d'arachides, sarments de vigne, etc.

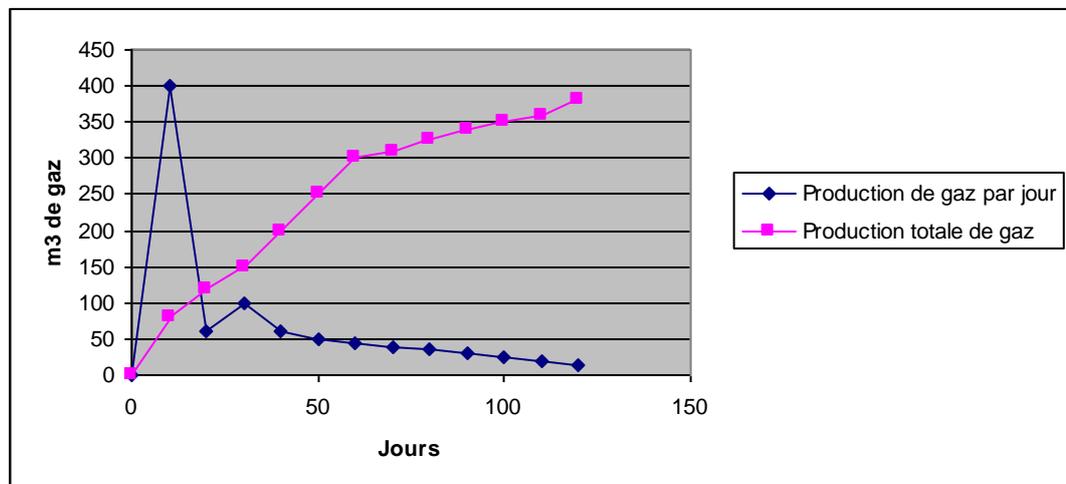
La constitution de ces produits est assez hétérogène, les résultats des analyses étant du reste variables suivant les méthodes utilisées.

Voici, à titre d'exemple, la composition approximative des pailles de céréales :

Cellulose	45 à 65%
Hémicellulose	20 à 35%
Lignine	15 à 20%

Les expériences ont prouvé qu'il était possible, dans les conditions de la pratique, d'obtenir 300 à 350 m<sup>3</sup> de gaz représentant 250 à 280 litres d'essence, à partir d'une tonne de paille pré fermentée.

Le graphe suivant donne une courbe expérimentale de fermentation d'une Tonne de paille d'avoine. Pour les pailles, la proportion de gaz carbonique CO<sub>2</sub> est de 35 à 40%.



On constate que le tiers de la production totale est obtenue en 10 jours et qu'il faut un mois pour obtenir la moitié de la production totale. Le débit journalier baisse ensuite progressivement et la fermentation se trouve pratiquement terminée au bout du sixième mois.

Ainsi, une « cuvaison » de six mois donnera 350 m<sup>3</sup> de gaz par tonne de paille sèche.

Si on limite la durée de la cuvaison à trois mois, on obtiendra 300 m<sup>3</sup> de gaz à partir d'une tonne de paille sèche. En limitant la durée de cuvaison à deux mois, on obtiendra 240 m<sup>3</sup>.

DUCELLIER et ISMAN ont obtenu les résultats suivants avec les pailles et certains débris végétaux en utilisant la méthode de fermentation aérobie préalable :

	Volume de gaz brut	Proportion de gaz carbonique	Volume de méthane	Temps en jours mis pour la production de :		
				100 l	200 l	300 l
Maïs	377	39	229	7	21	53
Avoine	371	38	229	15	34	64
Poussières de minoterie	345	34	225	9	24	71
Blé tendre	340	37	219	17	54	94
Sorgho	334	40	200	14	30	60
Orge	330	41	194	12	36	119
Blé dur	320	41	185	14	45	140
Seigle	313	36	192	17	34	92
Fanes d'arachides	298	40	176	9	31	171
Sarments de vigne	256	39	156	20	73	202
Luzerne	248	35	159	25	80	171
Lin	225	38	149	49	85	128
Marc de raisin	139	28	100	40	90	
Sciure	Insignifiant					

Les volumes sont donnés en litres, par kilogramme de matière sèche fermentable.

### 1 – 5 – La fermentation méthanique des fumiers.

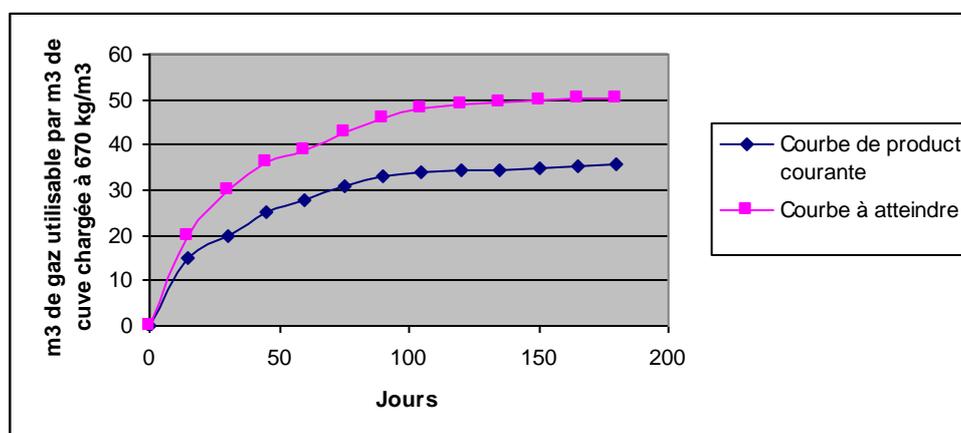
Le fumier que l'on met dans les cuves est un mélange de paille, de matières fécales et de souillures de terre. Ce mélange est plus ou moins humidifié par les déjections animales et les eaux de lavage.

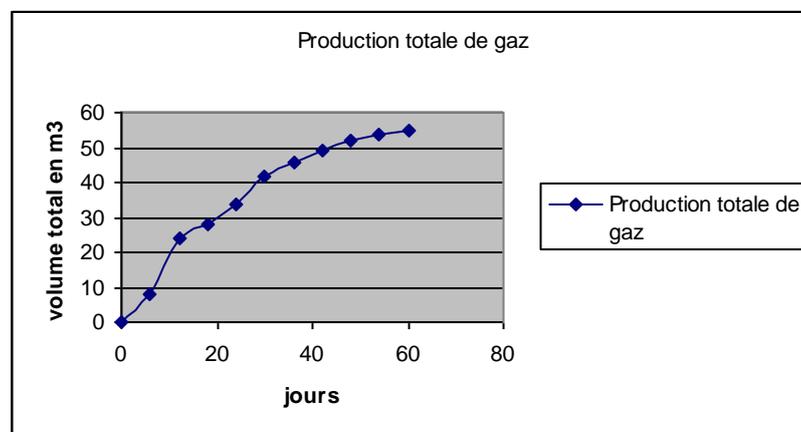
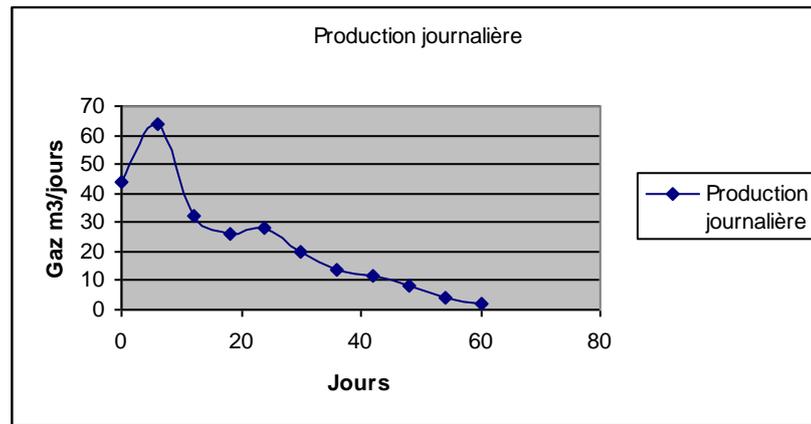
La teneur en eau des fumiers varie de 60 à 80% et leur teneur en paille plus ou moins décomposée de 30 à 20%.

Les rendements que l'on pourra observer dans la pratique seront donc variables, les productions les plus importantes étant obtenues avec des fumiers riches en paille et peu décomposés.

Ainsi, un fumier humide ayant fermenté pendant trois semaines avant mise en cuve donnera 60 m<sup>3</sup> de gaz par tonne, alors que du fumier artificiel n'ayant fermenté que 4 à 5 jours et provenant de paille humidifiée à 70% pourra donner 100 m<sup>3</sup> à la tonne.

Les graphes suivants résument ces indications.





Le processus de fermentation est complexe.

On observe, au début, des fermentations putrides résultant de la décomposition de matières azotées. Ces dernières, qui en plus de l'azote, contiennent du soufre et du phosphore, donnent naissance à des produits nauséabonds tels que :

- acide sulfhydrique  $H_2S$ ,
- Sulfhydrate d'ammoniaque  $S(NH_4)_2$ ,
- ammoniac  $NH_3$ ,
- hydrogène phosphoré, etc.

Du gaz carbonique ou dioxyde de carbone est aussi produit en grande quantité.

Lorsque la « phase de maturation » ou de « minéralisation des protides » est terminée, la phase de décomposition des produits hydrocarbonés commence, le processus devient identique à celui de la décomposition des pailles en 1 – 4.

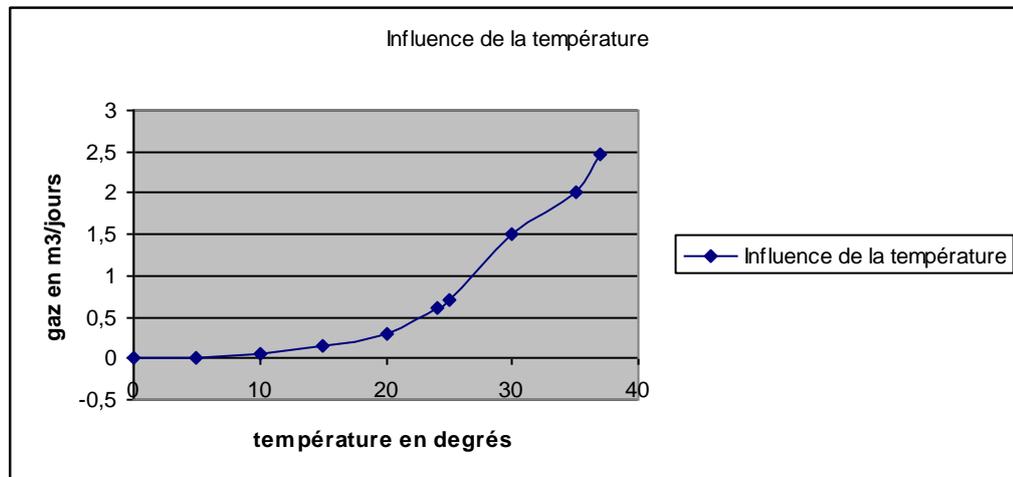
Le gaz produit au cours de la phase de maturation n'est pas combustible, on doit le laisser échapper dans l'atmosphère. Sa composition se modifie peu à peu et la proportion de méthane augmente dans le mélange, pendant la fermentation méthanique.

La durée de la phase dépend de :

- la température de la cuve au moment de la mise en fermentation,
- l'intensité de la fermentation préalable.

La vitesse de la fermentation méthanique, c'est à dire la production de gaz en un temps donné, dépend d'un certain nombre de facteurs :

a – Influence de la température.



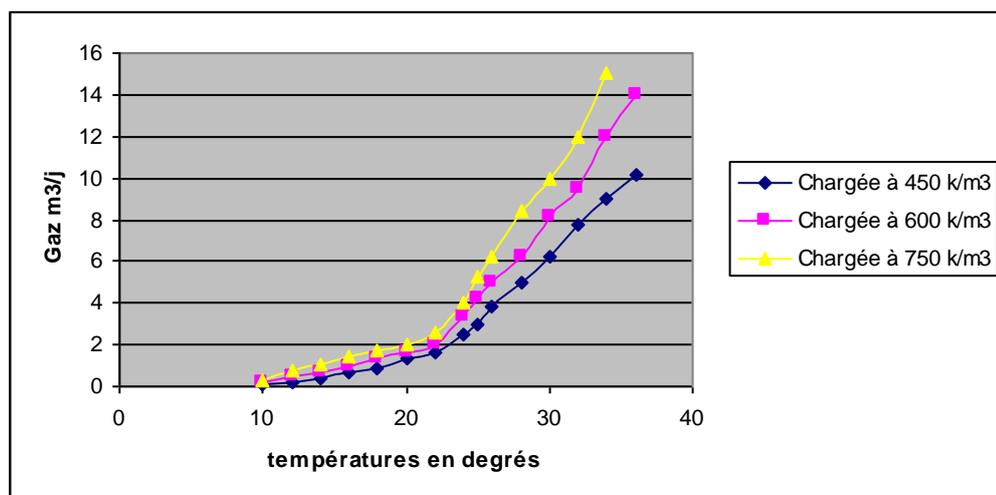
*Production journalière de 1 tonne de fumier en fonction de la température.*

La production de gaz est optimale dans la zone de 20 à 24° C, il faudra donc maintenir la température dans cette zone pour maintenir la masse de fumier en fermentation « économique ». Il faudra tenir compte de cette influence dans les pays où la production de gaz de fumiers sera envisagée.

Les analyses précédentes permettent de conclure qu'une tonne de fumier, peu produire, au cours d'un cycle de fermentation, une quantité de 50 à 60 m<sup>3</sup> de gaz. Il faut noter que la durée de production est diminuée lorsque la température est élevée.

Il est donc possible d'envisager une réduire le cycle de fermentation à un mois et demi, et par une « rotation » accélérée entre deux systèmes de fermentation, d'amortir une installation rapidement.

b – Influence du tassement.



*Influence du tassement sur la production journalière d'une cuve de 10 m<sup>3</sup>*

c – Influence de la « réaction » du milieu.

La réaction du milieu traduit la présence d'une quantité de produits plus ou moins basiques ou acides. Un contrôle du pH est donc conseillé. Il convient, si nécessaire, de corriger la réaction du milieu en ajoutant un acide si le pH est trop basique (cas de fumier trop chargé de purin) ou d'ajouter une base (chaux) si l'acidité est trop élevée (cas de marcs de raisin et de certaines ordures ménagères).

Rappel : La réaction d'un milieu est représenté par son potentiel hydrogène ou pH.

Une solution neutre a par définition un pH de 7,

Un pH inférieur à 7 correspond à une réaction acide,

Un pH supérieur à 7 correspond à une réaction basique.

Le point optimum de fermentation se situe près de la neutralité, vers un pH de 7,5, très légèrement basique.

d – Influence de l'ensemencement.

Pour obtenir une bonne fermentation, il est indispensable de disposer, au départ, d'une population microbienne très dense et en activité.

On réalise cet ensemencement par utilisation de ferments spéciaux quand il s'agit d'une première fermentation ou lors de la vidange en conservant une partie des « jus » pour la fermentation suivante. Ces jus devront être répandus sur la masse de fumier.

## 2 – Caractéristiques et propriétés du bio gaz.

### 2 - 1 – Composition.

La composition moyenne du bio gaz est la suivante :

CH <sub>4</sub>	Méthane	50 – 90 %
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone	10 – 40 %
H <sub>2</sub>	Hydrogène	1 – 3 %
N <sub>2</sub>	Azote	0,5 – 2 %
H <sub>2</sub> S	Dihydrogène sulfuré	0,1 – 0,5 %
CO	Mono oxyde de carbone	0 – 0,1 %

La quantité de soufre dépendant de la nature du substrat : moins de 0,3 % pour le lisier de porc, près de 0,7 % pour le fumier de bovin et jusqu'à 1 % pour les fientes de volaille. Le gaz contient aussi une certaine quantité d'eau qui combinée au CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>S devient très corrosive. Cette présence nécessite l'emploi de matériaux appropriés et la mise en place de filtres d'élimination de l'eau et des gaz acides.

### 2 – 2 – Propriétés physiques du gaz de fumier.

Les propriétés physiques du bio gaz sont à l'image de celles de ses principaux constituants le méthane et de dioxyde de carbone ou gaz carbonique.

Le méthane est difficilement liquéfiable, à 20°C et sous une pression de 200 bars il est encore en phase gazeuse. Sa densité par rapport à l'air de 0,77 évite son accumulation dans les parties basses d'un local. Son odeur rappelle l'odeur d'étables, de marais ou d'égouts. Cette caractéristique permet de déceler d'éventuelles fuites. Cependant une utilisation convenablement réglée ne dégage aucune odeur.

Le dioxyde de carbone plus dense que l'air doit être éliminé. Sa grande solubilité dans l'eau permet d'obtenir un bio gaz à 95% de méthane. L'élimination de cette vapeur d'eau évite l'agression des appareils d'utilisation.

### 2 – 3 – Les utilisations du bio gaz.

Les propriétés du bio gaz montrent qu'il peut alimenter tous les appareils domestiques et semi industriels fonctionnant au gaz.

Les cogénérateurs à gaz sont aussi capables de fonctionner avec du bio gaz.

### 2 – 4 – Equivalences.

Désignation	Masse moléculaire	Poids spécifique à 15°C	Masse au m <sup>3</sup> à 15°C et à la pression atmosphérique	Température d'ébullition à la pression atmosphérique	Pouvoir calorifique
Méthane CH <sub>4</sub>	16		0,638	- 164°	13 250
Ethane C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30		1,270	-84°	12 350
Propane C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44		1,860	-45°	12 000
Butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58		2,450	1°	11 800
Octane C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114	0,7		125°	11 500
Essence tourisme		0,7		100 à 170°	11 000

Equivalences pratiques du gaz méthane biologique brut et épuré (débarrassé du gaz dioxyde de carbone) par rapport à un certain nombre de combustibles et par rapport à l'énergie électrique (kWh).

Un mètre cube de gaz brut ( 6 000 calories) représente :		Un mètre cube de gaz épuré ( 8 400 calories) représente :	
Essence	0, 800 l	Essence	1, 100 l
Alcool	1, 250 l	Alcool	1, 700 l
Carbure de calcium	2 kg	Carbure de calcium	2, 700 kg
Gas-oil	0, 700 l	Gas-oil	1 l
Agglomérés de bois	1, 100 kg	Agglomérés de bois	1, 500 kg
Gaz de ville	1, 500 m <sup>3</sup>	Gaz de ville	2, 100 m <sup>3</sup>
Charbon de bois	1, 400 kg	Charbon de bois	1, 900 kg
Bois	2, 700 kg	Bois	3, 600 kg
Energie électrique	2, 200 kWh	Energie électrique	3 kWh

### 2 – 5 – Application au calcul des consommations.

**Cuisine :** La consommation de gaz dépend du nombre de bénéficiaire :

Pour 6 personnes il faut compter 0,350 m<sup>3</sup> de gaz par personne.

.....20.....0,250.....

.....50.....0,200.....

...100.....0,150.....

Ces données prévoient le service d'eau chaude de la cuisine.

**Chauffage de l'eau :** Chauffer 200 l d'eau par jour nécessite 2,500 m<sup>3</sup> de bio gaz.

### 3 – Application « Le biogaz » et « le digesteur »

Extraits du rapport de stage de Sylvain BOUX de CASSON.

Il existe un grand nombre de procédés de méthanisation qui ont en commun l'utilisation d'un digesteur, aussi appelé réacteur anaérobie, dans lequel se déroule la réaction de méthanisation. Les réacteurs les plus courants sont :

#### 3 – 1 – Les réacteurs discontinus.

Ces réacteurs doivent être vidés une fois la fermentation terminée.

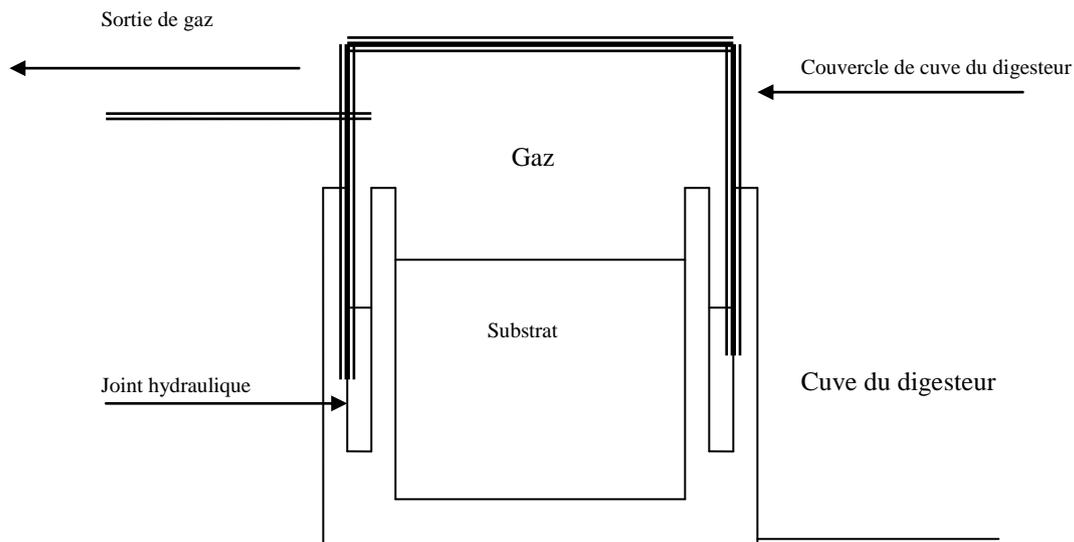
Le procédé DUCELLIER-ISMAN utilise un gazomètre, type « cloche », de volume compris entre 10 et 50 m<sup>3</sup>.

La fermentation se déroule en deux étapes.

La première en phase aérobie dure 4 à 7 jours est exothermique, elle permet le réchauffement des substrats.

La seconde, qui concerne la production du bio gaz, est anaérobie et dure près de deux mois. La production est en moyenne de 0,2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/j, (m<sup>3</sup> de bio gaz / m<sup>3</sup> de digesteur / jour).

*Schéma du principe du digesteur discontinu type gazomètre.*



Remarque du rédacteur du présent document :

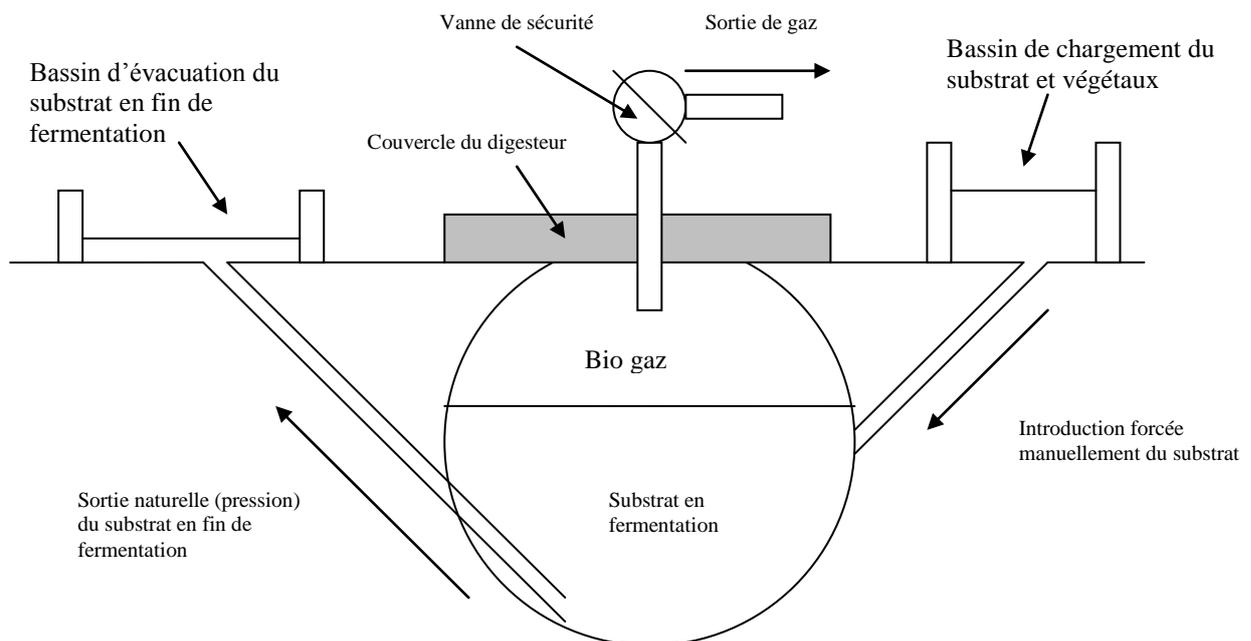
L'emploi d'un épurateur des gaz corrosifs contenus dans le bio gaz est nécessaire pour baisser le coût des matériaux de construction du digesteur et diminuer les frais d'exploitations (entretien et remplacement). L'épurateur doit éliminer l'eau, le dioxyde de carbone, l'azote, le dihydrogène sulfuré et le mono oxyde de carbone. (Voir § 5)

### 3 – 2 – Les réacteurs continus.

3 – 2 – 1 - Ce sont des réacteurs construits sous forme de cavernes enterrées, leurs contenances sont comprises entre 4 et 30 m<sup>3</sup>. Ils sont alimentés en déjections animales et humaines auxquelles on ajoute des végétaux hachés. Ils sont alimentés régulièrement et le substrat ressort à l'extrémité opposée à l'entrée après un séjour de 55 jours environ.

La productivité de ce réacteur est de 0,25 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/j, (m<sup>3</sup> de bio gaz / m<sup>3</sup> de digesteur / jour).

*Schéma du principe du digesteur continu type indien (GOBAR) ou chinois.*



La construction de la cuve enterrée nécessite le creusement d'une fosse, la construction en briques d'argile locale d'une peau et d'une voûte protégée par une dalle béton, mobile, servant de couvercle du digesteur. Une sortie de gaz avec contrôle de pression et une vanne de sécurité doit équiper ce couvercle. La mise à l'ombre de ce couvercle peut être réalisée par des végétaux coupés en attente de chargement du digesteur. Cette précaution permet de maintenir la température, du substrat en fermentation, à une valeur relativement constante.

#### **Très important :**

**Le nettoyage de cette fosse nécessite une ventilation très efficace pendant le nettoyage afin de ne pas incommoder ou asphyxier un employé, par le manque d'oxygène.**

Remarque du rédacteur du présent document :

Ici aussi, l'emploi d'un épurateur des gaz corrosifs contenus dans le bio gaz est nécessaire pour baisser le coût des matériaux de construction du digesteur et diminuer les frais d'exploitations (entretien et remplacement). L'épurateur doit éliminer l'eau, le dioxyde de carbone, l'azote, le dihydrogène sulfuré et le mono oxyde de carbone.

3 - 2 - 2 – Un autre type de digesteur est développé. Sous forme d'une « vache à gaz » en polyéthylène à une entrée et une sortie de substrat sous forme aplatie, ce digesteur d'un coût peu élevé et d'un entretien aisé est en expérimentation par l'association EDERN. Le débit de gaz nécessaire à l'alimentation d'un cogénérateur doit justifier un digesteur de grandes dimensions.

L'élimination des gaz « parasites » seraient traités par sur oxygénation à l'entrée du moteur.

#### 4 – Le cogénérateur. Exemple le TOTEM

Lorsqu'on produit de l'énergie électrique à partir des sources primaires le rendement de l'installation est faible. Par exemple le rendement d'une usine thermoélectrique, à flamme, ne dépasse pas 35%. Ce rendement s'adresse uniquement à la production d'électricité et ne prend pas compte de la possible valorisation de l'énergie thermique rejetée.

Une utilisation plus rationnelle de l'énergie consiste donc à récupérer la plus grande partie de cette énergie thermique en produisant de l'eau chaude qui pourra être utilisée pour le chauffage de locaux, pour la production d'eau chaude à usage domestique ou pour divers procédés industriels.

Issue d'expérimentations commencées en 1976, les cogénérateurs TOTEM (TOT Energy Module) virent le jour en Italie puis furent commercialisés en Europe.

On appelle cogénérateur (sous entendu électrothermique) un module capable de produire simultanément de l'électricité et de l'énergie thermique sous forme d'eau chauffée.

Le rendement d'un tel cogénérateur peut atteindre 95% grâce à l'utilisation de l'énergie thermique.

L'énergie thermique produite par le moteur thermique et par les pertes du générateur électrique est récupérée par des échangeurs.

##### 4 – 1 – Le TOTEM.

Il existe plusieurs modèles de TOTEM liés à leur mode de démarrage.

**Standard** : Le réseau électrique sert à démarrer le moteur à explosion en alimentant le générateur asynchrone.

**Indépendant** : Une batterie sert à démarrer le moteur à explosion, comme un moteur classique.

Les deux premières générations de TOTEM ont été développées sous licence FIAT par la société BIKLIM puis par TEM ENERGY. Une nouvelle génération de TOTEM a été mise au point suite au rachat de TEM ENERGY par l'entreprise italienne ACCARRONI.

##### 4 – 2 – Fonctionnement.

Il faut dissocier les phases de production et de démarrage pour appréhender le fonctionnement du cogénérateur.

L'examen du schéma fonctionnel en phase de production est la meilleure approche pour ensuite analyser la phase de démarrage.



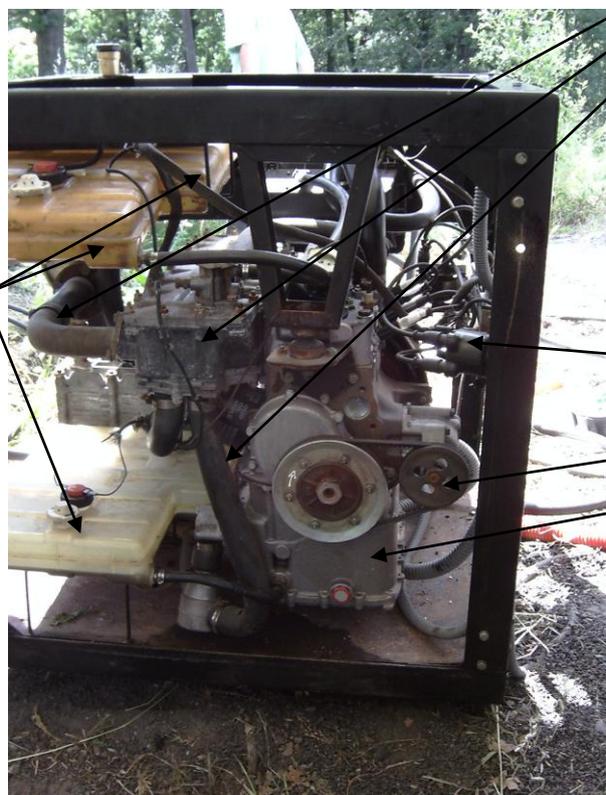
Echappement

Arrivée  
du gaz

Entrée d'eau  
froide pour  
récupération  
de chaleur

Génératrice asynchrone

Deux des échangeurs  
thermiques, alimenté par  
des durites.



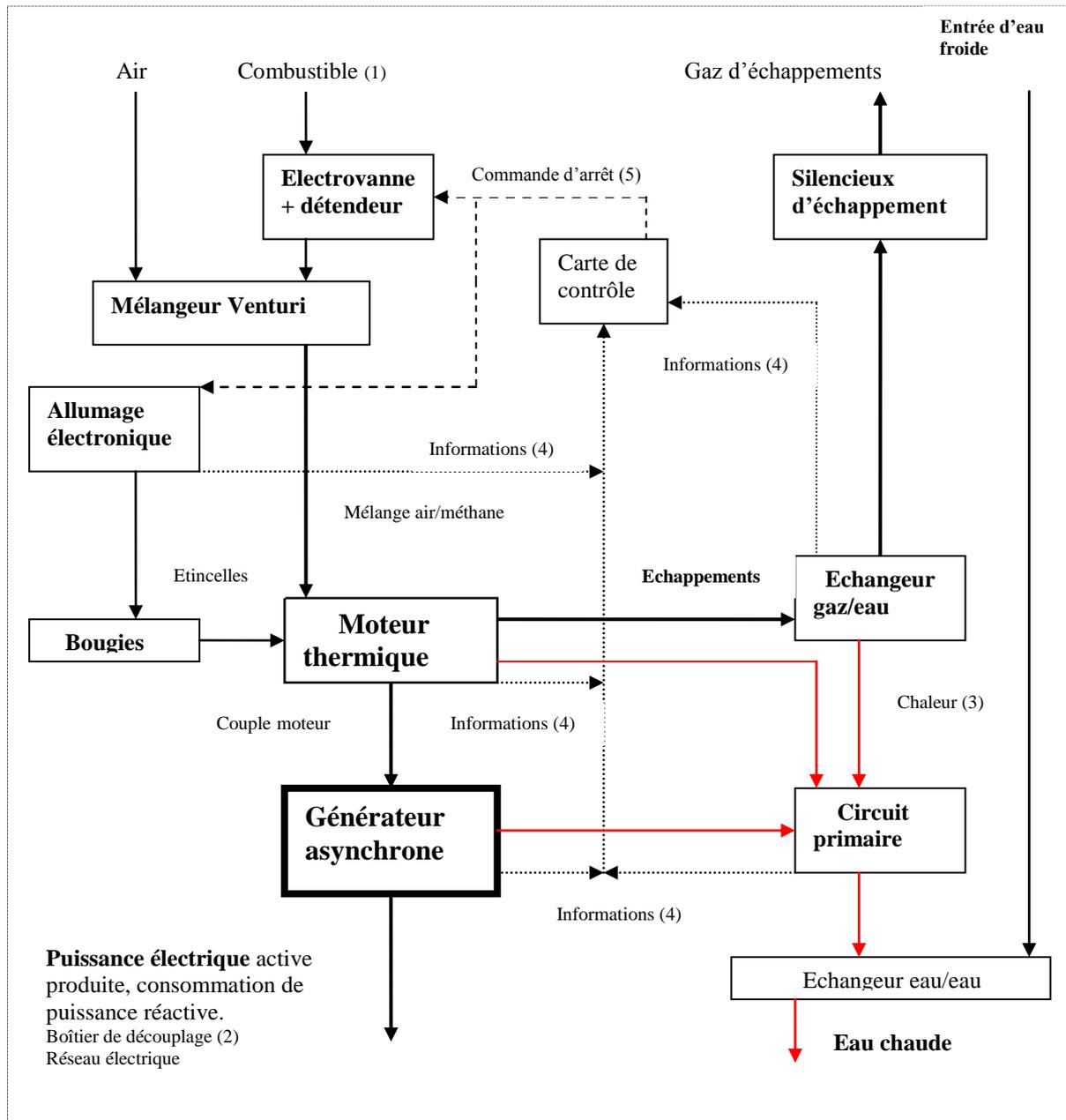
Vases  
d'expansion du  
liquide de  
refroidissement  
et de  
récupération de  
chaleur

Système d'allumage.

Pompe à eau

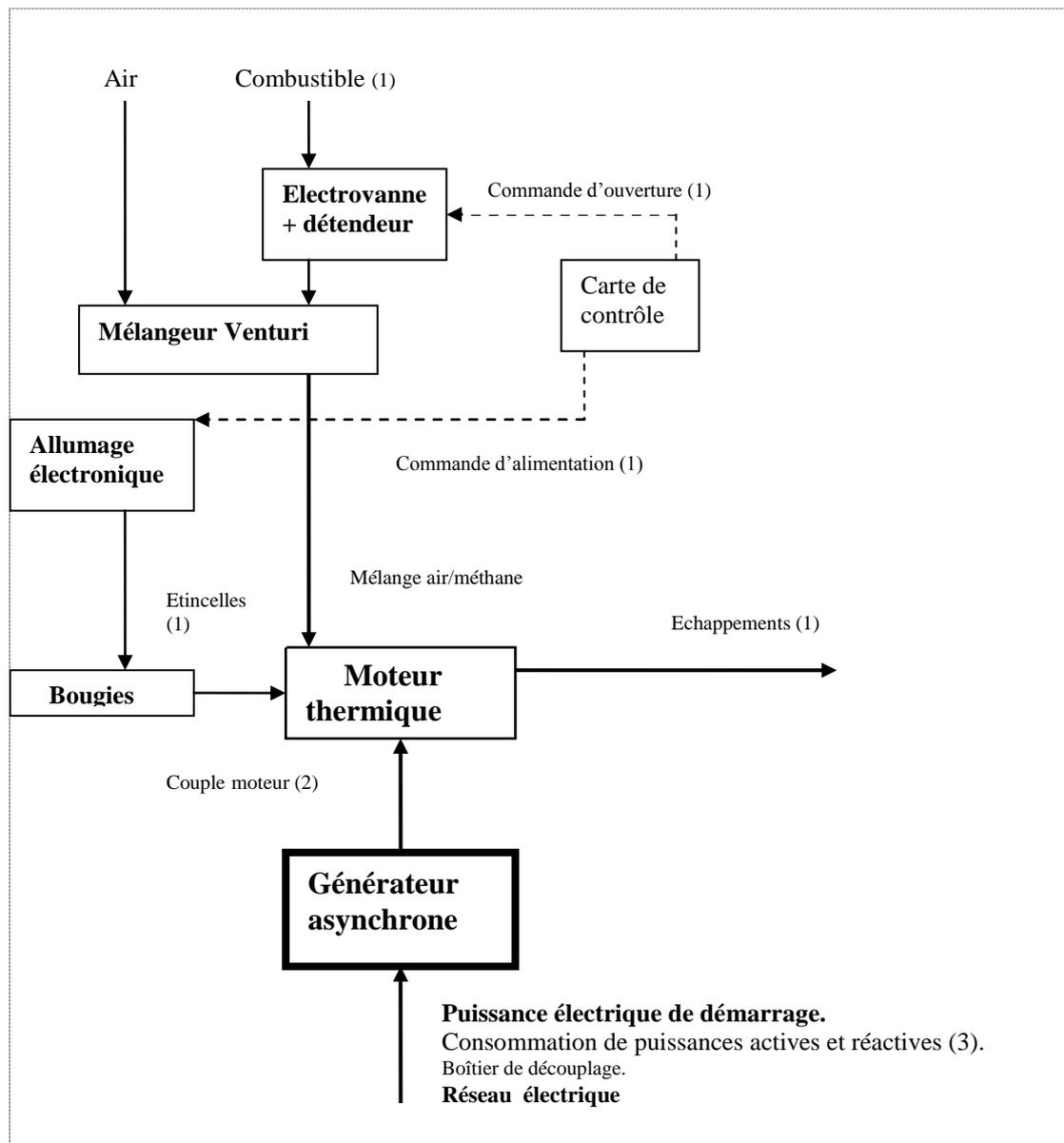
Moteur thermique

4 – 2 – 1 - Phase de production :



- (1) : En fonction de la teneur en hydrocarbure du combustible, il faut régler le détendeur de gaz (manuellement) de manière à obtenir la meilleure proportion combustible/comburant.
- (2) Le boîtier de découplage, agit sur un télérupteur entraînant l'arrêt instantané du TOTEM (grâce au découplage de la génératrice du réseau) lorsqu'une anomalie est détectée sur le cogénérateur ou sur le réseau.
- (3) Les flèches rouges représentent le transfert de chaleur sous forme d'eau chauffée.
- (4) Les informations venant de la carte de contrôle sont fournies par divers capteurs de pression, de température et de vitesse.
- (5) La commande d'arrêt, due à la détection d'un défaut entraîne la fermeture de l'électrovanne, l'arrêt de l'allumage électronique ainsi que l'ouverture du contacteur de puissance qui découple la génératrice du réseau.

## 4 – 2 – 2 - Phase de démarrage :



- (1) : toutes ces actions ou commandes, indispensables au fonctionnement du moteur thermique (allumage des bougies et alimentation en combustible), n'ont lieu qu'après une temporisation de 4 à 5 secondes. Ce retard est l'équivalent du temps de mise en vitesse du moteur thermique correspondant aux 50 Hz du générateur asynchrone.
- (2) Lors du démarrage, la machine asynchrone fonctionne comme un moteur ; elle consomme de l'énergie active nécessaire à l'entraînement du moteur thermique et à son démarrage.
- (3) A la fin de la temporisation, la machine asynchrone et le moteur thermique ont atteint la vitesse de synchronisme, le moteur thermique est alors alimenté en combustible et l'allumage des bougies se met en marche. Le moteur à explosion démarre et le couple résistant du générateur asynchrone fonctionnant en moteur asynchrone s'inverse et devient couple moteur face au couple du réseau qui de moteur devient résistant.

#### 4 – 2 – 3 - Le moteur thermique :

Le moteur thermique est un moteur à explosion classique, seules quelques modifications sont nécessaires.

- un carter spécial récupère de la chaleur en refroidissant l'huile du moteur,
- un réservoir d'huile complémentaire qui maintient le niveau dans le carter,
- un détendeur de pression à membrane fonctionnant entre la pression du réseau (entre 0,5 et 3 bar) et la pression nécessaire au moteur (légèrement inférieure à l'atmosphère),
- un mélangeur air/méthane, de type Venturi, fonctionnant à pleine ouverture, avec une vis de réglage en fonction du gaz utilisé,
- une électrovanne pour le gaz, fermée/désexcitée,
- un allumage électronique à avance fixe, réglable en fonction du gaz utilisé,
- un jeu de poussoir et un arbre à came optimisés pour un fonctionnement en régime constant,
- un silencieux d'échappement adapté.

L'utilisation d'un bloc moteur de voiture, permet de réduire les coûts de construction. De plus sa maintenance pourra être réalisée par un mécanicien auto.

#### 4 – 2 – 4 – Le générateur asynchrone.

Le générateur est une machine tournante triphasée à rotor de type « cage d'écureuil ». Sa vitesse de rotation doit être de 3000 t/mn afin d'être accouplée mécaniquement au moteur thermique sans réducteur de vitesse.

Pendant la phase démarrage le rotor atteint une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme. Pendant la phase de production la vitesse de rotation est égale à la vitesse de synchronisme augmentée d'un léger glissement. Le couple moteur de la génératrice asynchrone étant très inférieur au couple résistant du réseau la fréquence de ce dernier n'est pratiquement pas influencé. Seule la « transformation » de la puissance mécanique en puissance électrique injecte cette dernière dans le réseau. Le générateur consomme une puissance réactive nécessaire au rotor, à l'induction du flux magnétique tournant, donc au couple de synchronisation du rotor.

Un générateur asynchrone de 12 à 13 kW absorbera 9 kVAR de puissance réactive indispensable au rotor.

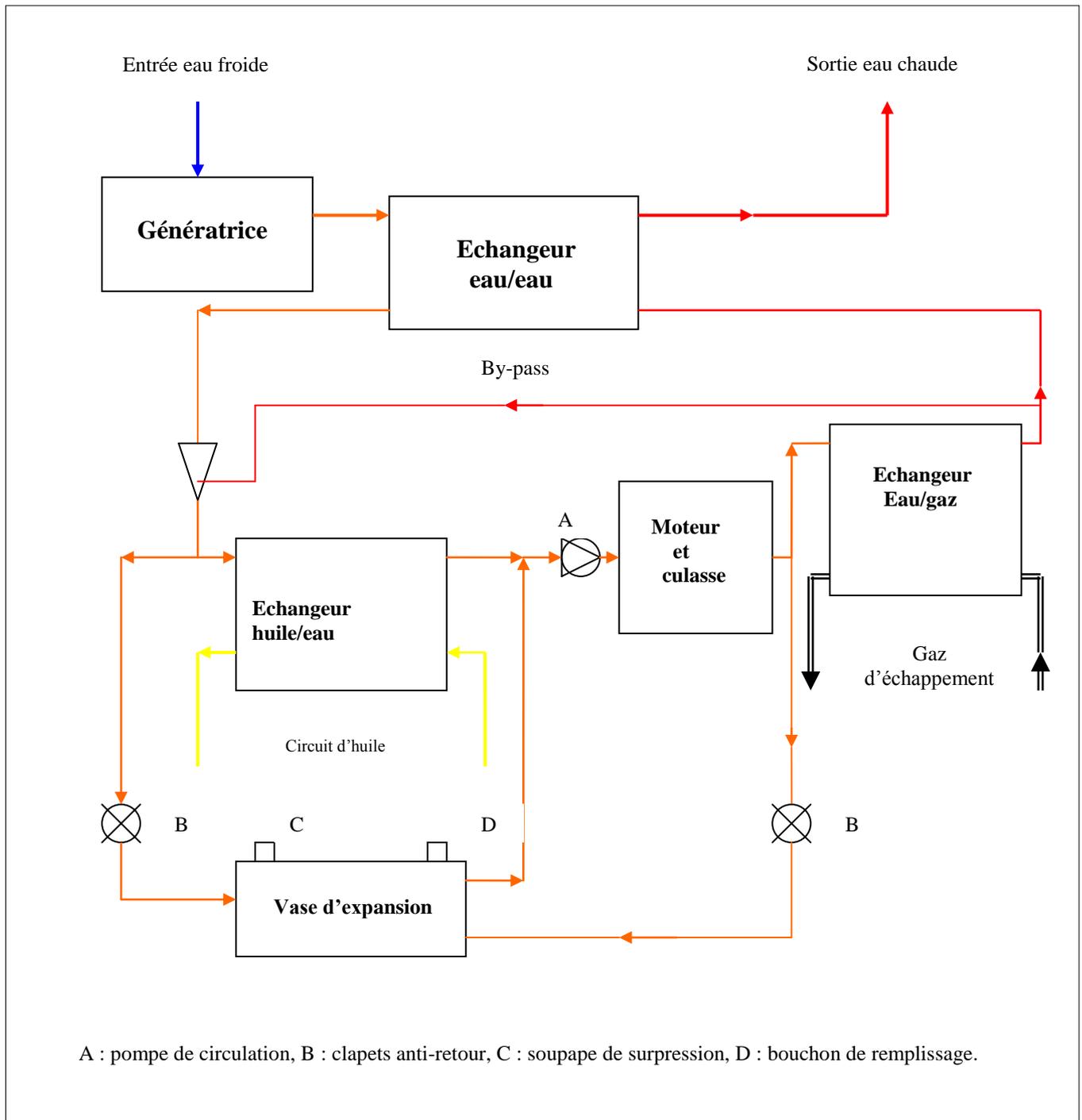
L'utilisation de machines asynchrones, bien qu'elles ne puissent fonctionner que raccordées sur un réseau, s'explique par les avantages suivants :

- faible coût d'investissement,
- rotor à cage d'écureuil simple et robuste,
- automatisme commande contrôle simple,
- aucune alimentation des courts-circuits de réseau.

Afin de compenser le facteur de puissance du site de production on peut utiliser ;

- des condensateurs de relevage du  $\cos \varphi$ ,
- surexciter l'excitation d'un générateur synchrone couplé sur le réseau, au voisinage du cogénérateur.

## 4 – 2 – 5 – Schéma de principe du circuit d'eau de récupération de chaleur.



## 4 – 2 – 6 – Le commande contrôle.

Le commande contrôle du cogénérateur doit satisfaire aux conditions suivantes :

- 1 - Mise en sécurité des exploitants,
- 2 - Mise en sécurité du matériel,
- 3 - Gestion des séquences de démarrage,
- 4 - Contrôle de la puissance produite.
- 5 – Visualisation de certaines grandeurs physiques.



Examen rapide des conditions :

- 1 - Mise en sécurité des exploitants,  
Contrôle de l'isolement des circuits de commande et de puissance. (disjoncteur différentiel ou mesureur d'isolement selon le régime de neutre).  
Interrupteur de tranche (circuits de commande) condamnable par clef.  
Disjoncteur de puissance condamnable par clef.
- 2 - Mise en sécurité du matériel,  
Protection contre les courts-circuits internes,  
Protection contre les surcharges électriques prolongées,  
Contrôle des températures,  
Contrôle de la circulation d'eau.
- 3 - Gestion des séquences de démarrage,  
Contrôle de la présence tension,  
Commande du contacteur de puissance (couplage de la génératrice au réseau).  
Contrôle de la vitesse,  
Commande de l'électrovanne de gaz.
- 4 - Contrôle de la puissance produite.  
Contrôle du retour de puissance.
- 5 - Visualisation des grandeurs physiques.  
Mesure des puissances actives et réactives,  
Mesure des intensités,  
Mesure des tensions réseau,  
Mesure de températures,  
Mesure de la vitesse de rotation.

**5 – Elimination des composés et gaz parasites.**

La **vapeur d'eau** est principalement éliminée si on doit compresser le Méthane.

Le cycle compression/détente fait condenser la plus grande partie de la vapeur d'eau, car cette eau trouble le fonctionnement de la station.

Elimination par :

Par condensation.

Par le chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>).

Par la chaux vive (CaO).

Par le glycol (antigel CH<sub>2</sub>OH-CH<sub>2</sub>OH) avide d'eau.

**Gaz carbonique** (CO<sub>2</sub>) : Il gêne la combustion sans l'empêcher, mais son élimination est intéressante pour diminuer le volume de stockage.

Elimination par :

Par le lait de chaux (chaux vive mélangée à de l'eau : CaO+H<sub>2</sub>O → Ca(OH)<sub>2</sub> ) et barbotage.

Par l'eau, donne de l'acide carbonique.

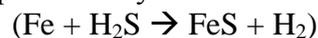
Par le diéthylamide (C<sub>4</sub>H<sub>11</sub>N).

Par le carbonate de Potassium (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

Par l'alcali, 1 litre par m<sup>3</sup> de fumier.

**Hydrogène sulfuré** (H<sub>2</sub>S) : Combustible mais fortement corrosif va dégager de l'acide sulfurique.

Pour l'éliminer on filtre le biogaz par de l'oxyde de fer ou de la limaille de fer.



Ils pourront être régénérés par exposition à l'air libre en donnant du fer (Fe), du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et de l'Hydrogène (H<sub>2</sub>).

Un lavage à l'eau peut aussi éliminer une grande partie de l'Hydrogène sulfuré car il est plus soluble que le CO<sub>2</sub> (2.6 dm<sup>2</sup>/l à 20°C). On peut aussi utiliser du charbon de bois en complément à la limaille de fer.

**Hydrogène phosphoré** (PH<sub>3</sub>) : Traces, combustible.

Hydrogène (H<sub>2</sub>) : Combustible.

**Composés éthyléniques** (C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>) : Traces, combustibles.

**Azote** (N<sub>2</sub>) : Incombustible, donne en présence d'oxygène des oxydes d'azote irritants.

**Ammoniac** (NH<sub>3</sub>) : Incombustible.

**Oxyde de carbone** (CO) : Toxique très dangereux à respirer, mais faible taux dans le bio gaz, combustible.

Une **prééparation dans le digesteur** est possible. Un apport de calcaire ou carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) à raison de 2.5 pour 1000 du poids du fumier éliminera la plus grande partie de gaz carbonique et d'Hydrogène sulfuré. Attention ces réactions sont exothermiques, le contrôle de la température, dans les pays chauds est conseillé. Un refroidissement peut être envisagé par ajout de matière froide.

