

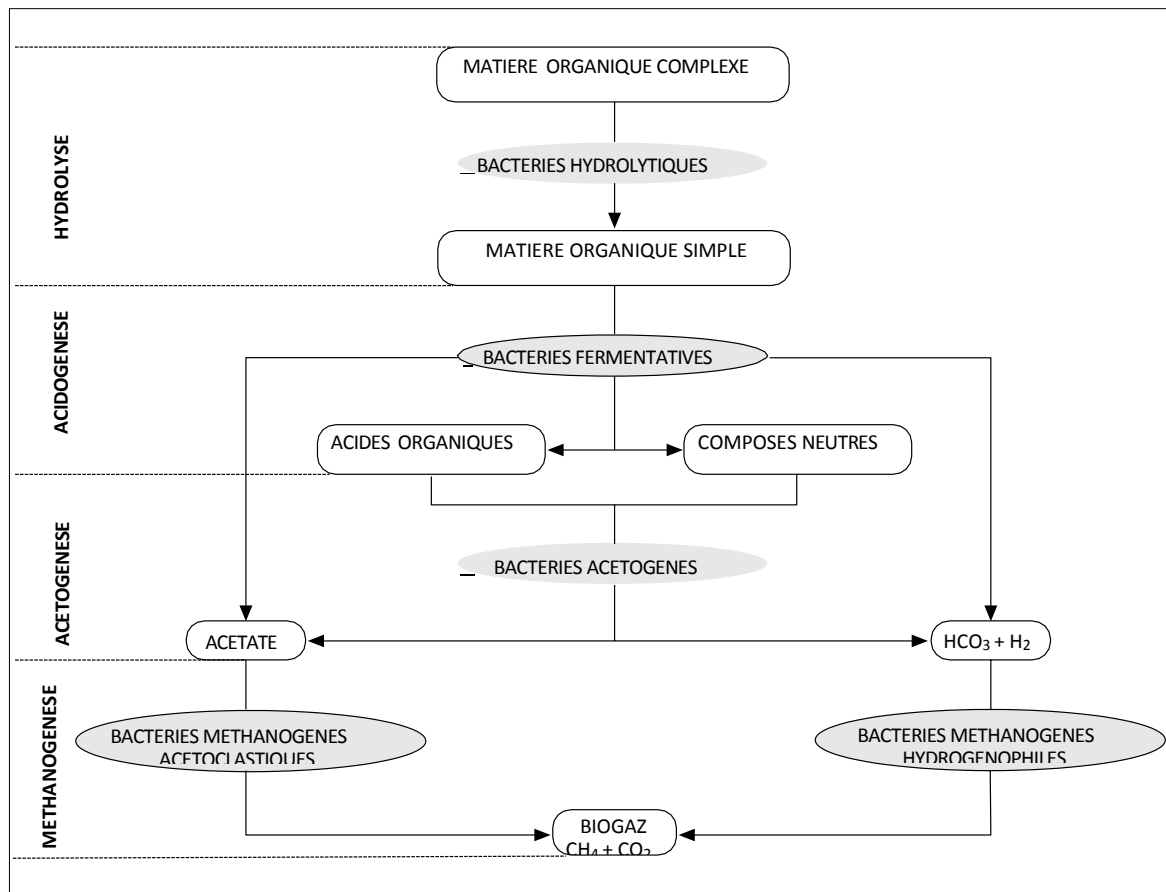
## CHAPITRE 2 : Technologie de la digestion

### 1. Paramètres biologiques

La dégradation de matières organiques par digestion anaérobie (en l'absence d'oxygène), conduit à la production d'un gaz composé essentiellement de méthane et de gaz carbonique, c'est la **méthanisation**.

La méthanisation est un procédé naturel de dégradation de la matière organique par des bactéries, en l'absence d'oxygène, produisant un **biogaz** composé de méthane et de dioxyde de carbone. Cette réaction produit également un résidu, appelé **digestat**, qu'il est ensuite possible de valoriser en tant que fertilisant pour l'agriculture.

Cette dégradation met en jeu des populations variées de microorganismes. Les substrats utilisés par ces bactéries et les produits qu'elles fabriquent permettent de distinguer différentes phases dans la biosynthèse du méthane. Elles sont présentées dans la figure ci-dessous.



### Le procédé de la digestion anaérobie, s'effectue en quatre étapes

- **Hydrolyse** : les macromolécules sont coupées progressivement en monomères solubles par des enzymes extracellulaires (cellulases, hydrolases, amylases...) les bactéries hydrolytiques.

- **Acidogénèse** : Les monomères issus de l'étape d'hydrolyse, sont transformés en acides organiques et alcools avec une libération d'ammonium ( $\text{NH}_4$ ), de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et ( $\text{H}_2$ ).

La composition des produits intermédiaires est influencée par la pression partielle d'hydrogène. La formation d'acétate est favorisée en présence de faibles pressions d'hydrogène, alors que celle de propionate, butyrate, éthanol et lactate est favorisée en présence de fortes pressions partielles.

- **Acétogénèse** : La plupart des acides organiques et des alcools produits en première et deuxième étape seront ensuite dégradés en acétate ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), hydrogène ( $\text{H}_2$ ) et gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), qui sont les précurseurs du méthane.
- **Méthanogénèse** : dernière étape au cours de laquelle est formé le méthane selon deux voies principales et distinctes. Environ 70 % du méthane produit provient de la décarboxylation de l'acétate, les 30 % restant résultent de la réduction du gaz carbonique par l'hydrogène.

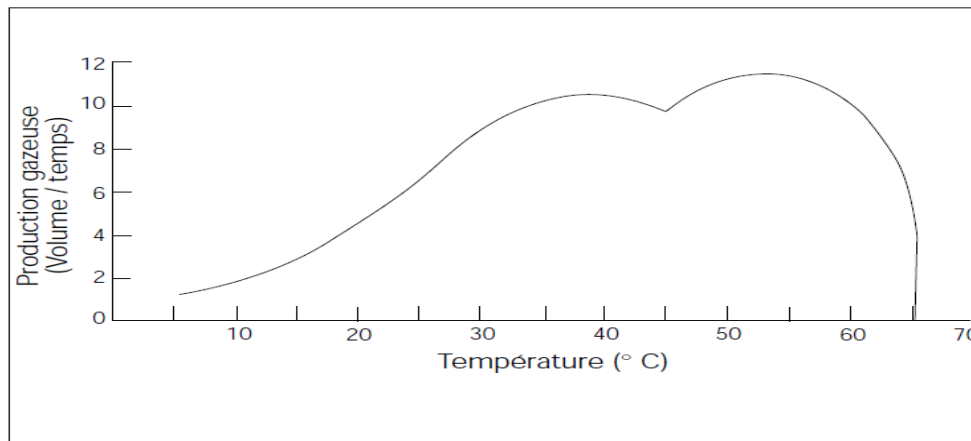
**Remarque** : selon la nature des déchets à traiter, deux cas peuvent être se présenter :

- a) les composés organiques ne sont pas dégradables par digestion anaérobie (lignine, etc.);
- b) la matière organique est dégradable par cette voie. Dans ce cas, il faut disposer des populations bactériennes appropriées et assurer les conditions physico-chimiques permettant leur croissance et leur activité.

Les principaux facteurs physico-chimiques qui affectent le procédé de digestion anaérobie sont: **la température, pH, le potentiel redox et la présence des substances toxiques ou inhibitrices.**

### 1.1. Température

Ce facteur influence directement la vitesse de réaction du processus de méthanisation. Selon leur optimum de température d'activité, les bactéries sont classées en trois groupes : psychrophile (moins de 20° C), mésophile (entre 20° C et 45° C, avec un optimum situé vers 35° C) et thermophile (à partir de 45° C, avec un optimum situé vers 55° C). La productivité gazeuse augmente parallèlement avec l'accroissement de température, jusqu'à environ 45° C, température qui n'est favorable à aucune des bactéries mésophiles ou thermophiles. En dessous de 10° C, on assiste à une diminution drastique de la production. La gamme de température mésophile présente dans la majorité des digesteurs est la plus intéressante au plan du bilan énergétique, car c'est elle qui laisse la part la plus importante d'énergie nette valorisable. La plage de température thermophile peut s'avérer intéressante pour des déchets ménagers, par exemple, car elle contribue à l'inactivation des germes pathogènes.



Le tableau suivant résume les principaux avantages d'une digestion anaérobie en zone mésophile ou thermophile.

Voie mésophile	Voie thermophile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• moins de vapeur d'eau dans le gaz;</li> <li>• moins de CO<sub>2</sub> dans le gaz;</li> <li>• davantage d'espèces microbiennes méthanogènes : d'où stabilité de l'écosystème;</li> <li>• bilan énergétique plus favorable;</li> <li>• possibilité d'utilisation des calories à bas niveau.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• activité plus grande : temps de rétention inférieur;</li> <li>• diminution des volumes de boue formée;</li> <li>• destruction des microorganismes pathogènes;</li> <li>• maintenance des conditions anaérobies plus facile, à cause d'une plus faible solubilité des gaz à des températures plus élevées.</li> </ul>

## 1.2. pH et alcalinité

Le pH optimal pour la production de méthane se situe au voisinage de la neutralité avec un optimum compris entre 6,5 et 7,5. Dans les systèmes de digestion monoétapes, la production et la consommation d'acides lors des différentes étapes biologiques permettent de stabiliser facilement le pH dans une plage voisine de l'optimum. Dans les systèmes biétapes, l'étape acidogène voit son pH diminuer et celui-ci doit être maintenu entre 5,0 et 6,5 afin d'assurer le fonctionnement optimum des bactéries.

Toute baisse de pH traduit un déséquilibre résultant d'une accumulation d'acides gras volatils; elle apparaît lorsque la capacité tampon du milieu est saturée. Une chute de pH inhibe l'activité des bactéries méthanogènes.

L'équilibre du pH est essentiellement assuré par les bicarbonates dissous, eux-mêmes en équilibre avec le gaz carbonique dissous. Des concentrations de 2500 à 5000 mg/l assurent un bon effet tampon du milieu. Si, par accident, la méthanogenèse est inhibée, l'accumulation d'acides gras volatils va entraîner une diminution des ions bicarbonates dissous et une libération de gaz carbonique. La chute de l'alcalinité due aux bicarbonates, en dessous de 1500 mg/l, précède une baisse de pH.

### **1.3. Potentiel redox**

Les processus microbiens s'accompagnent toujours de réactions d'oxydo-réduction. C'est de ce type de réaction que les microorganismes tirent l'énergie chimique dont ils ont besoin pour leur maintenance et leur croissance. En culture pure, les bactéries méthanogènes exigent de faibles potentiels redox (-300 à -330 mV). Dans un digesteur en pleine activité, on mesure des potentiels redox nettement plus élevés (-50 mV à 0 mV). Il importe, pour favoriser l'activité des bactéries méthanogènes, d'assurer un potentiel redox favorable en tout point du digesteur; pour ce faire, on limite au minimum l'apport de substances oxydantes tels les nitrates, les nitrites et évidemment l'oxygène.

### **1.4. Toxicité et inhibition**

Les déchets et les effluents (particulièrement industriels) sont susceptibles de contenir des substances toxiques ou inhibitrices pouvant, dans certains cas, perturber le fonctionnement d'un digesteur. L'importance de l'effet dépend de la nature des composés toxiques, de leur concentration et du degré d'adaptation des microorganismes à ces derniers. Dans la pratique, on ne peut toutefois parler de toxicité que dans de rares cas, souvent liés à des questions de concentrations.

Plusieurs paramètres influencent l'effet des toxines dont on cite :

- la différence de sensibilité et d'adaptation des bactéries présentes,
- le type de digesteur et à son mode de fonctionnement,
- la composition des déchets ou l'effluent,
- critères utilisés pour évaluer la toxicité.

## **2. Les systèmes de digestion**

Les systèmes de digestion peuvent être classés selon 3 critères :

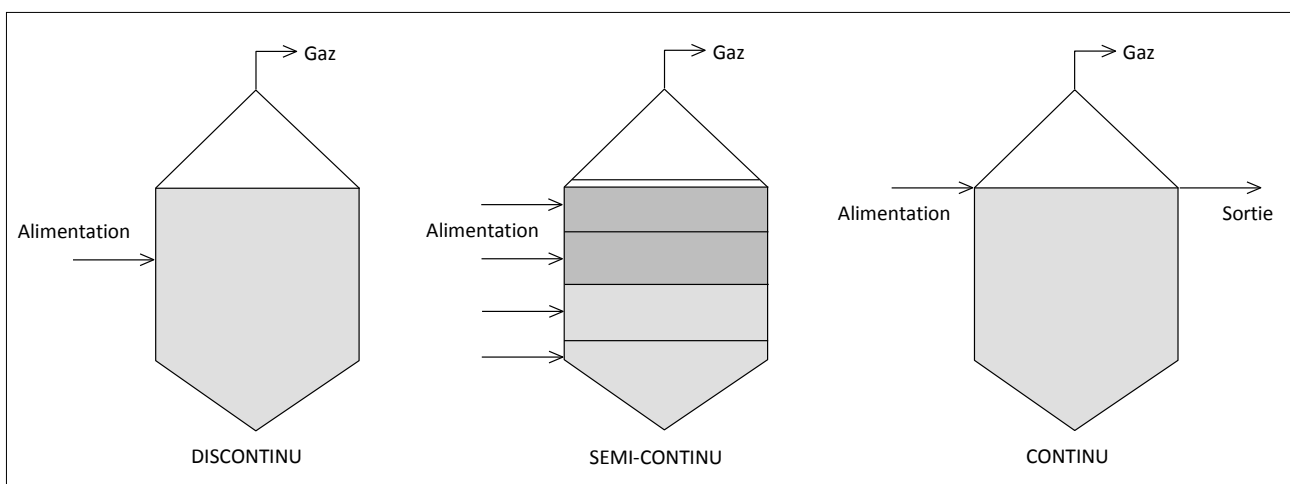
- a. le mode d'alimentation du substrat dans le digesteur;
- b. la voie retenue pour assurer le maintien d'une biomasse importante et un temps de séjour le plus élevé possible pour les microorganismes, et pour améliorer le contact entre la biomasse et le substrat à traiter;
- c. la séparation des étapes du processus biologique.

**2.1. Les systèmes de digestion selon le mode d'alimentation :** il existe trois modes d'alimentation des digesteurs

**2.1.1. L'alimentation en discontinu ou «batch» :** le réacteur est complètement rempli de substrat à digérer en une seule opération. Une fois l'anaérobiose est réalisée, la production gazeuse évolue de façon régulière, mais elle est limitée dans le temps et passe par un maximum, si bien que pour obtenir un débit régulier de biogaz il faut disposer de plusieurs réacteurs en batterie, remplis et vidés à intervalles réguliers. Ce mode d'alimentation utilisé à l'origine pour des déchets agricoles a été repris pour des applications à la méthanisation de déchets ménagers.

**2.1.2. L'alimentation en semi-continue ou «fed-batch» :** ce mode d'alimentation consiste à remplir progressivement le réacteur durant la digestion, sans retirer de substrat avant la fin du processus.

**2.1.3. L'alimentation en continu (système ouvert) :** le substrat est introduit et le produit digéré est extrait de façon progressive et continue, si bien que le volume effectif de biomasse dans le digesteur reste constant. Dans la pratique, la plupart des systèmes fonctionnent selon le mode continu.



## 2.2. Systèmes de digestion selon l'état de biomasse

Deux voies sont possibles pour assurer **le maintien de la matière organique** dans le digesteur et **améliorer son contact avec les microorganismes**.

### 2.2.1. Les procédés à cultures libres

Ce mode consiste à maintenir élevée la concentration en matière organique, en séparant cette dernière du substrat épuré et en la recyclant, ou en maintenant un lit de boue en partie inférieure du digesteur.

### 2.2.2. Les procédés à cultures fixes

Ce procédé met en œuvre des réacteurs dotés d'un matériau support sur lequel les bactéries peuvent se fixer et se développer.

### 2.3. Systèmes de digestion selon la séparation des étapes du processus

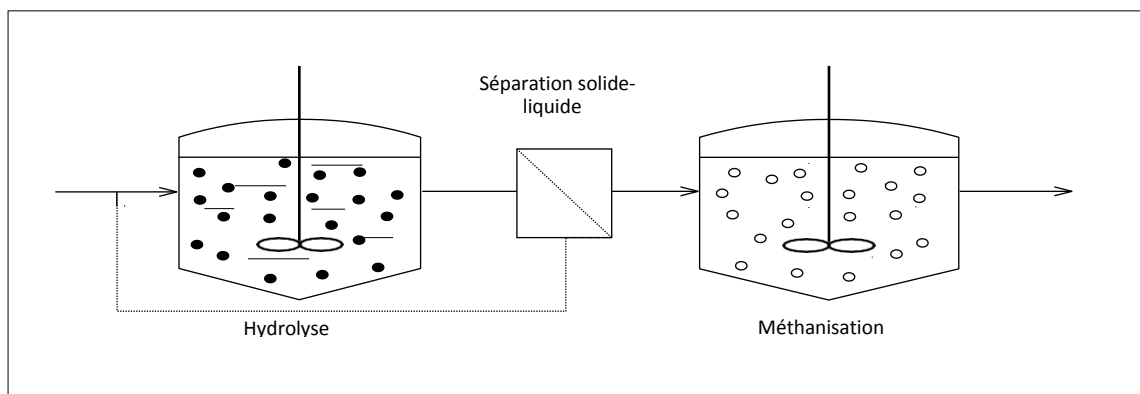
**2.3.1. Le procédé monoétape**, toutes les étapes biologiques ont lieu dans le même digesteur.

**2.3.2. Le procédé biétape** : Lorsque les étapes d'hydrolyse et de fermentation sont physiquement séparées de l'étape de méthanisation, on parle d'un procédé biétape. L'étape d'hydrolyse est alors dimensionnée de manière à offrir un temps de rétention hydraulique suffisamment élevé pour permettre au processus d'hydrolyse de se développer.

Pour des substrats organiques facilement hydrolysables, le temps d'hydrolyse est suffisamment court pour que la méthanisation ne puisse se développer dans le réacteur d'hydrolyse (lessivage des méthanogènes).

Lorsque le temps d'hydrolyse est plus long (> 2 à 3 jours), les méthanogènes peuvent commencer à se développer dans le réacteur d'hydrolyse.

Il est alors possible de découpler le temps de rétention hydraulique dans le réacteur d'hydrolyse du temps de rétention des matières solides. On inclut alors une étape de séparation liquide-solide à la sortie de l'étape d'hydrolyse (décanteur lamellaire, centrifugeuse). On réalise ainsi l'hydrolyse des matières solides par le biais d'un temps de rétention élevé des solides. Grâce au temps de rétention hydraulique court,



la méthanisation ne peut se développer dans le réacteur d'hydrolyse.

**NB** : Cette notion ne doit pas être confondue avec celle de **procédé biétage**, au cours duquel les mêmes réactions biologiques se déroulent à l'intérieur de deux digesteurs placés en série.

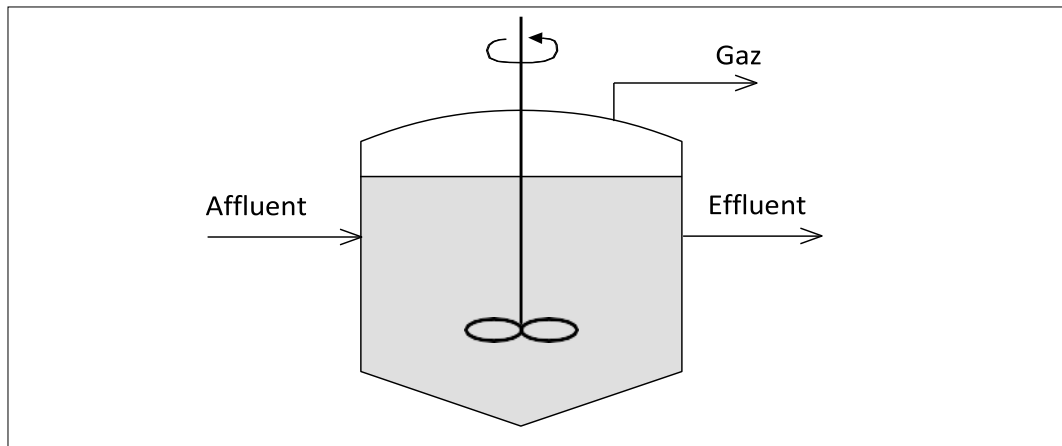
## 3. Technologies des systèmes de digestion

**3.1. Procédés de digestion d'effluents**: divers procédés technologiques peuvent être utilisés pour la digestion des déchets

### 3.1.1. Infiniment mélangé

Ces digesteurs sont largement utilisés et considérés comme conventionnels pour le traitement de lisiers en agriculture et pour la stabilisation de boues d'épuration urbaine.

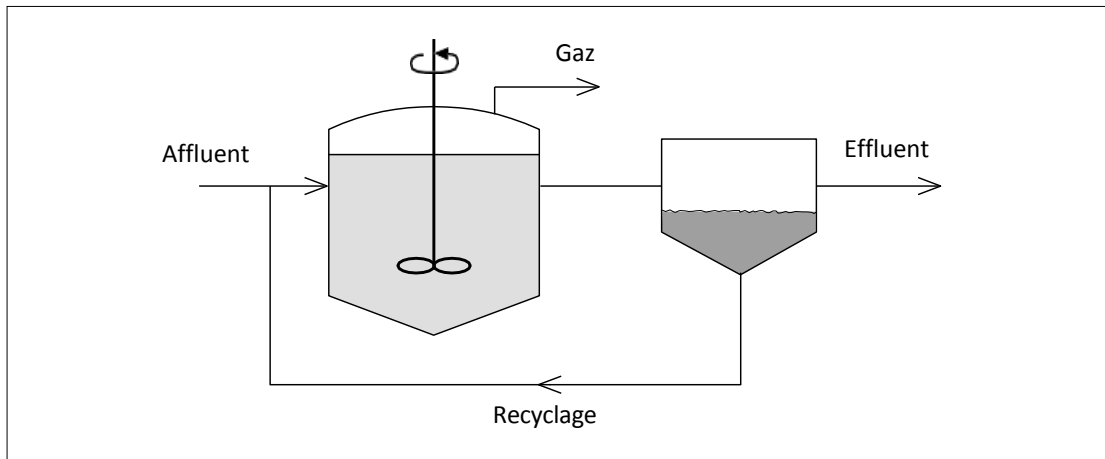
Dans ces réacteurs, des dispositifs de brassage maintiennent l'homogénéité du liquide. De ce fait, l'effluent digéré présente la même concentration en microorganismes que dans le digesteur. Par voie de conséquence, le nombre de bactéries perdues par entraînement dans l'effluent augmente avec des taux de charge hydraulique élevés.



La mise en œuvre de système infiniment mélangé ne convient pas pour des effluents à forte concentration de matière organique soluble ou contenant des substrats rapidement dégradables.

### 3.1.2. Contact anaérobie

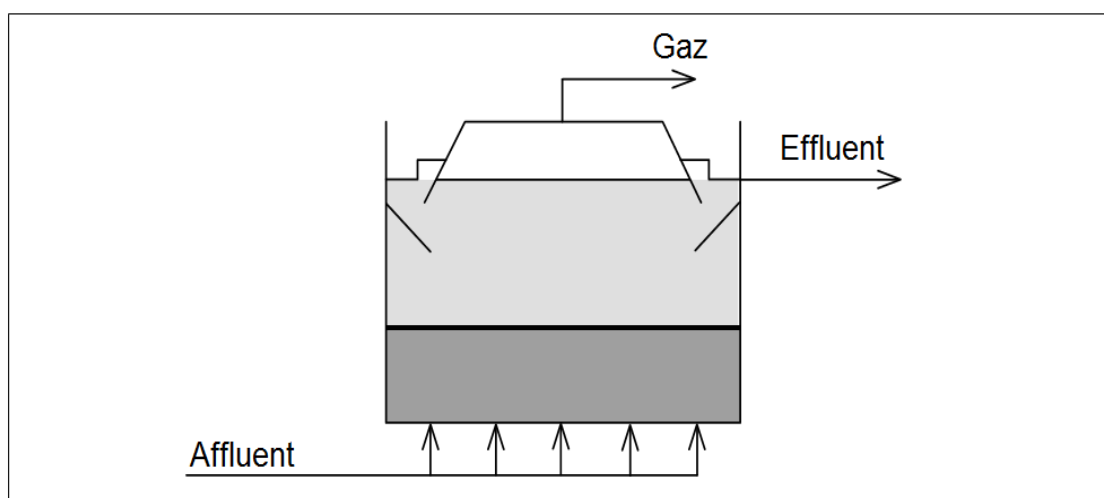
3.1.3. Directement dérivé des procédés de traitement aérobie, le système contact consiste en un digesteur infiniment mélangé suivi d'un décanteur dans lequel la matière organique active de l'effluent est décantée avant d'être recyclée dans le digesteur. De tels digesteurs présentent en pratique des performances deux fois supérieures à celles d'un simple digesteur infiniment mélangé. Le fait que la décantation externe ne soit pas la mieux adaptée pour des substrats anaérobies a conduit au développement de digesteurs avec décanteur intégré.



Ce système permet de maintenir une concentration élevée en boues même pour des effluents dont la charge organique est sous forme dis- soute.

#### 3.1.4. Lit de boues anaérobies

Les deux systèmes précédents sont basés sur le brassage du contenu du digesteur. On a observé que des granules très denses de biomasse anaérobie active peuvent se former en l'absence de brassage. Ce constat a été à l'origine du développement de la technologie du lit de boue anaérobie à flux ascendant ou **UASB** (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). L'affluent est introduit à la base du digesteur et traverse un lit de boues granuleuses. La vitesse du flux ascensionnel doit être relativement faible (0,5 à 1,0 m/h) pour assurer une bonne homogénéité du lit de boues et par conséquent un contact optimum entre l'effluent à traiter et la biomasse active. Ces granules de boues, de 2 à 5 mm de diamètre, se forment plus ou moins rapidement selon la nature du substrat (plus facilement avec des effluents sucrés ou riches en acide gras volatils).





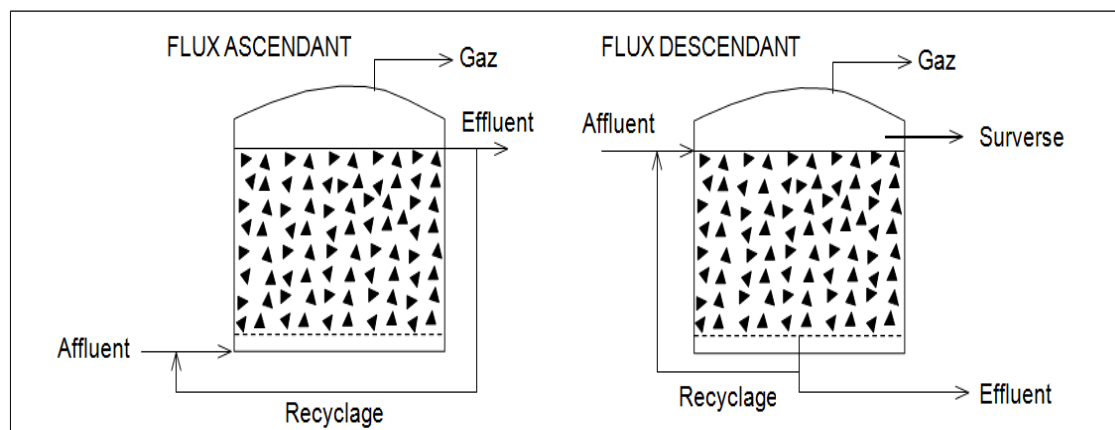
Le biogaz produit est collecté en partie supérieure du digesteur. Un dispositif de décantation de l'effluent traité est également présent au sommet du réacteur; il permet de prévenir l'exportation de granules flottants.

Ce système est capable de traiter des effluents riches en matières organiques solubles mais contenant peu de matières en suspension.

### 3.1.5. Filtre anaérobie

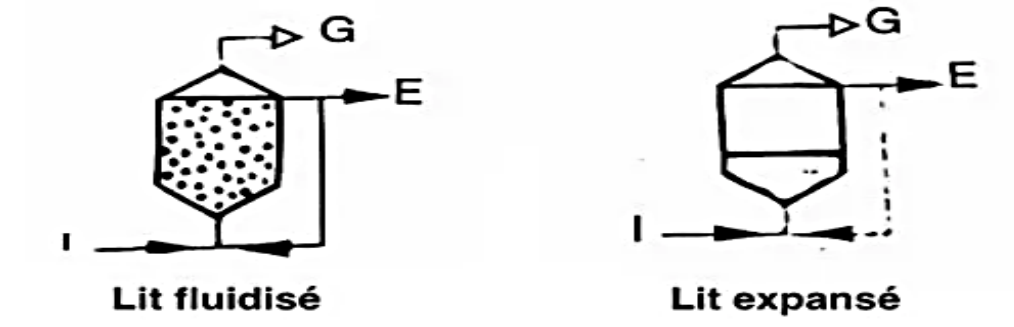
Ce système repose sur l'adhérence d'un film biologique constitué de microorganismes anaérobies sur un support inerte. Ce dernier est constitué d'une structure statique. De tels digesteurs sont alimentés de bas en haut, on parle alors de flux ascendant, ou de haut en bas, et on parle alors de flux descendant. Le support inerte peut être constitué par des matériaux granulaires ou des matrices modulaires en plastique, charbon, pierre, etc.

Ce type de digesteur est adapté au traitement d'effluents à charge organique essentiellement dissoute et donc pauvres en matières en suspension pouvant occasionner des colmatages du filtre.



### 3.1.6. Lit fluidisé ou expansé

Ce système met en œuvre la fixation de biomasse active sur des particules de petite taille de matériau inerte (sable de silice, par exemple) afin de constituer des granules. Ces granules sont maintenus en suspension dans un courant de liquide ascendant constitué par l'injection de l'effluent à traiter, par le recyclage d'une partie de l'effluent ou encore par la recirculation du gaz. L'expansion de boue s'accroît avec l'augmentation de la vitesse ascensionnelle du liquide jusqu'à ce que chaque granule puisse être considéré comme indépendant des interactions de ses voisins. Au-dessous de cette limite, le lit est qualifié d'expansé et au-dessus, il est dit fluidisé. Pratiquement, les vitesses ascensionnelles sont comprises entre 20 et 30 m/h pour les lits fluidisés et entre 5 et 8 m/h pour les lits expansés.



Ce type de digesteur convient pour le traitement d'effluents ne contenant que des substances solubles ou des matières en suspension facilement dégradables. Le développement de cette technique a rencontré d'importantes difficultés quant à la maîtrise des problèmes hydrauliques de fluidisation sur une section du réacteur en liaison avec la production de biogaz.

### 3.2. Procédés de digestion de déchets

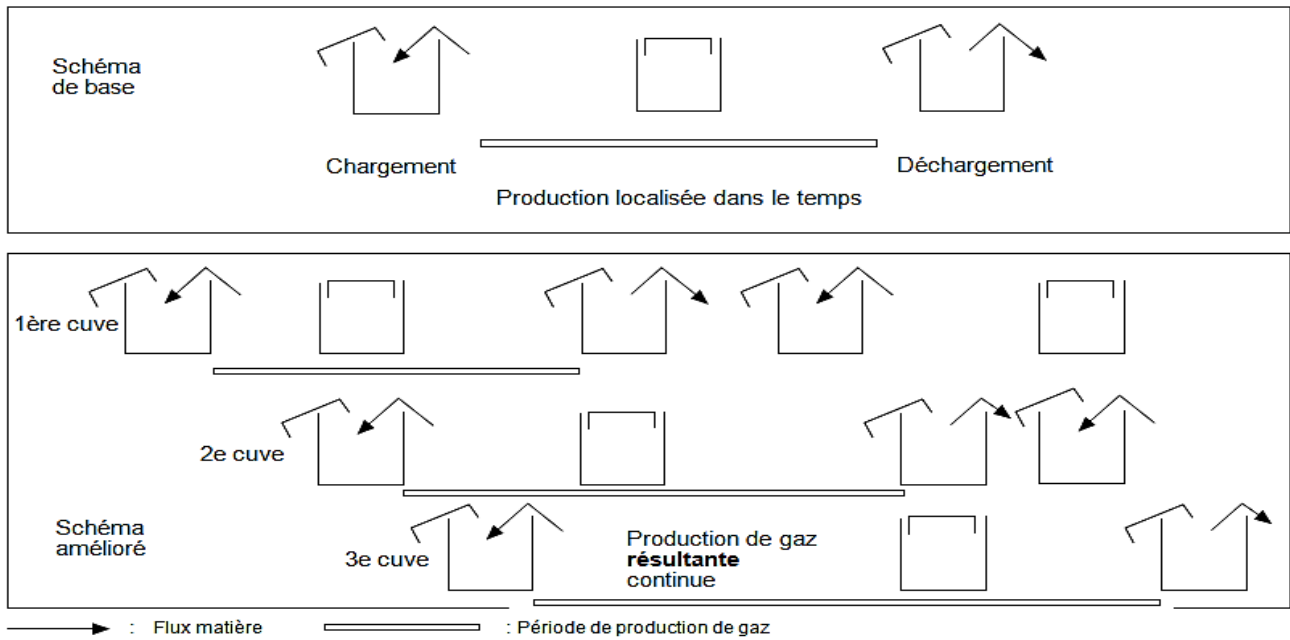
Les techniques de digestion utilisées pour le traitement des déchets solides se distinguent en fonction du fait que les diverses phases de la biométhanisation se déroulent dans un [système monoétape] ou deux [système biétape] réacteurs.

On peut aussi classer les systèmes de digesteurs en fonction du mode d'alimentation et des caractéristiques du substrat solide. Trois catégories sont alors à considérer :

- Les systèmes discontinus en phase sèche;
- Les systèmes continus en phase sèche;
- Les systèmes continus en phase humide.

#### 3.2.1. Systèmes discontinus en phase sèche

Chaque réacteur est complètement rempli de substrat à digérer, en une seule opération. Une fois l'anaérobiose réalisée, la production gazeuse évolue dans le temps de telle sorte que pour garantir un débit régulier de biogaz il faut disposer de plusieurs réacteurs en batterie, remplis et vidés à intervalles réguliers. Le schéma suivant décrit la procédure d'exploitation de tels systèmes. Ces systèmes fonctionnent à température thermophile ou mésophile. Dans ce dernier cas, ils sont complétés par un post-traitement d'hygiénisation du substrat digéré (compostage, séchage thermique).



Tous les procédés industriels de cette catégorie sont dotés d'une recirculation continue ou séquentielle d'eau de procédé, qui permet d'inoculer le contenu des réacteurs en début de digestion et de prévenir les inhibitions dues à l'accumulation d'acides.

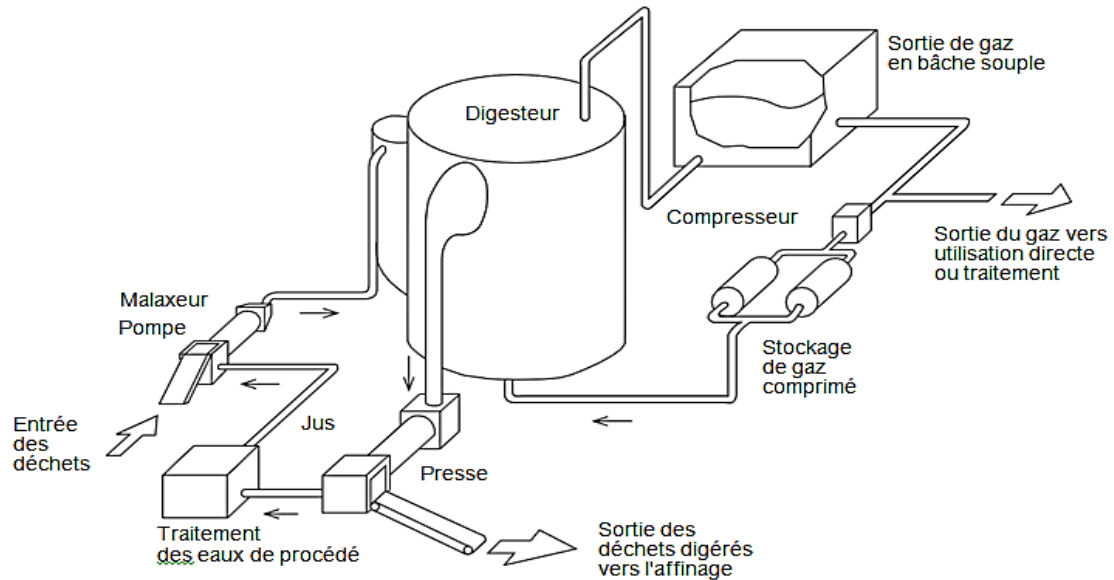
Ces systèmes discontinus peuvent également fonctionner en biétape. L'étape d'hydrolyse et d'acidification se déroule alors dans des réacteurs discontinus. L'eau de procédé, quant à elle, subit une étape de méthanisation dans un réacteur à haut rendement (UASB, filtre anaérobie, par exemple).

#### Systèmes continus en phase sèche

Les procédés classés dans cette catégorie sont des «digesteurs-pistons» disposés en cuves verticales ou horizontales et fonctionnant à des températures thermophiles ou mésophiles. Les déchets frais sont introduits à une extrémité du réacteur et évacués à l'autre extrémité. Le brassage du substrat dans le digesteur est effectué par un équipement mécanique ou par injection de biogaz comprimé.

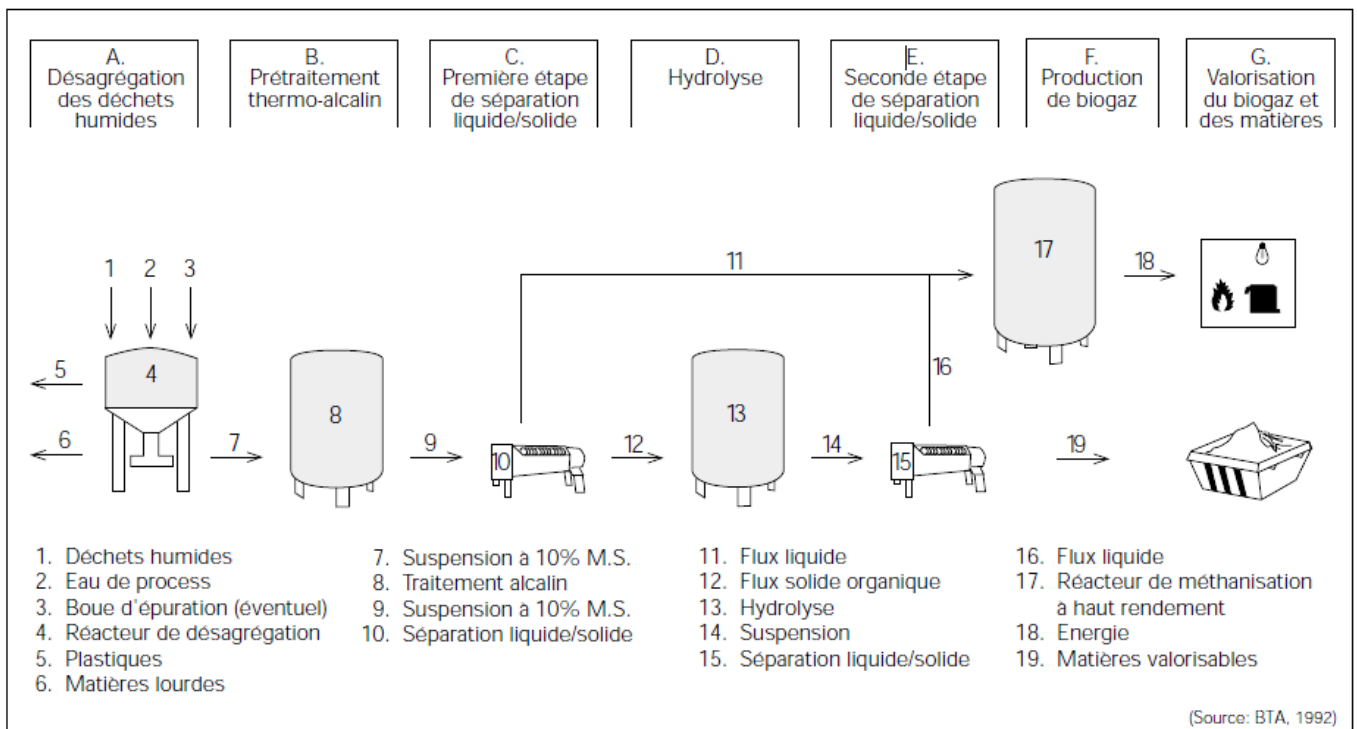
Eventuellement, le digesteur ne comporte pas de brassage interne au digesteur, mais un circuit de recirculation et d'inoculation du substrat frais.

Le schéma suivant présente le fonctionnement d'un procédé mésophile avec brassage par injection de gaz sous pression. Préalablement à leur introduction, les déchets sont broyés et mélangés avec une partie du liquide issu du pressage des déchets digérés; ils atteignent alors et dans le digesteur une teneur en matières sèches de 25-35 %. Après pressage du substrat sortant du digesteur, la teneur en matières sèches est de l'ordre de 55-65 %, et le matériau subit une stabilisation aérobie (affinage).



### 3.2.2. Systèmes continus en phase humide

Un seul procédé développé en taille industrielle illustre cette catégorie. Il comporte six étapes de traitement. Les déchets organiques (jusqu'à 35 % de matières sèches) sont introduits dans un réacteur de désagrégation ou pulpeur où ils sont broyés par les forces cisaillantes d'un puissant équipement de brassage, ceci sous adjonction d'eau de procédé. La boue qui est ainsi produite a une teneur en matières sèches d'environ 10%. Cette étape permet également d'éliminer des plastiques et des corps lourds et grossiers qui sont indésirables.



Un prétraitement thermique et alcalin des matières ligno-cellulosiques a lieu dans un réacteur approprié. A la suite de cette étape, les flux liquide et solide sont séparés. Le flux liquide est conduit par pompage dans le réacteur de méthanisation, alors que le flux solide est pompé avec un complément en eau dans le réacteur d'hydrolyse. Le substrat y séjourne de 2 à 4 jours et y est mélangé au moyen d'un brasseur. Après cela intervient une nouvelle séparation liquide-solide. Le flux liquide est dirigé vers le digesteur pendant que le flux solide est soumis à un traitement aérobie destiné à la préparation du compost.

### 3.3. Systèmes de codigestion

On parle de codigestion lorsque des boues liquides sont traitées dans des systèmes de digestion de déchets ou, à l'inverse, lorsque des déchets sont traités dans des digesteurs de boues d'épuration. Le schéma suivant illustre le fonctionnement de l'un de ces procédés.

