

3.3. Traitements périphériques

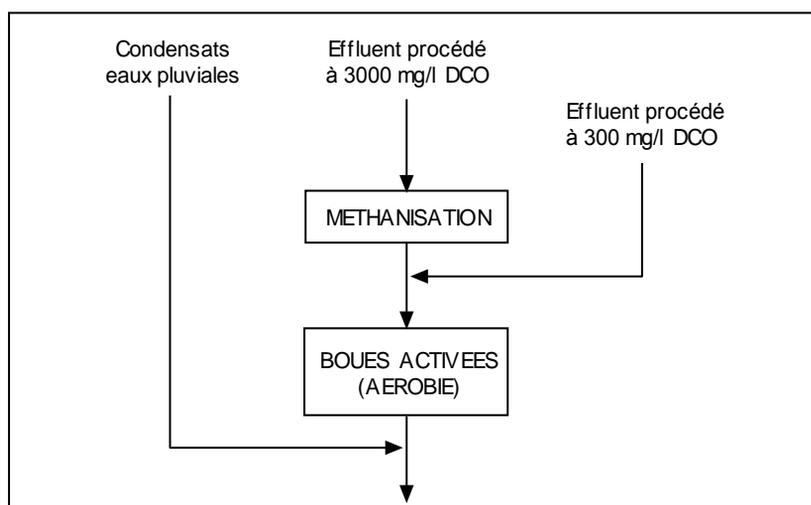
Une fraction non négligeable des déchets organiques énergétiques peut s'avérer réfractaire à la digestion anaérobie. Des procédés de prétraitement physiques, chimiques ou biologiques seront d'une importance primordiale en vue d'assurer l'efficacité des traitements par méthanisation. De même, les produits issus du digesteur doivent être conditionnés de façon à en garantir la valorisation et à en réduire les éventuelles nuisances.

a- En amont de la méthanisation

1- Effluents

Les eaux résiduelles 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 schéma suivant propose une voie de traitement techniquement et économiquement adaptée à trois types d'effluents d'un processus industriel.



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 anti-colmatage (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 agro- industriels 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.

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 déchiquettent les déchets.

Les matériels de déchiquetage sont les plus utilisés car ils réduisent les risques de pollution par des métaux lourds. Deux principaux types d'appareils entrent dans cette catégorie : la cisaille rotative et le trommel déchiqueteur. Une cisaille rotative est constituée d'une trémie d'alimentation au fond de laquelle deux arbres tournent en sens opposé l'un de l'autre et à des vitesses lentes et différentes; ces arbres sont équipés de couronnes dentées et sont entraînés par des moteurs hydrauliques. Le trommel déchiqueteur est un crible rotatif cylindrique équipé de lames à orientation centripète qui permettent de déchiqueter les déchets; il effectue simultanément un déchiquetage et un criblage des produits et il est caractérisé par une lente vitesse de rotation (de l'ordre de 5 à 7 t/min).

Quant aux équipements de broyage, le matériel le plus utilisé est le broyeur à marteaux. Il est constitué d'un capotage fixe à l'intérieur duquel tournent un ou plusieurs rotors à axe horizontal ou vertical. Sur l'axe du rotor sont fixés des disques en acier qui sont munis de marteaux disposés à leurs périphéries et tournant librement autour de leurs axes de fixation. Les produits broyés passent au travers de grilles lorsque leur granulométrie est suffisante.

Autres prétraitements

Diverses techniques ont été élaborées afin de régler les difficultés liées à la digestion de certains substrats celluloseux. 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

b- 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.

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.

Dans bien des cas, la postépuration aérobie s'opère dans une STEP d'eaux urbaines recevant les eaux digérées, pour autant que :

la STEP ne soit pas trop éloignée de la méthanisation (coût des canalisations) et qu'elle soit dimensionnée de façon à être en mesure de recevoir ce complément de charge hydraulique et organique; les charges polluantes (notamment rejets en MES) soient équitablement imputées à l'industriel.

Outre les effluents contenant une DCO excessive pour un rejet en canalisation, les eaux présentant un risque de carbonatation important peuvent justifier d'un traitement aérobie sur le site de la méthanisation.

Afin de garantir une teneur minimale en O₂ ou pour corriger le potentiel d'oxydoréduction, il peut être nécessaire de ré-aérer l'effluent.

La troisième phase d'épuration des effluents consiste à éliminer notamment l'azote présent sous forme organique et ammoniacale, grâce à un traitement biologique de nitrification et dénitrification. Ce processus comporte quatre phases : l'ammonification, au cours de laquelle l'azote organique est transformé en azote ammoniacal; l'assimilation, qui voit l'utilisation d'une partie de l'azote pour la synthèse bactérienne; la nitrification, qui est l'oxydation par des microorganismes de l'azote ammoniacal en nitrite (NO₂) puis en nitrate NO₃); et enfin la dénitrification, au cours de laquelle, dans un réacteur anoxique (sans oxygène dissous, mais avec de l'oxygène combiné), des bactéries réduisent l'azote nitrique à un état plus faible d'oxydation.

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

Si le type de réacteur le permet (par exemple UASB), un soutirage des boues peut être effectué à intervalles réguliers en vue de leur compostage ou de leur épandage.

En pratique, une partie (30-50 %) des boues en excès quitte le réacteur anaérobie en suspension dans l'effluent et sera séparée dans le décanteur primaire de l'étape aérobie.

Quelques limitations et précautions sont à prendre en compte :

Les boues en excès, lorsqu'elles sont séparées à l'étape de méthanisation, se présentent sous forme d'une suspension 3-5% MS. Leur transport vers une installation de compostage peut s'avérer problématique et leur déshydratation difficile d'un point de vue technico-économique.

A noter que les boues granulées extraites d'un digesteur de type UASB possèdent d'excellentes propriétés de sédimentation qui leur permettent d'atteindre 10-15% MS après une période de décantation.

La législation fédérale (Osubst) 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.

Pollution solide entraînée par les boues.

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 (bio filtre) (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.

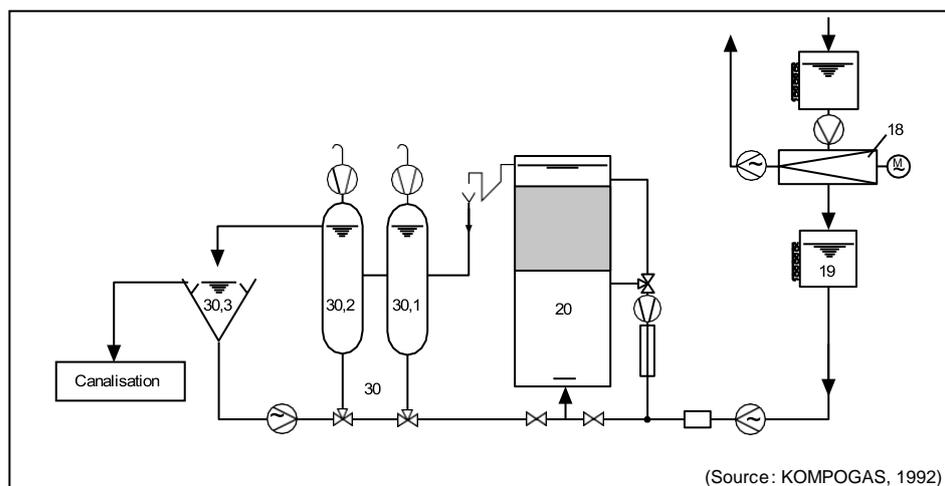
2- Déchets solides

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 (18), floculation chimique (19), digestion (20) dans un filtre anaérobie et aération intensive (30) comme le prévoit le procédé schématisé ci-dessous :



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.

Les équipements et dispositifs préconisés sont ceux déjà mentionnés pour le cas des effluents.

3.4. 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 flocons, 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.