

# Biogaz

à partir de  
déchets  
industriels  
et ménagers

Energies renouvelables



---

## Biogaz à partir de déchets industriels et ménagers

La méthanisation ou digestion anaérobie constitue un procédé d'épuration et de traitement des déchets et effluents organiques qui se caractérise par une récupération d'énergie (biogaz) associée à la réduction de pollution et à la conservation des qualités fertilisantes des déchets.

Cette brochure montrera dans quelle mesure ce procédé s'intègre au concept suisse du traitement des déchets, quels en sont les paramètres fondamentaux et les principes de fonctionnement, quel est le potentiel énergétique constitué par ces déchets et eaux usées, à quel niveau de développement se situe la méthanisation. Elle présentera également divers exemples de réalisations dont les schémas de fonctionnement, les performances et les divers aspects économiques, énergétiques et écologiques seront développés.

Le but de cette publication est de présenter :

- aux industries, les avantages de procédés d'ores et déjà disponibles pour l'épuration et la valorisation de leurs eaux usées et de leurs déchets;
- aux collectivités publiques, les possibilités offertes par de récents développements industriels qui permettent d'allier production d'énergie et de compost.

ISBN 3-905232-11-1

1993

N° de commande 724.230 f

---

# Biogaz à partir de déchets industriels et ménagers

Associations organisatrice et de soutien

ARPEA Association romande pour la protection  
des eaux et de l'air  
SIA Société suisse des ingénieurs et des  
architectes  
UTS Union technique suisse  
ASPEE Association suisse des professionnels  
de l'épuration des eaux

Groupe de travail

Yves Membrez, directeur du projet  
EREP SA  
Chemin du Coteau 28  
1123 Aclens

Dr Michel Glauser  
Biol-Conseils SA  
Rue de la Serre 5  
2000 Neuchâtel

Me Jacques-H. Meylan  
Av. du Tribunal-Fédéral 1  
1002 Lausanne

Dr Jean-Paul Schwitzguébel  
EPFL – Génie biologique  
1015 Lausanne

Dr Werner Edelmann  
Arbeitsgemeinschaft Bioenergie «arbi»  
8933 Maschwanden

Hans Engeli  
probag AG  
Grünastr. 23  
8953 Dietikon

Helmut Hofer  
HTH-Verfahrenstechnik  
Feldeggstr. 1  
8406 Winterthur

Dr Arthur Wellinger  
INFOENERGIE  
8356 Taenikon

ISBN 3-905232-11-1

Copyright © 1992  
Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne,  
janvier 1993.  
Reproduction d'extraits autorisée avec indication de la  
source.  
Diffusion : Coordination romande du programme d'action  
«Construction et Energie», EPFL-LESO, case postale 12,  
1015 Lausanne (N° de commande 724.230 f)

Form 724.230 f 01.93 1000 XXXXXX

Traduction et rédaction finale  
Yves Membrez

Mise en page  
Consortium DAC/City Comp S.A.  
Lausanne et Morges

# Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-1995), le programme d'action «Construction et Energie» se compose des trois Programmes d'impulsions suivants :

- PI-BAT – entretien et rénovation des constructions
- RAVEL – utilisation rationnelle de l'électricité
- PACER – énergies renouvelables

Ces trois Programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Ils doivent favoriser une croissance économique qualitative et, par là, conduire à une plus faible utilisation des matières premières et de l'énergie, avec pour corollaire un plus large recours au savoir-faire et à la matière grise.

Jusqu'ici, si l'on fait abstraction du potentiel hydro-électrique, la contribution des énergies renouvelables à notre bilan énergétique est négligeable. Aussi le programme PACER a-t-il été mis sur pied afin de remédier à cette situation. Dans ce but le programme cherche :

- à favoriser les applications dont le rapport prix/performance est le plus intéressant;
- à apporter les connaissances nécessaires aux ingénieurs, aux architectes et aux installateurs;
- à proposer une approche économique nouvelle qui prenne en compte les coûts externes;
- à informer les autorités, ainsi que les maîtres de l'ouvrage.

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc.

Le programme PACER se consacre, en priorité, à la formation continue et à l'information. Le transfert de connaissances est basé sur les besoins de la pratique. Il s'appuie essentiellement sur des publications, des cours et d'autres manifestations. Les ingénieurs, architectes, installateurs, ainsi que les représentants de certaines branches spécialisées, en constituent le public cible. La diffusion plus large d'informations plus générales est également un élément important du programme. Elle vise les maîtres de l'ouvrage, les architectes, les ingénieurs et les autorités.

Le bulletin «Construction et Energie», qui paraît trois fois l'an fournit tous les détails sur ces activités.

Ce bulletin peut être obtenu gratuitement sur simple demande. Chaque participant à un cours ou autre manifestation du programme reçoit une publication spécialement élaborée à cet effet. Toutes ces publications peuvent également être obtenues en s'adressant directement à la Coordination romande du programme d'action «Construction et Energie», EPFL-LESO, case postale 12, 1015 Lausanne

## Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des divers domaines concernés; ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles ou aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission qui comprend des représentants des associations, des écoles et des branches professionnelles concernées.

Ce sont également les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des autres activités. Pour la préparation de ces activités une direction de programme a été mise en place; elle se compose du Dr Jean-Bernard Gay, du Dr Charles Filleux, de M. Jean Graf, du Dr Arthur Wellinger ainsi que de Mme Irène Wuillemin et de M. Eric Mosimann de l'OFQC. La préparation des différentes activités se fait au travers de groupes de travail, ceux-ci sont responsables du contenu de même que du maintien des délais et des budgets.

## Documentation.

Le document d'information «Biogaz à partir de déchets industriels et ménagers» comporte quatre parties :

1. une partie théorique divisée en deux chapitres; le premier situant la digestion anaérobie dans le contexte général du traitement des déchets en Suisse, ainsi que dans son cadre législatif et réglementaire; le second donnant un aperçu des données fondamentales.
2. une présentation des potentialités techniques et énergétiques de développement de cette technologie, illustrée par les références d'installations existantes en Suisse et en Europe.
3. une description des systèmes et des concepts techniques actuellement disponibles.

4. une analyse comparative des aspects économiques et énergétiques de la filière «digestion par rapport à d'autres technologies classiquement mises en œuvre pour l'épuration et la valorisation des effluents et des déchets.

Le présent document a fait l'objet d'une procédure de consultation. Elle a permis aux auteurs d'effectuer les modifications nécessaires, ceux-ci étant toutefois libres de décider des corrections qu'ils souhaitaient apporter à leur texte. Dans ce sens, ils en assurent l'entière responsabilité. Des améliorations sont encore possibles et des suggestions éventuelles peuvent être adressées soit au directeur du cours, soit directement auprès de l'Office fédéral des questions conjoncturelles.

Pour terminer nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de la présente publication.

Janvier 93    Dr. Heinz Kneubühler  
                  Directeur-suppléant de l'Office  
                  fédéral des questions conjoncturelles

# Sommaire

---

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | Introduction   | 7  |
| 1A | Gestion des déchets en Suisse: place de la méthanisation | 7  |
| 1B | Dispositions légales applicables                         | 12 |

---

|    |                       |    |
|----|-----------------------|----|
| 2. | Données fondamentales | 15 |
|----|-----------------------|----|

---

|    |  |    |
|----|--|----|
| 3. | Potentiel des déchets solides et des effluents industriels | 23 |
|----|--|----|

---

|    |  |    |
|----|--|----|
| 4. | Production de biogaz à partir de déchets solides | 33 |
|----|--|----|

---

|    |                                       |    |
|----|---------------------------------------|----|
| 5. | Méthanisation d'effluents industriels | 41 |
|----|---------------------------------------|----|

---

|    |                                     |    |
|----|-------------------------------------|----|
| 6. | Aspects énergétiques et économiques | 49 |
| 6A | Déchets solides                     | 49 |
| 6B | Effluents industriels               | 57 |

---

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Appendice |   |    |
|           | Publications du Programme d'action PACER – Energies renouvelables | 60 |

---

# 1. Introduction

## 1A. Gestion des déchets en Suisse : place de la méthanisation

### Introduction

La méthanisation est un procédé biologique de dégradation de la matière organique qui, en l'absence d'oxygène, va principalement transformer certaines de ses fractions en deux molécules carbonées : la plus oxydée, le  $\text{CO}_2$  ou gaz carbonique et la plus réduite le  $\text{CH}_4$ , ou méthane. Le méthane ainsi produit peut être momentanément stocké puis, selon les besoins, oxydé par combustion de manière à libérer sous forme de chaleur l'énergie qu'il contient. D'autres fractions, en particulier la lignine et les composés ligno-cellulosiques, réfractaires aux attaques anaérobies, ne vont être que peu modifiées lors de la méthanisation et constitueront les précurseurs de l'humus des sols. Ces deux remarques montrent que la méthanisation est une technique de valorisation énergétique et de recyclage de la matière organique. Les valeurs économiques actuelles de l'énergie et de « l'humus » font qu'elle doit être envisagée pour des résidus organiques, des déchets. Les lignes qui suivent sont donc destinées à retracer le cadre général dans lequel la gestion des déchets est actuellement envisagée en Suisse et, dans un tel cadre, quelle peut être la place de la méthanisation comme technique de traitement.

### Evolution des techniques

Au cours des siècles, les méthodes d'élimination des déchets ont évolué en fonction de la démographie, de la technologie de production des biens et des substances, des connaissances scientifiques et des techniques d'élimination. Les paragraphes qui suivent résument succinctement cette évolution.

#### Epandage des déchets urbains sur les sols agricoles

Cette méthode a permis d'éliminer et même de valoriser les déchets urbains lorsqu'ils ont été collectés. Durant le  $\text{XX}^{\text{e}}$  siècle, cette pratique a été abandonnée en raison de l'augmentation de la quantité de déchets due à la croissance démographique et en raison de l'apparition de divers corps étrangers qui n'avaient plus leur place sur les champs. Par contre, une partie des boues de station d'épuration des eaux usées, descendantes des déjections humaines brutes, est encore épandue sur les sols agricoles. Leur qualité hygiénique et leur teneur maximale en métaux lourds sont réglementées depuis 1981 (Ordonnance sur les boues d'épuration).

#### Décharges

L'impossibilité d'évacuer tous les déchets urbains sur les sols agricoles incita au comblement ou au remblayage de différents sites. Ces décharges, laides,

puantes et polluantes en matière organique dans le passé, se sont multipliées durant le  $\text{XX}^{\text{e}}$  siècle. Leur nombre a même explosé après la  $2^{\text{e}}$  guerre, envahissant non seulement les abords des villes mais en plus ceux des villages et de chaque ferme isolée, généralement au bord et dans les cours d'eau. En plus de cet aspect quantitatif, la composition des déchets évoluait : au-delà des traditionnels cendres, gravats, boîtes de conserve et autres branchages, ces décharges ont recueilli des fonds de bidons d'huile de moteur ou de peinture, des plastiques, des roues de voitures ou encore des restes de produits phytosanitaires et des postes TV.

La loi fédérale de 1971 sur la protection des eaux interdit les décharges sauvages et mena à la notion de décharges aménagées qui, selon la nocivité des déchets qu'elle peuvent recevoir, sont classées de I à IV, d'inerte comme pour des matériaux d'excavation à toxique comme pour certains déchets spéciaux, en passant par les gravats de démolition (II) et les ordures ménagères (III). Les directives de 1976 sur les décharges qui ont suivi ont malheureusement été souvent peu respectées et de nombreux déchets ne sont pas où ils devraient être, nécessitant probablement de coûteux assainissements aux générations qui en hériteront. De plus, les durées durant lesquelles des substances gazeuses ou aqueuses étaient émises ont été sous-estimées. Finalement, les décharges représentent de nombreuses sources de pollution qui devront être gérées durant des dizaines ou des centaines d'années comme le montre la *figure 1*. Dans ces conditions, les nouvelles décharges, maillons indispensables de la gestion des déchets, devront dorénavant être organisées différemment.

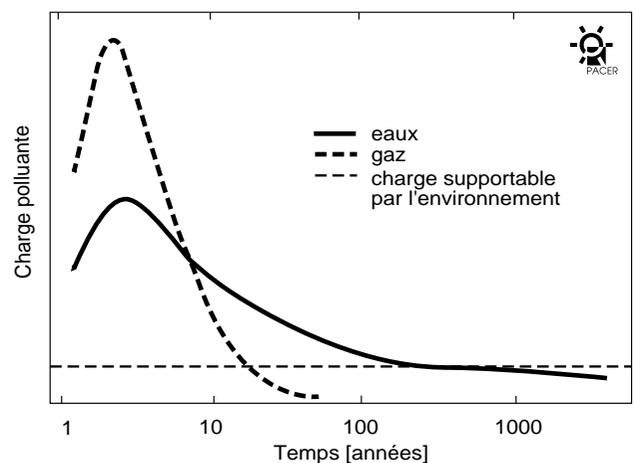


Figure 1: Présentation schématique de l'évaluation des charges polluantes gazeuses et aqueuses d'une décharge de déchets urbains en fonction du temps.

### Compostage

Pour diminuer les volumes à transporter et pour éviter des phénomènes de blocage nutritif sur les surfaces cultivées, une stabilisation biologique aérobie des ordures a été réalisée et a progressivement pris de l'importance. Durant le XX<sup>e</sup> siècle, au fur et à mesure de l'emploi de nouveaux objets et de nouvelles matières, ce compostage a dû être complété par un tri, manuel d'abord (tesson, verre, ...), puis de plus en plus complexe et mécanisé (métaux ferreux, plastiques, ...). Par la suite, l'emploi courant comme biens de consommation d'objets riches en métaux lourds (piles, radios, peintures, ...) ou riches en substances organiques de synthèse (produits antiparasitaires, solvants, enduits, ...) nécessita la mise sur pied d'une réglementation destinée à limiter les risques de contamination des sols par l'emploi des composts (Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement, 1986). Ce fut le coup de grâce pour les installations de compostage qui acceptaient les ordures ménagères brutes et qui avaient parfois vainement tenté de les trier pour obtenir une matière organique peu contaminée.

### Incinération

Pour éviter les nuisances dues aux décharges, les Anglais commencèrent à incinérer leurs ordures dès 1870. Zurich exploita la première usine dès 1901 et aujourd'hui les 80% des ordures ménagères de Suisse sont incinérées.

Les plus anciennes usines rejetaient directement leurs fumées par leurs cheminées. Les odeurs, cendres et évidemment nombre de substances gazeuses s'échappaient dans l'atmosphère. Une fois encore, l'arrivée de produits nouveaux riches en métaux lourds et en composés organiques synthétiques intensifièrent les nuisances de l'incinération (mercure, acide chlorhydrique, dioxine, ...). Les procédés de filtrage des fumées puis de lavage furent développés et l'entrée en vigueur de l'Ordonnance sur la protection de l'air en 1985 força à des assainissements efficaces et coûteux (diminution des émissions de 6 à 100 fois selon les polluants). Ce qui est dorénavant retenu avant les cheminées constitue un concentré de déchets qu'il s'agit de gérer sans créer de nouvelles nuisances par une mise en décharge non appropriée par exemple.

Si on résume l'évolution des techniques modernes d'élimination des déchets, on constate que l'ampleur et l'urgence des problèmes posés ont nécessité des solutions rapides dont les conséquences n'ont pas

toujours pu être toutes évaluées. Les effets secondaires des solutions retenues ont chacun nécessité la mise en œuvre de techniques nouvelles.

On peut constater que jusqu'à aujourd'hui les polluants présents dans les déchets ont été généralement dispersés dans l'environnement: sur les sols lors de l'épandage des ordures ou des composts d'ordures, dans l'air et l'eau par les décharges, dans l'air et le sol par les fumées d'incinération.

Or on sait que par exemple certains métaux lourds ou composés organiques toxiques se fixent de manière irréversible dans les sols ou les sédiments. Ils ne peuvent être dégradés ni chimiquement ni biologiquement et, inéluctablement, leur concentration augmente. Un jour ou l'autre, plus ou moins proche selon les produits et les situations, le seuil de toxicité sera atteint pour les organismes vivants.

Enfin, que réserve l'avenir? Cette histoire sans fin va-t-elle se poursuivre? On peut espérer que non et ceci, rêvons un peu, parce qu'une vaste réflexion dans de larges milieux a commencé depuis quelques années. Elle a déjà pris forme dans les «Lignes directrices pour la gestion des déchets en Suisse» élaborées en 1986 par la Commission fédérale d'experts chargée du problème des déchets.

## Lignes directrices pour la gestion des déchets en Suisse

Les lignes directrices proposent des principes politiques, économiques et technico-scientifiques destinés à assurer une gestion des déchets compatible avec l'environnement. Du point de vue technique elles insistent sur le fait que les modes d'élimination des déchets ne doivent rejeter que des matières recyclables ou définitivement stockables, que les substances dangereuses doivent être concentrées et que les substances organiques pures doivent être compostées ou méthanisées pour produire un amendement.

La loi fédérale sur la protection de l'environnement de 1983 et ses ordonnances d'application, dont en particulier l'ordonnance sur le traitement des déchets de 1990, permettent d'aborder le problème des déchets dans sa globalité, de la production des biens à leur stockage définitif. Les révisions en cours devront encore permettre d'en faciliter l'application et, lorsque la technique le permet, d'améliorer encore

les objectifs de qualité de l'environnement. Les principales étapes d'une saine gestion des déchets ménagers peuvent être résumées comme suit:

1. Réduire la charge polluante des biens de consommation

Comme on l'a vu jusqu'ici, les biens contiennent des polluants extraits des minerais (métaux lourds) ou produits par l'industrie chimique (molécules organiques de synthèse) qui, jusqu'à leur mise sur le marché, étaient confinés en des lieux bien circonscrits. Jusqu'à ce jour, ces substances nocives pour les êtres vivants ont été généralement dispersées dans l'environnement, lorsque sous forme de déchets, ces biens ont été «éliminés». Comme le veut le second principe de la thermodynamique, cette dispersion est inéluctable et seul son ralentissement peut être envisagé par une réelle gestion des déchets. Ceci montre bien que la seule manière de lutter de manière absolue contre la dispersion des polluants est celle qui consiste à ne pas les mettre en circulation sur le marché. C'est ce que prévoit en partie l'Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement qui, par exemple, vise à empêcher la production et l'exploitation de bombes aérosols aux chlorofluorocarbones (CFC) ou à réduire jusqu'à 99% la teneur en mercure des piles alcalines. C'est aussi ce que fait l'Ordonnance sur les emballages pour boissons qui interdit les emballages en PVC, grands producteurs d'acide chlorhydrique lors de leur incinération.

2. Limiter la production de déchets

2.1. *Améliorer la production*: une attention particulière aux procédés de production, orientée aussi vers le problème des déchets, permet de diminuer les volumes de résidus de fabrication. On cite volontiers l'industrie chimique qui au cours des vingt dernières années a diminué de plus de moitié la quantité de déchets issus de la transformation d'une tonne de matière brute, passant de 650 à 350 kg. De manière générale, un potentiel encore peu exploité dans l'industrie et l'artisanat permettra de diminuer les déchets créés lors de la production des biens.

2.2. *Orienter la consommation*: on admet que la pollution engendrée par les déchets ne justifie pas à elle seule une modification fondamentale de notre mode de vie par des interdictions et des rationnements de biens de consommation ou de services (la pollution engendrée par leur

production ou leur utilisation étant en effet largement supérieure). Toutefois, sans altérer le niveau de vie, certaines mesures permettent de limiter la production des déchets: éviter l'emploi systématique d'objets jetables (rasoirs, vaisselle, ...), concevoir des appareils dont les parties obsolètes peuvent être changées (ordinateurs, photocopieuses, ...), favoriser les réparations ou remise en état (mobilier, remontage des pneus, ...), ...

Partant du principe que le PVC peut être remplacé dans les emballages par des produits recyclables et qu'en cela le volume des déchets peut être diminué, l'Ordonnance sur les emballages pour boissons interdit, comme décrit plus haut, les emballages en PVC et incite l'industrie à recycler d'autres emballages tels que le PET, le verre, le fer blanc ou l'aluminium.

2.3. *Favoriser le recyclage*: le recyclage des déchets permet d'augmenter la durée de vie utile des matières. Il est déjà largement pratiqué en Suisse et selon l'Office fédéral de l'environnement, de la forêt et du paysage, il a permis en 1989 de remettre dans le circuit de production 613 000 tonnes de papier, 178 000 tonnes de verre, 140 000 tonnes de matériaux organiques, 12 000 tonnes de textile et 1200 tonnes d'aluminium, soit près d'un million de tonnes de déchets ménagers ou le quart du total produit. Selon l'OFEFP toujours, près de 500 000 tonnes supplémentaires pourront prochainement être recyclées. Cela implique que les collectes sélectives soient intensifiées par le développement de toutes les techniques connues (porte à porte, reprise par les commerces, postes fixes, déchetteries, ...) et que les marchés de l'emploi des produits recyclés soient organisés ou intensifiés. Ces collectes sélectives permettent d'obtenir des matériaux de composition homogène, condition sine qua non pour un recyclage économique. Elles permettent aussi d'éviter la contamination des fractions recyclables par la récupération séparée des déchets les plus polluants que constituent les déchets spéciaux (médicaments, restes de peinture, huiles, piles, ...).

Lorsque leur qualité le permet, les boues de STEP sont valorisées dans l'agriculture.

3. Stabilisation des déchets

On a vu que les techniques de traitement des déchets devaient produire des fractions recyclables

ou inertes. La stabilisation des ordures ménagères et des boues de STEP riches en métaux lourds est réalisée par leur oxydation chimique, l'incinération, qui les transforme principalement en eau, gaz carbonique et scories. Les produits volants ou volatils secondaires tels que les cendres, les métaux lourds, les acides chlorhydrique et fluorhydrique ou les oxydes d'azote ou de soufre sont en grande partie retenus par l'épuration des fumées à tel point que lorsque les 31 usines suisses en seront équipées, elles rejeteront moins de 1% de la pollution atmosphérique due aux transports, ménages et industries.

Les résidus de l'épuration des fumées, cendres volantes et boues d'épuration des eaux de lavage, seront stabilisés avec du ciment par exemple, puis mis en décharge pour résidus ou, peut-être bientôt, vitrifiés.

Les résidus solides seront fortement minéralisés et ne contiendront pas plus de 3% de carbone organique selon l'OTD. En raison de leur teneur trop élevée en métaux lourds et en substances solubles, ces scories ne peuvent pas actuellement être considérées comme inertes.

Pour faire face aux besoins supplémentaires créés par les limitations des possibilités d'épandage des boues de STEP dans l'agriculture et en raison de l'obligation d'extraire les fractions combustibles des déchets de chantier pour pouvoir déposer les gravats en décharge, une augmentation de la capacité d'incinération d'environ trente pour cent sera nécessaire en Suisse.

#### 4. Dépôt définitif

Les décharges ne devront permettre que le stockage des déchets inertes dont les émissions gazeuses et aqueuses sont compatibles avec l'environnement. Elles ne seront plus que de deux types, selon que le déchet inerte sera pauvre ou riche en polluants, nécessitant alors des conditions plus ou moins sévères liées au site, à l'aménagement et à l'exploitation. Leur capacité minimale sera, en principe, de 100 000 m<sup>3</sup>. En conséquence, les petites décharges communales ou privées ne pourront généralement plus être exploitées pour recevoir comme jusqu'à ce jour des matériaux d'excavation, des gravats, des déchets divers et bien souvent aussi des branchages et des déchets de jardin. L'organisation de la collecte sélective de ces derniers devra permettre leur compostage ou méthanisation puis leur recy-

clage plutôt que leur incinération avec le reste des ordures ménagères.

Un troisième type de décharge devra momentanément pallier au manque de capacité d'incinération de la Suisse: les décharges bioactives. Elles seront de 500 000 m<sup>3</sup> au minimum et principalement destinées aux scories d'incinération qui ne pourraient pas être utilisées en génie civil et, tant qu'elles seront riches en métaux lourds, à certaines boues de STEP, à des déchets de chantier non triés ou à des ordures ménagères. Elles constituent des réacteurs biologiques dont la production de biogaz mérite d'être exploitée.

#### 5. Planification

Bien que ce terme ne soit pas particulièrement à la mode, une planification de l'aménagement du territoire par les cantons est nécessaire pour que les besoins en sites de traitement ou de dépôt des déchets soient assurés à long terme. Une planification est aussi nécessaire pour que la gestion des déchets soit globalement dominée, évitant des éliminations incompatibles avec l'environnement et garantissant les bassins de réception pour les coûteuses installations à entretenir ou à créer. Une planification est encore nécessaire pour qu'en cas de difficulté ou de panne, des solutions d'élimination par trop rapides ou économiques ne réduisent pas en quelques jours à néant les efforts faits pendant le reste de l'année. Une telle planification est prévue par l'article 16 de l'OTD.

## Méthanisation

Finalement, quelle est la place de la méthanisation dans un tel concept général de gestion des déchets et plus particulièrement dans le cas des déchets ménagers et des effluents industriels ?

### Déchets urbains

La méthanisation, comme le compostage, permet de stabiliser les fractions biologiquement les plus accessibles (donc les plus polluantes) des déchets organiques. Elle préserve les composés ligno-cellulosiques qui sont les précurseurs des humus et peuvent alors constituer d'utiles amendements pour les sols cultivés. Ce recyclage particulier répond aux mêmes règles que celles énumérées pour le recyclage en général: il implique une matière première pure et non contaminée. Plus concrètement, il est

adapté aux déchets organiques de cuisine ou de jardin qui ont été collectés séparément, exempts de corps étrangers en métal, plastique ou verre par exemple, et surtout exempts de contaminants tels que les métaux lourds. Ces derniers peuvent provenir de déchets spéciaux ménagers tels que des piles ou des thermomètres cassés. Ils peuvent aussi provenir de l'air pollué par les automobiles dans le cas de taille d'arbres ou d'herbes fauchées le long d'axes à grand trafic. De tels déchets devront être évités pour que, suite à la méthanisation ou au compostage qui vont concentrer les polluants par la destruction d'une partie de la matière organique, les valeurs limites de l'Osust ne soient en aucun cas atteintes dans les composts, préservant ainsi les sols qui les recevront : Cd 3 g/t de matière sèche; Co, Sn 25 g/t; Ni 50 g/t; Cr, Cu, Pb 150 g/t; Zn 500 g/t. (Rappelons qu'il n'existe pas de système de tri des ordures ménagères brutes qui garantisse l'obtention d'une fraction organique d'une telle qualité.)

Une fois admis qu'un traitement de type biologique est le mieux adapté au recyclage des déchets organiques, reste encore à préciser le choix entre le procédé aérobie (compostage) et le procédé anaérobie (méthanisation). Disons d'emblée que ce choix dépendra des déchets à valoriser (degré d'humidité, aptitude à la dégradation aérobie ou anaérobie), des caractéristiques techniques des équipements s'ils sont existants (destinés à des liquides ou à des solides, brassés, ...) et enfin des possibilités de valoriser l'énergie produite sous forme de biogaz dans le cas de la méthanisation. Ces différents aspects sont traités plus en détail dans les chapitres qui suivent.

#### Effluents industriels

Les effluents industriels solubles ou en suspension peuvent être méthanisés lorsqu'ils sont évidemment organiques et d'origine naturelle. Cette situation se présente généralement dans des industries agro-alimentaires où les eaux résiduaires peuvent être de composition homogène et exemptes de produits toxiques pour les organismes méthanogènes ou pour les sols qui recevront les résidus. Du point de vue de l'environnement, c'est alors les eaux qui doivent être protégées contre les déversements polluants et pour cette raison la charge organique des effluents doit être abaissée pour être compatible avec les valeurs maximales fixées par l'Ordonnance sur le déversement des eaux usées de 1975. Lorsque les charges sont importantes, la méthanisation peut permettre leur destruction dans des conditions avantageuses par rapport à une simple

épuration aérobie. Du point de vue énergétique le bilan peut être positif : l'épuration biologique aérobie nécessite en effet de pulser de l'air pour assurer une teneur en oxygène suffisante dans les eaux, alors que, lors de la méthanisation, le biogaz récupéré permet d'assurer les besoins du procédé et même de produire des excédents. D'autre part la production d'organismes est beaucoup plus faible en anaérobiose qu'en aérobie, limitant d'autant la production de boues qui peuvent parfois poser des problèmes pour leur évacuation.

Généralement, la qualité des résidus liquides des réacteurs de méthanisation est insuffisante pour permettre leur évacuation directe dans les eaux de surface. Un traitement complémentaire aérobie est alors nécessaire pour diminuer cette charge résiduelle.

Les résidus solides de l'épuration d'effluents industriels organiques seront évacués sous forme de boues. Comme les boues provenant de l'épuration des eaux domestiques, elles devront être d'une qualité compatible avec l'Ordonnance sur les boues d'épuration de 1981 pour pouvoir être épandues sur les sols agricoles. C'est en principe le cas lorsque les industries transforment des produits agricoles.

## Energie

Du point de vue énergétique, le programme «Energie 2000» vise à ce que l'ensemble des sources renouvelables (soleil, vent, biogaz, géothermie) apporte le 0,5% de la production d'électricité et le 3% de la chaleur en l'an 2000. Ces contributions modestes nécessiteront toutefois des efforts importants sur le terrain et le programme souligne qu'il ne faut pas s'illusionner sur leur capacité à résoudre à court terme l'ensemble des problèmes énergétiques. Ajoutons encore que du point de vue de l'air toutes les économies de combustibles fossiles réalisées par l'utilisation d'énergies renouvelables, y compris le biogaz, contribueront à diminuer les émissions de CO<sub>2</sub>, atténuant d'autant ses effets pervers prévus.

## 1B. Dispositions légales applicables

La construction et l'exploitation d'une installation de méthanisation obéissent partiellement aux mêmes règles juridiques, partiellement à des règles différentes selon qu'il s'agit de traiter des déchets solides ou des effluents industriels.

Ces règles peuvent ressortir soit au droit privé, soit au droit public. On peut toutefois négliger les aspects de droit privé : on ne voit en effet guère que, sous cet angle, des installations de méthanisation puissent poser des problèmes spécifiques; tout au plus pourrait-on concevoir un conflit de voisinage (art. 684 du Code civil) ou de responsabilité du propriétaire (art. 679 du Code civil) ou du propriétaire d'ouvrage (art. 58 du Code des obligations); mais, encore une fois, ce type de problèmes n'est nullement spécifique à de telles installations. Nous nous concentrerons donc, dans la suite du présent exposé, sur les dispositions de droit public.

Celles-ci peuvent appartenir à divers domaines du droit : aménagement du territoire, police des constructions, droit de l'environnement, éventuellement droit des services publics. Nous verrons tout d'abord les règles communes à toutes les installations de méthanisation (I); nous traiterons ensuite de celles qui sont propres aux installations traitant des déchets solides (II), puis de celles qui se rapportent spécifiquement aux installations destinées à traiter des effluents liquides (III).

### I) Les dispositions communes

De par leurs dimensions, leur configuration, éventuellement les nuisances qu'elles dégagent (il conviendra de revenir sur ce point), les installations de méthanisation ne peuvent guère trouver place dans une zone destinée exclusivement ou principalement (zone mixte) à l'habitation. Leur place se trouve donc, bien plutôt, en zone industrielle.

Tout au plus peut-on se demander si une telle installation pourrait, à titre exceptionnel, être autorisée dans une zone de non bâtir en application de l'art. 24 de la loi fédérale sur l'aménagement du territoire. Ce n'est peut-être pas absolument exclu, encore que la question apparaisse assez académique : le plus souvent, en effet, de telles installations seront, par la force des choses, établies au voisinage immédiat d'autres installations, celles précisément qui «produisent» les déchets qu'il s'agit de traiter, lesquelles sont, elles aussi, situées en zone industrielle. De toute manière, les conditions, fort strictes, posées par cette disposition légale devraient être respectées; il faudrait, en particulier, que l'empla-

cement de l'installation fût imposé par sa destination, ce qui ne paraît pas, a priori, évident s'agissant d'une installation de méthanisation. Dans la mesure, d'autre part, où il s'agirait d'une installation collective particulièrement importante, destinée à traiter, par exemple, les déchets d'une commune ou d'une pluralité de communes, il est probable, compte tenu des tendances les plus récentes de sa jurisprudence, que, s'il venait à être saisi de la question, le Tribunal fédéral ne se contenterait pas d'une autorisation spéciale au titre de l'art. 24 de la loi fédérale sur l'aménagement du territoire, mais exigerait l'établissement d'un plan d'affectation spécial.

La construction et l'exploitation de l'installation devrait en outre respecter les règles de fond et les règles de forme en matière de police des constructions : règles propres au régime de la zone d'implantation (le plus souvent communales) et règles générales (de niveau cantonal) sur la sécurité et la salubrité des constructions. Il faut vouer une attention particulière aux règles relatives à la police du feu. Il s'agit de prévenir les risques d'incendie et d'explosion inhérents à des installations de ce genre, en imposant au constructeur une série de mesures touchant tant à la construction qu'à l'exploitation de l'installation; l'Association des établissements cantonaux d'assurance contre l'incendie a établi, à ce sujet, des Directives pour la construction et l'exploitation d'installations de biogaz, qui détaillent les mesures susceptibles d'être imposées à ce titre : prescriptions quant aux matériaux de construction des cuves de fermentation, prescriptions sur les réservoirs à gaz à basse ou à haute pression (dans ce dernier cas, il existe en outre des prescriptions fédérales qui doivent être elles aussi respectées), distances de sécurité à observer, dispositif de sécurité contre la surpression, la sous-pression ou le manque de gaz, dispositifs de blocage des retours de flamme, matériaux à utiliser pour la tuyauterie et la robinetterie, aération des récipients de stockage, etc. Ces directives n'ont, comme leur nom l'indique, pas directement force de loi, mais les dispositions légales ou réglementaires, cantonales ou communales peuvent s'y référer et leur conférer ainsi un effet juridique direct; les exigences qu'elles formulent peuvent aussi être reprises, à titre de conditions, par les autorités compétentes pour délivrer le permis de construire, l'autorisation spéciale souvent exigée en sus du permis de construire et l'autorisation d'exploiter.

La construction et l'exploitation de l'installation doivent, bien entendu, respecter également les dispositions (fédérales pour l'essentiel) sur la protection

de l'environnement : loi fédérale du 7 octobre 1983 (LPE), Ordonnance sur la protection de l'air du 20 novembre 1991 (OPAir), Ordonnance sur la protection contre le bruit du 15 décembre 1986 (OPB), Ordonnance du 19 octobre 1988 relative à l'étude d'impact sur l'environnement (OEIE), notamment.

Il faut rappeler, dans ce contexte, que le droit fédéral exige une telle étude notamment pour les installations destinées au tri, au traitement, au recyclage ou à l'incinération de déchets d'une capacité supérieure à 1000 tonnes par an, pour les réservoirs destinés au stockage de gaz d'une capacité supérieure à 50 000 m<sup>3</sup> de gaz en conditions normales, pour les conduites au sens de l'art. 1<sup>er</sup> de la loi fédérale du 4 octobre 1963 sur les installations de transport par conduites de combustibles ou carburants-liquides ou gazeux, lorsque leur construction et leur exploitation sont soumises à concession. Même lorsqu'une telle étude n'est pas prescrite par le droit fédéral, les cantons n'en doivent pas moins veiller au respect des dispositions légales et réglementaires sur la protection de l'environnement et ils peuvent, à ce titre, exiger l'établissement d'une notice d'impact.

Du point de vue du bruit, les installations de méthanisation ne semblent pas poser de problèmes particuliers; il n'en conviendra pas moins de vérifier, dans chaque cas, que les valeurs-limites fixées par le droit fédéral sont respectées.

La combustion du biogaz entraînera des rejets dans l'atmosphère de CO<sub>2</sub>, les grandes installations produiront en outre des rejets d'oxyde de soufre. Là encore, il faudra veiller que les valeurs fixées par l'OPAir soient observées, ce qui pourra impliquer que soient prises certaines dispositions lors de la construction de l'installation (dispositif de filtrage et/ou d'aération, forme et dimension des cheminées, etc.).

D'autres aspects du droit de la protection de l'environnement sont également impliqués; ils seront examinés dans les deuxième et troisième parties du présent exposé.

Enfin, dans la mesure où le biogaz produit par l'installation doit faire l'objet d'une fourniture publique, d'autres problèmes juridiques peuvent encore se poser, tels que la nécessité d'une concession pour le transport et/ou la distribution d'énergie, ou encore pour la pose de conduites sous le domaine public.

- II) Les installations de traitement de déchets solides
- a) Le premier problème spécifique posé par de telles installations est celui de leur intégration dans une conception générale de gestion des déchets.

Le problème, en fait, est double.

Le traitement de déchets solides par méthanisation ne présente, tout d'abord, d'intérêt réel que si l'«input» est relativement homogène et s'il présente certaines caractéristiques. Conditions qui seront sans autre remplies par définition dans tous les cas où l'installation de méthanisation fonctionne en combinaison avec une autre installation industrielle productrice de déchets; mais qui pourraient faire problème dans la mesure où il s'agit d'une installation collective: dans ce dernier cas, le traitement par méthanisation suppose nécessairement un tri préalable des déchets, tel que ne seront retenus que ceux qui ne sont pas chimiquement contaminés (c'est, pour l'essentiel, le problème de la teneur des déchets en métaux lourds!); c'est donc tout le problème du tri préalable des déchets qui se trouve de la sorte posé. A cet égard, l'Ordonnance du 10 décembre 1990 sur le traitement des déchets (OTD) fait obligation aux cantons de veiller que les déchets compostables que les particuliers n'ont pas la possibilité de valoriser eux-mêmes soient dans la mesure du possible collectés séparément et valorisés. Les cantons disposent donc d'une base légale pour imposer le tri à la source de tels déchets.

Ensuite, la question se pose de la place d'une telle installation dans un concept général de gestion des déchets.

Il faut, là encore, distinguer entre installations collectives et installations privées.

L'OTD fait obligation aux cantons d'établir un plan de gestion des déchets, qui doit définir notamment les zones d'apports, de diviser leur territoire en zones d'apport, d'attribuer à chacune d'elles une installation de traitement des déchets et de veiller que les déchets d'une zone d'apport donnée soient traités dans l'installation à laquelle elle a été attribuée; prévues au premier chef pour les déchets urbains, ces obligations peuvent être étendues à d'autres types de déchets, si cela est nécessaire pour garantir qu'ils feront l'objet d'un traitement respectueux

de l'environnement. Ces dispositions pourraient donc trouver à s'appliquer, semble-t-il, aux déchets susceptibles d'être traités par méthanisation et permettre aux cantons d'intégrer dans leur plan de gestion une ou plusieurs installations collectives de ce genre avec la ou les zones d'apport correspondantes.

Quant aux installations privées, elles pourraient tomber sous le coup de l'art. 12 OTD, qui permet d'imposer au détenteur d'une entreprise industrielle, artisanale ou de prestation de services l'obligation de déterminer si des possibilités de valorisation existent ou pourraient être créées pour ses déchets, d'informer l'autorité compétente du résultat de ses recherches et enfin de veiller à la valorisation de ces déchets pour autant que cette opération soit techniquement possible et économiquement supportable et qu'elle soit, de surcroît, plus respectueuse de l'environnement que ne le seraient l'élimination desdits déchets et la production de biens nouveaux.

- b) Les installations de méthanisation produisent, d'autre part, des boues et des eaux. Cet «output» pose lui aussi des problèmes spécifiques du point de vue du droit de la protection de l'environnement. Ces problèmes se posent cependant en termes identiques pour les installations de traitement des déchets liquides. C'est dans ce contexte qu'ils seront donc examinés.
- c) Il n'est enfin pas inutile de rappeler, dans ce contexte, les dispositions de l'art. 20 OTD, qui fait obligation aux cantons de coordonner, dans les limites de leurs compétences, les différentes procédures d'autorisation nécessaires à la construction ou à l'exploitation des installations de traitements de déchets, notamment en ce qui concerne les autorisations en matière d'aménagement du territoire, de défrichement et de protection des eaux, les autorisations au sens de la loi sur le travail et de l'Ordonnance sur les mouvements de déchets spéciaux.

### III) Les installations de traitement des déchets liquides

S'agissant de telles installations, les problèmes spécifiques qui se posent sont, nous l'avons dit, ceux qui ont trait à l'«output» (boues, eaux) en relation avec le droit de la protection de l'environnement, plus précisément, dans ce contexte, avec les dispo-

sitions de ce droit relatives à la protection des eaux contre la pollution.

En ce qui concerne tout d'abord les boues, devront être respectées les dispositions de l'Ordonnance sur les boues d'épuration du 8 avril 1981. Dans la mesure où il n'est pas possible de garantir que la charge bactérienne de ces boues demeure dans les limites fixées par ce texte en matière de boues hygiénisées, une hygiénisation supplémentaire s'imposera avant toute possibilité d'épandage sur des surfaces fourragères ou des cultures maraîchères; celui-ci devra en outre se conformer aux prescriptions formulées en cette matière par cette même ordonnance (disponibilité de surfaces suffisantes, règles d'épandage, interdiction d'épandage sur certains types de sol). Quant aux valeurs limites concernant la teneur en métaux lourds, la question apparaît, dans le présent contexte, assez théorique: compte tenu de la composition des déchets et effluents susceptibles d'être utilisés pour la production de méthane, le problème ne devrait guère se poser. Quant aux eaux résiduelles, il conviendra d'appliquer les dispositions de l'Ordonnance sur le déversement des eaux usées du 8 décembre 1975. Si elles satisfont aux conditions posées par ce texte, elles pourront être déversées directement dans une canalisation publique, sinon elles devront faire l'objet d'un prétraitement. Enfin, si ces eaux sont produites en quantités trop importantes, l'aménagement d'une station d'épuration privée pourra être exigé.

## 2. Données fondamentales

### 2.1 Etapes microbiologiques et biochimiques

La digestion anaérobie des déchets organiques et des effluents industriels est un processus biologique de décomposition de la matière organique présente qui se déroule en l'absence d'oxygène et qui conduit à la formation de biogaz, mélange de méthane  $\text{CH}_4$  (50 à 75%) et de gaz carbonique  $\text{CO}_2$  (25 à 50%). Ce processus met en jeu une microflore bactérienne complexe qui se développe à l'abri de l'air, à des températures moyennes (30 à 40°C pour les bactéries mésophiles) ou élevées (50 à 60°C pour les bactéries thermophiles) et à un pH proche de la neutralité.

Les conditions physico-chimiques régnant dans tout digesteur doivent donc respecter ces exigences afin de canaliser efficacement le flux carboné ainsi que le potentiel énergétique entre la matière à dégrader et le biogaz produit. Pour fonctionner de façon optimale, les bactéries anaérobies doivent en plus recevoir régulièrement un substrat équilibré, c'est-à-dire un effluent ou un déchet qui contient 15 à 30 fois plus de carbone que d'azote.

La matière organique, d'origine naturelle ou industrielle, est composée de molécules plus ou moins complexes, dont la structure est basée sur la liaison de plusieurs atomes de carbone qui peuvent ainsi former des chaînes plus ou moins longues, plus ou moins ramifiées. Sur ce squelette carboné viennent se fixer d'autres éléments en proportions variables: essentiellement hydrogène et oxygène (sucres, graisses), mais aussi azote (protéines), phosphore (acides nucléiques) ou soufre (certains acides aminés). Une molécule riche en hydrogène (graisses) a un potentiel énergétique plus important qu'une molécule contenant moins d'hydrogène (sucres).

La demande chimique en oxygène, ou DCO (COD en anglais), est définie comme la quantité d'oxygène, exprimée en milligrammes, qui est consommée par les matières, contenues dans 1 litre d'eau, oxydables dans les conditions de l'essai (définition AFNOR). Les matières oxydables contenues dans l'échantillon à analyser sont oxydées par un excès de dichromate de potassium avant d'être mesurées par colorimétrie. La mesure de la DCO permet d'estimer la charge polluante d'une eau usée en matières organiques. Sa détermination avant et après un traitement physique, chimique ou

biologique permet également de contrôler le bon fonctionnement d'une STEP ou d'évaluer l'activité de micro-organismes aérobies ou anaérobies dégradant un effluent organique donné.

Lors de toute biodégradation de matière organique, les molécules sont oxydées progressivement en libérant l'énergie qu'elles contiennent et leur structure carbonée est détruite. En conditions aérobies, l'énergie libérée est utilisée pour la croissance des bactéries et le carbone se retrouve sous forme de biomasse et de  $\text{CO}_2$  rejeté dans l'atmosphère. Dans un processus anaérobie au contraire, la croissance bactérienne est beaucoup plus faible, alors que le carbone contenant l'énergie libérée se retrouve essentiellement sous forme de méthane, utilisable ultérieurement comme combustible.

Dans un processus aérobie, l'oxygène est l'accepteur final du potentiel réducteur initialement présent dans les effluents ou les déchets organiques, et l'énergie libérée est suffisante pour permettre la dégradation et l'oxydation complètes d'un composé donné par un seul micro-organisme. Plusieurs espèces microbiennes peuvent ainsi effectuer les mêmes réactions en parallèle. Cette grande diversité de micro-organismes non spécialisés offre un large potentiel d'adaptation et de réaction rapide à d'importantes variations physico-chimiques de l'effluent à traiter. Les bactéries aérobies se contentent de faibles concentrations en substrats (0,1–10 mg/l), ce qui autorise une forte réduction de la charge polluante contenue dans l'effluent.

Par contre, pour des raisons thermodynamiques, une action synergique de plusieurs espèces bactériennes très spécialisées intervenant séquentiellement est requise pour les différentes étapes de la dégradation des composés organiques en l'absence d'oxygène. Par ailleurs, l'affinité des bactéries anaérobies pour leurs substrats est relativement faible, et ces derniers ne seront consommés rapidement que pour des concentrations supérieures à 50–100 mg/l. Par conséquent, la digestion anaérobie est avantageuse pour traiter des effluents fortement chargés en matière organique, mais moins efficace pour l'élimination totale de la pollution.

Bien que nombreuses et complexes, les réactions se déroulant dans un digesteur anaérobie peuvent se diviser en trois étapes principales réparties entre différents groupes de bactéries: hydrolyse-fermentation, acétogenèse, méthanogenèse.

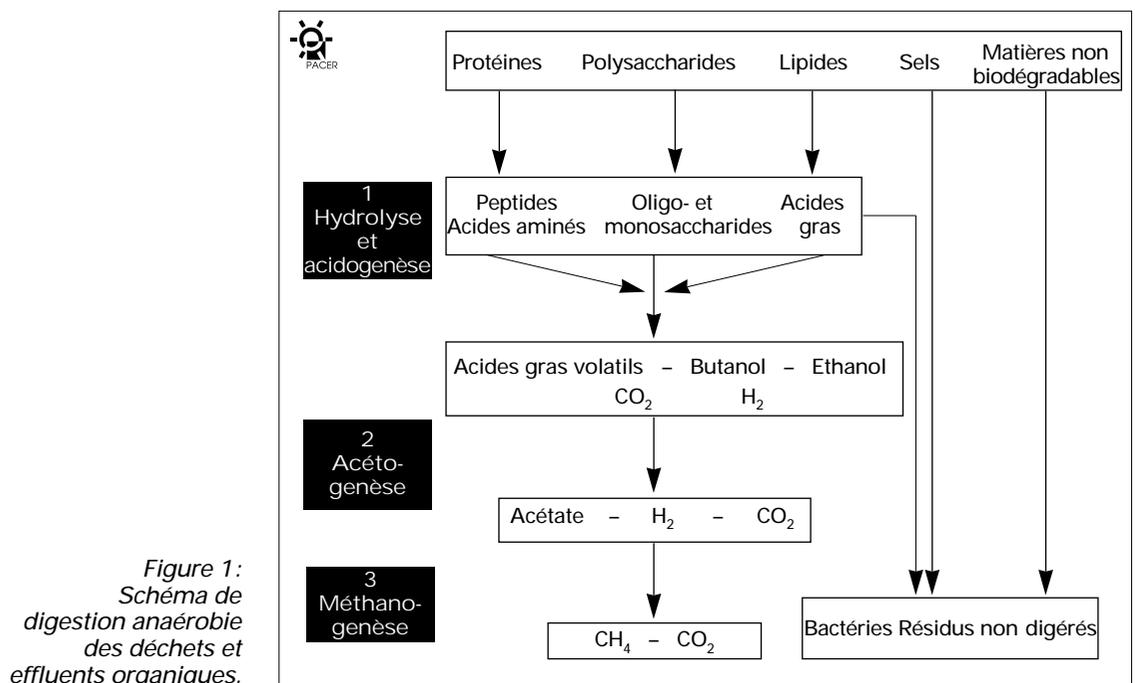
La première étape est l'hydrolyse de la matière organique, présente sous forme de grosses molécules, solubles ou non, comme les protéines, les graisses, les polysaccharides (cellulose, amidon). Ces polymères sont tout d'abord cassés en monomères, briques élémentaires de la matière organique comme les acides aminés, les acides gras et les sucres simples. Les bactéries acidogènes transforment ensuite ces monomères en un mélange d'acides (acétique, lactique, butyrique, etc.) et de composés neutres, comme l'éthanol. Cette dégradation de la matière organique complexe est souvent une étape freinant le processus global de biométhanisation, en particulier dans le cas de déchets, solides ou en suspension, difficilement hydrolysables.

Le second groupe est composé des bactéries acétogènes qui transforment les divers acides et autres produits issus de l'étape précédente en précurseurs directs du méthane: acide acétique, CO<sub>2</sub> et hydrogène (H<sub>2</sub>). Un transfert efficace de l'hydrogène des bactéries acétogènes aux bactéries méthanogènes est indispensable pour assurer le bon déroulement de l'ensemble du processus de digestion anaérobie.

Les bactéries méthanogènes utilisent ensuite les précurseurs formés lors des deux premières étapes pour produire du méthane. L'identification et la ca-

ractérisation de nouvelles espèces méthanogènes a permis de mieux comprendre la physiologie, la biochimie et la bioénergétique de la méthanogénèse, qui est maintenant définie comme une respiration anaérobie, et non plus comme un processus de fermentation. Le méthane peut être formé par la réduction progressive du CO<sub>2</sub> au moyen de quatre molécules d'H<sub>2</sub> ou par la scission de l'acide acétique (CH<sub>3</sub>-COOH) en CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> en plusieurs étapes biochimiques aujourd'hui bien comprises. Toutes les bactéries méthanogènes sont capables d'effectuer la première réaction, qui est rapide, alors que seules quelques espèces peuvent réaliser la seconde, plus lente, car moins favorable thermodynamiquement. Malgré la faible affinité des bactéries méthanogènes pour l'acide acétique, la deuxième réaction est néanmoins responsable de la formation de 70% du méthane.

Ces étapes biochimiques et microbiologiques se déroulent simultanément dans un digesteur anaérobie, mais à des vitesses différentes. Selon les caractéristiques du déchet ou de l'effluent, l'étape hydrolytique ou l'étape acéto-méthanogène sera la plus lente et limitera ainsi l'ensemble du processus. L'acidogénèse est réalisée par des bactéries à taux de croissance élevé qui s'adaptent rapidement à tout excès de substrat. Les acides produits sont à l'inverse utilisés par des bactéries à croissance très



lente qui sont très sensibles à une acidification du milieu ou à une surcharge en substrat. Il conviendra donc d'éviter une accumulation des produits de la fermentation (acides gras, ammonium) dans le digesteur. De même, la croissance et le métabolisme des bactéries seront inhibés de manière plus ou moins réversible si l'effluent à traiter contient des substances toxiques, comme les métaux lourds ou certains pesticides et antibiotiques.

## 2.2 Les différents systèmes de réacteurs pour la digestion des effluents

Un digesteur (appelé aussi bioréacteur ou fermenteur) anaérobie est essentiellement une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur, dans laquelle différentes espèces bactériennes se relaient pour dégrader les composés organiques de déchets ou d'effluents et produire du biogaz. La diversité de cette matière organique, soluble, en suspension ou semi-solide, fait qu'aucun type de digesteur ne peut être considéré comme universel : il faudra le choisir et l'adapter en fonction du déchet ou de l'effluent à traiter et des potentialités des bactéries.

Dans un procédé discontinu, le digesteur est chargé en une seule fois et vidangé lorsque la production de biogaz cesse, suite à l'épuisement des matières organiques biodégradables. Ces systèmes conviennent bien pour traiter des déchets solides, jusqu'à 15% de matière sèche totale, comme les fumiers, les résidus agricoles ou les ordures ménagères. Ce sont des digesteurs rustiques, qui ont l'avantage d'une grande simplicité technique et dont le contenu n'est pas obligatoirement chauffé ni mélangé, mais leur productivité en biogaz reste faible et variable au cours du temps.

Pour traiter des effluents liquides plus ou moins riches en matières en suspension, le digesteur est alimenté en continu ou en semi-continu, son contenu étant maintenu homogène par brassage mécanique régulier ou par recirculation du gaz ou du liquide (procédé infiniment mélangé). La température est contrôlée et le volume du liquide maintenu constant par un déversoir de trop plein ou par le fonctionnement d'une pompe. Les digesteurs de première génération étaient des cuves cylindriques sans rétention de biomasse, ce qui signifie que le temps de séjour des bactéries dans le fermenteur était le même que le temps de séjour hydraulique

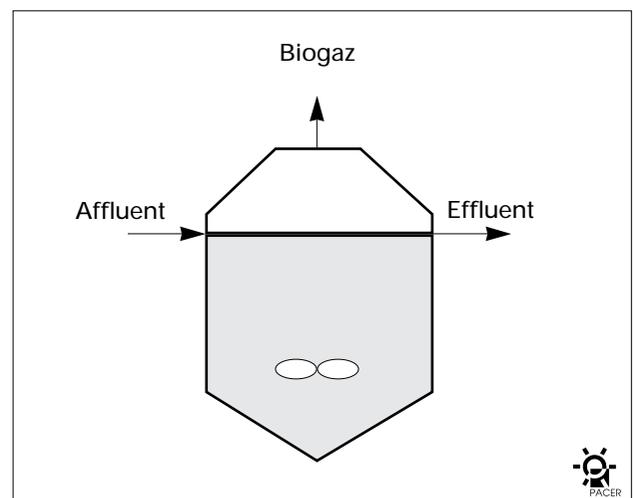


Figure 2: Digesteur infiniment mélangé conventionnel.

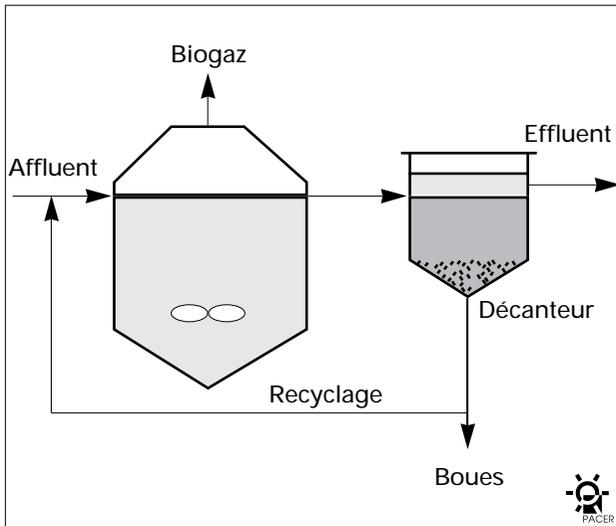


Figure 3: Procédé contact (recyclage de la biomasse).

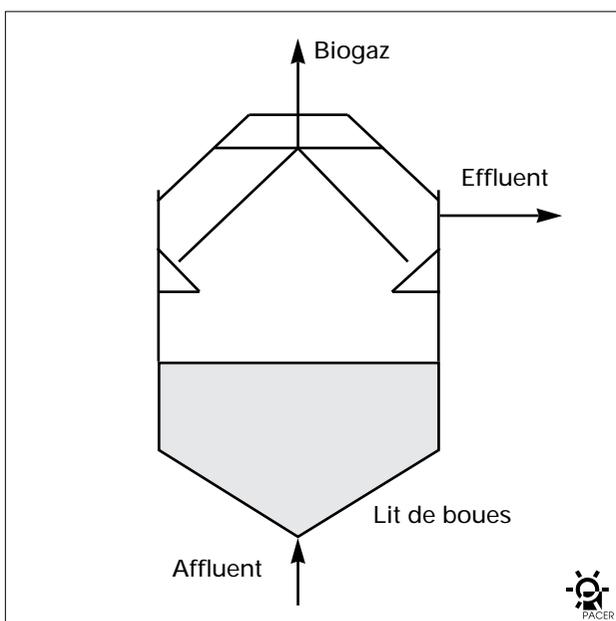


Figure 4: Lit de boue anaérobie à flux ascendant (UASB).

de l'effluent. Le réacteur devait donc être dimensionné pour permettre des temps de séjour compris entre 10 et 30 jours et éviter ainsi le lessivage des bactéries acéto-méthanogènes qui se multiplient très lentement. Ce type de fermenteur conventionnel est encore largement utilisé pour des effluents possédant jusqu'à 8% de matière sèche totale, comme les lisiers de porc ou les boues de STEP. Les taux de charge quotidiens ne pouvant pas excéder 4 kg de DCO par m<sup>3</sup>, plusieurs techniques ont été développées pour augmenter la charge de pollution admissible et l'efficacité du traitement, par immobilisation ou recyclage de la biomasse active dans le digesteur.

1. Les systèmes conventionnels à culture libre ou infiniment mélangés, mais avec recyclage de la biomasse (procédé contact). A la sortie du digesteur, les bactéries et les matières en suspension sont séparées de l'effluent traité par sédimentation dans un décanteur et réintroduites dans le fermenteur. Ce procédé de recyclage permet de maintenir une forte concentration de bactéries actives et la durée du traitement peut ainsi être ramenée à quelques jours. Toutefois, la capacité des bactéries et des matières en suspension à sédimenter correctement dépend largement des caractéristiques de l'effluent et du taux de charge. Les performances d'un procédé contact seront donc influencées par ces deux facteurs. C'est pourquoi ce traitement convient particulièrement bien à des eaux résiduaires ayant une charge polluante assez forte (DCO supérieure à 10 g / l), et contenant beaucoup de matière organique en suspension. C'est le cas de nombreux effluents de l'industrie agro-alimentaire: conserveries (blanchiment de petits pois et de haricots, pelage de carottes et de pommes de terre), raffineries de sucre (mélasses), abattoirs, laiteries, distilleries ou brasseries. Le taux de charge peut varier entre 3 et 10 kg de DCO par m<sup>3</sup> par jour et les rendements d'épuration atteignent 70 à 95%, selon le type de substrat. Par contre, ce procédé n'est que peu intéressant pour des effluents riches en matière organique essentiellement ou exclusivement sous forme soluble.

2. On utilise la capacité d'autofloculation de la biomasse dans le réacteur lui-même, la sédimentation des granules ou floccs bactériens par gravité étant équilibrée par le flux ascendant de l'effluent à traiter (lit de boues anaérobies à flux ascendant, UASB ou upflow anaerobic sludge blanket). De tels procédés permettent d'obtenir une forte concentration de biomasse active dans la partie inférieure

du digesteur, la partie supérieure étant particulièrement conçue pour la clarification de l'effluent traité. Les problèmes rencontrés sont associés à la formation des granules : si certains effluents favorisent le développement des floccs bactériens (effluents riches en sucres, en amidon ou en acides volatiles), d'autres effluents ne favorisent pas leur formation. Ce procédé est donc très efficace pour traiter des effluents riches en composés organiques solubles mais contenant peu de matière en suspension. Le taux de charge journalier est habituellement de 10 à 20 kg de DCO par m<sup>3</sup> de digesteur et la concentration de matière organique est réduite de 70 à 90% pour des temps de séjour hydrauliques de 0,5 à 6 jours.

3. Les procédés à biomasse immobilisée, où le réacteur contient un support statique inerte, minéral ou synthétique, sur lequel viennent se fixer les bactéries (filtre anaérobie ou lit fixe). L'effluent (jusqu'à 20 kg de DCO par m<sup>3</sup> de digesteur par jour) est distribué en flux ascendant ou descendant, et la matière organique est réduite de 90 à 95% pour un temps de séjour hydraulique de 1 à 5 jours. Le filtre anaérobie ascensionnel est bien adapté pour traiter les effluents dilués et peu chargés en matières en suspension de l'industrie agro-alimentaire (raffineries sucrières, distilleries, laiteries) ou les lisiers de porc. La principale limitation du procédé en flux ascendant est due à l'accumulation de matières en suspension ou de bactéries sur les supports qui peuvent provoquer une distribution non homogène de l'effluent et même colmater le digesteur. L'utilisation d'un flux descendant permet de résoudre les problèmes de colmatage, de répartition inégale de l'effluent et de formation de mousse ou de croûtes en surface.

4. La biomasse peut aussi être fixée sur un support mobile, particules granulaires fines et poreuses comme le sable maintenues en expansion contrôlée par le flux ascendant rapide et régulier de l'effluent (lit fluidisé). Ce type d'installation compacte permet de traiter des effluents moyennement chargés ne contenant que des substances solubles (sucres simples, mélasses de betteraves, acides organiques ou alcools) ou des matières en suspension facilement biodégradables. Jusqu'à 30 kg de DCO peuvent être chargés par m<sup>3</sup> et par jour, et la matière organique est presque totalement transformée en biogaz pour des temps de séjour relativement courts. Toutefois, ce procédé nécessite la recirculation de grands volumes d'effluent et le fonctionnement continu d'une pompe puissante et fiable.

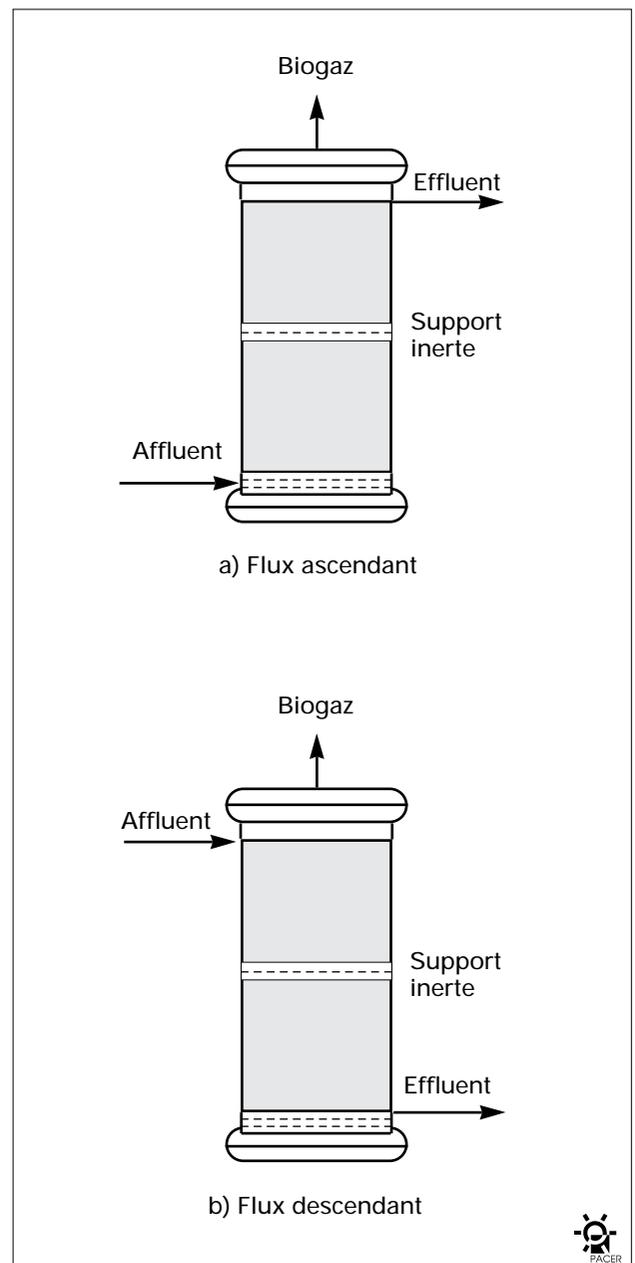


Figure 5: Filtre anaérobie (lit fixe) à flux ascendant (a) ou descendant (b).

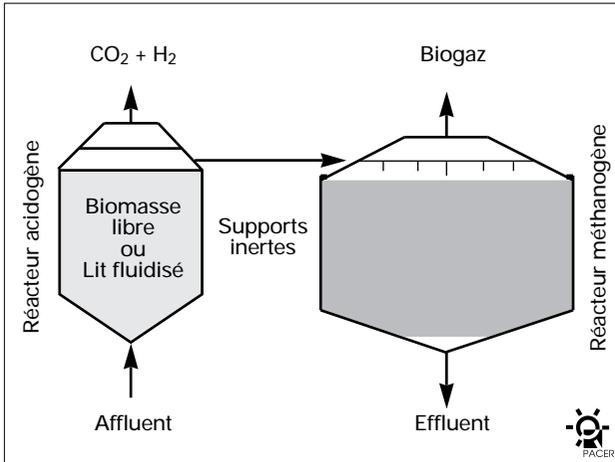


Figure 6: Système à deux étages.

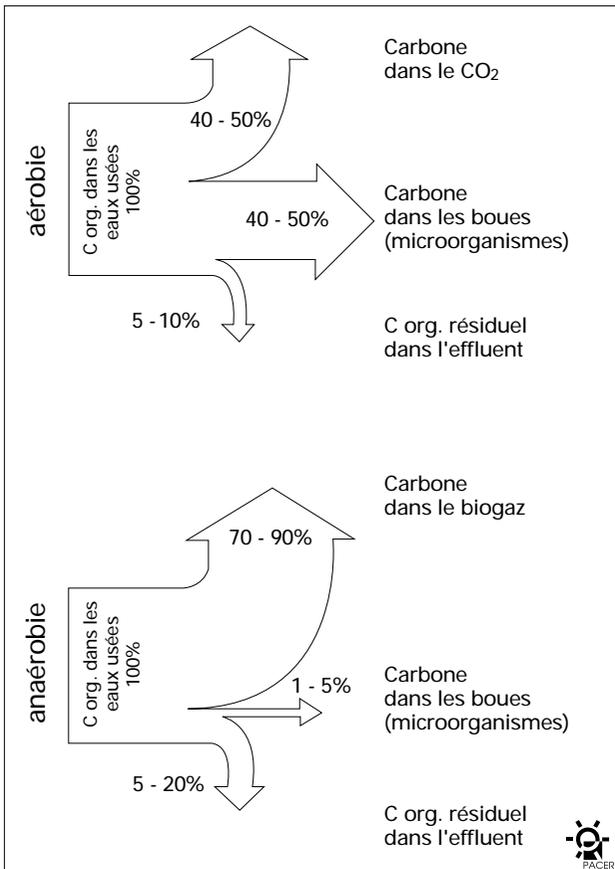


Figure 7: Répartition du flux de carbone présent dans la matière organique: comparaison des traitements aérobie et anaérobie.

5. Les systèmes de digestion anaérobie à deux étages, où les bactéries hydrolytiques et acidogènes sont séparées physiquement des bactéries acéto-méthanogènes. Un tel procédé peut être intéressant pour optimiser le traitement de nombreux effluents de l'industrie agro-alimentaire, qui comprennent souvent un mélange de composés solubles et de matière en suspension, comme le petit-lait issu de la fabrication du fromage. Chaque étage peut être contrôlé séparément (pH, temps de séjour, température) et utiliser l'une ou l'autre des techniques mentionnées ci-dessus, selon l'effluent à traiter. Un procédé à deux étages permet souvent de traiter des charges volumiques plus importantes en moins de temps, et il améliore aussi la qualité de l'effluent final, la productivité en méthane ainsi que la stabilité du système.

Ces différents procédés ont été l'objet de développements importants ces dix dernières années et sont déjà largement appliqués à grande échelle: pour une charge pouvant atteindre plus de 20 kg de DCO par m<sup>3</sup> et par jour, entre 75 et 90% de la matière organique est dégradée en quelques jours. La production quotidienne de biogaz peut s'élever jusqu'à 8 m<sup>3</sup> par m<sup>3</sup> de bioréacteur, ou 350 litres de méthane par kg de DCO transformée. Une adéquation judicieuse entre la quantité et la qualité des effluents à traiter, le type et le volume du bioréacteur, la production et l'utilisation du biogaz permet maintenant à un industriel ou à une communauté d'optimiser la dégradation de ses rejets organiques et de couvrir une part non négligeable de ses dépenses énergétiques.

### 2.3 Possibilités et limites de la digestion anaérobie

Les procédés aérobie et anaérobie ont souvent été opposés pour le traitement des effluents et des déchets organiques. Un traitement aérobie permet de convertir les composés carbonés solubles ou en suspension en CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère (près de 50% du carbone initialement présent) et en biomasse microbienne (environ 50% du carbone), qui constitue les boues secondaires. Dans ce cas, la valeur énergétique de l'effluent n'est pas utilisée, et il faut même dépenser une énergie considérable pour oxygéner les bassins d'aération (plus de 300 millions de kWh par an pour l'ensemble des STEP suisses) puis pour éliminer les boues produites. Au contraire, la digestion anaérobie

minimise la formation de biomasse, donc de boues (seulement 5% du carbone initial), alors que la production d'un biogaz riche en méthane permet de récupérer l'énergie potentielle des effluents.

Un procédé aérobie est généralement mieux indiqué pour traiter des effluents dilués de composition variable: les bactéries s'adaptent rapidement à des changements brusques de la qualité d'un effluent et peuvent utiliser de nombreux substrats à faible concentration. Les procédés aérobies semblent plus robustes, plus stables et plus simples à contrôler. Mais ils ne peuvent pas forcément éliminer n'importe quoi, et ne permettent pas toujours d'atteindre les normes de rejet en vigueur.

Au contraire, un procédé anaérobie permet d'appliquer une charge volumique élevée, ce qui le rend intéressant pour traiter les effluents fortement chargés en matière organique, provenant par exemple de l'industrie agro-alimentaire, tout en couvrant une part significative des besoins énergétiques de ces industries. Toutefois, le contrôle de la stabilité d'un processus anaérobie peut parfois être délicat, ce qui a quelque peu freiné l'utilisation de la biométhanisation pour traiter certains déchets ou effluents. Enfin, la digestion anaérobie ne permet pas de réduire de manière importante la pollution azotée qui se retrouve sous forme ammoniacale.

A l'heure actuelle, les procédés aérobies et anaérobies apparaissent donc complémentaires plutôt que concurrents. De plus en plus d'effluents devront être traités successivement par une digestion anaérobie suivie d'un post-traitement aérobie, qui peut aussi inclure un cycle de nitrification-dé-nitrification pour réduire la pollution azotée. Les avantages respectifs des deux techniques seront ainsi exploités, et leurs inconvénients neutralisés: diminution de la charge polluante de l'effluent final, réduction du volume des boues, amélioration de la balance énergétique et économique du traitement.

Les eaux usées domestiques sont généralement trop diluées pour être traitées par les procédés actuels de digestion anaérobie d'une manière efficace et économique. Toutefois, des procédés nouveaux fonctionnant à des températures plus basses (10-25°C) sont en cours de développement. En immobilisant ces bactéries anaérobies psychrophiles, il sera bientôt possible de traiter 1 à 2 kg de DCO par m<sup>3</sup> de réacteur et par jour, au lieu de 0,5 à 1 kg pour les traitements aérobies classiques. Par conséquent, la surface et le volume requis pour trai-

ter les eaux usées domestiques pourraient être considérablement réduits par rapport aux STEP actuelles. Enfin, la quantité de boues produites étant beaucoup plus faible et les besoins énergétiques pour l'aération des bassins étant supprimés, cela offre des perspectives intéressantes pour les STEP de l'an 2000, qui pourraient faire appel à des procédés anaérobies ou à un couplage des techniques anaérobie et aérobie.

En attendant la mise en service de ces STEP du 21<sup>e</sup> siècle, encore plus respectueuses de l'environnement, quelque 4,5 à 5 millions de tonnes de boues organiques continueront à être produites chaque année par les STEP helvétiques. Bien que relativement coûteuses et peu sûres écologiquement, l'incinération et la mise en décharge sont les deux solutions adoptées pour le traitement de ces boues. Face aux problèmes de pollution atmosphérique et de contamination possible des sols et des nappes phréatiques, des solutions nouvelles doivent être activement recherchées et appliquées. La digestion anaérobie des boues est actuellement limitée à la stabilisation des boues primaires en conditions mésophiles, ce qui permet de transformer 25 à 30% seulement de la matière organique en biogaz. Des procédés plus sophistiqués devraient être développés à l'avenir pour améliorer la dégradation des boues primaires et traiter également les boues secondaires.

En Suisse, près de 85% de la quantité toujours croissante des déchets ménagers sont actuellement brûlés dans des usines d'incinération, pour un coût compris entre 250 et 300 fr. par tonne. Malgré tout, l'incinération ne réduit le volume des ordures ménagères que d'un facteur 3 à 4 et les scories doivent à leur tour être mises en décharge. Une alternative intéressante est le compostage aérobie des déchets ménagers, des résidus, voire des surplus agricoles, qui permet leur valorisation en produisant du compost utilisable comme fertilisant pour l'agriculture et l'horticulture. Mais le compostage traditionnel ne permet que de transformer 40% du volume initial des déchets en compost, alors que 20% se retrouvent sous forme de gaz carbonique, et ce qui reste (40%) doit être mis en décharge. Par ailleurs, le contenu énergétique des déchets est perdu sous forme de chaleur.

Une autre possibilité pour dégrader les ordures ménagères est leur mise en décharge contrôlée, où a lieu une décomposition anaérobie de la matière organique avec production de biogaz. Les décharges contrôlées sont des sortes de gigantesques

digesteurs où l'on peut favoriser le dégagement gazeux par le contrôle du taux d'humidité des déchets et par la mise en place d'un système d'évacuation et de récupération du biogaz. La mise en décharge contrôlée d'une tonne d'ordures ménagères coûte environ 100 fr. et permet de produire quelque 150 à 200 m<sup>3</sup> d'un biogaz contenant 45 à 65% de méthane. Une décharge contrôlée est un gisement de biogaz exploitable pendant au moins 10 à 20 ans.

La dégradation anaérobie des ordures ménagères, des déchets organiques industriels et des résidus agricoles est également possible en digesteur, après un tri et un broyage préalables. Ces bioréacteurs sont généralement opérés en conditions thermophiles (55-60° C), pour accélérer la dégradation et stabiliser-hygiéniser le résidu digéré qui peut également être utilisé comme compost. Les techniques de fermentation solide permettent d'appliquer de grandes charges volumiques et de traiter des déchets contenant jusqu'à 30 à 35% de matière solide totale. Les ordures ménagères contenant environ 55% de matière sèche, il est nécessaire de les diluer avant de les charger dans le digesteur. Elles peuvent aussi être mélangées avec des boues de STEP avant leur traitement par digestion anaérobie.

Le taux de charge en matière organique peut atteindre 10 à 20 kg de DCO/m<sup>3</sup> par jour et la réduction est de 50 à 95% en 2 à 3 semaines en conditions mésophiles, en un peu plus d'une semaine pour des conditions thermophiles. Environ 6 à 8 m<sup>3</sup> de biogaz (55% méthane) sont produits par m<sup>3</sup> de digesteur et par jour, ce qui représente une moyenne de 130 m<sup>3</sup> de biogaz produits par tonne de déchet, ou quelque 400 m<sup>3</sup> par tonne de matière organique.

Des progrès considérables ont été accomplis au cours des dix dernières années dans la compréhension des mécanismes microbiologiques et biochimiques de la digestion anaérobie et dans la maîtrise des procédés de biométhanisation des effluents et déchets organiques. La conception et le développement de fermenteurs plus performants, plus fiables, mieux adaptés à la nature des effluents traités et relativement moins coûteux, ouvrent maintenant d'intéressantes perspectives à la digestion anaérobie. Combinant la dégradation de déchets organiques à leur valorisation énergétique, la biométhanisation constitue un excellent choix technologique pour la protection de l'environnement.

## 3. Potentiel des déchets solides et des effluents industriels

L'objectif de la présente contribution consiste à définir la nature des déchets ménagers et effluents industriels pouvant faire l'objet d'une valorisation par digestion anaérobie, d'en définir ou d'en estimer le gisement en Suisse, d'en évaluer le potentiel énergétique et de dresser l'inventaire des installations réalisées ou en cours de construction en Europe et en Suisse.

### 3.1 Définition et caractérisation

Parmi les filières qui permettent de récupérer de l'énergie à partir de la biomasse, la voie de conversion biologique apparaît comme particulièrement adaptée aux déchets humides et aux eaux usées très chargées en matières organiques dissoutes. Ces sous-produits et effluents peuvent être regroupés comme suit :

a) les déchets ménagers qui peuvent être classés en trois catégories :

1. les matières organiques fermentescibles pouvant être décomposées en un court laps de temps. Il s'agit par exemple de gazon, de déchets de récolte de fruits et légumes, déchets verts de plantes, papier de ménage humide, etc.
2. les matières organiques non ou difficilement fermentescibles, lesquelles peuvent être compostées. On y trouve notamment du bois et des déchets de plantes à forte teneur en lignine, des coquilles d'œufs, de la terre provenant de bacs à fleurs, etc.
3. les matières résiduelles qui ne peuvent être ni digérées ni compostées, comme par exemple : plastique, verre, métal, pierres, etc.

Les déchets ménagers pouvant être traités par digestion anaérobie sont constitués :

- par la fraction organique des déchets ménagers, elle-même constituée par les déchets de cuisine, les déchets de tonte de gazon et éventuellement des broyats de tailles de haies et de branchages. La composition des déchets de cuisine varie en fonction du type d'habitation, des activités et du niveau social des habitants, et selon les saisons. On peut cependant retenir les résultats d'analyses effectuées à Genève :

|                                | (en poids) |
|--------------------------------|------------|
| Epluchures légumes             | 27,1%      |
| Restes agrumes                 | 18,2%      |
| Déchets alimentaires           | 8,8%       |
| Légumes et fruits entiers      | 9,0%       |
| Pain                           | 3,6%       |
| Os                             | 2,4%       |
| Marc de café et sachets thé    | 2,8%       |
| Litières d'animaux             | 2,0%       |
| Plantes d'appartements, fleurs | 7,2%       |
| Terre (plantes d'appartements) | 6,1%       |
| Non triables                   | 12,8%      |
| Sacs poubelles                 | 1,3%       |
| Sacs plastiques                | 1,0%       |
| Emballages carton              | 0,3%       |
| Papier                         | 2,2%       |
| Indésirables, verre            | 0,2%       |
|                                | 100,0%     |

La teneur en matières sèches de cette fraction organique des déchets ménagers est en moyenne comprise entre 25 et 35% et sa teneur en matière organique est de l'ordre de 75 à 85% (en pour-cent de la matière sèche).

- par les déchets assimilés aux déchets ménagers, tels que fruits et légumes (refus et invendus des grandes surfaces commerciales), déchets de cuisine de restauration collective, etc.

b) les déchets et les effluents industriels, dont les producteurs se situent dans les secteurs des industries agro-alimentaires, chimiques et pharmaceutiques. Les domaines d'activité suivants peuvent être mentionnés :

- lait et transformation du lait
- fruits et légumes : élaboration et mise en conserve
- viande et transformation de la viande
- produits surgelés, préparation de potages et de repas préfabriqués
- graisses et huiles alimentaires
- sucre
- confiserie, chocolat, crèmes, glaces
- pain et produits de boulangerie
- pommes de terre et dérivés
- pâtes alimentaires et riz : fabrication et raffinage
- minoteries ; fourrages et aliments pour animaux
- café et thé : élaboration

- viticulture
- distilleries
- brasseries
- cidreries, boissons sans alcool
- industries chimiques et pharmaceutiques (fermentations)
- tanneries et industries du cuir
- industries de la cellulose et des fibres textiles

Les déchets solides d'origine industrielle sont constitués par les sous-produits issus des procédés de fabrication qui ne trouvent pas de débouchés en compostage (légumes, champignons, viticulture, sucreries, etc.) ou en alimentation animale (fruits, déchets d'abattoirs, céréales et huileries, mélasses et tourteaux de sucreries, marcs de café, etc.) et qui, trop souvent, sont éliminés dans des usines d'incinération ou mis dans des décharges plus ou moins contrôlées !

Les effluents industriels se caractérisent par des fluctuations de production au cours de l'année et souvent aussi durant la journée, si bien que d'importantes variations peuvent être observées sur les quantités et les concentrations des constituants produits. Elles peuvent être particulièrement fortes lorsque les entreprises de transformation ne fonctionnent que quelques semaines ou quelques mois par an (par exemple: sucreries, distilleries, conserveries).

Le tableau suivant donne quelques valeurs indicatives au sujet des volumes d'eaux usées produites par diverses industries de transformation, ainsi que leurs caractéristiques en termes de pollution.

(DBO<sub>5</sub>: Demande Biochimique en Oxygène à 5 jours = quantité d'oxygène consommée durant cinq jours pour oxyder par voie biologique les matières organiques présentes dans l'eau.)

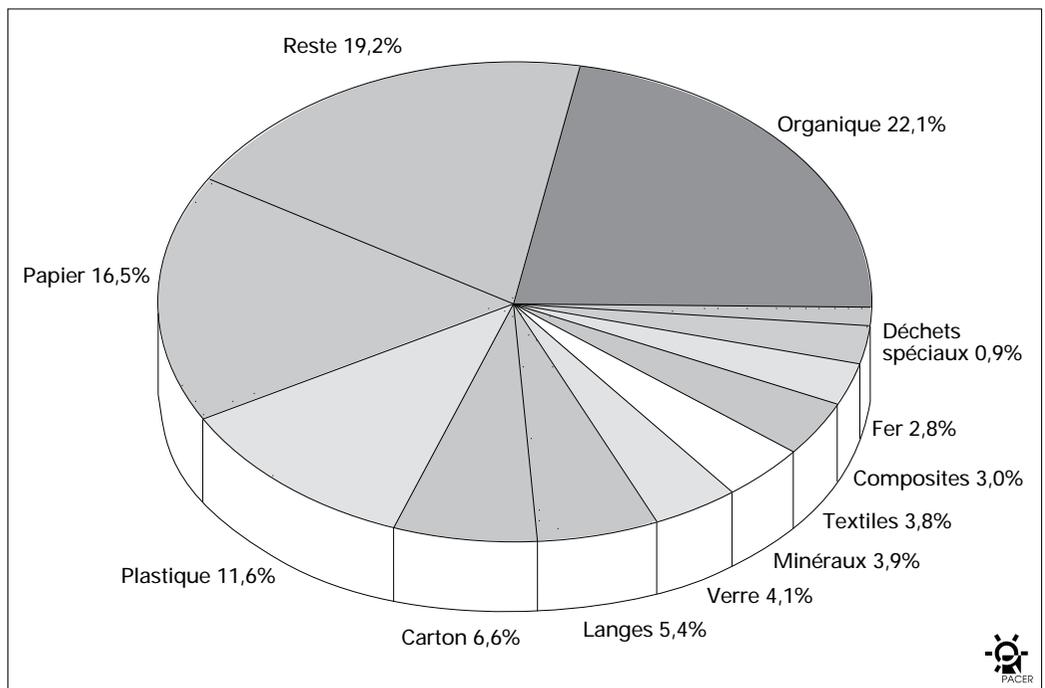
|  Type d'industrie | Volume d'eaux résiduares   | DBO <sub>5</sub>  | Equivalent -habitant   |
|--|--|---|--|
| LAITERIES<br>(sans eaux de refroidissement)  | 0.5 - 3.0 m <sup>3</sup> / t lait  | 0.5 - 3.0 kg / t lait   | 9.0 - 55.0 / t lait  |
| ABATTOIRS<br>- Bovins (400 kg poids vif)<br>- Porcs (100 kg poids vifs)<br>- Volailles               | 0.6 - 9.6 m <sup>3</sup> / bête<br>0.3 - 0.4 m <sup>3</sup> / bête<br>20.0 - 40.0 l / abattage | 2.4 - 10.4 kg / bête<br>0.43 - 2.1 kg / bête<br>6.0 - 30.0 g / abattage | 44.0 - 192.0 / bête<br>8.0 - 39.0 / bête<br>0.1 - 0.5 / abattage |
| TRANSFORMATION de POISSONS   | 24.0 m <sup>3</sup> / t  | 41.0 kg / t   | 760.0 / t  |
| ATELIERS D'EQUARRISSAGE  | 0.9 - 1.1 m <sup>3</sup> / t   | 1.8 - 4.6 kg / t  | 33.0 - 85.0 / t  |
| BRASSERIES   | 0.4 - 1.2 m <sup>3</sup> / hl bière  | 0.4 - 2.7 kg / hl bière   | 7.0 - 50.0 / hl bière  |
| DISTILLERIES de FRUITS   | 0.5 - 0.8 m <sup>3</sup> / j   | 6.0 - 35.0 kg / j   | 110.0 - 650.0 / j  |
| FABRICATION JUS DE FRUITS  | —  | 0.45 - 0.9 /100 kg fruits   | 8.0 - 17.0 / 100 kg fruits                                       |
| INDUSTRIE DES BOISSONS NON ALCOOLIQUES, LIMONADES  | 1.9 m <sup>3</sup> / 1000 bouteilles   | 1.24 kg / 1000 bouteilles   | 23.0 / 1000 bouteilles   |

| Type d'industrie  | Volume d'eaux résiduares  | DBO <sub>5</sub>   | Equivalent-habitant   |
|---|---|--|---|
| <b>CONSERVIERIES</b><br>- Pois<br>- Carottes<br>- Haricots verts<br>- Tomates<br>- Betteraves rouges<br>- Plats complets<br>- Salades mixtes<br>- Aliments pour bébés<br>- Fraises<br>- Pommes<br>- Poires<br>- Cerises<br>- Abricots | 10.0 - 125.0 m <sup>3</sup> } par 1000<br>7.0 - 23.0 m <sup>3</sup> } boîtes<br>3.7 - 5.3 m <sup>3</sup> } de 1 kg<br>1.8 - 3.6 m <sup>3</sup> / t<br>4.5 - 35.0 m <sup>3</sup> / t<br>30.0 - 50.0 m <sup>3</sup> / t<br>50.0 - 100.0 m <sup>3</sup> / t<br>80.0 - 160.0 m <sup>3</sup> / t<br>30.0 - 40.0 m <sup>3</sup> / t<br>34.0 m <sup>3</sup> / t<br>8.0 - 24.0 m <sup>3</sup> / t<br>4.0 - 10.0 m <sup>3</sup> / t<br>13.0 m <sup>3</sup> / t | 7.0 - 18.0 kg } par 1000<br>6.0 - 32.0 kg } boîtes<br>7.0 - 11.6 kg } de 1 kg<br>2.1 - 3.5 kg / t<br>15.0 - 20.0 kg / t<br>14.0 - 25.0 kg / t<br>8.0 - 30.0 kg / t<br>30.0 - 69.0 kg / t<br>50.0 - 60.0 kg / t<br>24.0 kg / t<br>6.0 - 36.0 kg / t<br>7.0 kg / t<br>6.0 kg / t | 130.0 - 330.0 } par 1000<br>110.0 - 590.0 } boîtes<br>320.0 - 215.0 } de 1 kg<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>— |
| ENTREPRISES DE VINIFICATION   | 1650.0 - 1870.0 m <sup>3</sup> / 100 ha de vignoble   | 280.0 - 3530.0 m <sup>3</sup> / 100 ha de vignoble   | —   |
| FABRICATION DE CHOUCROUTE   | 5.0 - 9.0 m <sup>3</sup> /t choux   | 4.2 - 9.2 kg / t choux   | 80.0 - 170.0 / t choux  |
| INDUSTRIE DES LEVURES   | 21.0 m <sup>3</sup> / t mélasse   | 150.0 kg / t mélasse   | 2800.0 / t mélasse  |
| <b>INDUSTRIE POMMES DE TERRE</b><br>- Eaux de transport + lavage<br>- Installation d'étuvage<br>- Eaux d'épluchage<br>• FLOCONS et SEMOULES<br>• POMMES-CHIPS<br>• FECULE   | 5.0 - 8.0 m <sup>3</sup> / t<br>0.2 m <sup>3</sup> / t<br>—<br>13.0 - 20.0 m <sup>3</sup> / t<br>16.6 m <sup>3</sup> / t<br>4.0 - 10.0 m <sup>3</sup> / t   | 1.0 - 3.0 kg / t<br>0.9 - 1.8 kg / t<br>3.0 - 5.0 kg / t<br>20.0 - 39.0 kg / t<br>11.3 kg / t<br>19.0 - 35.0 kg / t  | 19.9 - 56.0 / t<br>17.0 - 34.0 / t<br>56.0 - 93.0 / t<br>17.0 - 34.0 / t<br>210.0 / t<br>350.0 - 650.0 / t                      |
| <b>AMIDONNERIE</b><br>• AMIDON DE MAÏS<br>• AMIDON DE BLÉ<br>• AMIDON DE RIZ  | 0.4 - 3.0 m <sup>3</sup> / t<br>8.0 - 12.0 m <sup>3</sup> / t<br>8.0 - 12.0 m <sup>3</sup> / t  | 0.8 - 10.8 kg / t<br>48.5 - 57.0 kg / t<br>5.4 - 9.2 kg / t  | 15.0 - 200.0 / t<br>900.0 - 1060.0 / t<br>100.0 - 170.0 / t   |
| SUCRERIES   | 0.5 - 1.0 m <sup>3</sup> / t betterave  | 0.5 - 1.0 kg / t betterave   | 0.5 - 1.0 / t betterave   |
| <b>INDUSTRIE PHARMACEUTIQUE</b><br>• FABRICATION ANTIBIOTIQUES<br>- Bouillons de cultures usés<br>- Boues de mycélium<br>- Eaux de lavage   | 120.0 kg/m <sup>3</sup> bouillon culture<br>1.7 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> bouillon culture   | 4.0 - 8.0 g / l<br>>100.0 g / l<br>600.0 - 2500.0 mg / l   |   |
| TANNERIES   | 1090.0 m <sup>3</sup> / 500 peaux   |  |   |
| <b>INDUSTRIE TEXTILE</b><br>• Rouissage du lin<br>• Soieries<br>• Blanchisseries coton<br>• Lavage de laine   | 40.0 - 60.0 m <sup>3</sup> / t paille<br>70.0 m <sup>3</sup> / t soie<br>50.0 - 100.0 m <sup>3</sup> / t coton<br>100.0 m <sup>3</sup> / t laine  | 1.3 - 3.6 g / l<br>820.0 - 985.0 mg / t soie<br>—<br>1.2 - 22.0 g / l  | 300.0 / 100 kg lin<br>—<br>250.0 - 300.0 / t coton<br>—   |
| <b>INDUSTRIE PAPETIERE</b><br>• Transformation du bois;<br>cellulose et pâte à papier<br>• Fabrication pâte à papier<br>• Papeteries, cartonneries<br>• Fabriques panneaux de fibres  | 160.0 - 300.0 m <sup>3</sup> /t produit<br>1000.0 m <sup>3</sup> / pâte blanchie<br>125.0 - 2000.0 m <sup>3</sup> /t papier<br>5.0 - 50.0 m <sup>3</sup> / t bois   | —<br>—<br>3.0 g / l<br>33.0 - 100.0 kg / t bois  | 600.0 - 6000.0 / t produit<br>3500.0 - 5000.0 / t pâte<br>51.0 - 1254.0 / t papier<br>—   |

### 3.2 Potentiel des déchets solides méthanisables

En Suisse, une étude réalisée par ARBI-PROBAG, sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, a permis en 1990 d'estimer les quantités de déchets organiques solides ménagers et industriels, disponibles pour une valorisation par digestion anaérobie.

La production de déchets ménagers a atteint 3 millions de tonnes en 1990 dans notre pays. La répartition de cette production selon les diverses catégories de déchets résulte de campagnes d'analyses réalisées par ARBI-PROBAG, dont les résultats figurent ci-dessous :



On peut ainsi classer les ordures ménagères en fonction de leur aptitude à être traitées par méthanisation, et on obtient la ventilation suivante :

|   |     |     |           |                    |
|---|-----|-----|-----------|--------------------|
| • Substances organiques digestibles     |     | 27% |           | 810 000 t          |
| • Fraction difficilement digestible     |     | 32% |           | 960 000 t          |
| - difficilement digestible, compostable | 22% |     | 660 000 t |                    |
| - papier recyclable                     | 10% |     | 300 000 t |                    |
| • Matières résiduelles                  |     | 41% |           | 1 230 000 t        |
| <b>TOTAL</b>                            |     |     |           | <b>3 000 000 t</b> |

Cette dernière évaluation est basée sur des résultats de tris effectués en 1988 et 1989 sur près de 1500 sacs à ordures, en région zurichoise (sacs «gris»: sans collecte séparée) et à Schaffouse (sacs «verts»: avec collecte séparée de la fraction organique).

Pour les déchets industriels, l'étude déjà mentionnée fournit, sur la base d'enquêtes réalisées auprès des producteurs, des évaluations quantitatives qui figurent sur le tableau suivant:

|  | DECHETS<br>[t. mat. fraîche/an]<br>* | MAT. SECHES<br>COMPOST. [t/a]<br>** | MAT. ORG.<br>DIGEST. [t/a]<br>*** |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Industrie laitière  | 2 000                                | 3 000                               | 2 000                             |
| Production et transformation légumes  | 50 000                               | 5 000                               | 4 500                             |
| Abattoirs   | 30 000                               | 2 000                               | 1 700                             |
| Transformation de viande  | 20 000                               | —                                   | —                                 |
| Préparation de potages et condiments  | 6 000                                | 2 000                               | 1 500                             |
| Industrie sucrière  | 40 000                               | 10 000                              | 8 000                             |
| Moulins à céréales et huiles  | 10 000                               | 1 000                               | 700                               |
| Elaboration de café et de thé   | 40 000                               | 6 000                               | 5 000                             |
| Industrie vinicole  | 10 000                               | 10 000                              | 7 000                             |
| Production et transformation de fruits  | 30 000                               | 7 000                               | 5 000                             |
| Brasseries  | 20 000                               | —                                   | —                                 |
|   |                                      |                                     |                                   |
| Industrie papetière   | 100 000                              | 30 000                              | 10 000                            |
| Production de champignons   | 500                                  | 60                                  | 50                                |
| Aliments divers (boulangerie, levurerie, etc.)                                    | 1 000                                | 3 000                               | 2 500                             |
| Autres déchets (cuirs, tabacs, etc.)  | 1 200                                | 500                                 | 400                               |
| Cotons, textiles naturels   | 2 000                                | 1 600                               | —                                 |
|   |                                      |                                     |                                   |
| TOTAL   | 363 000                              | 81 000                              | 48 500                            |

\* Poids humide des déchets solides frais.

\*\* Matière sèche compostable,  
y compris MS effluents.

\*\*\* Matière organique digestible,  
y compris MO effluents.

Ces chiffres appellent les commentaires spécifiques aux secteurs d'activités mentionnés ci-après :

#### © *Industrie laitière*

Les déchets sont pour l'essentiel constitués d'eaux usées présentant une teneur en matières sèches de l'ordre de 1%; ces effluents sont dirigés sur des stations d'épuration communales. Le lactosérum peut, quant à lui, être utilisé pour la production de biogaz dans la mesure ou d'autres valorisations traditionnelles posent des problèmes (affouragement porcin, poudre de petit-lait). Les déchets solides issus de la production fromagère sont assez limités.

#### © *Production et transformation des légumes*

La quantité annuellement traitée est d'environ 500 000 tonnes de légumes par an. Les déchets qui résultent des processus industriels sont estimés à 100 000 tonnes par an, dont la moitié est épandue sur les champs.

L'élimination du solde (50 000 tonnes par an) est assurément problématique car, bien souvent, ces déchets sont acheminés vers des usines d'incinération. Ces sous-produits peuvent être utilisés en alimentation animale (déchets de carottes, et à un degré moindre: pulpes de tomates, racines d'endives, pulpes et tubercules de pommes de terre, haricots verts et petits pois en conserveries).

#### © *Abattoirs et transformation de viande*

Sont abattus annuellement en Suisse 500 000 têtes de gros bétail (veaux - vaches - taureaux), 3 300 000 porcs et 200 000 moutons, chèvres et chevaux. Les déchets ainsi produits peuvent être utilisés en affouragement porcin, avec les problèmes d'infrastructures qui sont liés aux exigences vétérinaires édictées en la matière. Les contenus de panses qui présentent une faible valeur nutritive peuvent difficilement être incorporés à la ration alimentaire des porcs. En outre, d'importants volumes d'eaux usées sont rejetés en stations d'épuration.

#### © *Industrie sucrière*

Les 15 000 hectares de cultures produisent environ 0,85 à 1,0 millions de tonnes de betteraves sucrières. Seul  $\frac{1}{9}$  du poids initial de la betterave sera transformé en sucre cristallisé. La pulpe de betterave et la mélasse sont appréciées en alimentation animale. Le problème le plus important reste cependant lié aux eaux usées provenant du lavage et du processus chimique d'extraction du sucre brut.

#### © *Elaboration de café et de thé*

La Suisse importe 62 000 tonnes par an de café en grains, dont 6000 tonnes par an repartent du pays sous forme de produits raffinés. Le refus de la fabrication d'extrait de café constitue le plus important gisement de déchets dans ce secteur, dont l'élimination s'avère parfois problématique, bien que ces sous-produits puissent être utilisés en affouragement bovin ou incorporés en compostage. Dans le secteur du thé, c'est environ 1000 tonnes par an de produit brut (thé noir et herbes) qui sont importées pour la production de thé en sachets. L'utilisation des déchets de thé en alimentation animale est considérée comme une solution transitoire par les professionnels, car la qualité nutritive de ce sous-produit équivaut à celle d'un mauvais foin.

#### © *Industrie vinicole*

Les déchets issus de la transformation du raisin sont principalement constitués de marcs, rafles et lies; ils sont pratiquement produits durant une période d'un mois par année. Les rafles, à prédominance ligneuse, peuvent être traitées par compostage. Les marcs de raisins sont en quasi totalité utilisés pour la fabrication d'eaux-de-vie (marc, lie); le sous-produit restant après fermentation alcoolique et distillation peut encore être valorisé par digestion.

#### © *Production et transformation de fruits*

On trouve dans ce secteur d'activités une abondance de producteurs et de produits: boissons (jus de fruits, alcools), vinaigre, fruits secs, pectine et arômes. Traditionnellement agricoles, ces spécialités sont désormais centralisées dans des entreprises de transformation. Les déchets et effluents souvent fortement chargés sont produits au cours des processus suivants:

- eaux de lavage des fruits avant pressurage;
- pulpes fraîches après pressurage;
- refus de filtration et clarification durant le traitement du moût;
- vinasses ou marcs provenant de la distillation des fruits fermentés;
- sous-produits de productions spéciales (concentrats, pectine, etc.);
- jus de clarification en cidrerie;
- produits avariés ou imparfaits.

#### © *Brasseries*

La Suisse compte 35 brasseries dont la moyenne annuelle de production est de 120 000 hectolitres par établissement. Les déchets organiques solides qui y sont produits sont les drèches, obtenues en fin

de brassage par filtration du moût et qui sont composées par les enveloppes celluloses du malt concassé et les levures extraites par filtres-presses lors de la clarification finale de la bière. Les drèches se caractérisent par leur richesse en azote et en matières grasses et elles sont particulièrement recherchées en alimentation animale (production laitière notamment), si bien qu'actuellement la demande surpasse l'offre. Par contre, les levures de pressage peuvent constituer un sous-produit dont l'écoulement est problématique.

#### © Industrie papetière

Ce secteur comporte deux fabrications, celle de la pâte à papier et celle du papier et carton; certains établissements intègrent les deux productions. Le blanchiment des pâtes à papier produit des «liqueurs noires» dont le traitement par évaporation produit des condensats. Le désencrage effectué par contre-lavage ou flottation mécanique génère des effluents. Toutes ces eaux usées sont généralement dégradées dans des stations d'épuration aérobies; les boues qui y sont produites constituent un gisement intéressant pour la digestion. Certains procédés de méthanisation permettent également le traitement direct des effluents.

Les déchets d'entretien paysager constituent un gisement de substrats organiques méthanisables dont le potentiel a été évalué par ARBI-PROBAG. Les tontes d'herbe et de gazon (pelouses de jardins et piscines, terrains de sport) ne sont guère appréciées en compostage (échauffements et émissions malodorantes); 20 000 hectares de ces espaces d'agrément produisent environ 40 000 tonnes de matières sèches par an. Quant aux talus et bords de routes et voies de chemins de fer, ils produisent près de 6000 tonnes de matières sèches par an; les teneurs élevées de ces résidus en métaux lourds les rendent inutilisables pour le compostage.

L'usage excessif ou inadapté d'engrais a conduit au développement de plantes aquatiques dans nos lacs et nos grands fleuves. Cette biomasse de déchets peut être estimée à 3000 tonnes de matières sèches par an.

Enfin, les feuilles récoltées lors du nettoyage automnal des routes et des parcs constituent un gisement qui, à Zurich, a été évalué à environ 10 kg / habitant. Pour la Suisse, une estimation grossière basée sur cette donnée permet d'évaluer le potentiel à environ 20 000 tonnes de matières organiques par an.

En résumé, le potentiel des déchets organiques digestibles se décompose ainsi :

|                            |         |                  |
|----------------------------|---------|------------------|
| Déchets ménagers           | 810 000 | tonnes / an      |
| Déchets industriels        | 50 000  | tonnes M.O. / an |
| Déchets entretien paysager | 60 000  | tonnes M.O. / an |

### 3.3 Potentiel des effluents industriels méthanisables

Une approche visant à quantifier les volumes et les caractéristiques physico-chimiques des eaux usées produites par l'industrie est extrêmement délicate à établir. L'enquête réalisée par ARBI-PROBAG dans le cadre de l'évaluation du potentiel biogaz des déchets industriels, en Suisse, a permis d'obtenir une estimation quantitative assez complète des déchets solides et des boues résultant de processus de transformation ou de traitement des eaux résiduaires.

A titre indicatif, on peut reprendre quelques valeurs partielles ou extrapolées sur la base des informations communiquées par les industries suivantes :

|                                       |       |                                   |
|---------------------------------------|-------|-----------------------------------|
| – Industrie laitière:                 | 1.0   | mio m <sup>3</sup> effluents / an |
| – Industrie papetière:                | 12.0  | mio m <sup>3</sup> effluents / an |
| – Brasseries:                         | 1.0   | mio m <sup>3</sup> effluents / an |
| – Industrie sucrière:                 | 0.595 | mio m <sup>3</sup> effluents / an |
| – Abattoirs et transformation viande: | 3.5   | mio m <sup>3</sup> effluents / an |
| – Elaboration de fruits:              | 0.1   | mio m <sup>3</sup> effluents / an |
| – Industrie vinicole:                 | 0.245 | mio m <sup>3</sup> effluents / an |

A court terme, on peut considérer comme valable pour la Suisse le scénario établi par la Commission des Communautés Européennes, selon lequel la méthanisation peut devenir une étape biologique classique dans le traitement des eaux résiduaires industrielles, déplaçant ainsi l'étape biologique aérobie à un simple traitement de finition. Elle s'intégrera aux technologies globales des productions industrielles, épurant les eaux usées et rendant les procédés de transformation moins gourmands en énergie.

### 3.4 Inventaire des réalisations existantes en Europe et en Suisse

Deux enquêtes réalisées entre 1982-1983 et 1986-1988 par la Communauté Européenne, Direction générale «Sciences, Recherche et Développement», ont permis d'établir un relevé des installations de biogaz agricoles et industrielles dans les états membres et d'obtenir des indications concernant l'Autriche, la Finlande, la Pologne et la Suisse.

Les installations industrielles référencées dans les pays de la Communauté sont au nombre de 195 et elles présentent un volume total de réacteurs de 487 000 m<sup>3</sup>.

Sur la base de ces indications et des informations publiées par ailleurs par divers constructeurs, on peut établir les recensements suivants :

#### DECHETS SOLIDES

|  Site Pays | Constructeur              | Déchets Type et capacité                                     | Caractéristiques   | Mise en service      |
|---|---------------------------|--|--|----------------------|
| LA BUISSE<br>- France -   | VALORGA                   | Ordures ménagères<br>16 000 t / an                           | 1 digesteur 500 m <sup>3</sup>   | 1984                 |
| AMIENS<br>- France -  | VALORGA                   | Ordures ménagères<br>+ boues industrielles<br>110 000 t / an | 3 digesteurs de 2400 m <sup>3</sup> chacun   | 1988                 |
| TAMARA'A NUI<br>TAHITI<br>- France -  | VALORGA                   | Déchets verts et<br>ménagers (70%)<br>80 000 t / an          | 2 digesteurs de 2200 m <sup>3</sup> chacun   | 1991                 |
| TILBURG<br>- Pays-Bas -   | VALORGA /<br>PROTECH      | Fraction organique<br>ordures ménagères<br>52 000 t / an     | 2 digesteurs de 3300 m <sup>3</sup> chacun   | (prévue)<br>1993     |
| GENT<br>- Belgique -  | OWS / DRANCO              | Fraction organique<br>déchets ménagers                       | - Pilote - digesteur de 56 m <sup>3</sup>  | 1984                 |
| BRECHT<br>- Belgique -  | OWS / DRANCO              | Fraction organique<br>déchets ménagers<br>10 500 t / an      | 1 digesteur 808 m <sup>3</sup>   | 1991                 |
| ARNHEM<br>- Pays-Bas -  | BIOCEL<br>HEIDEMIJ        | Fraction organique<br>déchets ménagers                       | - Pilote - capacité 5 m <sup>3</sup><br>- Pilote - capacité 60 m <sup>3</sup><br>- Pilote - capacité 450 m <sup>3</sup>                    | 1988<br>1990<br>1992 |
| GARCHING<br>- Allemagne -   | BTA                       | Déchets organiques<br>ménagers                               | - Pilote -   | 1985                 |
| HELSINGØR<br>- DANEMARK -   | BTA                       | Déchets organiques<br>ménagers<br>20 000 t / an              | réacteur de dissolution: 2 x 20 m <sup>3</sup><br>réacteurs d'hydrolyse: 170 / 125 m <sup>3</sup><br>méthanisation: 2 x 800 m <sup>3</sup> | 1991                 |
| GLATTBRUGG<br>- Suisse -  | KOMPOGAS<br>SCHMID / AFAG | Déchets jardins<br>970 kg / j                                | - Pilote - digesteur de 15 m <sup>3</sup>  | 1990                 |

| Site<br>Pays                | Constructeur                              | Déchets<br>Type et capacité  | Caractéristiques  | Mise en<br>service |
|-----------------------------|---|--|---|--------------------|
| RÜMLANG<br>- Suisse -       | KOMPOGAS<br>SCHMID / AFAG                 | Déchets organiques<br>ménagers - 3300 t / an                                     | 1 digesteur 250 m <sup>3</sup>  | 1992               |
| LULLY<br>- Suisse -         | EREP SA                                   | Déchets agricoles et<br>organiques ménagers                                      | - Pilote - 4 x 30 m <sup>3</sup>  | 1992               |
| ROTTWEIL<br>- Allemagne -   |   | Déchets de jardins<br>et de cuisines<br>4 à 5000 habitants                       | - Pilote - digesteur 45 m <sup>3</sup>  |                    |
| BREMEN<br>- Allemagne -     | RIJKENS<br>A.N. MASCHINEN-<br>BAU         | Déchets de jardins,<br>de cuisines et de<br>marchés de gros                      | Réacteur d'hydrolyse: 20 m <sup>3</sup><br>Fermenteur méthanique<br>Boxes de compostage | 1987               |
| HILDESHEIM<br>- Allemagne - | ARENHA /<br>F.N.<br>FERNWÄRME-<br>TECHNIK | Boues épuration:<br>1 à 2 m <sup>3</sup> / j<br>Déchets org. mén.:<br>350 kg / j | - Pilote - digesteur de 55 m <sup>3</sup>   | 1989               |
| BELLARIA<br>- Italie -      | ITALBA                                    | Boues d'épuration et ordures<br>triées en usine (84 t / j)<br>74 000 habitants   | 2 digesteurs de 1700 m <sup>3</sup> chacun  | 1985               |

## EFFLUENTS INDUSTRIELS

## a) en Suisse

|  Secteur<br>industriel | Constructeur<br>(Procédé)  | Industrie  | Caractéristiques<br>digesteur | Mise en<br>service |
|---|--|--|-------------------------------|--------------------|
| INDUSTRIE<br>SUCRIERE   | SULZER<br>décanteur-digesteur à flux<br>descendant et boues en<br>suspension | SUCRERIE ET RAFFINERIE<br>D'AARBERG SA / Aarberg | 6500 m <sup>3</sup>           | 1985               |
| BRASSERIE   | SULZER (ESMIL)<br>lit de boue à flux ascendant                               | BRAUEREI FELTSCHLÖSSCHEN AG /<br>Rheinfelden     | 2 x 400 m <sup>3</sup>        | 1991               |
| DISTILLERIES  | PEC (PURAC)<br>contact anaérobie   | OVA PRODUKTE AG / Affoltern                      | 1200 m <sup>3</sup>           | 1981               |
|   | DEGREMONT<br>contact anaérobie   | CIDIS SA / Cossonay                              | 300 m <sup>3</sup>            | 1987               |
| TRANSFORMATION<br>de<br>POMMES de TERRE   | GIST BROCADES (BIOTHANE)<br>lit de boue à flux ascendant                     | CISAC SA / Cressier                              | 583 m <sup>3</sup>            | 1980               |
|   | ALPHA UMWELTTECHNIK (PAQUES)<br>lit de boue à flux ascendant                 | ZWEIFEL POMY CHIPS AG /<br>Spreitenbach          | 95 m <sup>3</sup>             | 1991               |
|   | ALPHA UMWELTTECHNIK (PAQUES)<br>lit de boue à flux ascendant                 | KADI KARTOFFELFLOCKENFABRIK AG /<br>Langenthal   | 190 m <sup>3</sup>            | 1991               |
| INDUSTRIE<br>PAPETIERE  | GIST BROCADES (BIOTHANE)<br>lit de boue à flux ascendant                     | MODEL AG VERPACKUNGEN /<br>Weinfelden            | 650 m <sup>3</sup>            | 1989               |
|   | ALPHA UMWELTTECHNIK (PAQUES)   | KARTONFABRIK NIEDERGÖSGEN AG /<br>Niedergösgen   | 1000 m <sup>3</sup>           | 1991               |

b) en Europe (CEE)

La plupart des installations de digestion d'effluents industriels sont implantées en Allemagne (47), aux Pays-Bas (35) et en France (33). 49 unités de méthanisation sont intégrées à des distilleries, 39 dans l'industrie sucrière et 21 dans l'industrie de transformation de la pomme de terre. Au total, 23 secteurs d'activités industrielles ont mis en œuvre la digestion anaérobie pour le traitement de leurs eaux usées.

### 3.5 Evaluation du potentiel énergétique

Diverses données expérimentales et bibliographiques ont permis à ARBI-PROBAG de fixer les productions spécifiques des différents types de déchets. Elles sont récapitulées dans le tableau suivant :

|  Types de déchets | Production spécifique de biogaz [m <sup>3</sup> /kg M.O.] |
|--|---|
| Déchets ménagers<br>(collecte sélective pouvant comporter des éléments ligneux)                      | 0.45  |
| Industrie laitière   | 0.6   |
| Production et transformation légumes   | 0.6   |
| Abattoirs  | 0.45  |
| Transformation viande  | 0.5   |
| Préparation potages et condiments  | 0.4   |
| Industrie sucrière   | 0.65  |
| Moulins céréales   | 0.4   |
| Elaboration café et thé  | 0.6   |
| Industrie vinicoles  | 0.4   |
| Production et transformation de fruits   | 0.55  |
| Brasseries   | 0.5   |
| Industrie papetière  | 0.35  |
| Production champignons   | 0.6   |
| Aliments divers (levures, etc.)  | 0.4   |
| Autres déchets (tabac, cuir, etc.)   | 0.45  |
| Déchets d'entretien paysager<br>(gazons, plantes aquatiques, feuilles, broyats ligneux)              | 0.45  |

En reprenant les quantités de déchets organiques évaluées précédemment, et en affectant à chacune des catégories inventoriées le potentiel en biogaz correspondant, on obtient le

Potentiel suisse en biogaz à partir de déchets et effluents industriels et ménagers:

|   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
| a) à partir de<br>DECHETS<br>MENAGERS                 | 80 mio m <sup>3</sup> /an |  1.8 PJ/an |
| b) à partir de<br>DECHETS<br>INDUSTRIELS              | 24 mio m <sup>3</sup> /an | 0.5 - 0.6 PJ/an   |
| c) à partir d'<br>EFFLUENTS<br>INDUSTRIELS            | (théorique)               | 2.5 - 3.0 PJ/an   |
| d) à partir des<br>DECHETS<br>D'ENTRETIEN<br>PAYSAGER | 27 mio m <sup>3</sup> /an | 0.6 PJ/an   |

Ainsi, le potentiel théorique total de ces déchets et effluents se monte à 5,4 – 6,0 PJ / an.

En tenant compte de l'énergie auto-consommée par le processus de digestion et de l'énergie « grise » contenue dans les installations de méthanisation, on peut admettre que le potentiel utilisable constitué par les déchets solides (à l'exclusion des effluents industriels) peut atteindre 1,2 PJ / an. En tenant compte par ailleurs des économies de transport et de fabrication de tourbe, de terre et d'engrais de synthèse, ce chiffre peut être porté à 1,5 PJ / an.

Ce chiffre peut être considéré comme faible si on le compare à la consommation suisse en énergie finale qui, en 1989, atteignait 779 PJ / an (dont 12 PJ / an pour le bois). Il faut cependant considérer que le biogaz est une source d'énergie renouvelable, respectueuse de l'environnement et à fort contenu énergétique qui, par ailleurs, contribue à compenser les pertes en humus des sols suisses et à rétablir les équilibres écologiques. Tous ces aspects restent à exprimer en termes économiques.

## 4. Production de biogaz à partir de déchets solides

### 4.1 Technologie de la digestion des déchets solides

La technologie de la digestion se compose des étapes de préparation du substrat, du processus de digestion proprement dit et du post-traitement.

#### Préparation des déchets biogènes

Une préparation soignée des déchets biogènes est profitable, car la digestion qui y est raccordée est nettement améliorée grâce à cette étape. La préparation influence aussi bien la composition des matières que leurs propriétés. Le but de la préparation mécanique est de nettoyer les ordures produites, de réduire leurs dimensions et de les désagréger, et enfin d'en réduire le volume afin d'améliorer leur aptitude à être manipulées.

Pour la modification de la composition de la matière, les étapes suivantes se présentent :

- contrôle visuel: enlèvement des gros corps étrangers tels que plastiques, verre et métaux non magnétiques;
- tri magnétique: enlèvement des métaux magnétiques et des parties métalliques telles que vis et boîtes en fer;
- tri balistique et tri par ventilation: enlèvement des matières qui ne peuvent pas être retirées par les méthodes précédentes;
- tamisage: obtention de fractions grossières, lesquelles peuvent être traitées par des procédés adaptés.

Pour la modification des propriétés de la matière, on dispose des étapes de process suivantes :

- broyage: augmentation de la surface spécifique au moyen d'un broyeur à marteau ou grâce à une cisaille rotative. L'expérience a montré que les cisailles rotatives à mouvement lent devaient être préférées aux broyeurs à marteaux à mouvement rapide, car les premières produisent moins de brèves métalliques que les secondes, ce qui a pour conséquences de réduire les nuisances résultantes en métaux lourds et de diminuer les frais d'exploitation provoqués par l'usure des équipements. Le mode de travail des cisailles rotatives permet d'effiler la matière organique au lieu de la hacher, d'où résulte une plus grande surface spécifique que lors d'une préparation par shredder;

- broyage humide (dissolution): désagrégation mécanique en machines (pulpeurs) comme c'est le cas dans la préparation du vieux papier;
- détrempeage: mouillage des déchets organiques par de l'eau de process, laquelle, dans certains procédés, est recyclée. Lors du mouillage du matériau frais, on réalise également un ensemencement en micro-organismes qui sont contenus dans l'eau recirculée;
- pré-traitement thermo-alcalin: décomposition assistée chimiquement par ajout alcalin dans un réacteur spécial et chauffé. Eventuellement, injection de vapeur pour intensifier la décomposition.

Le rendement de décomposition est largement influencé par l'effilage du matériau sortant. Le degré requis pour le broyage est dicté par les exigences particulières de chaque procédé de digestion; il se situe, en règle générale, entre 3 et 10 cm. La fraction granulométrique désirée est le plus souvent obtenue par tamisage. La teneur en matières sèches (MS) souhaitée pour la fraction organique dépend également du procédé de digestion envisagé. S'il s'agit d'une digestion de matière solide, la teneur en MS se situe alors, en règle générale, entre 25 et 35%, ce qui correspond d'ailleurs au taux de MS des déchets biogènes. Dans le cas d'une digestion humide, on doit, lors du pré-traitement, ajouter la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une boue pompable (MS: 12 - 18%).

#### Digestion des déchets biogènes

On opère une distinction entre les procédés de digestion de déchets biogènes solides, monoétapes et biétapes. Dans les premiers, l'hydrolyse, l'acidification et la méthanisation se déroulent dans la même cuve, alors que pour les procédés biétapes, l'hydrolyse et l'acidification sont nettement séparés de la méthanisation. Une autre possibilité de traitement est constituée par la codigestion, qui permet de digérer des déchets solides et des boues d'épuration urbaines dans un digesteur de station d'épuration.

La conduite de process monoétape se caractérise par le fait que l'hydrolyse des biopolymères (cellulose, hémi-cellulose, protéines et lipides), la digestion des oligomères et monomères en acides organiques, et enfin également la méthanogénèse se déroulent simultanément dans un unique réacteur. Il en résulte clairement qu'un procédé monoétape ne permet pas d'optimiser individuellement

une étape de décomposition sans, en même temps, modifier les conditions pour les autres étapes. Les micro-organismes participant à l'ensemble du processus forment une biocénose; les produits de décomposition d'un groupe sont en même temps les substrats du groupe suivant; ces groupes optimisent de façon largement «automatique» les cycles de régulation du processus.

Les procédés monoétapes sont exploitables aussi bien par charge (batch) qu'en continu. Les installations connues de digestion de déchets solides seront, sous nos latitudes, exclusivement exploitées en continu.

Les procédés monoétapes ont l'avantage d'ouvrir des possibilités de techniques relativement peu coûteuses. La cinétique et le taux de dégradation peuvent être compromis en raison du fort pourcentage en matières solides, spécialement lors d'un brassage insuffisant. Du point de vue de l'hygiénisation et d'un traitement uniforme du substrat, un fonctionnement à effet piston est idéal; dans celui-ci, le matériau se meut dans le sens du flux, de l'entrée à la sortie, sans brassage. Dans un réacteur-piston idéal, toutes les parties du substrat présentent le même temps de séjour. Pour empêcher la formation de gradients locaux et pour ensemencher le mieux possible le substrat frais, les réacteurs sont pourtant plus ou moins complètement mélangés.

Ceci a pour inconvénient de rendre non homogène le temps de séjour des particules individuelles de substrat, ce qui a pour résultat qu'une partie du matériau est extraite sans être digérée (d'où, entre autres, une influence négative sur l'élimination de germes pathogènes et de graines de mauvaises herbes).

Des procédés monoétapes sont aussi bien réalisés dans des domaines de températures mésophile et thermophile. La conduite thermophile a un effet positif sur l'hygiénisation. Les procédés monoétapes sont appliqués pour des substrats allant jusqu'à 40% de matières sèches. A de très hauts pourcentages de matières sèches, on peut rencontrer des risques d'inhibitions et de blocages de transferts de matières. Les temps de dégradation pour des procédés monoétapes sont de trois à quatre semaines en mésophile et de deux à trois semaines en thermophile.

Nous présentons ci-après divers procédés techniques monoétapes. Les références des divers constructeurs mentionnés figurent au *chapitre 3*.

#### DRANCO

C'est un procédé belge fonctionnant en thermophile (DRY ANAerobic COMposting). Le fermenteur est constitué par un cylindre vertical dans lequel la matière fraîche est introduite par le haut et extraite

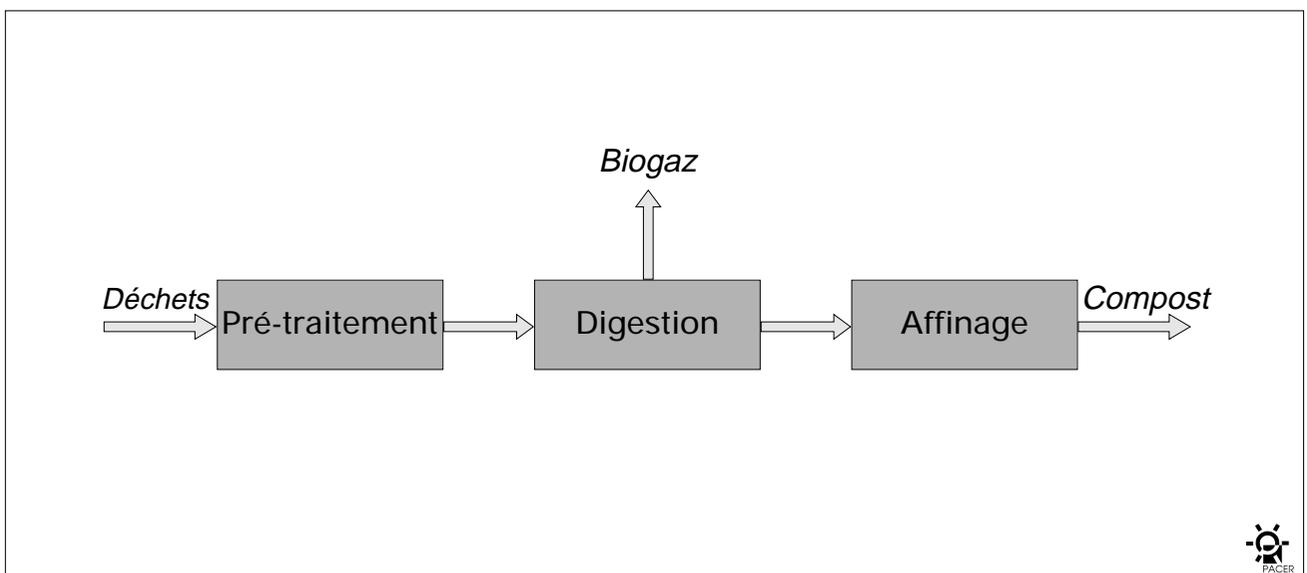


Figure 1: Schéma de procédé monoétape.

par le bas. Le mélange dans le digesteur s'opère par brassage sur une boucle extérieure; le fermenteur fonctionne pratiquement en mélange complet. Le matériau frais est inoculé par mélange avec le matériau recirculé à la base du réacteur.

Ce système dispose d'une expérience très complète et fort documentée.

#### KOMPOGAS

C'est un procédé suisse fonctionnant en thermophile. Le long réservoir cylindrique (selon les cas, enterré) est disposé horizontalement. Le mélange est effectué perpendiculairement au sens du flux, au moyen d'un brasseur mécanique (arbre horizontal avec flèches). Pour l'inoculation, on mélange une petite partie de matériau digéré avec du matériau frais.

Ce système présente le meilleur comportement d'effet piston de tous les procédés monoétapes connus.

#### VALORGA

C'est un procédé français fonctionnant en mésophile. Le réacteur cylindrique est disposé verticalement. Le mélange complet est obtenu par injection de biogaz comprimé. Grâce au mélange complet, aucune inoculation n'est nécessaire.

Ce système dispose d'une expérience industrielle de plusieurs années.

La conduite du process biétape se distingue par le fait que l'hydrolyse et l'acidification sont nettement séparées de la phase suivante de méthanisation. La part prépondérante du biogaz produit se forme dans cette dernière étape. Dans le cas de la digestion de déchets solides dans un procédé conduit en biétape se produit simultanément une séparation des phases liquide et solide.

Dans ce procédé à deux phases (voir figure 2), une phase liquide mobile s'écoule au travers (percole) d'une phase solide stationnaire. Les premières étapes de dégradation, soit l'hydrolyse et l'acidification, ont lieu avant tout dans la phase solide stationnaire de la première étape. La phase liquide mobile devient alors chargée en acides organiques, lesquels lors de la seconde étape et par différentes voies, seront transformés en méthane et en dioxyde de carbone dans un réacteur à haut rendement. Le liquide de process ainsi libéré de sa charge organique s'écoule ainsi renouvelé dans la phase solide (recirculation) et se charge, à nouveau, avec les produits solubles de décomposition issus de la première étape. La recirculation de la phase liquide a l'avantage, contrairement aux procédés humides conventionnels, de ne pas nécessiter en permanence l'ajout d'eau réchauffée, ceci grâce à la digestion en phase liquide.

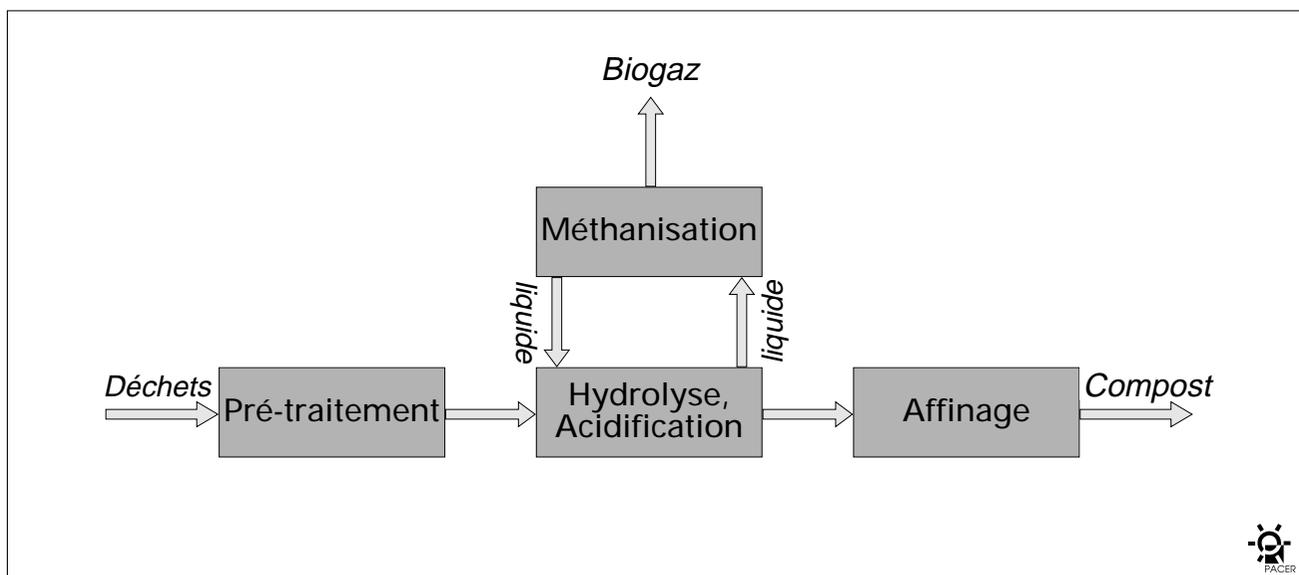


Figure 2: Schéma de procédé biétape.

Le procédé biétape nécessite une séparation des phases solide et liquide; cette séparation est réalisée par des systèmes actuellement connus au moyen de presses à vis, de décanteurs centrifuges ou, dans le plus simple des cas, au moyen d'un tamis doté de largeurs de mailles adaptées. De cette façon, on pourra méthaniser la phase liquide dans un réacteur à haut rendement. Pour ce faire, on peut appliquer un des procédés ayant été utilisé depuis longtemps et avec succès pour l'épuration d'effluents industriels fortement chargés.

L'hydrolyse des matières solides (phase solide, première étape) peut aussi bien être réalisée en batch qu'en continu, alors que la méthanisation doit être exclusivement exploitée en continu et en circuit fermé dans les systèmes à haut rendement déjà mentionnés. Un avantage de l'hydrolyse en discontinu réside dans le faible recours à des procédés technologiques coûteux, car on peut renoncer aux équipements d'alimentation et de reprise qui travaillent en continu. Grâce à la recirculation du flux de liquide, on peut réaliser le réchauffage des matières solides au moyen de solutions relativement simples.

L'avantage du procédé biétape réside dans les courts temps de décomposition de la matière solide, qui sont de l'ordre de quelques jours. En outre, les contraintes de l'étape d'hydrolyse ont un effet positif sur l'hygiénisation.

A la charge de ce procédé, on mentionnera les importants besoins en équipements.

Les procédés techniques suivants peuvent être mis en œuvre. Les références des constructeurs mentionnés figurent au *chapitre 3*.

#### AN

Il s'agit d'un procédé allemand, biétape et mésophile, avec une hydrolyse en discontinu. Les matières solides sont percolées par le flux de liquide sur une hauteur d'environ 2,2 m. L'avantage d'une réalisation très simple s'oppose à l'inconvénient de possibles passages préférentiels dans le réacteur d'hydrolyse.

Le constructeur planifie pour le début 1993 la mise en service d'une installation traitant 3000 tonnes par an au moyen de quatre réacteurs d'hydrolyse de 80 m<sup>3</sup> fonctionnant en parallèle. Cette installation est située dans le Landkreis Oldenburg.

#### BTA

Il s'agit d'un procédé allemand, biétape et mésophile, avec une hydrolyse en continu. Le concept de l'installation prévoit un réacteur de désagrégation (pulpeur), dans lequel les déchets sont séparés des matières indésirables, puis détremés. Un pré-traitement thermophile alcalin peut être raccordé. Le temps de décomposition des déchets solides est, au prix d'un équipement relativement important et coûteux, extrêmement court (de l'ordre de trois à quatre jours).

Sous le concept de codigestion, on entend la digestion commune des boues d'épuration d'une installation d'épuration communale (STEP) ou industrielle, avec des déchets biogènes. Les boues digérées dans les STEP présentent, en règle générale, une faible teneur en matières sèches, de l'ordre de quelques pourcents. En ajoutant des déchets organiques solides dégradables, jusqu'à une teneur en matières sèches d'environ 12%, on améliore nettement la production gazeuse du digesteur, sans pour autant devoir en élever de façon excessive la charge hydraulique. Dans la mesure où le matériau digéré ne peut pas être épandu sur les champs sous forme de boue, on peut entreprendre une déshydratation qui, en fonction des applications, se fera par centrifugation, par filtre-bande ou filtre-pressé.

La codigestion présente le grand avantage (du moins en Suisse) de pouvoir se raccorder à un réseau complet de STEP déjà existantes. Le mélange avec des boues peut, par contre, avoir une incidence négative. Malheureusement, une image négative est attachée aux boues car, par le passé, certaines boues remises à l'agriculture étaient chargées en métaux lourds (avant tout dans les agglomérations industrielles). La charge excessive du produit en métaux lourds devrait pouvoir être réglée par un choix approprié des STEP.

Outre l'installation italienne mentionnée au *chapitre 3*, la société BTA à Kaufbeuren (D) a réalisé une étape de préparation combinée avec des digesteurs urbains (2500 tonnes par an; réacteur de désagrégation: 8 m<sup>3</sup>).

#### Affinage des déchets méthanisés

Le produit digéré doit, dans tous les cas, être déshydraté car les déchets biogènes introduits en digestion sont plutôt humides, et parce que les matières solides sont décomposées au cours du processus. Pour la déshydratation – qui peut être problématique selon le matériau sortant – diverses presses et

centrifugeuses entrent en ligne de compte. Une teneur en matières sèches d'au moins 40% doit être recherchée, car le compost humide est difficilement stockable. La déshydratation étant réalisée, d'autres étapes destinées à l'amélioration de la qualité sont envisageables : mélange avec des matériaux structurants, tamisage ou séparation aéroulique pour l'enlèvement des inertes restants.

Le compost anaérobie ainsi obtenu peut, selon les circonstances, être utilisé directement ou en mélange avec des composts aérobies, pour un emploi comme produit de base en agriculture. Dans la mesure où une qualité supérieure est exigée, un bref post-compostage, d'environ deux semaines, est recommandé. Ce traitement permet de soumettre le matériau à une phase de décomposition à haute température.

## 4.2 Compostage des déchets biogènes

La composante ligneuse du bois ne peut pas être dégradée par des bactéries anaérobies. Des déchets de bois comme les écorces, les coupes d'arbres et de buissons, mais aussi certaines parties des déchets ménager ne peuvent dès lors pas être digérés. Pour ces déchets, le compostage s'offre comme procédé biotechnologique. Le compostage est à considérer non pas comme concurrent, mais comme un complément utile à la digestion. En pratique, on doit tendre, selon les possibilités, à favoriser des solutions combinées de digestion et de compostage (*figure 1, chapitre 6A*). La suite de cette présentation expliquera quelques concepts spécifiques au compostage et présentera les plus importants procédés.

### Notions fondamentales

On entend par compostage la décomposition aérobie (c'est-à-dire sous contact avec l'air) de déchets biogènes par différents micro-organismes tels que des bactéries et des champignons inférieurs. Normalement, on peut observer deux phases de compostage aux déroulements relativement confondus. Dans une première phase, qualifiée également de compostage intensif, les composants facilement dégradables qui se présentent avant tout dans les déchets de cuisines ou dans l'herbe fraîche, sont principalement décomposés par des bactéries. Lors de cette phase plutôt tumultueuse, la consommation d'oxygène dans le matériau biogène est forte, et la température atteint rapidement et durablement de

hauts niveaux, partiellement de plus de 60°C. Au cours d'une période assez courte, de l'ordre de quelques jours, voire de peu de semaines, on obtient un compost frais.

Dans une seconde phase, souvent appelée post-compostage, les molécules plus difficiles à dégrader, en particulier ligno-cellulose et composés ligneux, sont décomposées. La lignine n'est pas ou peu dégradée par des bactéries; au cours du post-compostage, des champignons primitifs se développent parallèlement aux bactéries. Leur mycélium transperce la matière en compostage. En raison de la croissance plus lente de ces micro-organismes, la production de chaleur et la demande en oxygène sont réduites par rapport au compostage intensif. Selon les conditions du processus, on obtient un compost mûr après deux ou trois mois.

Pour améliorer les conditions de compostage (allègement de la structure, amélioration de l'aération, empêchement de la formation de gradients locaux, etc.), le matériau est régulièrement retourné. Ceci peut se faire au moyen de chargeurs sur pneus ou d'autres machines avec servants, ou bien de façon totalement automatique.

Les installations de compostage peuvent être ouvertes, couvertes ou entièrement fermées; le compostage ouvert s'opère à l'air libre, ce qui présente le désavantage de soumettre la matière aux influences atmosphériques. Lors de chutes de pluie, le compost peut être détrempe, ce qui peut conduire à des difficultés. Dans ce cas particulier, mais aussi de façon plus générale, se manifeste le problème des émissions malodorantes.

Dans des installations couvertes, les processus peuvent être mieux régulés dans la mesure où la teneur en eau du compost peut être maintenue dans les limites souhaitées. Cette solution réduit quelque peu le problème d'odeur, mais ne l'élimine pas, spécialement lors du compostage de quantités importantes de matières facilement dégradables, lesquelles pourraient aussi être digérées. La dégradation de matériau facilement dégradable nécessite, lors du compostage intensif, plus d'oxygène que le compost n'est en mesure d'en importer; des zones anaérobies se forment alors, où se décomposent des produits malodorants.

Dans des installations entièrement fermées, la matière est enfermée dans un réservoir ou dans une enceinte fermée (éventuellement halle). Cette

enveloppe autour du compost permet de capter les gaz de décomposition et de les traiter dans un bio-filtre.

Les installations actuellement en fonctionnement en Suisse sont pour la plupart ouvertes, parfois couvertes. A l'avenir, partout où il n'y aura pas d'installation de digestion, il faudra réaliser des unités totalement fermées pour faire face au traitement des quantités croissantes de déchets problématiques, tels que les déchets de cuisine. Diverses installations de ce type sont actuellement à l'étude. On pourrait aussi éventuellement fermer complètement la phase de compostage intensif et réaliser le post-compostage à l'air libre.

Dans les installations couvertes ou fermées, il est judicieux de prévoir un arrosage du compost, car beaucoup d'eau s'évapore aux hautes températures obtenues et le risque existe que le compost devienne trop sec.

Pour obtenir une concentration élevée en oxygène dans le matériau, des installations modernes disposent d'une aération. On distingue, à ce sujet, l'insufflation et l'aspiration. Lors de l'aspiration, l'air est repris à la base du compost. Actuellement, la tendance serait plutôt en faveur de l'insufflation, au cours de laquelle l'air est comprimé de la base au haut du tas.

Dans ce qui suit, quelques systèmes de compostage sont décrits à titre d'exemples. Il s'agit soit de systèmes déjà fréquemment réalisés en Suisse, soit de techniques qui seront très probablement mises en œuvre.

##### Compostage en andains

Le matériau brut broyé est mis en tas d'au moins un mètre et jusqu'à trois mètres de haut, au moyen d'un chargeur sur pneus ou d'une grue. Les andains présentent souvent une section trapézoïdale ou triangulaire. Les tas de compost, qui se trouvent le plus souvent à l'air libre, sont en règle générale retournés après quelques jours ou semaines; ils donnent un compost mûr après trois à six mois. Le procédé exploité souvent en batch, est également indiqué pour des petites quantités, comme par exemple les composts de quartiers.

##### Compostage en cellules et en réacteurs

Le compostage en cellules est un procédé en discontinu de compostage intensif, qui a lieu soit en

réservoirs complètement fermés, soit dans des enceintes (boxes). Le compost frais y est obtenu en une ou deux semaines. Le matériau est soumis à une aération forcée en boxes, et subit normalement un retournement régulier. Pour la désodorisation, on peut utiliser un bio-filtre. Etant donné que ce mode de compostage nécessite déjà un investissement technique plus élevé, il est employé pour des échelles de traitement partant de quelques centaines de tonnes par an. Un type de compostage en cellules est constitué par le compostage en paniers. Le matériau à composter est stocké dans des paniers en treillis métalliques (sans aération forcée) qui, pendant la durée du compostage, sont protégés par un toit. Comme les paniers sont relativement petits, l'oxygène peut aisément pénétrer dans le matériau, pour autant qu'on y trouve suffisamment de matières structurantes.

##### Compostage en canal

Il s'agit d'un procédé qui, le plus souvent, est entièrement automatisé, et dans lequel la matière est transférée au travers de plusieurs canaux parallèles, au moyen d'un retourneur automatique, durant le déroulement du compostage. Le compostage en canal est en principe réalisé dans des halles fermées. Le matériau est amené au début d'un des canaux séparés de cloisons verticales. Le retourneur de compost est équipé d'un tambour denté ou d'une roue à aubes, au moyen duquel le compost est repris et transféré à l'arrière par une unité de transport. Le retourneur circule sur des rails, posés sur les parois des canaux, d'un bout à l'autre de ceux-ci. Lorsqu'un canal est retourné, le retourneur peut être déplacé latéralement afin de pouvoir exploiter un autre canal. A chaque passage, il déplace le matériau de quelques mètres, en direction de la sortie, tout en le brassant et en l'allégeant.

Les investissements relativement grands qui doivent être réalisés ne peuvent pas être amortis sur de petites installations, si bien que le compostage en canal n'est applicable qu'à partir de quelques milliers de tonnes par an.

##### Andains dynamiques

Contrairement au compostage en canal, le compost n'est pas réparti au travers de parois de séparation. Le matériau constitue une seule et unique meule sur l'ensemble de l'aire de la place de compostage. Le retourneur est constitué par une roue à aubes, laquelle est suspendue à un pont libre mobile. Le

temps de compostage dépend, comme pour le compostage en canal, de la composition du substrat, de la hauteur du compost et d'autres paramètres; il est compris entre six et douze semaines. Dans les andains dynamiques, le substrat est réparti sur l'ensemble de la surface, également sur une hauteur comprise entre 1,6 et 2,5 m. Le compostage en andains dynamiques, tout comme le compostage en canal, n'entre normalement en ligne de compte que pour des capacités de plus de 5000 tonnes par an.

A côté de ces procédés professionnels représentatifs, il existe encore d'autres voies de traitement. Une partie des déchets biogènes sera aussi à l'avenir valorisée de façon décentralisée, c'est le compostage de jardin individuel. Ce dernier est d'une application sensée partout où le jardin n'est pas surchargé en engrais du fait du compostage d'aliments achetés. Malheureusement, le compostage de jardin ne réalise souvent pas la phase du compostage intensif, qui serait nécessaire pour l'hygiénisation et l'élimination des graines de mauvaises herbes. Les limites du compostage de quartier sont fixées par les émissions d'odeurs et par le manque de continuité souvent rencontré dans le suivi. En plus, les normes de qualité ne sont souvent pas assurées et ne permettent pas de commercialiser le produit. Par un vaste tri des déchets dans différentes communes de Suisse, on peut montrer que le compostage de quartier traite nettement moins de déchets biogènes que ne le font les collectes séparées raccordées à des compostages professionnels.

### 4.3 Rendements énergétiques de la digestion et du compostage

La décomposition bactérienne de matériau biogène s'accompagne d'une libération d'énergie. Des différences de principes existent cependant entre la dégradation anaérobie et la dégradation aérobie.

La digestion anaérobie conduit à une utilisation de l'énergie en deux étapes; dans une première phase, les bactéries doivent se contenter de très peu d'énergie, 93% de l'énergie du substitut restant disponible dans le produit de dégradation biogaz. Le biogaz est un vecteur énergétique de haute valeur qui, dans une seconde phase, parvient à être utilisé par l'homme.

Lors de dégradation aérobie, les bactéries disposent de la totalité du contenu énergétique du substitut sortant. Pour cette raison, ils croissent beaucoup plus vite que les bactéries anaérobies et libèrent, contrairement aux bactéries anaérobies, beaucoup de chaleur lors de la décomposition du matériau. Cette chaleur est difficilement utilisable, car elle n'est disponible qu'à un bas niveau de température.

Selon une étude de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), le potentiel biogaz théorique des déchets solides biogènes non agricoles se situe annuellement à environ 80 millions de m<sup>3</sup> de biogaz pour les déchets ménagers, 24 millions de m<sup>3</sup> pour les déchets industriels et 27 millions de m<sup>3</sup> pour les déchets d'entretien paysager. Le potentiel biogaz théorique des déchets biogènes ménagers, industriels et paysagers est ainsi estimé à 130 000 000 m<sup>3</sup> par an. La teneur en méthane du gaz varie fortement en fonction des substrats. La teneur moyenne en méthane devrait se situer entre 60% et 65%, ce qui correspond à un contenu énergétique de 21,4 à 23,3 MJ/m<sup>3</sup>. C'est près de 3000 TJ d'énergie renouvelable qui, théoriquement, pourraient être récupérés par an à partir des déchets biogènes susmentionnés.

En pratique, la production et l'utilisation de biogaz issu de déchets biogènes solides offrent des perspectives plutôt importantes, en raison de circonstances favorables:

- la collecte séparée des déchets biogènes doit être étendue à l'ensemble de la Suisse, selon les dispositions de l'Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD). La production de biogaz apparaît alors comme l'un des procédés les moins chers;
- les déchets collectés sont disponibles en grandes quantités, ce qui permet la construction d'installations de tailles économiquement intéressantes;
- grâce à la forte teneur en matières sèches, on ne doit injecter que relativement peu d'énergie dans le process, ceci par comparaison avec la digestion de substrats liquides. Les installations produisent relativement beaucoup de gaz par m<sup>3</sup> de réacteur, et présentent un bon facteur de récupération énergétique;
- une utilisation raisonnable du gaz est facilitée, d'une part par le fait que les installations de traitement réclament tout au long de l'année une forte consommation en énergie, et d'autre part parce que les grandes quantités de gaz permettent de produire de l'électricité et de la chaleur au moyen de robustes couplages chaleur-force.

L'estimation avancée dans l'étude de l'OFEN indiquait que la digestion de déchets biogènes solides permettrait à l'avenir de fournir environ 1200 TJ/an nets aux utilisateurs. Ce potentiel pratiquement réalisable est ainsi significativement plus grand que celui de l'agriculture, où pourtant de très nombreux déchets biogènes sont disponibles, mais qui, en fonction de considérations économiques, ne parviennent pas à être digérés.

Le potentiel énergétique du compostage est théoriquement nettement plus important que celui de la digestion, car tous les déchets biogènes sont compostables, sous réserve cependant des problèmes évoqués pour les déchets facilement dégradables. Dans une autre étude de l'OFEN, on a déterminé qu'en compostant tous les déchets biogènes, on libérerait théoriquement 8500 TJ/an sous forme de chaleur et de vapeur d'eau. En pratique, la quantité d'énergie réellement utilisable se réduit de façon drastique, pour diverses raisons :

- l'utilisation de chaleur n'est possible, pour des raisons techniques d'exploitation, que sur l'air extrait d'installations complètement fermées, ce qui déjà limite fortement l'énergie utilisable;
- la chaleur du compost est de faible valeur; elle se présente à un très bas niveau de température. Des investissements en pompes à chaleur sont à peine justifiables pour obtenir de l'énergie pratiquement utilisable;
- dans beaucoup de cas, il n'y a pas suffisamment de repreneurs d'énergie pour la chaleur ainsi obtenue, sur le site de l'usine de compostage.

En pratique, il ne devrait rester du très gros potentiel en bioénergie du compostage tout au plus que quelques 100 TJ/an à pouvoir être utilisables.

Ces considérations énergétiques plaident, en plus d'autres facteurs, pour la mise en œuvre de la digestion, où cela est possible.

#### 4.4 Aspects environnementaux de la digestion

La combustion de biogaz produit du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de l'eau. Le  $\text{CO}_2$  est connu comme gaz à effet de serre. Le  $\text{CO}_2$  libéré par la combustion du biogaz ne contribue pourtant pas à l'effet de serre dans la mesure où il n'est pas issu de vecteurs énergétiques fossiles. La biomasse qui croît actuellement tire du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère pour assurer sa croissance et le restitue au cycle, soit par putréfac-

tion (décomposition aérobie), soit par combustion des produits de décomposition anaérobie. (À l'inverse, la combustion d'énergies fossiles libère soudainement du  $\text{CO}_2$  supplémentaire, lequel se trouvait depuis des millions d'années à l'intérieur de la Terre.)

Le méthane ( $\text{CH}_4$ ) est également un très important gaz à effet de serre; l'effet d'une molécule de  $\text{CH}_4$  correspond environ à l'effet de 30 molécules de  $\text{CO}_2$ . La croissance actuelle des troupeaux de bétail dans le monde et les rizières contribuent à la libération de méthane; elles contribuent de façon substantielle à l'effet de serre. Il faut faire attention au fait que l'exploitation d'installations de biogaz parvient à rejeter le moins possible de méthane dans l'atmosphère. Pour diverses raisons, des excédents de gaz peuvent être produits, ce qui justifie de les éliminer en torchères.

Du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) se forme lors de la combustion du biogaz. Celui-ci réagit avec l'humidité et donne de l'anhydride sulfureux. Ce dernier, provenant de combustibles fossiles est, surtout dans les pays de l'Est, la cause principale des pluies acides. Bien que le soufre du biogaz actuellement issu des cycles naturels y soit restitué, il est recommandable de prévoir une désulfuration du gaz. Etant donné que le système doit être fermé, il n'y a que peu d'émissions d'odeurs à attendre. Dans la mesure où le processus de digestion se déroule de façon suffisamment complète, le produit digéré est exempt d'odeurs désagréables. Un bon produit digéré rappelle l'odeur de terre de forêt. En présence de fortes teneurs en azote dans le substrat, la libération d'un peu d'ammoniac est néanmoins possible à l'extraction de la matière hors du fermenteur.

Lors de la digestion de déchets biogènes solides, on vise à produire un compost présentant une teneur en matières sèches d'environ 50%. Les matériaux entrants dans le digesteur étant déjà nettement humides, ils se liquéfient encore au cours de la digestion. En fin de fermentation, une séparation solide-liquide doit donc être entreprise, au cours de laquelle de l'eau de pressage fortement chargée organiquement et inorganiquement est produite. Celle-ci doit être traitée à la suite, à moins qu'elle puisse être utilisée pour l'arrosage des tas de compost (voir figure 1, chapitre 6A) ou comme engrais liquide pour l'agriculture. Avant le rejet en canalisation, des étapes biologiques supplémentaires (filtre anaérobie, aération) ainsi qu'une sédimentation ou autre étape analogue, doivent être prévues.

## 5. Méthanisation d'effluents industriels

### 5.1 Pourquoi pré-épurer ?

On peut en principe répartir les eaux usées industrielles en trois catégories :

- eaux usées à faible charge polluante organique;
- eaux usées à forte charge polluante organique;
- eaux usées chargées de polluants inorganiques.

Les eaux usées à faible charge polluante organique peuvent être dirigées dans des canalisations publiques et seront épurées en mélanges avec les eaux résiduaires urbaines, dans des stations communales.

Les eaux usées à forte charge polluante organique suivent actuellement et dans la plupart des cas les mêmes chemins. Pour cette catégorie, l'opportunité de procéder à un pré-traitement biologique mérite d'être examinée de cas en cas.

Les eaux usées chargées de polluants inorganiques doivent dans tous les cas être pré-épurées selon les conditions posées par l'Ordonnance sur le déversement des eaux usées.

Seules les eaux usées fortement chargées organiquement sont intéressantes pour un traitement par digestion anaérobie. Les deux autres catégories d'eaux résiduaires n'entrent pas en ligne de compte pour ce mode d'épuration.

#### 5.1.1 Avantages du rejet des eaux usées industrielles en canalisations publiques

Les contraintes politiques et juridiques engendrées par le raccordement d'une unité industrielle à un collecteur public sont plus simples et par essence plus rapides à satisfaire. L'amélioration du problème des eaux usées dans notre pays n'a été rendue durablement possible que grâce au rejet des effluents industriels dans des canalisations publiques.

Les effluents industriels présentent souvent une caractéristique commune qui tient au fait qu'elles contiennent beaucoup de constituants carbonés mais peu d'éléments nutritifs pourtant indispensables pour une dégradation biologique. A l'inverse, les effluents urbains présentent un excédent pour ces nutriments (azote et phosphore). De ce point de vue, ces deux types d'eaux usées se complètent bien. Mais, lorsque la part des eaux usées industrielles devient trop importante apparaît

une sous-alimentation en éléments nutritifs des bactéries épuratrices. Ceci provoque d'importants problèmes d'exploitation.

L'introduction d'effluents industriels dans une canalisation publique a pour conséquence – parallèlement aux déversoirs de crues – qu'il n'existe qu'un point de déversement dans l'exutoire, ce qui facilite la tâche des autorités de contrôle compétentes.

La charge organique des effluents industriels peut alors contribuer à rendre plus simple et plus efficace l'élimination de l'azote (dénitrification) dans les stations d'épuration communales.

#### 5.1.2 Inconvénients du rejet des eaux usées industrielles en canalisations publiques

Dans quelques rares cas, les effluents industriels sont amenés directement à la station d'épuration au moyen d'une conduite séparée; le danger existe alors, lors de précipitations pluvieuses, de voir une part importante des eaux usées non épurées s'écouler dans l'émissaire. Ceci provoque souvent d'énormes pointes de charge dans ce dernier. Le pré-traitement des effluents sur le lieu de production permet de réduire de façon importante de telles fluctuations.

Les eaux usées industrielles présentent fréquemment des constituants qui se caractérisent par une forte vitesse de dégradation en biologie. De ce fait, elles causent des problèmes d'exploitation sous forme de boues difficilement décantables (boues flottantes). Ce type de problème peut également être réduit grâce à une pré-épuration.

Des problèmes d'éléments nutritifs apparaissent, comme déjà mentionné, lorsque les effluents industriels sont prédominants dans les stations d'épuration. Cela signifie que le taux des nutriments doit être augmenté. En raison des variations de débits d'effluents, aussi bien dans l'industrie que pour les effluents urbains, un apport ciblé d'azote et/ou de phosphore s'avère particulièrement difficile. On doit par conséquent surdoser, ce qui se traduira par d'importants coûts d'exploitation.

Les effluents industriels fortement chargés organiquement se présentent, en règle générale, à des températures plus élevées que celles des eaux usées domestiques, ceci en particulier lors des périodes froides de l'année. D'autres procédés d'économie

d'énergie existent pour ces effluents qui, parallèlement, ont pour conséquence une production de boues considérablement réduite: des installations d'épuration anaérobie.

Lorsque les stations d'épuration publiques doivent être adaptées à la nitrification, la charge organique entre complètement dans le dimensionnement du bassin d'aération. Ceci en particulier dans les eaux usées industrielles qui, souvent, n'apportent que peu d'azote. Comme les industriels ne peuvent que difficilement être invités à participer aux investissements, les taxes de traitement des eaux usées s'accroissent de façon disproportionnée pour les pouvoirs publics.

Les avantages et inconvénients répertoriés ci-dessus justifient, lors de chaque modification d'une station d'épuration publique, qu'on examine précisément, à l'amont de chaque introduction d'effluents fortement chargés en pollution organique, si une pré-épuration sur le lieu de production peut être considérée comme raisonnable, en termes écologiques et économiques.

## 5.2 Comparaison des procédés de pré-épuration anaérobies et aérobies

### 5.2.1 Différences entre les procédés biologiques

Dans les stations d'épuration publiques, le traitement des effluents se déroule toujours grâce à une biologie fonctionnant en aérobiose. L'avantage de cette technique réside dans les grandes vitesses de déroulement du process, permettant l'épuration des eaux usées même à basses températures. La dégradation a lieu essentiellement en une étape grâce à un grand nombre de diverses variétés microbiennes. Les produits issus de la transformation sont le CO<sub>2</sub> et l'eau, et l'énergie libre formée est utilisée pour structurer la substance cellulaire. Ceci conduit à une importante production de biomasse, laquelle doit être éliminée sous forme de boue d'épuration.

### 5.2.2 Les diverses techniques

Tant les procédés aérobies que les anaérobies visent à faire en sorte que le plus de biomasse puisse être maintenu dans un petit volume, et que cette biomasse puisse être mise en contact intensif avec

l'effluent. Dans les deux filières, deux systèmes ont fait leurs preuves:

- le système à boue activée, fondé sur les propriétés de sédimentation des boues, lesquelles, à la sortie du réacteur, peuvent être séparées de l'effluent et recyclées dans le réacteur;
- les réacteur à lits fixes, qui sont basés sur la croissance de la biomasse sur un matériau de support traversé par l'effluent.

Pour ces deux systèmes, les variantes les plus diverses ont été testées et développées techniquement. En épuration anaérobie, on observe, parallèlement à la séparation solide / liquide (biomasse / effluent) une séparation gaz / liquide (biogaz / effluent). Ceci a pour conséquence, en règle générale, que les systèmes anaérobies sont conçus de façon plus complexe que les systèmes aérobies. Les principaux systèmes de réacteurs sont décrits au *chapitre 2*.

### 5.2.3 Aspects énergétiques

Les systèmes aérobies requièrent en tout temps le maintien dans le réacteur biologique d'une concentration en oxygène d'au moins 1 mg O<sub>2</sub> par litre. Ceci a pour conséquence que les systèmes à boues activées et les lits fixes immergés doivent être dotés d'une insufflation d'air. Pour les systèmes non immergés, l'effluent doit être transporté et recyclé dans le réacteur. Dans tous les cas, l'exploitation nécessite une dépense relativement grande en énergie électrique. Dans les stations d'épuration communales, cette étape du process constitue le plus gros consommateur d'électricité.

Dans les systèmes anaérobies, l'effluent doit uniquement être acheminé au réacteur et y être brassé, une grande part du brassage provenant d'ailleurs de la production du biogaz elle-même. Le biogaz peut être utilisé comme vecteur énergétique, si bien qu'un gain d'énergie en résulte.

On jugera aisément des aspects énergétiques en consultant les tableaux du *chapitre 6*. Dans l'exemple mentionné, il résulte une différence nette de 226 000 francs par an sur les frais d'énergie, respectivement 0,48 fr. / m<sup>3</sup> effluent.

### 5.2.4 Infrastructure

Le procédé aérobie produit, comme déjà indiqué, relativement beaucoup de boue. Pour cette raison, il n'y a pas de grands risques à redouter d'une pollution de boues par des matières contaminantes

non dissoutes, celles-ci étant en pratique diluées. C'est pourquoi les procédés aérobies ne nécessitent pas une importante pré-épuration des effluents.

Comme les procédés aérobies ne produisent pas de biogaz, des installations spécifiques ne sont pas à prendre en compte. Des systèmes aérobies correctement exploités ne conduisent, en règle générale, à aucun problème d'odeurs. Aucune disposition particulière n'est nécessaire à cet effet. Seuls demeurent les problèmes de stabilisation et d'élimination des boues.

Les procédés aérobies nécessitent peu de mesures d'infrastructures.

Le sulfure présent dans les protéines et les sulfates présents dans l'eau sont réduits en  $H_2S$ , en anaérobiose. Le gaz dissout dans l'eau peut provoquer dans l'air extrait d'importants problèmes d'odeur. L'air vicié doit être épuré. Cette épuration s'effectue en général au moyen de bio-filtres.

Le gaz produit présente dans bien des cas une concentration non négligeable en  $H_2S$ . Cet  $H_2S$  sera oxydé en  $SO_2$  dans la chaudière ou dans le couplage chaleur-forcée. Ce gaz agressif pour les équipements est très nuisible pour l'environnement. Pour cette raison, on prévoira, en principe, une désulfuration du biogaz. A cet effet, divers procédés peuvent être mis en œuvre, parmi lesquels le lavage du gaz avec une solution de soude a donné de bons résultats.

#### 5.2.5 Aspects écologiques

Comme déjà mentionné, divers problèmes annexes doivent être pris en compte dans le cas des installations d'épuration anaérobie, qui peuvent rendre nécessaire une infrastructure non négligeable. Si ces problèmes sont résolus de façon satisfaisante (odeur, qualité du gaz), ce système peut alors être considéré comme clairement supérieur à l'épuration aérobie, d'un point de vue écologique :

- bilan énergétique positif, ce qui signifie qu'à partir d'une certaine taille d'installation, on produit plus d'énergie qu'il n'en faut pour l'épuration des eaux;
- production de boue nettement réduite avec pour conséquence une réduction des volumes de décharges nécessaires. Lorsque les boues doivent être déshydratées ou séchées, les besoins en énergie en seront réduits d'autant.

### 5.3 Possibilités d'application de l'épuration anaérobie

En principe, la technique de l'épuration anaérobie peut être appliquée partout où les eaux usées présentent une forte charge organique et pour autant qu'elles soient exemptes de substances toxiques. Il est avantageux de pouvoir disposer d'effluents tempérés. Les domaines d'application possibles sont présentés au *chapitre 3*.

Les conditions à remplir pour une mise en œuvre réussie de ce procédé peuvent être résumées comme suit :

#### *Concentration des effluents*

La concentration minimale des eaux usées dépend de la température, de la teneur en matières non dissoutes ainsi que de la concentration en nitrates et sulfates.

Dans le cas de faibles concentrations d'effluents et de basses températures des eaux usées, il est nécessaire de réaliser un apport d'énergie pour le réchauffage tel que le bilan énergétique en devienne négatif. De tels cas ne constituent pas des applications sensées de l'épuration anaérobie.

Plus la concentration des effluents, en termes de  $DBO_5$  et  $DCO$ , est faible, plus la teneur maximale en substances non dissoutes est faible. La production réduite de boue exige de faibles teneurs en substances non dissoutes, respectivement décantables, lesquelles peuvent diluer la boue anaérobie.

#### *Températures*

L'optimum de température du process se situe vers  $35^\circ - 37^\circ C$ . Des réductions des températures des effluents sont possibles jusqu'à  $20^\circ C$ ; la vitesse de réaction est alors réduite de façon correspondante. Lorsque la température des eaux usées se situe en dessous de l'optimum, un concept énergétique doit, dans chaque cas, permettre d'examiner la rentabilité du réchauffage des eaux usées. Les facteurs de stabilité du process doivent alors être considérés.

#### *Sels inorganiques*

Divers effluents (sucreries, papeteries, etc.) présentent en outre le risque de précipitation de sels inorganiques. En premier lieu, on signalera la précipitation de calcaire ( $CaCO_3$ ) et/ou de gypse ( $CaSO_4$ ). Si ce risque existe, on envisagera, lors de la planification, s'il existe des possibilités d'extraire ces produits de précipitation par décantation des boues anaérobies.

Certains types de réacteurs sont inadaptés dans de tels cas (systèmes UASB, lits fixes, réacteurs à lit fluidisé).

#### *Substances inhibitrices*

Des substances toxiques peuvent, déjà en faibles concentrations, conduire à l'arrêt complet du réacteur. Ceci est surtout le cas lorsque ces matières peuvent s'accumuler dans le digesteur. C'est le cas en particulier pour les métaux lourds et les graisses. Les réacteurs peuvent aussi être négativement affectés par des produits chimiques, en particulier par des solvants. Il est ici nécessaire d'expliquer au personnel de ces usines que de petites quantités de solvants (par exemple lors du nettoyage des machines) peuvent déjà perturber durablement l'anaérobie.

## 5.4 Réalisations exemplaires

Les exemples représentatifs de trois installations anaérobies réalisées en Suisse sont présentés ci-après :

### 5.4.1 Cartonnerie de Niedergösgen

#### *Historique*

La Cartonnerie de Niedergösgen envoie ses eaux usées à la STEP de Schönenwerd, depuis que cette dernière existe. Depuis sa mise en service, l'installation présente de gros problèmes d'exploitation. Elle est nettement surchargée aussi bien organiquement qu'en boues. C'est la raison pour laquelle, au début des années 80, un bureau d'ingénieurs a été chargé d'étudier l'aménagement de l'installation de traitement des boues. Le projet mit en évidence d'importantes conséquences financières, auxquelles les diverses parties, et notamment aussi la fabrique de carton, auraient à participer. Pour cette raison, on rechercha des solutions alternatives pouvant être économiquement plus favorables.

En collaboration avec l'ingénieur de la Commune, la cartonnerie établit une étude de variantes au cours de laquelle les alternatives suivantes furent examinées :

- dérivation de l'effluent non pré-épuré biologiquement dans la STEP;
- dérivation de l'effluent biologiquement pré-traité dans la STEP;
- épuration complète des eaux usées de la cartonnerie et rejet dans l'émissaire.

L'étude montra que les variantes pré-épuration et traitement complet conduisaient à peu près aux mêmes coûts. La variante consistant à dériver les effluents non pré-épurés était nettement la plus mauvaise. Il fut décidé de réaliser une installation de pré-épuration dans l'enceinte de la cartonnerie. Des comparaisons de variantes entre des systèmes aérobies et anaérobies démontrèrent clairement les avantages du système anaérobie.

#### *Procédé*

L'effluent de la cartonnerie s'écoule d'abord dans un bassin de décantation. Cet équipement était existant. Environ 75% de l'eau traversant ce bassin est recirculée dans la cartonnerie et renvoyée dans le processus de production. Les 25% qui restent vont dans la pré-épuration anaérobie.

L'effluent a une température qui varie entre 32° – 37° C, qui le situe dans le domaine idéal pour l'épuration anaérobie. Il est conduit dans un bassin-tampon où se déroule un échange de masse et de concentration. De ce bassin, l'effluent est dirigé vers le méthaniseur, conçu selon le principe du réacteur UASB. A la sortie du réacteur UASB, l'effluent arrive dans un bassin où il est aéré. Dans ce bassin, l'effluent est libéré d'H<sub>2</sub>S et amené en conditions aérobies. L'effluent est alors restitué au collecteur existant.

Le gaz produit et capté dans le méthaniseur est stocké dans un gazomètre et est utilisé, dans une chaudière séparée, pour la production de vapeur. La boue est stockée et peut, selon les besoins, être déshydratée et incinérée ou mise en décharge.

L'ensemble des bassins sont couverts et ventilés par aération forcée. L'air extrait est rejeté dans l'atmosphère après passage dans un bio-filtre. En cas d'important accroissement du débit d'effluent dans le bassin-tampon, ce dernier est raccordé à un bassin de réception qui peut recevoir les quantités d'eau comme le fait un bassin récepteur d'eaux pluviales. Lorsque le niveau d'eau s'abaisse dans le bassin tampon, le bassin de réception est alors à nouveau vidé.

L'effluent de la fabrique de carton présentant un rapport défavorable entre éléments nutritifs, l'urée et l'acide phosphorique doivent être surdosés. Afin de pouvoir corriger le pH en cas d'urgence, l'ajout de solution de soude a été prévu.

*Données techniques de l'installation*

|  |                         |                                 |                      |
|--|-------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Débit d'effluent traité                  | 6000 m <sup>3</sup> / d | Capacité du bassin-tampon       | 850 m <sup>3</sup>   |
| DCO totale                               | 10 000 kg / d           | Capacité du bassin de réception | 1000 m <sup>3</sup>  |
| DCO soluble totale                       | 9700 kg / d             | Capacité du digesteur           | 1000 m <sup>3</sup>  |
| DBO <sub>5</sub> décantée                | 4500 kg / d             | Emprise du digesteur            | 240 m <sup>2</sup>   |
| Température de l'effluent                | 30 - 36° C              | Réduction sur DCO               | env. 80%             |
| Sulfate (SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> ) | 100 g / m <sup>3</sup>  | Réduction sur DBO <sub>5</sub>  | env. 85%             |
|  |                         | Conversion en biogaz            | env. 7500 kg DCO / d |

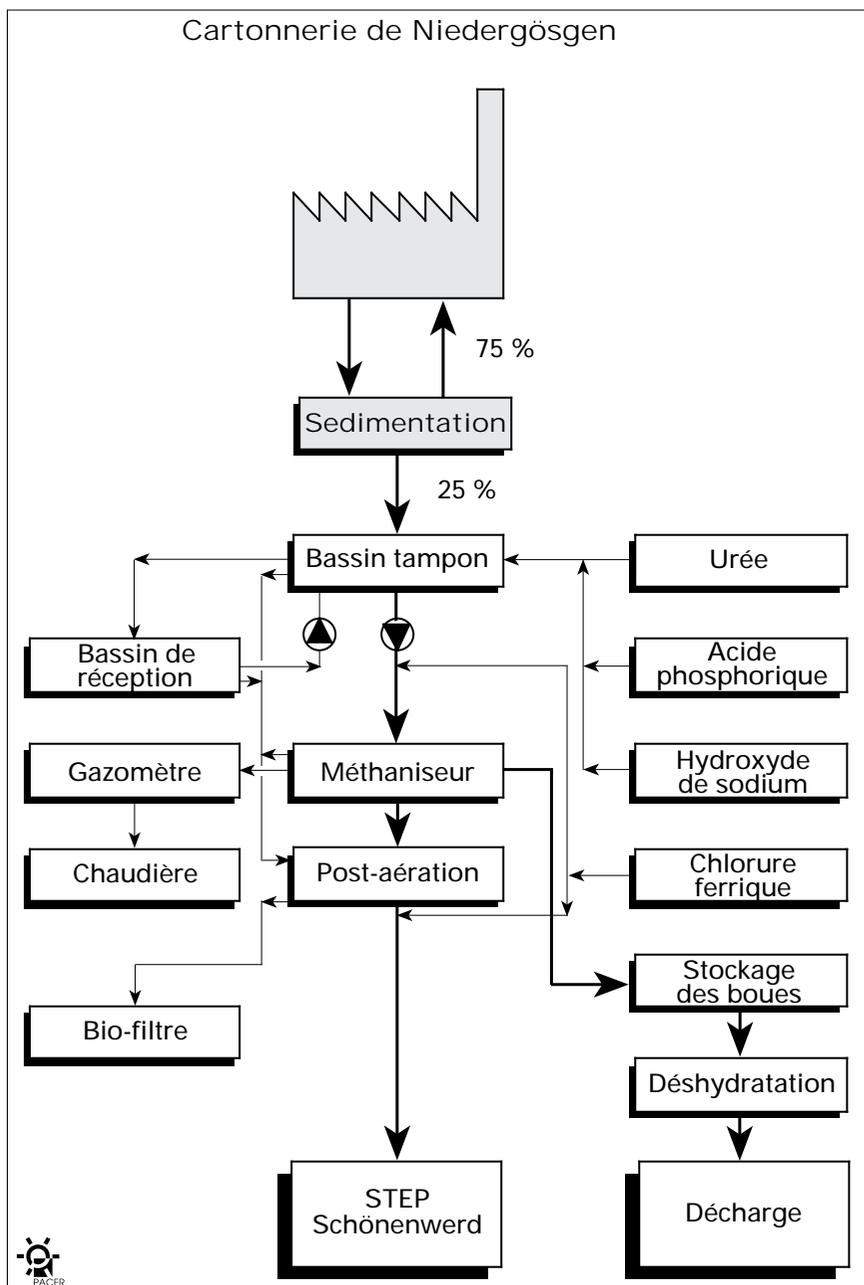


Schéma 1:  
Cartonnerie de Niedergösgen.

5.4.2 Brasserie Feldschlösschen, Rheinfelden

*Historique*

A l'époque, la station d'épuration de Rheinfelden recevait périodiquement des charges de plus de 100 000 équivalents-habitants. De là, seul un quart provenait des communes raccordées. Une étude réalisée en 1986 montra qu'il fallait renoncer à une transformation de la station d'épuration si les entreprises industrielles raccordées (quatre grandes industries) ne procédaient pas à la pré-épuration, à raison d'au moins 75% de leurs effluents. C'est en raison de cette conclusion que les industries ont entrepris l'étude de la réduction de charge.

Pour la Brasserie Feldschlösschen, l'étude des variantes montra qu'à terme la réalisation d'une installation d'épuration anaérobie constituait la solution économique la plus favorable.

*Procédé*

L'effluent de la Brasserie Feldschlösschen est réparé en deux flux, l'un constitué par les eaux fortement chargées et l'autre par les eaux faiblement chargées. Ces dernières sont dirigées – comme déjà actuellement – sur une installation existante, où elles sont neutralisées en cas de besoin, puis dirigées sur la station d'épuration.

Les effluents fortement chargés sont collectés et acheminés vers un puits de pompage. Depuis là, elles sont dirigées dans le bassin-tampon et de compensation. Avant de parvenir au bassin-tampon, l'effluent traverse deux tamis qui permettent d'éliminer les matières grossières. Dans ce bassin-tampon, on réalise l'égalisation des pointes hydrauliques et de concentration. Une autre station de pompage transporte l'effluent dans le bassin de pré-acidification, en passant par une ligne de neutralisation. Dans le bassin de pré-acidification, les grosses molécules constituant l'effluent se transforment en acides organiques. Les eaux usées ainsi traitées sont pompées dans le digesteur où se déroule la dégradation de la matière organique en biogaz. L'effluent est séparé de la boue biologique pour être conduit sur la filière des eaux usées faiblement chargées.

La neutralisation de l'effluent a lieu dès l'installation de neutralisation existante, au moyen d'acide et de base. Afin de ne pas perturber le processus biologique de décomposition, il est possible d'ajouter des sels nutritifs et des éléments-traces sous forme liquide et/ou pulvérulente.

Le gaz produit est capté et conduit vers un gazomètre. De là, le gaz est transporté en chaufferie, où il est utilisé pour la production de vapeur. Dans le cas où la chaudière n'est pas en service et que le gaz continue d'être produit, il peut alors être brûlé en torchère.

La boue résultant de la dégradation biologique est extraite du méthaniseur au moyen d'une pompe à vis excentrée. Les boues sont périodiquement enlevées par un camion-citerne et éliminées. Tous les bassins sont couverts et aspirés. L'air extrait est collecté et rejeté dans l'atmosphère après passage dans un bio-filtre.

*Données techniques*

|                                       |                         |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Débit d'effluent traité               | 2400 m <sup>3</sup> / d |
| DCO totale                            | 6000 kg / d             |
| DCO soluble totale                    | 5000 kg / d             |
| DBO <sub>5</sub> décantée             | 3100 kg / d             |
| Température de l'effluent             | 22 - 28° C              |
| Capacité du bassin-tampon             | 540 m <sup>3</sup>      |
| Capacité du bassin de réception       | 360 m <sup>3</sup>      |
| Capacité du digesteur                 | 800 m <sup>3</sup>      |
| Emprise du digesteur                  | 130 m <sup>2</sup>      |
| Réduction prévue sur DCO              | > 80%                   |
| Réduction prévue sur DBO <sub>5</sub> | > 85%                   |
| Conversion prévue en biogaz           | > 4500 kg DCO / d       |

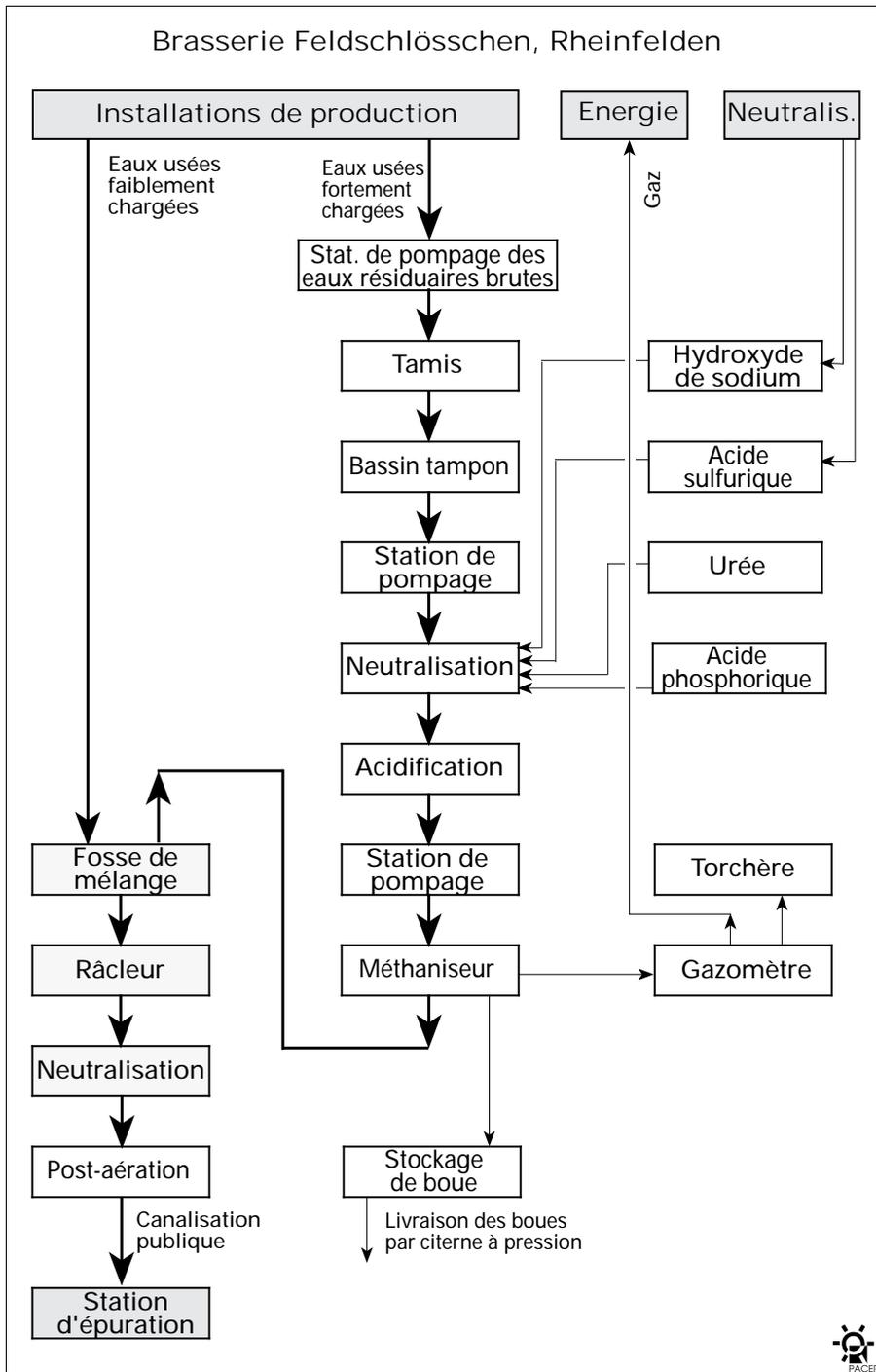


Schéma 2:  
Brasserie Feldschlösschen,  
Rheinfelden.

### 5.4.3 Sucrierie d'Aarberg

Les matières grossières contenues dans les eaux de lavage de la Sucrierie d'Aarberg sont éliminées dans des bassins de décantation largement dimensionnés. Dans ces bassins de décantation a lieu, en même temps, une importante pré-acidification.

L'effluent pré-traité est dirigé sur deux échangeurs de chaleur qui servent l'un à la récupération de la chaleur de l'effluent, alors que l'autre permet de couvrir les pertes de chaleur.

L'effluent est alors conduit dans un réacteur du type contact. Le brassage se déroule pour l'essentiel grâce au biogaz produit (les bulles ascendantes de gaz créent des turbulences). Il est complété par un équipement de brassage installé à la base du réacteur.

Des bassins de sédimentation, équipés de décanteurs à plaques parallèles, sont raccordés au diges-

teur. La boue est renvoyée au digesteur alors que l'effluent peut s'écouler dans la canalisation publique après avoir traversé l'échangeur de chaleur.

Le soutirage des boues en excès s'opère au fond du réacteur, où elles s'accumulent; elles sont généralement imprégnées de calcaire. Cette mesure permet d'empêcher un enrichissement excessif en calcaire du réacteur.

Le biogaz est dirigé directement, c'est-à-dire sans stockage intermédiaire, au moyen d'un compresseur, vers la chaufferie. Si du biogaz est produit lorsque la chaudière n'est pas en service, il est alors brûlé dans une torchère.

L'installation traite un débit d'effluent de 100 m<sup>3</sup> / heure à une teneur en DCO de 9000 mg / litre. La réduction sur la DCO est de l'ordre de plus de 90%.

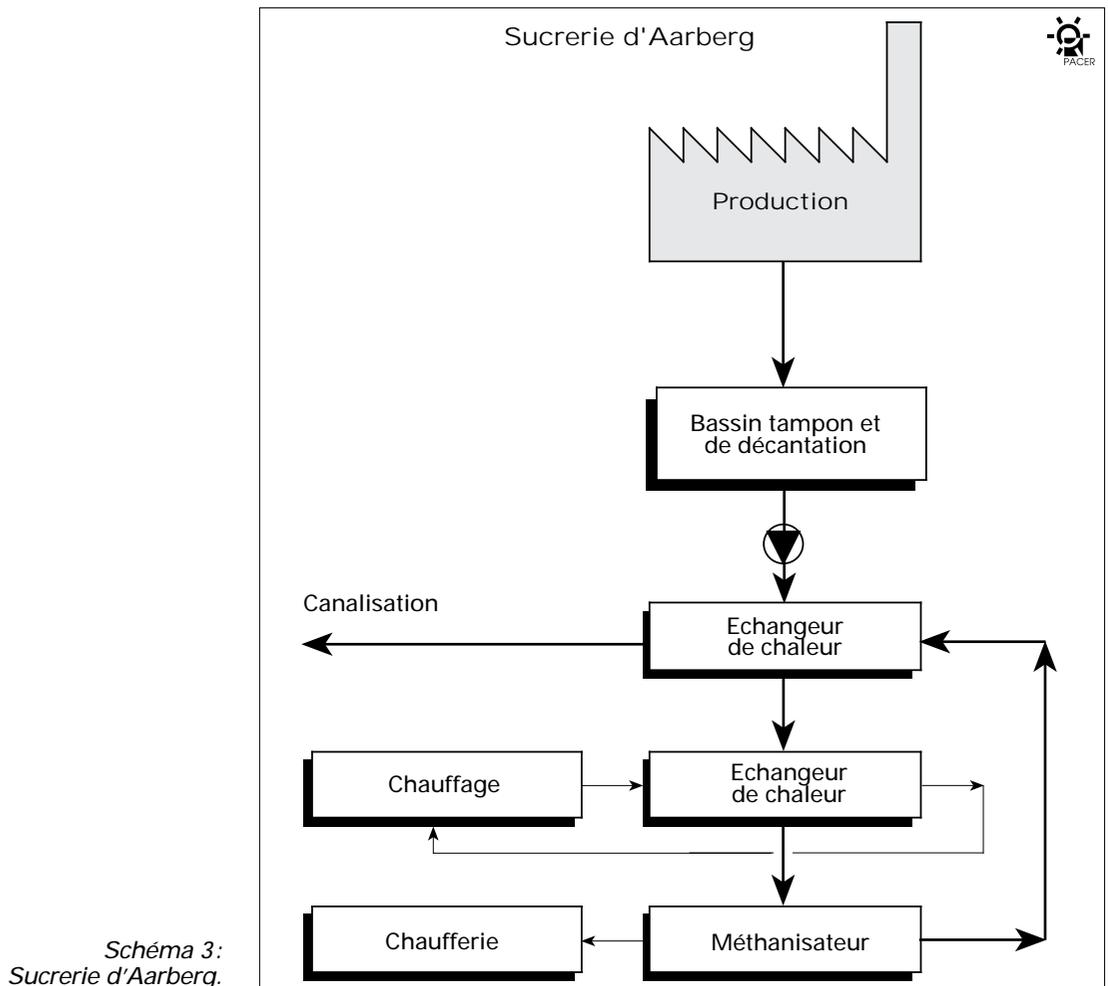


Schéma 3:  
Sucrierie d'Aarberg.

# 6. Aspects énergétiques et économiques

## 6A. Déchets solides

Contrairement au compostage ou à la digestion d'effluents industriels, on ne dispose que de peu de données permettant une comparaison des coûts d'installations en taille industrielle pour la digestion de déchets solides.

Pour cette raison, les frais d'investissement autant que les coûts d'exploitation sont la plupart du temps étayés par des estimations.

Les procédés pris en compte sous un aspect économique dans ce chapitre sont brièvement décrits dans les contributions précédentes. Il n'y a donc pas lieu de revenir ici sur les particularités spécifiques aux divers systèmes.

possible, on s'est appuyé sur des offres indicatives des fournisseurs respectifs.

Machines et appareils

Figurent sous cette position les machines et appareils suivants qui ne font pas partie intégrante des procédés/installations :

- grue à grappin / chargeur sur pneus;
- machine à tamiser;
- pompes;
- petits appareils;
- outillage.

### 6A.1 Frais d'investissement

Achat de terrain

L'unité retenue pour l'estimation de ce poste est l'emprise de terrain nécessitée par l'installation correspondante. Pour l'acquisition de terrain, un prix moyen de terrain industriel de 300 francs le m<sup>2</sup> a été pris en compte.

Construction

Dans la mesure où ils sont connus, on a retenu les frais effectifs de construction. Dans tous les autres cas, ces coûts ont été donnés soit sur la base d'offres indicatives de divers fournisseurs d'installations, soit à partir de nos propres expériences.

Développement / aménagement

Pour l'essentiel, les coûts suivants sont regroupés dans ce poste :

- raccordements d'eau et d'eau usée;
- raccordements électriques et téléphoniques;
- accès et places;
- clôture avec portail;
- aménagements extérieurs, plantations.

Installation

Ce poste comprend l'ensemble des parties d'installation électro-mécaniques spécifiques aux procédés. Lorsqu'ils étaient connus, on a pris en compte les coûts de réalisation réels. Quand cela n'a pas été

### 6A.2 Frais d'exploitation

Frais de capital

L'établissement de l'amortissement et des intérêts du capital investi résulte de la méthode habituelle des annuités pour le calcul des coûts d'investissement. Au moyen du taux d'intérêt du marché de 8% et de la durée d'utilisation, on peut déterminer les facteurs d'annuités selon la formule suivante :

$$(f) = ([1 + i]^n i) : ([1 + i]^n - 1)$$

où n correspond à la durée d'utilisation, en années, et i au taux d'intérêt indiqué.

|  Objet | Taux (%) | Durée d'utilisation (années) | Facteur (f) |
|---|----------|------------------------------|-------------|
| Construction, développement + aménagement   | 8        | 25                           | 0,094       |
| Installation digestion  | 8        | 16                           | 0,113       |
| Installation compostage   |          |                              |             |
| - en cellules/réacteurs   | 8        | 15                           | 0,117       |
| - en canal/andains dynamiques   | 8        | 12                           | 0,133       |
| Machines/appareils  | 8        | 7                            | 0,192       |

Tableau 1: Intérêt, durée d'utilisation et facteurs d'annuités correspondants.

Réparation, service, entretien (RSE)

Les coûts annuels pour la réparation, le service et l'entretien des constructions et des équipements, proviennent des taux suivants appliqués comme suit aux coûts d'investissements :

|  Objet | Taux - RSE (%) |
|---|----------------|
| Construction, développement + aménagement   | 1              |
| Installation<br>- Compostage<br>- Digestion   | 3              |
| Machines/appareils  | 6              |

Tableau 2: Taux de Réparation, Service et Entretien (RSE) pour construction, installation, machines et appareils.

Frais d'énergie

L'achat et la revente d'énergie électrique ont été calculés sur la base d'un prix moyen de 0,20 fr. / kWh, qui combine les hauts et les bas tarifs.

Pour le calcul des frais d'exploitation de la digestion, aucun coût énergétique n'a été introduit, car aucune énergie externe n'est nécessaire à la couverture des besoins en énergie de process. Les frais spécifiques d'exploitation se trouvent, par conséquent, ainsi réduits des montants équivalents à l'énergie excédentaire qui, selon les procédés, se montent entre 15 francs par tonne et 20 francs par tonne.

Ceci vaut également pour la combinaison digestion / compostage, dans la mesure où la consommation énergétique de la variante combinée (préparation, compostage et affinage) est couverte par la production propre (par la digestion) et peut permettre de livrer encore de l'énergie excédentaire dans le réseau public. Les coûts totaux s'abaissent dès lors du montant de la revente d'énergie électrique.

Pour la restitution de chaleur, il n'a été tenu compte d'aucun prix car, selon les sites d'installation, l'énergie thermique ne peut être que très mal, voire pas du tout, valorisée.

Frais de personnel

Le coût de la main-d'œuvre est calculé sur la base d'un coût moyen annuel de 95 000 francs. Ils s'entendent comme montants bruts comprenant toutes les charges sociales.

Divers

*Assurances*

Ce poste comprend toutes les assurances nécessaires pour l'installation, pour lesquelles un taux de prime de 1% appliqué aux coûts d'investissement a été introduit.

*Administration*

Cette position de frais regroupe les dépenses annuelles dans le domaine administratif, telles que matériel de bureau, taxes téléphoniques, etc.

*Contrôle de qualité*

Ce poste concerne les coûts annuels liés au contrôle de la qualité du produit (analyses, conseils).

*Elimination des matières résiduelles*

En fonction de la teneur des déchets livrés en matériaux indésirables, et selon la technologie choisie, c'est entre 1% et 4% d'inertes indésirables qu'il convient d'éliminer, respectivement d'incinérer. Les coûts résultants sont résumés à ce poste.

### 6A.3 Comparaison économique entre digestion et compostage

Les *tableaux 3 et 4* présentent les coûts d'investissement et d'exploitation de différentes technologies de digestion et de compostage. Les calculations pour les procédés de compostage présentés et pour les procédés de digestion VALORGA et KOMPOGAS sont basées sur les données les plus récentes, alors que celles des systèmes DRANCO et BTA datent d'à peu près deux ans.

Quatre différents procédés de digestion sont comparés au *tableau 3*:

1. VALORGA (mésophile, monoétape)
2. BTA (mésophile, biétape)
3. DRANCO (thermophile, monoétape)
4. KOMPOGAS (thermophile, monoétape)

|  Procédé | VALORGA<br>(1991)<br>monoétape<br>mésophile | BTA<br>(1989)<br>biétape<br>mésophile | DRANCO<br>(1989)<br>monoétape<br>thermophile | KOMPOGAS<br>(1991)<br>monoétape<br>thermophile | KOMPOGAS<br>(1991)<br>monoétape<br>thermophile |
|---|---|---------------------------------------|--|--|--|
| Quantité traitée (t/a)  | 10'000                                      | 10'000                                | 10'000                                       | 10'000   | 5'000  |
| INVESTISSEMENTS   | Fr.   | Fr.                                   | Fr.  | Fr.  | Fr.  |
| Achat de terrain  | 510'000                                     | 480'000                               | 420'000                                      | 300'000  | 180'000  |
| Construction  | 1'700'000                                   | 1'900'000                             | 1'582'000                                    | 1'556'000                                      | 1'166'000                                      |
| Développement / aménagement   | 250'000                                     | 250'000                               | 250'000                                      | 250'000  | 150'000  |
| Installation, y.c. positions suivantes:<br>Unité de réception/broyage                     | 10'000'000                                  | 8'000'000                             | 6'100'000                                    | 5'100'000                                      | 3'600'000                                      |
| Fermenteur  |   |                                       |  |  |  |
| Alimentation, vidange, pressage   |   |                                       |  |  |  |
| Stockage de gaz   |   |                                       |  |  |  |
| Mesures et régulation   |   |                                       |  |  |  |
| Valorisation du gaz (cogénération)  |   |                                       |  |  |  |
| Traitement air extrait  |   |                                       |  |  |  |
| Installation électro-technique  |   |                                       |  |  |  |
| Génie civil / installation  |   |                                       |  |  |  |
| Pesage  | 100'000                                     | 100'000                               | 100'000                                      | 100'000  | 100'000  |
| Grue à grappin/chargeur s. pneus  | 160'000                                     | 160'000                               | 160'000                                      | *  | *  |
| Tamis   | 100'000                                     | 100'000                               | 100'000                                      | 60'000   | 60'000   |
| Investissement total  | 12'820'000                                  | 10'990'000                            | 8'172'000                                    | 7'366'000                                      | 5'256'000                                      |
| COÛTS D'EXPLOITATION  | Fr./an                                      | Fr./an                                | Fr./an                                       | Fr./an   | Fr./an   |
| Frais de capital  |   |                                       |  |  |  |
| Achat de terrain  | 40'800                                      | 38'400                                | 33'600                                       | 24'000   | 14'400   |
| Construction  | 169'200                                     | 188'000                               | 158'108                                      | 155'664  | 119'004  |
| Développement / aménagement   | 23'500                                      | 23'500                                | 23'500                                       | 23'500   | 14'100   |
| Installation  | 1'130'000                                   | 904'000                               | 689'300                                      | 576'300  | 406'800  |
| Machines / appareils  | 49'920                                      | 49'920                                | 49'920                                       | 11'520   | 11'520   |
| Réparation, service, entretien<br>(RSE)   |   |                                       |  |  |  |
| Construction  | 18'000                                      | 20'000                                | 16'820                                       | 16'560   | 12'660   |
| Développement / aménagement   | 2'500                                       | 2'500                                 | 2'500  | 2'500  | 1'500  |
| Installation  | 300'000                                     | 240'000                               | 183'000                                      | 153'000  | 108'000  |
| Machines / appareils  | 15'600                                      | 15'600                                | 15'600                                       | 3'600  | 3'600  |
| Energie   | 0   | 0                                     | 0  | 0  | 0  |
| Personnel   | 190'000                                     | 190'000                               | 190'000                                      | 190'000  | 95'000   |
| Divers  |   |                                       |  |  |  |
| Assurances  | 128'200                                     | 109'900                               | 87'120                                       | 73'660   | 52'560   |
| Administration  | 40'000                                      | 40'000                                | 40'000                                       | 40'000   | 25'000   |
| Contrôle de qualité   | 20'000                                      | 20'000                                | 20'000                                       | 20'000   | 10'000   |
| Élimination matières résiduelles  | 100'000                                     | 100'000                               | 100'000                                      | 100'000  | 50'000   |
| Total coûts d'exploitation  | 2'227'720                                   | 1'941'820                             | 1'609'468                                    | 1'390'304                                      | 924'144  |
| COÛTS SPÉCIFIQUES   | Fr./t                                       | Fr./t                                 | Fr./t  | Fr./t  | Fr./t  |
| Y compris achat de terrain  | 223   | 194                                   | 161  | 139  | 185  |
| Sans achat de terrain   | 219   | 190                                   | 158  | 137  | 182  |

\* Compris dans position «Installation».

Tableau 3: Frais d'investissement et d'exploitation - Digestion.

Les coûts sont donnés pour une capacité de 10 000 tonnes par an. De plus, pour le procédé KOMPOGAS, une variante de coût pour le traitement de 5000 tonnes par an est présentée. Pour tous les procédés, les coûts d'un post-traitement aérobique (éventuellement nécessaire) de deux semaines ont été évalués. Pour les coûts ainsi décrits, il s'agit de montants totaux qui, pour la construction et l'exploitation, sont soumis à des conditions-limites déterminées.

La recette provenant de la production d'énergie renouvelable n'est pas prise en compte dans le *tableau 3*. La valorisation du biogaz produit dans un couplage chaleur-force avec introduction d'électricité dans le réseau peut, en fonction du montant net de l'énergie produite et du prix de l'énergie (fr. / kWh) être calculé en tenant compte de montants compris entre 15 francs et 20 francs par tonne de déchets. Ce fait contribue à améliorer la situation économique de la digestion qui, sous certaines conditions et dans des cas favorables, coûte probablement 40% moins cher que le compostage.

Dans certains cas, on peut dire que les coûts spécifiques de la digestion sont significativement inférieurs à ceux du compostage; ceci en particulier parce que l'emprise de terrain d'une installation de digestion est nettement plus faible que celle d'une installation de compostage.

Trois différents procédés de compostage font l'objet de la comparaison du *tableau 4*:

1. Compostage en andains couverts pour la valorisation de 3000 tonnes par an, dont l'application se situe dans de petites installations présentant un grand éloignement avec des zones habitées et/ou en combinaison avec la digestion anaérobie.
2. Compostage en cellules ou en réacteurs fermés, partiellement automatisé et doté d'une aération et d'une ventilation, pour la valorisation de 3000 tonnes par an. Grâce au fait que l'air vicié est traité au moyen d'un bio-filtre, on peut construire une telle installation plus près des régions habitées ou dans des zones industrielles.
3. Compostage en installations entièrement fermées, largement automatisé, et équipé d'une aération et d'une ventilation, pour la valorisation de 10 000 tonnes par an. La possibilité de désodoriser l'air extrait chargé d'odeurs au moyen d'un bio-filtre permet, pour le cas où aucune

autre limitation ne l'empêche, d'implanter de telles installations à proximité de zones habitées ou industrielles. Dans cette catégorie, deux solutions techniques existent, dont les coûts ne sont pas significativement différents. Il s'agit:

- a) du compostage en canal;
- b) du compostage en andains dynamiques.

Les coûts présentés comprennent la totalité des dépenses engendrées par la réalisation et le fonctionnement. Le *tableau 4* met en évidence le fait que les coûts spécifiques du compostage se situent à environ 200 francs par tonne de déchets traités. Le compostage en andains n'est pas clairement meilleur marché que les systèmes fermés et automatisés: ceci provient du fait qu'ils nécessitent relativement beaucoup de place et de personnel pour de petites quantités traitées, avec pour conséquences une augmentation des frais d'exploitation.

Pour des installations combinées, les coûts seront inférieurs à la somme des coûts des deux installations prises individuellement, car différentes composantes, telles que chargeur sur pneus et certaines parties des lignes de préparation et d'affinage (broyage, tamisage, etc.) ne doivent être acquises qu'une seule fois. Des économies sont également possibles sur les postes «Développement / aménagement» et «Construction». De plus, des installations combinées engendrent des coûts spécifiques plus faibles que ceux du compostage sans digestion. Simultanément, la valorisation des déchets organiques solides est améliorée, car les différentes fractions peuvent être traitées de façon optimale et spécifique.

|  Procédé  | Compostage en andains couverts retourneur   | Compostage en cellules ou en réacteurs automatisés bio-filtre   | Compostage en canal ou andains dynamiques fermés, automatisés bio-filtre  |
|--|---|---|---|
| Quantité traitée (t/a)   | 3'000   | 3'000   | 10'000  |
| <b>INVESTISSEMENTS</b><br>Achat de terrain<br>Halle, couverture (préparation, affinage, stockage)<br>Halle de fermentation, couverture<br>Aération / ventilation<br>Container bureau, aménagements intérieurs<br>Revêtement de la place<br>Bassin de collecte des eaux usées<br>Développement / aménagement<br>Broyeur<br>Equipement électro-mécanique; retourneur<br>Pesage<br>Chargeur sur pneus<br>Tamis<br>Ingénierie, direction des travaux           | Fr.<br>1'110'000<br>112'000<br>275'000<br>30'000<br>370'000<br>70'000<br>200'000<br>300'000<br>270'000<br>100'000<br>120'000<br>60'000<br>224'510 | Fr.<br>900'000<br>120'000<br>*<br>*<br>30'000<br>300'000<br>30'000<br>200'000<br>300'000<br>1'836'000<br>100'000<br>120'000<br>60'000<br>379'080                    | Fr.<br>1'800'000<br>600'000<br>1'900'000<br>700'000<br>100'000<br>300'000<br>350'000<br>*<br>3'800'000<br>100'000<br>160'000<br>*<br>1'020'500                              |
| Investissement total   | 3'241'510   | 4'375'080   | 10'830'500  |
| <b>COÛTS D'EXPLOITATION</b><br>Frais de capital<br>Achat de terrain<br>Construction<br>Développement / aménagement<br>Installation<br>Machines / appareils<br>Réparation, service, entretien (RSE)<br>Construction<br>Développement / aménagement<br>Installation<br>Machines / appareils<br>Energie<br>Energie électrique<br>Carburants<br>Personnel<br>Divers<br>Assurances<br>Administration<br>Contrôle de qualité<br>Elimination matières résiduelles | Fr./an<br>88'800<br>111'062<br>18'800<br>144'000<br>9'570<br>2'000<br>45'000<br>1'000<br>11'000<br>95'000<br>32'415<br>25'000<br>10'000<br>7'500  | Fr./an<br>72'000<br>90'154<br>18'800<br>214'812<br>92'160<br>5'800<br>2'000<br>55'080<br>28'800<br>16'000<br>6'000<br>62'700<br>43'751<br>25'000<br>10'000<br>7'500 | Fr./an<br>144'000<br>443'727<br>32'900<br>505'400<br>30'720<br>37'000<br>3'500<br>114'000<br>9'600<br>90'000<br>16'000<br>285'000<br>108'305<br>40'000<br>20'000<br>100'000 |
| Total des coûts d'exploitation   | 601'147   | 750'556   | 1'980'152   |
| <b>COÛTS SPÉCIFIQUES</b><br>Y compris achat de terrain<br>Sans achat de terrain  | Fr./t<br>200<br>171   | Fr./t<br>250<br>226   | Fr./t<br>198<br>184   |

\* Compris dans position «Installation».

Tableau 4: Frais d'investissement et d'exploitation - Compostage.

## 6A.4 Le concept de combinaison de la digestion et du compostage

Tous les déchets compostables ne sont pas méthanisables.

Des déchets ligneux de jardin, des écorces et certains déchets industriels ne conviennent pas pour la digestion et doivent être compostés. D'un autre côté, des déchets tels que la fraction organique des déchets ménagers, collectée séparément, des gazons et certains déchets industriels, doivent de préférence être digérés.

En particulier, les déchets facilement dégradables, humides ou mouillés provoquent des problèmes de compostage, car ils conduisent à la formation de zones anaérobies à l'intérieur des tas de compost.

Lorsque l'on considère le potentiel suisse des déchets biogènes solides, on remarque qu'une part située entre le tiers et la moitié de ce potentiel est méthanisable. On peut à partir de ce fait envisager de traiter dans de grandes installations des déchets de différentes origines. Il semble alors sensé de construire des installations combinant les deux technologies du compostage et de la digestion. Un schéma présentant ce traitement combiné de déchets organiques est présenté à la *figure 1* ci-contre.

La combinaison du compostage et de la digestion présente les avantages suivants:

- Des déchets humides, facilement dégradables, aussi bien que des substrats secs et ligneux, peuvent être traités de façon optimale pour chaque déchet respectif. Ainsi, les tas de compost auront moins tendance au compactage et à s'agglomérer, ce qui constitue une amélioration influençant le comportement à l'aération.
- Grâce au traitement séparé des déchets méthanisables (qui provoquent des problèmes d'odeurs lors du compostage), on peut dans certains cas obtenir une solution meilleure marché dans une installation non complètement fermée de compostage de la fraction ligneuse restante.
- Les coûts du compostage et de la digestion sont plus faibles pour des solutions combinées que pour des solutions séparées, sur deux sites distincts, car la plus grande partie des équipements mécaniques de pré- et de post-traitement peuvent être utilisés simultanément pour les deux technologies.

- A l'avenir, les installations de compostage conduites professionnellement seront – pour autant qu'elles ne soient pas complètement fermées – au moins équipées d'une couverture, ceci afin de pouvoir contrôler activement la teneur en humidité des tas. Il en résultera que beaucoup d'eau sera évaporée par la chaleur dégagée par le compostage. Cette perte en liquide doit être compensée par arrosage. L'eau de pressage provenant de la séparation solide / liquide de la digestion peut être utilisée à cette fin.
- Du matériau compostable, comme les branches et autres substrats ligneux, présente très souvent une faible teneur en éléments nutritifs. Le liquide formé durant la digestion de déchets organiques ménagers collectés sélectivement et de déchets industriels est, quant à lui, riche en nutriments. Ainsi, en utilisant ce liquide pour l'arrosage des tas, on optimisera le rapport C/N du processus de compostage de façon sensible selon les cas.
- Le biogaz produit au cours de la digestion peut être transformé en courant électrique et en chaleur dans une installation de cogénération. La quantité d'énergie contenue suffit normalement pour couvrir les besoins de toute l'installation combinée, c'est-à-dire pour la digestion, la préparation et l'affinage, ainsi que pour le retournement automatique des tas et l'insufflation d'air. Une grande quantité de chaleur et, selon les technologies appliquées et le rapport des quantités traitées en compostage et en digestion, un excédent en électricité également, peuvent être livrés (vendus) à d'autres consommateurs.
- Un court post-compostage de dix à quatorze jours améliore la qualité du matériau digéré. Lorsqu'il s'agit de produire un matériau de haute qualité (par exemple pour des applications spéciales en agriculture ou en paysagisme), l'infrastructure requise par ce bref post-traitement aérobie est déjà disponible sur une installation combinées.

Des solutions combinées ne peuvent être réalisées que dans des installations présentant une capacité minimale de traitement. Il ressort de considérations de coûts et de bénéfices qu'une taille minimale est nécessaire pour la digestion anaérobie comme pour le compostage automatisé. En l'état actuel des développements, il apparaît qu'une capacité de traitement de 3500 tonnes par an constitue la taille minimale pour la digestion (unités proposées par KOMPOGAS). En fonction du rapport entre matériaux méthanisable et

compostable, la taille minimale d'une installation combinée se situe à une capacité de traitement de 6000 à 8000 tonnes par an.

D'un autre côté, la limite supérieure de taille d'installation résulte de la charge sur l'environnement résultant de la collecte (énergie, bruit, pollution de l'air) et de l'augmentation des frais de transport.

Des études commandées par la Ville de Zurich montrent qu'en raison de considérations macroéconomiques, il est plus raisonnable de construire deux plus petites installations (capacité de traitement de 20 000 tonnes par an et 15 000 tonnes par an) plutôt qu'une seule plus grande (35 000 tonnes par an). Pour des raisons environnementales, aucune grande installation centralisée n'est planifiée pour le

moment; la solution optimale semble être celle qualifiée de «petite installation régionale professionnelle», qui est suffisamment grande pour permettre de traiter professionnellement les déchets, et pour laquelle les distances entre producteurs de déchets et site de traitement restent faibles.

Pour autant que les installations puissent être construites dans le voisinage immédiat de zones habitées ou à l'intérieur d'agglomérations (ce qui paraît raisonnable pour ce qui concerne les distances de transport), il s'avère nécessaire dans la plupart des cas de réaliser des installations entièrement fermées. On prévient des émissions d'odeurs en dirigeant l'air extrait sur un bio-filtre qui le désodorisera. Ces installations entièrement fermées présentent

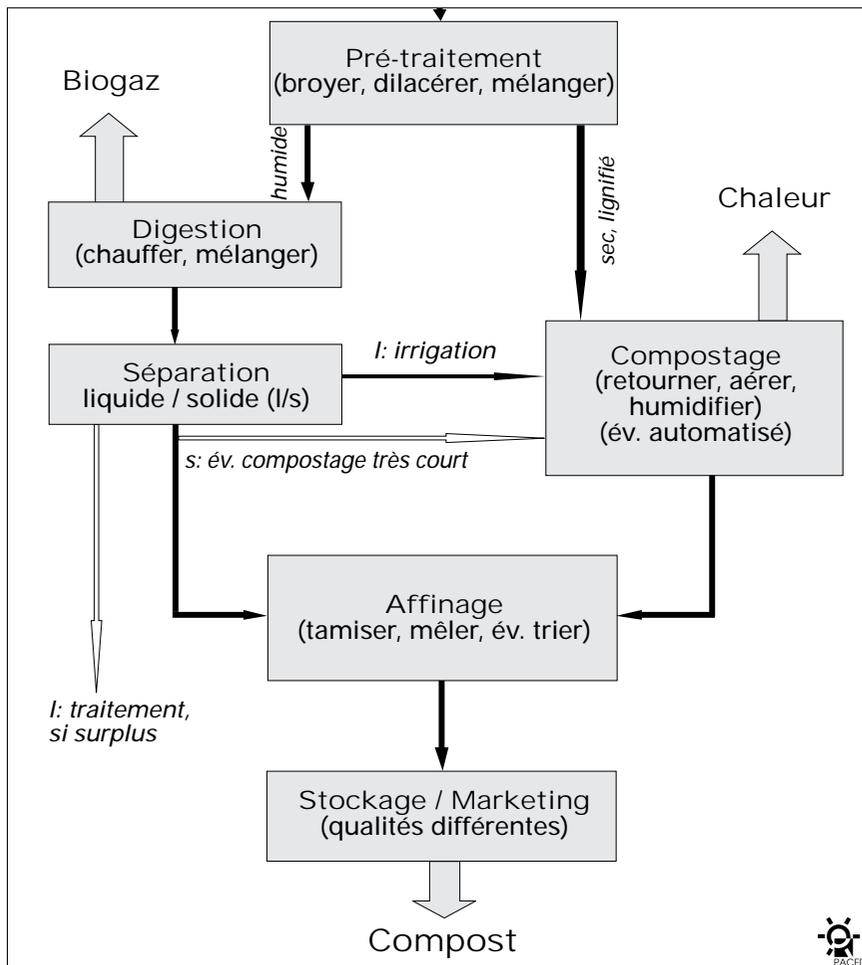


Figure 1: Schéma du traitement combiné de déchets organiques.

normalement une forte consommation énergétique pour l'aération du compost, ainsi que pour la ventilation des bâtiments (halle, etc.). La préparation du substrat (broyage, tri, etc.) nécessite à peu près autant d'énergie que l'aération. La consommation énergétique pour le retournement du compost équivaut, dans une installation automatisée, à environ la moitié de celle requise pour l'aération.

Des bilans énergétiques ont été calculés pour la combinaison d'une unité de compostage entièrement fermée avec

- a) une unité de digestion biétape, mésophile, avec pré-traitement thermique;
- b) une unité de digestion monoétape, thermophile.

Lorsque généralement on digèrera 10 000 tonnes par an et compostera 10 000 tonnes par an, on pourra tenir compte d'une production d'énergie issue de la méthanisation de l'ordre de 4,5 millions de kWh par an (environ 2,9 millions de kWh par an en chaleur et environ 1,6 million de kWh par an en électricité).

En combinant le compostage avec l'unité biétape et mésophile, on obtiendra un excédent de chaleur de l'ordre de 2 millions de kWh par an; l'électricité, par contre, sera totalement utilisée pour assurer le fonctionnement du process.

Un excédent de chaleur de 2,6 millions de kWh par an et un solde disponible de 375 000 kWh par an pour l'électricité peuvent être attendus en combinant le compostage avec la digestion monoétape et thermophile.

La haute autoconsommation énergétique de la digestion biétape est influencée par le grand nombre d'étapes de fonctionnement mécanisées et gourmandes en énergie. Depuis peu apparaissent pourtant des solutions présentant une plus faible consommation et qui devraient permettre de livrer à des tiers une part non négligeable de l'énergie produite. Dans une étude relative à la faisabilité de l'utilisation de la chaleur du compostage, il a été calculé qu'en compostant 10 000 tonnes de déchets organiques (matières sèches: environ 45%; contenu énergétique; 17,8 MJ/kg MS) avec un taux de dégradation de la matière sèche de 50%, c'est environ 11 millions de kWh d'énergie qui étaient libérés sous forme d'air chaud et humide. Des investigations sont actuellement en cours afin de déterminer dans quelle mesure cette chaleur à basse température peut être utilisée. Pour autant que l'air extrait soit refroidi dans des échangeurs de chaleur, se produisent alors de grandes quantités d'eau de condensation. Dans des installations de compostage

isolées, cette eau peut être employée pour l'arrosage des tas. Dans des installations combinées, en revanche, il semble raisonnable de conduire l'eau de condensation vers la canalisation, et d'utiliser l'eau usée provenant de la séparation solide / liquide de la digestion pour humidifier les tas. Cet effluent doit en effet être épuré dans des digesteurs isolés et au moyen de procédés coûteux d'épuration, avant de pouvoir être rejeté en canalisation. Dans une première installation de digestion exploitée en taille industrielle, à Rümliang/Glattbrugg, près de Zurich, des essais sont cependant en cours en vue d'épurer cette eau de pressage dans un filtre anaérobie dynamique.

#### Conclusions

1. Les déchets ligneux, arbustifs et en bois seront de préférence compostés; les déchets humides et facilement dégradables seront avantageusement digérés.
2. Le potentiel des déchets compostables et méthanisables est pratiquement équivalent.
3. Dans la plupart des cas, digestion et compostage se complètent.
4. Au cas où les deux procédés sont mis en œuvre, en combinaison et au même endroit, les déchets peuvent être traités de façon adaptée; les composantes organiques ligneuses allant au compostage et les parties humides et facilement dégradables étant digérées.
5. Pour de plus grandes installations, la valorisation combinée tend à engendrer des frais inférieurs à ceux du compostage sans digestion.
6. Aussi bien le traitement biologique anaérobie que le traitement aérobie des déchets biogènes sont techniquement réalisables et écologiquement judicieux (contribution à la compensation du déficit en humus, production d'énergie renouvelable, décongestion des usines d'incinération et des décharges).
7. Pour le traitement de déchets ménagers et industriels humides et facilement dégradables, la digestion anaérobie offre des avantages économiques par rapport au compostage car d'une part le compostage requiert une plus grande emprise de terrain, et d'autre part, ces déchets mélangés de préférence avec des matériaux structurants ligneux doivent être traités dans des halles relativement coûteuses. En considérant le montant de la recette provenant de la vente de l'énergie excédentaire, les avantages en faveur de la digestion s'accroissent encore.

## 6B. Effluents industriels

Contrairement au cas des déchets solides, les données du problème pour les effluents industriels sont très différentes d'un secteur industriel à l'autre. Pour cette raison, il n'est pas possible d'établir des comparaisons de coûts de portée générale et valables pour tous les cas. Les coûts d'une installation pour l'industrie papetière ne sont pas comparables à ceux d'une unité pour l'industrie sucrière. Ceci vaut également pour des aspects annexes de l'épuration anaérobie des eaux usées industrielles, et spécialement aussi pour les aspects énergétiques.

Pour cette présentation, nous avons choisi deux exemples qui peuvent fournir des conclusions approximatives également valables pour des installations analogues, se situant dans des domaines de quantités d'effluents et de taux de charge pouvant être admis pour d'autres installations. Afin de pouvoir apprécier correctement les coûts indiqués, les données de calcul sont résumées dans ce qui suit.

### 6 B.1 Coûts d'investissement

#### Achat de terrain

Comme dans la plupart des autres cas, les exemples cités ont été réalisés sur des parcelles appartenant déjà aux entreprises industrielles. Cependant, l'emprise de terrain nécessaire à l'installation a été calculée à un prix de terrain industriel de 300 francs le m<sup>2</sup>.

#### Construction

Les coûts des installations ont été introduits sur la base de décomptes effectifs. Pour les variantes non réalisées des plus ou moins-values ont été calculées à partir des offres.

#### Développement et aménagement

Les frais suivants ont été évalués sous cette position :

- mesures internes destinées à réunir et à transférer les effluents;
- conduite d'amenée et raccordement à la canalisation;
- travaux complets d'aménagement, y compris accès, places, clôtures et aménagements extérieurs.

#### Equipements

Sous cette position figurent toutes les parties d'équipements électro-mécaniques qui ne sont pas soumises à une usure proprement spécifique (conduites, robinetterie, installations, équipements électriques, etc.). Les coûts des équipements ont été calculés sur la base de décomptes effectifs. Pour les variantes non exécutées, des plus ou moins-values ont été évaluées à partir des offres.

#### Machines

Sous la dénomination «machines» sont regroupées toutes les parties d'équipements qui présentent naturellement une usure de fonctionnement (pompes, souffleries, aérateurs, etc.). Les coûts de ces machines ont été établis sur la base de décomptes définitifs. Les variantes non exécutées ont été évaluées en moins ou plus-values, sur la base des offres.

### 6B.2 Frais d'exploitation

#### Frais de capital

L'établissement de l'amortissement et des intérêts du capital investi résulte de la méthode habituelle des annuités pour le calcul des coûts d'investissement. Au moyen du taux d'intérêt du marché de 8% et de la durée d'utilisation, on peut déterminer les facteurs d'annuités selon la formule suivante :

$$(f) = ((1 + i)^n i) : ((1 + i)^n - 1)$$

où n correspond à la durée d'utilisation, en années et i au taux d'intérêt pratiqué.

|  Objet | Taux (%) | Durée d'utilisation (années) | Facteur (f) |
|---|----------|------------------------------|-------------|
| Construction/ Développement + aménagement   | 8,00     | 25                           | 0,094       |
| Equipements   | 8,00     | 15                           | 0,117       |
| Machines  | 8,00     | 7                            | 0,192       |

Tableau 1: Intérêt, durée d'utilisation et facteurs d'annuités correspondants.

#### Réparation, service, entretien (RSE)

Les coûts annuels pour la réparation, le service et l'entretien (RSE) des constructions, des équipements, ainsi que des machines, proviennent des taux appliqués comme suit aux coûts d'investissement.

|  Objet | Taux - RSE (%) |
|---|----------------|
| Construction  | 1              |
| Equipements   | 2              |
| Machines  | 6              |

Tableau 2: Taux - RSE pour les parties de construction et d'installation.

**Frais d'énergie**

Pour l'énergie électrique, un prix moyen de 0,20 fr / kWh a été admis; ce prix tient compte et combine les hauts et bas tarifs ainsi que les frais pour consommations de pointe. La substitution du gaz naturel par le biogaz tient compte d'un prix de 0,04 fr. / kWh pour le gaz naturel.

**Frais de personnel**

Le coût de la main-d'œuvre est calculé sur la base de 110 000 francs par personne et par an. Les frais de personnel s'entendent comme montants bruts, y compris toutes les charges sociales.

**Divers**
**Assurances**

Ce poste comprend toutes les assurances nécessaires pour l'installation. Un taux de 1% sur l'ensemble des frais d'investissement a été pris en compte.

**Traitement des boues**

Les boues produites dans l'installation devront être traitées et éliminées. Un coût de 0,80 fr. / g de matière sèche a été calculé pour les coûts d'élimination des boues.

**Redevances sur les effluents résiduels**

Les coûts relatifs aux effluents résiduels ont été calculés et introduits sur la base des décompositions de frais respectivement en vigueur. Pour les deux exemples, le calcul des coûts des effluents résiduels a été établi compte tenu des quantités d'eaux usées, de la charge organique ainsi que de la charge en matières décantables.

### 6B.3 Exemples

**Cartonnerie de Niedergösgen**

Le procédé mis en œuvre, ainsi que les principales caractéristiques techniques de cette installation sont décrits au *chapitre 5.4.1*. L'installation a été réalisée en dehors de l'enceinte de l'usine, ce qui occasionne des frais relativement importants concernant les canalisations d'effluents et l'acheminement du gaz vers l'utilisation.

Le *tableau 3* montre les coûts engendrés par les trois différents procédés étudiés ainsi que la situation énergétique de l'époque, transcrite en coûts.

|  Procédé | Unité              | Réacteur contact anaérobie | Réacteur anaérobie UASB |           |
|---|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------|
| <b>Données techniques</b>   |                    |                            |                         |           |
| Débit d'effluent  | m <sup>3</sup> /d  | 6'000                      | 6'000                   | 6'000     |
|   | m <sup>3</sup> /a  | 1'500'000                  | 1'500'000               | 1'500'000 |
| Charge DCO  | kg/d               | 10'000                     | 10'000                  | 10'000    |
|   | kg/a               | 2'500'000                  | 2'500'000               | 2'500'000 |
| <b>INVESTISSEMENTS</b>  | Fr.                | 7'700'000                  | 7'750'000               |           |
| Achat de terrain  | Fr.                | 750'000                    | 750'000                 | 750'000   |
| Construction  | Fr.                | 1'500'000                  | 2'850'000               | 1'500'000 |
| Développement/Aménagement   | Fr.                | 250'000                    | 250'000                 | 250'000   |
| Equipements   | Fr.                | 4'500'000                  | 3'500'000               | 3'900'000 |
| Machines  | Fr.                | 700'000                    | 400'000                 | 700'000   |
| <b>COÛTS ANNUELS</b>  |                    |                            |                         |           |
| Frais de capital  | Fr./a              | 885'400                    | 837'700                 | 815'200   |
| Service et entretien  | Fr./a              | 149'500                    | 125'000                 | 137'500   |
| Energie   | Fr./a              | -128'000                   | -169'000                | -105'000  |
| Energie électrique  | Fr./a              | 52'000                     | 11'000                  | 75'000    |
| Substitution gaz naturel  | Fr./a              | -180'000                   | -180'000                | -180'000  |
| Personnel   | Fr./a              | 90'000                     | 90'000                  | 90'000    |
| Divers  | Fr./a              | 577'000                    | 577'500                 | 571'000   |
| Total frais d'exploitation  | Fr./a              | 1'573'900                  | 1'461'200               |           |
| <b>COÛTS SPÉCIFIQUES</b>  | Fr./m <sup>3</sup> | 1,05                       | 0,97                    |           |
|   | Fr./kg DCO         | 0,63                       | 0,58                    |           |

Tableau 3: Cartonnerie de Niedergösgen - coûts et situation énergétique.

Le choix se porta sur le système UASB, en faveur duquel les coûts et surtout les nombreuses références sur des effluents similaires firent pencher la balance.

Brasserie Feldschlösschen à Rheinfelden  
Le procédé retenu ainsi que les principales données techniques de cette installation sont décrit au chapitre 5.4.2. Cette installation a été exécutée enterrée et présente dès lors des coûts d'investissement qui sont beaucoup plus élevés qu'ils ne l'auraient été avec une exécution hors-sol.

Le tableau 4 présente une comparaison entre une pré-épuration aérobie des eaux usées et trois différents systèmes anaérobies. En raison de la réalisation enterrée qui a dû être prévue, les procédés présentant de faibles coûts de construction disposent de nets avantages en ce qui concerne les coûts d'investissement. Ceci conduisit en fin de compte à de plus faibles investissements pour le procédé UASB.

Dans le même tableau, la situation énergétique est décrite sur la base des coûts. On constate ici clairement que les systèmes anaérobies présentent finalement un gain énergétique, alors que le système aérobie montre d'importants coûts énergétiques.

Ici également, le choix se porta sur le système UASB. A côté des coûts et des références, la meilleure intégration dans le terrain fut déterminante.

|  Procédé | Unité              | Système aérobie à boues activées | Réacteur contact anaérobies | Réacteur anaérobie UASB | Réacteur anaérobie à lit fixe |
|---|--------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| <b>Données techniques</b>   |                    |                                  |                             |                         |                               |
| Débit d'effluent  | m <sup>3</sup> /d  | 2'150                            | 2'150                       | 2'150                   | 2'150                         |
|   | m <sup>3</sup> /a  | 473'000                          | 473'000                     | 473'000                 | 473'000                       |
| Charge DCO  | kg/d               | 4'800                            | 4'800                       | 4'800                   | 4'800                         |
|   | kg/a               | 1'056'000                        | 1'056'000                   | 1'056'000               | 1'056'000                     |
| <b>INVESTISSEMENTS</b>  |                    |                                  |                             |                         |                               |
| Achat de terrain  | Fr.                | 200'000                          | 200'000                     | 200'000                 | 200'000                       |
| Construction  | Fr.                | 1'800'000                        | 2'000'000                   | 2'500'000               | 2'000'000                     |
| Développement/Aménagement   | Fr.                | 250'000                          | 2'500'000                   | 2'500'000               | 2'500'000                     |
| Equipements   | Fr.                | 800'000                          | 4'500'000                   | 3'200'000               | 4'050'000                     |
| Machines  | Fr.                | 1'600'000                        | 300'000                     | 150'000                 | 390'000                       |
| <b>COÛTS ANNUELS</b>  |                    |                                  |                             |                         |                               |
| Frais de capital  | Fr./a              | 609'500                          | 1'023'100                   | 889'200                 | 970'450                       |
| Service et entretien  | Fr./a              | 132'500                          | 153'000                     | 123'000                 | 144'000                       |
| Energie   | Fr./a              | 148'100                          | -66'000                     | -78'000                 | -63'000                       |
| Energie électrique  | Fr./a              | 148'100                          | 24'000                      | 11'000                  | 22'000                        |
| Substitution gaz naturel  | Fr./a              | 0                                | -90'000                     | -89'000                 | -85'000                       |
| Personnel   | Fr./a              | 100'000                          | 130'000                     | 130'000                 | 130'000                       |
| Divers  | Fr./a              | 908'900                          | 650'100                     | 650'600                 | 669'600                       |
| Total frais d'exploitation  | Fr./a              | 1'899'000                        | 1'899'200                   | 1'714'800               | 1'851'050                     |
| <b>COÛTS SPÉCIFIQUES</b>  |                    |                                  |                             |                         |                               |
|   | Fr./m <sup>3</sup> | 4,01                             | 4,00                        | 3,63                    | 3,91                          |
|   | Fr./kg DCO         | 1,80                             | 1,79                        | 1,62                    | 1,75                          |

Tableau 4: Brasserie Feldschlösschen à Rheinfelden - coûts et situation énergétique.

# Associations organisatrice et de soutien

## ARPEA

Association romande  
pour la protection des eaux et de l'air

The logo for SIA (Société suisse des Ingénieurs et des Architectes) consists of the lowercase letters 'sia' in a bold, black, sans-serif font.

Société suisse  
des Ingénieurs et des Architectes



Union technique suisse

## ASPEE

Association suisse  
de l'épuration des eaux