

1. Paramètres de dimensionnement

Le fonctionnement d'un digesteur peut être optimisé en fonction de deux objectifs principale,

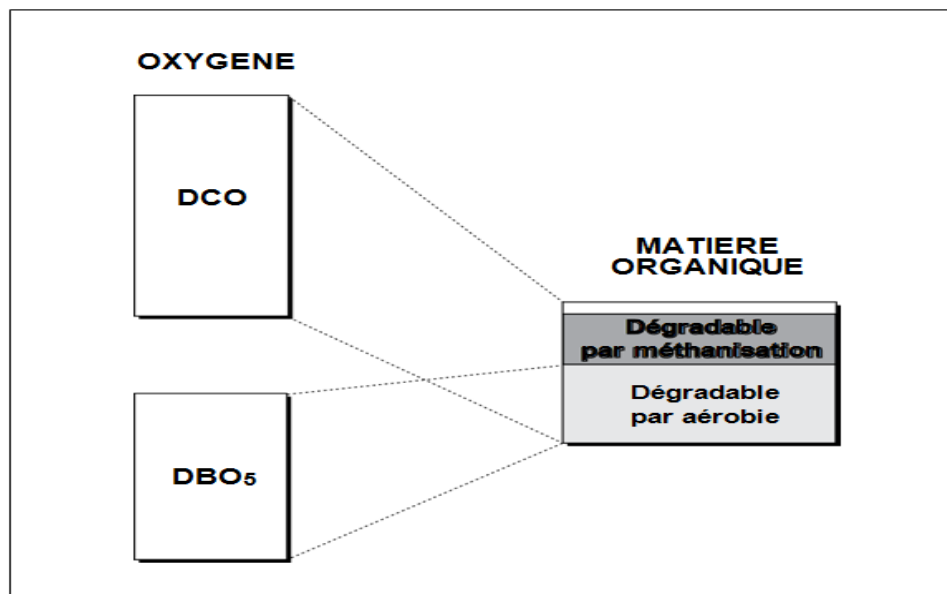
- en vue d'assurer la dégradation la plus complète possible des composés organiques du flux de substrat,
- et afin d'obtenir la plus forte production gazeuse possible

Pour une installation industrielle, la dégradation des composés organiques constitue le plus souvent le facteur déterminant dans le processus de digestion. Par ailleurs, d'autres paramètres peuvent influencer la production du biogaz et doivent être prises en considération ce sont les paramètres de dimensionnement.

1.1. Mesure de la pollution ou de la charge à traiter

La quantité de matière polluante dans les effluents ou la charge organique des déchets entrant dans le réacteur de méthanisation se mesure respectivement en **kg de DCO** ou en **kg de MV**.

La **DBO** (DBO_5), communément utilisée pour le dimensionnement des systèmes aérobies (boues activées, ...) elle a dans le cas de la méthanisation une valeur indicative puisqu'elle est représentative de la matière organique biodégradable dans des conditions aérobies (voir figure).



Dans les conditions anaérobies propres à la méthanisation, les métabolismes des microorganismes impliqués sont fondamentalement différents. Certains composés dégradables par voie aérobie ne le sont pas en anaérobie (composés ligno-cellulosiques par exemple). A l'inverse, de nombreux composés difficilement dégradables par voie aérobie peuvent être décomposés en anaérobie.

La DCO et la MV sont représentatifs de la quasi-totalité de la matière organique présente dans l'effluent à traiter et constituent ainsi de bons indicateurs de la pollution ou de la charge à traiter.

1.2. La charge spécifique

Le paramètre principal de dimensionnement est la charge spécifique en DCO ou en MV; il s'exprime de la manière suivante:

kg DCO / m³ · jour ou kg MV / m³ · jour.

Pour une certaine charge à traiter, en kg DCO/jour ou en kg MV/jour, le choix d'une charge donnée implique immédiatement un volume de réacteur. La charge admissible dépend principalement de la conception technique du digesteur et, dans une moindre mesure, du substrat et de sa biodégradabilité. Grossièrement, Le rendement journalier d'un système de digestion dépend surtout des conditions biologiques :

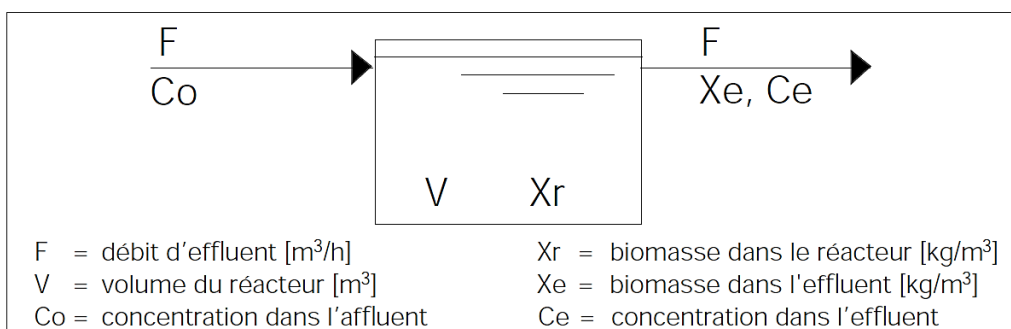
- type de substrat (température, pH, alcalinité, etc.);
- qualité de la matière organique à dégrader (inhibiteurs, ...);
- activité de la biomasse.

Le tableau suivant donne quelques valeurs représentatives de charges pour les différents types de digesteurs :

Infiniment mélangé Contact anaérobie	2	kg DCO/m ³ · jour	kg	volume relatif : 20
Lit de boues anaérobies Filtre anaérobie	5	DCO/m ³ · jour	kg	volume relatif : 8
Lit fluidisé ou expansé	10	DCO/m ³ · jour	kg	volume relatif : 4
Déchets solides sans recirculation du substrat	10	DCO/m ³ · jour		volume relatif : 4
Déchets solides avec recirculation du substrat	40	kg DCO/m ³ · jour		volume relatif : 1
Déchets solides sans recirculation du substrat	8 – 13	kg MV/m ³ · jour		
Déchets solides avec recirculation du substrat	18 – 30	kg MV/m ³ · jour		

1.3. Temps de rétention

Le **temps de rétention** est le temps de séjour moyen des substrats dans le digesteur. Il est généralement de l'ordre de 30 jours.



On peut distinguer deux types de temps de rétention :

- **Temps de rétention hydraulique (TRH):** $TRH = \frac{V}{F} / \text{[jours]}$

- **Temps de rétention de la biomasse (TRB) :**
$$TRB = \frac{V \cdot X_r}{F \cdot X_e}$$

1.4. Traitement des matières en suspension (MES)

- **MES organiques**

En pratique, on ne rencontre pas simplement des déchets solides ou des effluents dissous. En règle générale, il s'agit toujours de substrats intermédiaires, c'est-à-dire des eaux usées contenant une plus ou moins grande proportion de matières solides organiques. Dans des cas particuliers, il faudra déterminer si l'on veut fixer le temps de séjour en fonction de la durée de l'hydrolyse (réacteurs infiniment mélangé ou contact), ou si l'on préfère séparer au préalable les matières solides pour les soumettre à une étape d'hydrolyse séparée (système biétape).

Si, dans le digesteur, l'afflux de matières solides est supérieur à la capacité de dégradation par hydrolyse, les matières solides vont alors s'accumuler dans le réacteur, gênant l'activité de la biomasse et conduisant à une obstruction rapide du digesteur.

- **MES minérales**

Les MES minérales devront autant que possible être séparées lors du prétraitement. Des équipements de tamisage, dessablage pour les liquides, ainsi que de tri mécanique pour les déchets solides permettent cette séparation avec de bons rendements.

Les réacteurs de type contact anaérobie acceptent des matières minérales pour autant que le brassage du digesteur évite leur décantation en fond de réacteur. On court néanmoins le risque de séparer préférentiellement les matières minérales dans le clarificateur, en lieu et place des matières organiques, ce qui conduit à un remplacement progressif de la biomasse active par de la matière inerte. L'accumulation de chaux dans les digesteurs de sucrerie est un cas typique.

Les réacteurs à biomasse fixée (lits de boues, filtres) supportent relativement mal les matières minérales ou inertes, qui s'accumulent dans le volume réactionnel et finissent par le colmater.

De plus, la matière minérale ou inerte n'est pas obligatoirement apportée par l'effluent à traiter, mais peut être créée par précipitation dans le réacteur. Il convient de se méfier des eaux contenant de fortes concentrations en carbonates notamment. Des exemples sont connus de filtres anaérobies à garnissages colmatés par la précipitation du carbonate après deux à trois ans de fonctionnement sur des eaux de laiterie.

1.5. Rendement gazeux

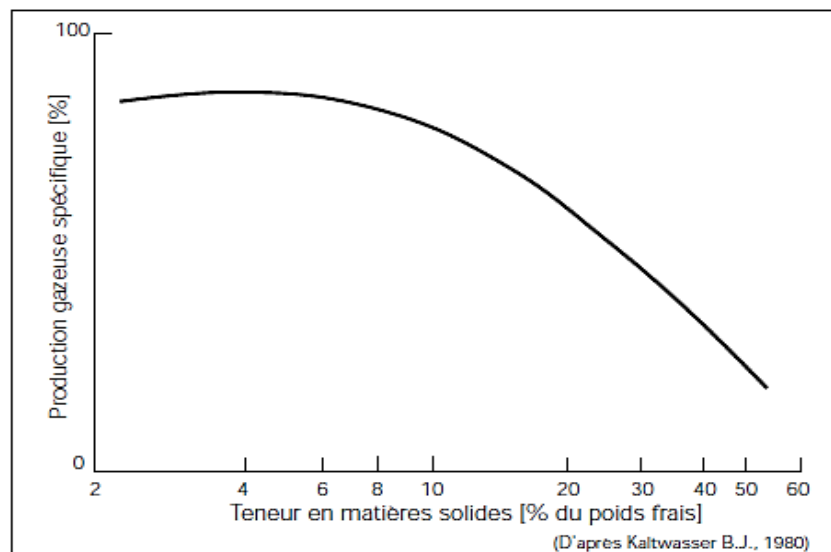
La production de biogaz dépend pour l'essentiel de trois facteurs qui sont: la composition du substrat, la température de digestion et le temps de séjour.

- **Composition du substrat**

Comme on l'a déjà mentionné, toutes les substances ne présentent pas la même vitesse ni le même taux de dégradation. Ce dernier définit le rendement gazeux, c'est-à-dire la quantité de gaz produite par unité de substance organique ajoutée ($[m^3/kg \text{ DCO}]$, respectivement $[m^3/kg \text{ MV}]$).

Plus un substrat est facilement et complètement dégradable, plus il formera de gaz dans un temps donné. En outre, le rendement gazeux est influencé par la présence de substances inhibitrices. Les sels peuvent notamment réduire le rendement gazeux. La teneur en matière sèche joue également un certain rôle. Au-dessus d'environ 9-12% MS, le rendement gazeux commence à fléchir; au-delà de 35-40% MS, le processus de dégradation est pratiquement paralysé, car la teneur en eau critique pour la croissance bactérienne est alors dépassée. D'un point de vue énergétique, on ne s'intéresse en fait qu'à la production de méthane, et on définit alors le rendement en méthane ($[m^3/kg \text{ DCO}]$, respectivement $[m^3/kg \text{ MV}]$). La proportion de méthane dans le biogaz est également dépendante de la composition du substrat. De fait, la composition du biogaz dépend de l'étape d'oxydation moyenne.

La figure suivante illustre l'influence de la teneur en matières solides sur la production gazeuse.

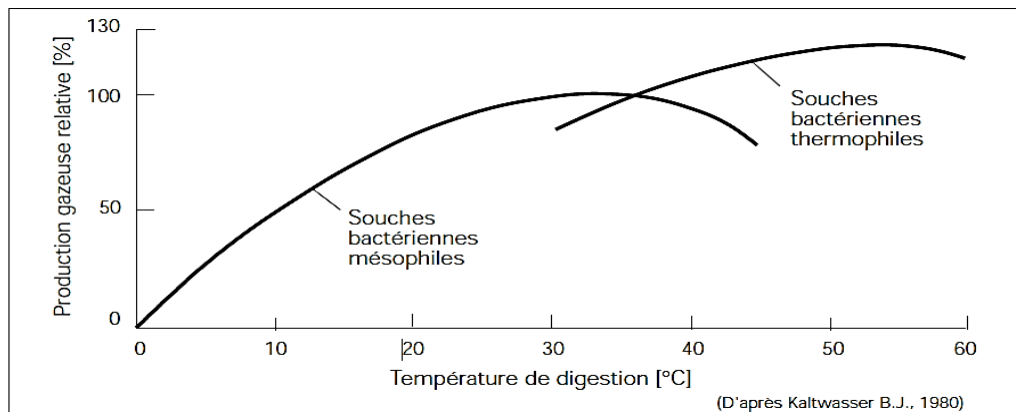


➤ Température de digestion

Le rendement gazeux s'accroît également lorsque la température augmente, si bien qu'on peut clairement distinguer le régime mésophile

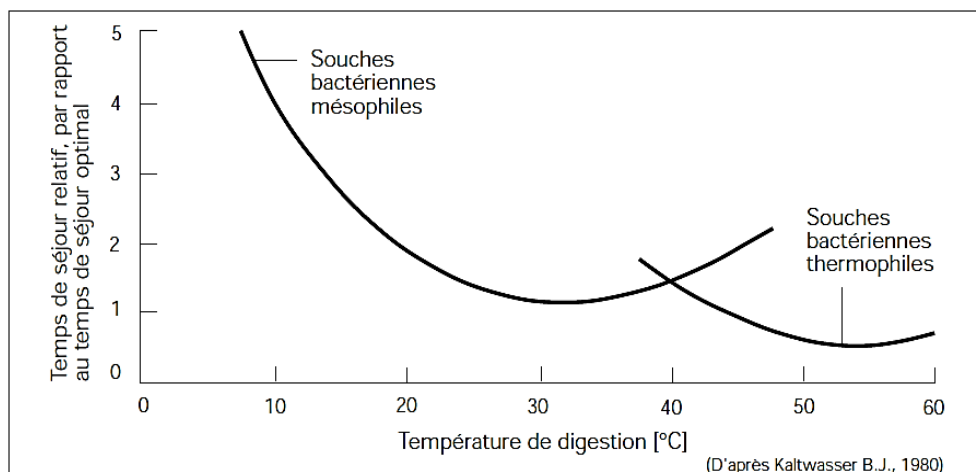
(25-45° C) du régime thermophile (50-65° C). Une augmentation de la température provoque dans tous les cas un accroissement du rendement gazeux et de la production brute de gaz. Dans les plages supérieures de température, les besoins en énergie de réchauffage augmentent plus rapidement que la production de gaz, si bien que la production énergétique nette tend à décroître.

La figure suivante illustre l'influence de la température sur la quantité de gaz récupérable, en référence aux températures optimales.



➤ Temps de séjour

Des temps de séjour croissants conduisent aussi à des augmentations du rendement gazeux. Comme on l'a vu précédemment, le temps de séjour n'est que rarement optimisé sur des réacteurs à haute performance dans le but d'améliorer la production gazeuse, mais bien plutôt en fonction du rendement de dégradation. La production gazeuse joue un rôle plus important dans la méthanisation des déchets solides, où les temps de séjour sont de toute façon plus longs. Pour illustrer l'interdépendance des facteurs déterminant la production de gaz, la figure suivante présente l'influence de la température sur le temps de séjour optimal.



2. Technologie des digesteurs

2.1. Construction de la cuverie

Pour des raisons économiques, la plupart des digesteurs industriels sont maintenant constitués de réservoirs préfabriqués en acier. Le matériau utilisé est essentiellement l'acier inox 1.4435, dans

des épaisseurs de l'ordre de 5 mm, les pressions de service étant comprises entre -10 et +30 mbars. Ces digesteurs préfabriqués présentent des capacités de l'ordre de 100-500 m³.

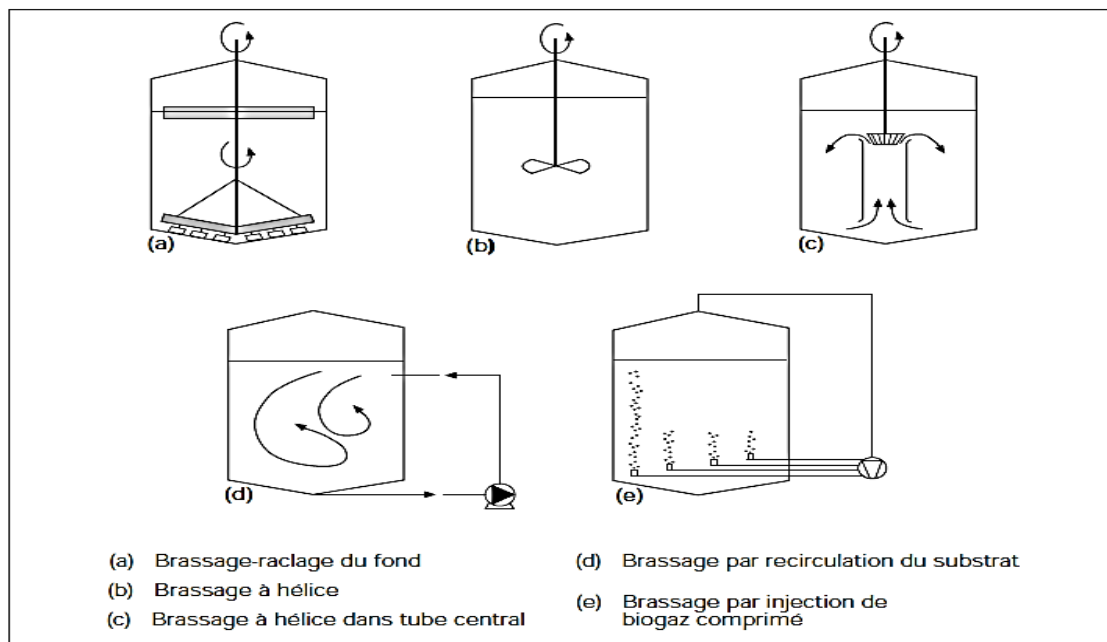
2.2. Isolation thermique

L'isolation thermique du digesteur est réalisée au moyen de plaques de fibres minérales protégées par un bardage métallique, par de la mousse de polyuréthane projetée sur l'extérieur des parois du digesteur, ou par tout autre matériau d'isolation résistant à l'humidité (sauf si le réacteur est disposé dans un bâtiment).

2.3. Brassage

Le mélange du substrat à l'intérieur du digesteur peut être réalisé par l'un ou l'autre des systèmes présentés schématiquement ci-dessous.

Pour l'essentiel, ces dispositifs reposent sur un brassage mécanique, sur la recirculation du substrat ou sur un brassage hydraulique au biogaz:



2.4. Alimentation et sortie

L'alimentation et l'extraction du substrat nécessitent des systèmes fiables et d'entretien facile.

L'alimentation d'un digesteur de type UASB est ainsi réalisée par un système sophistiqué de tuyauterie recouvrant l'ensemble du fond du digesteur.

Il en résulte une distribution uniforme de l'effluent à traiter, ceci grâce à la multiplication des points d'injection. L'homogénéité du système d'alimentation est garantie par la définition de la perte de charge dans les orifices d'injection; un diamètre minimal d'ouverture doit cependant être assuré pour prévenir le risque de colmatage. Dans un réacteur UASB, l'effluent digéré est déversé à une hauteur importante (4,5 m) par rapport au réseau d'alimentation; il peut donc être évacué par gravité, ce qui simplifie passablement le circuit hydraulique.

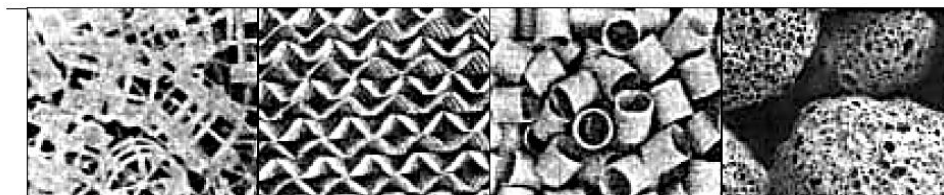
Les digesteurs de type filtre anaérobie à flux descendant sont équipés d'un système de distribution de l'eau usée qui assure une distribution uniforme sur toute la section droite du réacteur. L'effluent traité sort du digesteur au travers d'un déversoir et d'un joint hydraulique destiné à éviter des fuites de biogaz.

Les systèmes de digestion de déchets solides en phase sèche relèvent d'un fonctionnement à effet piston. Certains de ces digesteurs sont dotés de parois intérieures destinées à éviter le départ immédiat du substrat fraîchement introduit. Selon les techniques, l'alimentation et l'extraction du substrat se font par des dispositifs mécaniques (pompe à succion et vis d'extraction) ou hydrauliques (mise en pression et dépression du digesteur au moyen de biogaz).

2.5. Rétention de la biomasse

Dans les réacteurs à lit de boue de type UASB, la rétention se fait par la sédimentation. La granulation de la base est réalisée sans matériau de support. Les granules sont donc des agglomérations de boues, qui se forment sous certaines conditions. La granulation de la boue permet d'obtenir des vitesses de sédimentation élevées.

Les digesteurs équipés de garnissages intérieurs mettent en œuvre des supports plastiques, métalliques (treillis, minéraux, sable, Lenca) ou synthétiques (mousse de polyuréthane, anneaux de polyamide, fibres de polyester), dont quelques exemples figurent ci-après:



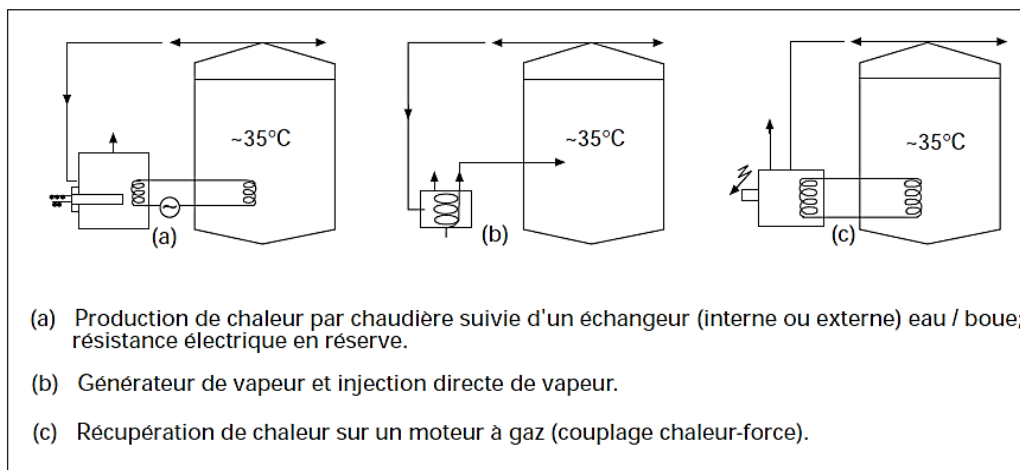
Type	HIFLOW	PLASDEK	FLOCOR	SIRAN
a [m ² / m ³]	65	148	150	30 000
ε [%]	96,5	96	97	70

a : surface spécifique
 ε : volume de vide

2.6. Chauffage et régulation de la température

La plupart des digesteurs d'eaux usées sont maintenus en température (30-40° / 50-60°) par circulation d'eau chaude sur un échangeur de chaleur eau-boue, externe ou interne au digesteur. L'eau chaude est produite par chaudière ou récupération de l'énergie thermique de moteurs ou de couplages chaleur-force fonctionnant au biogaz. Certains systèmes utilisent une injection directe de vapeur, ce qui présente l'avantage d'un transfert direct de la chaleur et évite de recourir à un échangeur.

Le bilan énergétique est un élément important lors du choix du système et de la détermination des conditions opératoires. Certains réacteurs infiniment mélangés peuvent consommer 50% et plus de l'énergie produite, si l'isolation n'est pas optimale ou si l'on y traite des effluents à forte teneur en eau.



Une analyse énergétique complète est nécessaire de cas en cas, mais le réchauffage du substrat reste le facteur le plus déterminant. Le tableau suivant donne le résultat d'un tel bilan pour des conditions de fonctionnement données à titre d'exemple.

Besoins énergétiques d'un digesteur conventionnel	
(infiniment mélangé, mésophile, charge polluante: 1,6 kg DCO/m ³ · j, teneur en MS: 5%, température de l'effluent: + 15°C, température ambiante: air -8°C min., sol: + 3°C min)	
Composante	Consommation, en % de l'énergie produite
Réchauffage effluent	11 – 15
Pertes de chaleur	7 – 9
Brassage et pompage	2 – 3
Equipements divers	2 – 3
Total	22 – 30
(D'après Chynoweth D.P., 1991)	

2.7. Circuit de soutirage du biogaz

Indépendamment du réseau acheminant le biogaz produit vers son stockage et sa valorisation, divers équipements de contrôle et de sécurité sont directement liés au digesteur. Il s'agit notamment :

- du pot de séparation de l'eau de condensation, avec dans certains systèmes un dispositif pour combattre la formation de mousse;
- du dispositif permettant d'éviter la mise en dépression du digesteur, ou «casse-vide»;
- d'un dispositif contre la surpression assurant l'évacuation du biogaz en cas de non-utilisation.

La collecte s'opère dans le dôme du digesteur ou, dans les systèmes de type UASB, dans des séparateurs standardisés en tête du réacteur. En règle générale, plus de 90% de la production théorique est récupéré. Les pertes sont principalement dues à la solubilité du gaz dans l'effluent, sous certaines conditions de pression et de température.

3. Traitements périphériques

Une fraction non négligeable des déchets organiques énergétiques peut s'avérer réfractaire à la digestion anaérobie. Des procédés de prétraitement physiques, chimiques ou biologiques seront d'une importance primordiale en vue d'assurer l'efficacité des traitements par méthanisation.

De même, les produits issus du digesteur doivent être conditionnés de façon à en garantir la valorisation et à en réduire les éventuelles nuisances.

3.1. En amont de la méthanisation

3.1.1. Effluents

Les eaux résiduaires industrielles en sortie d'usine sont très souvent constituées par un mélange d'eaux usées provenant de différentes étapes du processus de fabrication. La qualité (concentration en DCO notamment) peut être très variable d'un effluent à l'autre, et nécessiter un traitement spécifique.

Le prétraitement des effluents à l'amont du digesteur comporte les étapes suivantes:

Séparation

Les matières solides minérales pouvant s'accumuler dans les digesteurs doivent être séparées par décantation, dégrillage ou tamisage (tamis rotatif).

Dans les réacteurs de type UASB, les matières en suspension doivent être éliminées, car les temps de séjour dans ces réacteurs (de l'ordre de quelques heures) ne permettent pas la dégradation de la DCO particulaire.

La présence de ces matières est également susceptible de provoquer la désagrégation des granules et la dilution du lit de biomasse.

Pour les digesteurs mettant en œuvre des systèmes de rétention de la biomasse, l'accumulation de graisses peut occasionner d'importants risques de colmatages.

Lorsque ces graisses se présentent sous forme d'amas épais (eaux usées d'abattoirs par exemple), des systèmes de dégrillage équipés de dispositifs anticolmatage (lavage à l'eau chaude) seront utilisés. Sur des eaux contenant des graisses sous forme plus dispersées, des équipements classiquement employés en traitement des eaux peuvent être mis en œuvre, dès 200 mg/l de graisse.

Stockage tampon

Afin d'alimenter le digesteur avec un débit constant sur 24 heures, un volume tampon doit être prévu de façon à absorber et à régulariser les pointes de débits d'eaux usées.

Ce stockage sert également à corriger et à homogénéiser la température de l'effluent afin de l'amener aux conditions optimales de température du digesteur. Ceci peut se faire par échange de chaleur entre l'effluent et l'affluent du digesteur, par échange eau/affluent (l'eau étant réchauffée grâce au biogaz produit), ou encore par injection directe de vapeur. Des installations exploitées à une température sous-optimale (20-25°) peuvent fonctionner à une charge volumique réduite.

Adjonction-corrrection

L'adjonction de nutriments est parfois nécessaire pour maintenir ou réaliser un équilibre nutritionnel adapté à la croissance de la biomasse. A cause de la production réduite de boue en excès dans les procédés anaérobies, le besoin en éléments nutritifs est nettement moins important que dans un système aérobie de capacité comparable. Les éléments les plus souvent employés sont N, P, S, Fe, Ni et Co.

La valeur optimale de pH pour la méthanisation se situe entre 6,5 et 7,5.

Les effluents industriels et notamment agro-alimentaires peuvent requérir une correction de pH. En effet, certains effluents incluent des eaux acides ou basiques (provenant par exemple de lavages de cuves avec des détergents alcalins). La plage de pH de ces effluents agroindustriels se situe entre 3 et 12. La correction de pH s'effectue au moyen de réactifs acides ou basiques; la possibilité de corriger le pH doit toujours demeurer réalisable, bien qu'elle ne soit, la plupart du temps, pas nécessaire.

3.1.2. Déchets solides

Les critères de qualité auxquels sont soumis les composts sont tels que le produit final issu de la méthanisation comme du compostage doit pour ainsi dire être exempt de polluants. Pour ce faire, seule la séparation à la source des déchets fermentescibles et leur collecte sélective constituent le moyen de parvenir à cette exigence de qualité. Un tri manuel sur une bande transporteuse défilant à faible vitesse, intervenant après la réception et avant le broyage des déchets permet encore d'écarter les éléments indésirables qui pourraient malgré tout se trouver dans ces déchets. Un système de tri hydraulique, par décantation et flottation, repris de la technologie papetière, permet dans l'un des procédés industriels de digestion actuellement opérationnels, de mettre en suspension des déchets organiques dans une cuve alimentée par charge, et équipée en son centre d'un puissant mélangeur-déchiporteur. A la fin de la séquence de brassage, les matières flottantes (plastiques) sont récupérées au moyen d'un peigne immergé et évacuées. Les inertes (pierres, verres, piles, objets métalliques, etc.) qui décantent en fond de cuve, sont extraits par un sas.

Le prétraitement des déchets ainsi triés, de même que des fractions organiques collectées sélectivement, se poursuit en vue de réduire la granulométrie des éléments fermentescibles et de les homogénéiser; il s'agit de la fragmentation.

La fragmentation regroupe tous les équipements qui concassent, broient, dilacèrent et déchiportent les déchets.

3.1.3. Autres prétraitements

Diverses techniques ont été élaborées afin de régler les difficultés liées à la digestion de certains substrats cellulotiques. La plupart de ces procédés visent à obtenir la saccharification de ces substrats. Ils sont résumés dans le tableau suivant (d'après Tsao G.T., 1987).

Effets escomptés				
Procédé	Lignine	Cellulose	Taux d'hydrolyse de la cellulose	Coûts Commentaires
Traitement alcalin	Dissolution	Gonflement	Hausse prévisible pour l'ensemble des hydrolyses acide et enzymatique	Extraction préalable d'hémicellulose souhaitable sinon coûts en alcalis
Traitement au bioxyde de soufre	Dissolution	Effet limité	Hausse prévisible pour l'hydrolyse enzymatique	Pas souhaitable en méthanisation et en traitement aérobie
Délicnification aux solvants	Dissolution	Aucun effet	Hausse prévisible pour l'hydrolyse enzymatique	Potentiel en sous-produits ligneux
Explosion à la vapeur	Rupture	Effet limité	Hausse prévisible pour l'hydrolyse enzymatique	Coût de la vapeur; perte d'hémicellulose; sous-produits ligneux potentiels
Délicnification biologique	Biodégradation	Aucun effet	Hausse prévisible pour l'hydrolyse enzymatique	Trop lent
Explosion par congélation - NH ₃ liquide	Rupture	Délicristallisation possible	Hausse prévisible	Coût en NH ₃

3.2. En aval de la méthanisation

Les étapes de post-traitement pouvant intervenir à l'issue de la digestion concernent:

Pour les effluents

- post-épuración aérobie; nitrification et dénitrification;
- traitement des boues en excès;
- traitement des odeurs et de l'air vicié;

Pour les déchets solides

- hygiénisation et maturation aérobie du digestat;
- traitement des jus en excès;
- traitement des odeurs et de l'air vicié.

3.2.1. Effluents

Post-épuración aérobie; nitrification et dénitrification

- Le rejet en canalisation ou en rivière (exceptionnel en Suisse) de l'effluent digéré nécessite un traitement aérobie (boues activées) permettant de rabattre jusqu'aux niveaux prescrits par les normes les valeurs de la DCO résiduaire, qui pour l'effluent méthanisé est compris entre 300 et 1000 mg/l DCO.
- Afin de garantir une teneur minimale en O₂ ou pour corriger le potentiel d'oxydoréduction, il peut être nécessaire de réaérer l'effluent.
- La troisième phase d'épuración des effluents consiste à éliminer notamment l'azote présent sous forme organique et ammoniacale, grâce à un traitement biologique de nitrification et dénitrification.

Traitement des boues en excès

Les boues biologiques produites par la digestion anaérobie (0,10 – 0,15 kg MS/kg DCO dégradée) sont partiellement séparées et accumulées dans le réacteur sous forme de boues en excès.

La législation fédérale (Ordonnance sur les substances dangereuses, Osubst, Suisse) requiert l'hygiénisation des boues épandues sur des terres destinées à la production fourragère ou maraîchère (< 100 entérocoques/g). Cette norme peut être atteinte par un traitement thermique ou par chaulage (traitement à la chaux).

Traitement des odeurs et de l'air vicié

Les odeurs dégagées par les acides gras volatils sont relativement nauséabondes.

Leur dégagement peut être limité en observant quelques précautions aux endroits cruciaux (sortie de l'effluent, stockeur de boues). Plusieurs solutions sont envisageables selon la taille de l'installation et la sensibilité du voisinage :

- mise en dépression des zones à risque avec refoulement au travers du stockage d'eau usée (bassin tampon);
- refoulement et adsorption au travers de filtres à charbon actif;
- refoulement et absorption dans une colonne de lavage (vitesse: 1 m/s);
- refoulement au travers d'un filtre à compost (biofiltre) (surface environ 10 fois celle de la colonne de lavage, vitesse 1 m/s).

Une attention particulière doit être accordée au fait que l'air vicié peut contenir du biogaz et présenter ainsi un risque d'explosion.

3.2.2. Déchets solides

Hygiénisation et maturation aérobie du digestat

Afin de dégrader les composés ligno-cellulosiques et d'hygiéniser le digestat pour le cas où le système de digestion ne fonctionnerait pas à température thermophile, il est quasiment indispensable de soumettre le digestat à une étape de maturation aérobie. Cette étape est elle-même précédée d'une phase de déshydratation du matériau sortant du digesteur (presses à vis, centrifugeuses, etc.). Le digestat peut représenter entre 30 et 40% en poids du matériau entrant.

Traitement des jus en excès

Les jus en excès provenant de la déshydratation du digestat peuvent être:

- rejetés en canalisation en vue d'un traitement dans une STEP;
- épandus sur des surfaces agricoles;
- traités par centrifugation, floculation chimique, digestion dans un filtre anaérobie et aération intensive.

Traitement des odeurs et de l'air vicié

Les endroits particulièrement sensibles sont constitués par la fosse de réception des déchets et le local de maturation du digestat dans le cas où cette étape s'effectue en compostage par andains.

4. Mise en service, conduite et suivi

Le démarrage de la digestion peut constituer l'un des problèmes majeurs rencontrés dans l'application de cette technique. Elle correspond à la difficulté de développement de la culture de microorganismes la mieux adaptée à un substrat donné. Dès que la biomasse s'est établie sous

forme de granules, de floes, ou attachée à un support inerte sous forme de biofiltre, le fonctionnement du digesteur est en général stable. Ce problème initial est essentiellement remarquable pour la méthanisation des effluents.

Deux phénomènes méritent d'être mis en évidence pour comprendre le démarrage d'une digestion : Diverses substances contenues dans le substrat initial détermineront un potentiel redox élevé; elles devront être éliminées pour permettre la croissance des organismes anaérobies. C'est tout d'abord les organismes aérobies qui consommeront l'oxygène, puis la réduction des nitrates, du fer trivalent et des sulfates achèvera l'abaissement du potentiel redox.

Les bactéries méthanogènes peuvent être présentes dans le substrat à deux titres : soit elles s'y sont développées et y sont actives et abondantes (boues de STEP, fumier bovin), soit elles en sont absentes ou accidentellement présentes (effluents agro-alimentaire). Ainsi, au démarrage de la digestion, la flore méthanogène sera suffisamment abondante pour permettre une activité immédiate, ou elle nécessitera une période de développement ou une inoculation artificielle.

Diverses méthodes spécifiques destinées à démarrer les digesteurs anaérobies. Elles varient en fonction du système choisi et du substrat à traiter. De façon générale, elles consistent en une addition initiale d'un inoculum contenant les microorganismes nécessaires. Cette phase d'ensemencement est suivie par un début d'alimentation en substrat, à de faibles taux de charge organique afin d'assurer une stabilisation des performances du digesteur. Le taux de charge est ensuite graduellement augmenté jusqu'à atteindre le niveau prévu. Le succès de l'opération de mise en service nécessite l'utilisation d'une culture anaérobie viable contenant un large spectre de microorganismes, et le contrôle de l'alimentation progressive en substrat. Un digesteur en fonctionnement normal ne nécessite en principe pas un apport continu d'inoculum; les organismes une fois établis dans le réacteur se reproduisent et dégradent le substrat.

Les objectifs de dépollution des eaux usées, de traitement des déchets et de production de biogaz rendent nécessaire le contrôle du procédé. Les pertes économiques liées à d'éventuelles défaillances du digesteur ne peuvent être exprimées que sur la base d'une connaissance des critères de stabilité du fonctionnement de la digestion.

Les paramètres suivants sont habituellement utilisés pour juger de la stabilité et des performances du réacteur :

- Production Et Composition Du Biogaz:

Au cours d'une digestion stable avec un substrat non variable en composition, on observe une production gazeuse relativement stable, avec un contenu en méthane pouvant être facilement pronostiqué. Lorsque production et composition du biogaz sont erratiques, c'est le signe d'une instabilité, une faible teneur en méthane constituant un indicateur primaire d'une inhibition des bactéries méthanogènes.

Ces paramètres sont simples à mesurer et ils constituent l'un des meilleurs indicateurs généraux des performances du digesteur.

- Réduction Des Matières Organiques:

La charge et le rendement de réduction des matières organiques sont déterminés par la teneur en MO (matière organique), par la DCO, ou encore par la teneur en carbone dans le substrat entrant et sortant et dans le biogaz.

- pH et alcalinité :

Une déviation des niveaux optimaux de pH indique une toxicité potentielle et un incident de digestion. De bas niveaux de pH sont un symptôme de déséquilibre du digesteur. L'accroissement des concentrations en acides gras volatils s'accompagne d'une baisse du pH; à des niveaux inférieurs à pH 6,0, les conditions deviendront toxiques pour les bactéries méthanogènes. Le pH d'une digestion anaérobie est une fonction de la teneur en gaz carbonique du gaz, aussi bien que l'alcalinité.

L'alcalinité est une mesure de la capacité tampon, ou capacité de neutralisation acide, du digesteur. L'alcalinité totale est une mesure non spécifique fréquemment employée pour la détermination des teneurs en carbonate, bicarbonate et en hydroxyde d'une culture. Le maintien d'une alcalinité en bicarbonate de l'ordre de 1000 mg/l permet d'assurer la stabilité du digesteur. Dès que l'alcalinité dans le digesteur est amoindrie par une augmentation des concentrations en acides volatils, par exemple, le pH décroît dans le réacteur.

Les moyens favorisant l'augmentation de l'alcalinité et du pH sont alors nécessaires, en sachant qu'augmenter le pH sans accroître l'alcalinité peut s'avérer insuffisant pour rétablir la stabilité d'un digesteur. L'alcalinité sera augmentée en ajoutant de la chaux ou encore générée par une dégradation de protéine en ammoniac formant un tampon de bicarbonate d'ammonium.

Des considérations économiques déterminent de cas en cas les méthodes spécifiques retenues pour maintenir pH et alcalinité dans les digesteurs. Autant que possible, les conditions de fonctionnement seront à même d'éviter le recours à des additifs.

- Acides Volatils:

C'est là un paramètre critique du fonctionnement et du contrôle de la digestion anaérobie. L'acide volatil le plus important pour la formation de méthane est l'acide acétique. La concentration de ces acides volatils dans un digesteur anaérobie est déterminée par leur taux de production et leur taux d'extraction. Lorsque le premier dépasse le second, la concentration en acides volatils augmente. Dans un digesteur fonctionnant correctement, on observe un équilibre entre la quantité d'acides volatils produite et celle extraite lors de la conversion par les bactéries formatrices de méthane. Certains facteurs, qui stimulent sélectivement la production d'acides ou inhibent les bactéries méthanogènes à croissance lente, provoquent une accumulation d'acides dans le digesteur; il s'agit surtout d'augmentations rapides de la charge organique, de l'introduction de substances toxiques ou de variations extrêmes des températures de fonctionnement. Par conséquent, toute modification des conditions opératoires d'un digesteur devrait être effectuée de façon graduelle.

L'observation de la concentration en acide propionique constitue le plus souvent un bon moyen de contrôle du processus de digestion. L'augmentation de ce paramètre par rapport à la concentration en acide acétique coïncide avec l'apparition de problèmes de stabilité biologique.

- Température:

Ce facteur peut influencer la cinétique et la stabilité de la conversion, la qualité de l'effluent et le bilan énergétique du procédé.

Concernant les effets de la température sur les performances, on considère que les plus hautes températures augmentent l'efficacité de destruction des matières organiques en suspension, qu'elles améliorent l'aptitude à la déshydratation des substrats solides digérés, et qu'elles accroissent le taux d'élimination des organismes pathogènes. Les effets des hautes températures sur la qualité de l'effluent sont particulièrement sensibles pour de courts temps de rétention; lorsque ces derniers s'allongent, la différence de qualité d'effluent entre digesteurs mésophile et thermophile tend à se réduire.

Quant à la stabilité du processus, des fluctuations de température même limitées à des plages étroites peuvent affecter la stabilité des digesteurs thermophiles, notamment.

Les effets sur le bilan énergétique tiennent avant tout au fait que les digesteurs thermophiles ont des besoins en énergie thermique plus importants que les réacteurs mésophiles, pour leur réchauffage. L'importance de cette différence sur le bilan énergétique général du digesteur dépend de la concentration en matières sèches du substrat et du taux de production de méthane. Il a été démontré que la production énergétique de la digestion anaérobie présentait un bilan négatif dès que la teneur en matières sèches devenait inférieure à 2 % pour le régime mésophile, et 4 % pour le régime thermophile.