

Transformation des déchets pour leur valorisation agricole.

I. Introduction

Par principe, nous n'évoquerons ici que les filières de traitement biologique qui permettent le recyclage de matière organique et fertilisante dans l'agriculture. Les autres filières classiques de traitement, telles que la mise en décharge ou l'incinération, ne seront pas évoquées.

En fait, on s'aperçoit que la fermentation au sens large est la seule voie de traitement adaptée au recyclage des déchets organiques, car elle permet toujours l'obtention d'un co-produit résiduel permettant l'amendement et la fertilisation des sols. On distinguera 3 grands types de fermentation ([diapo 3](#)) :

- la fermentation alcoolique,
- la digestion anaérobie ou [méthanisation](#),
- la fermentation aérobie ou [compostage](#).

Il est important de signaler que l'obtention d'un compost de qualité nécessite pratiquement toujours une fermentation aérobie pour la maturation finale des résidus de digestion anaérobie ou de fermentation alcoolique. En conséquence le compostage, et plus particulièrement sa phase finale de maturation, peut être considéré comme une technique récurrente quelque soit le type de fermentation choisi au départ.

II. La fermentation alcoolique ([diapos 4 et 5](#))

Contrairement aux autres fermentations, la fermentation alcoolique, à base de levures, ne concerne encore aujourd'hui qu'une catégorie bien précise de déchets organiques. Il s'agit des déchets à forte teneur en glucides, surtout les amidons et les sucres libres. Les déchets les mieux adaptés sont les résidus végétaux de l'industrie sucrière, notamment les mélasses de canne ou de betterave à sucre qui contiennent encore 50% de glucides. C'est ainsi que l'on estime que 3,5 à 4 tonnes de mélasse peuvent permettre la production d'une tonne d'alcool éthylique. L'intérêt par rapport à la production classique d'alcool à partir du pétrole est que la dépense énergétique est 3 à 4 fois moindre. Dans le cas des céréales, l'intérêt est moindre car une étape préalable de saccharification de l'amidon est nécessaire.

Dans le domaine des déchets, il est possible d'utiliser certains résidus végétaux tels que les rafles de maïs ou encore les papiers-cartons, mais les techniques ne sont pas encore concurrentielles. Le traitement des déchets lignocellulosiques quant à lui, exige une opération de prétraitement lourde destinée à éliminer la lignine, généralement par hydrolyse alcaline, ce qui conduit à des surcoûts importants. Du fait du peu d'application de cette filière de traitement aux déchets urbains et agricoles, nous ne l'évoquerons pas ici.

III. Les processus anaérobie et aérobie ([diapo 6](#))

Les fermentations bactériennes sont beaucoup mieux adaptées à la transformation des déchets organiques. Elles peuvent être mises en œuvre en présence (aérobie) ou absence (anaérobie) d'oxygène. La digestion anaérobie ou méthanisation a lieu dans un réacteur fermé alors que le compostage est conduit à l'air libre ou en réacteur ouvert.

La dégradation des molécules organiques en anaérobie entraîne la formation de méthane et de dioxyde de carbone avec une faible production de chaleur. En aérobie, cette biodégradation produit du dioxyde de carbone et de l'eau et elle est fortement exothermique.

Après utilisation du méthane à des fins énergétiques, les 2 processus sont équivalents en terme de production finale de dioxyde de carbone (GES). Cependant, l'économie d'énergie non renouvelable réalisée grâce au méthane entraîne un bilan net plus favorable du processus anaérobie.

La digestion anaérobie

III.1. Intérêt et déchets traités (diapo 7)

La digestion anaérobie permet la stabilisation des déchets organiques en produisant un gaz combustible, le méthane. Elle s'applique principalement aux déchets humides riches en matière organique à dominante cellulosique.

III.2. Principe général

Le processus de digestion anaérobie (en absence totale d'oxygène) se déroule dans un réacteur fermé appelé digesteur et abouti à la formation de 2 co-produits : le biogaz et un résidu méthanisé ou digestat. C'est un processus naturel résultant d'une activité microbienne complexe qui s'établit en trois étapes principales:

- hydrolyse, par laquelle les macromolécules organiques se trouvent décomposées en produits plus simples; action des bactéries fermentaires;
- acidogénèse, qui conduit à la formation d'acides gras volatils divers, en particulier l'acide acétique; action des bactéries acidogènes et essentiellement acétogènes;
- méthanogénèse, étape ultime pendant laquelle le biogaz est produit à partir des acides gras volatils, du dioxyde de carbone et de l'hydrogène issus des étapes précédentes; action des bactéries méthanogènes.

Cette flore bactérienne mixte est généralement présente naturellement, en quantité plus ou moins importante, dans la plupart des déchets organiques. Le démarrage de la digestion anaérobie peut être accéléré en inoculant le digesteur avec une flore spécifique, par exemple en ajoutant des matières stercoraires (contenu de panse) de bovins ou un digestat provenant d'un autre réacteur en fonctionnement.

Le principal facteur influençant la digestion anaérobie est la température. On distingue 3 plages de température engendrant chacune la présence d'une flore microbienne adaptée: psychrophilie (10 à 25°C), mésophilie (25 à 40°C) et thermophilie (45 à 60°C). La cinétique de la digestion anaérobie croît avec la température. La réaction n'est que faiblement exothermique et les conditions de température nécessaires au développement optimal des bactéries mésophiles ou thermophiles doivent être créées par un apport de chauffage externe. En zone tropicale, les conditions de température et d'ensoleillement suffisent à entretenir la mésophilie et la plupart des digesteurs travaillent entre 25 et 35°C. Dans des conditions plus tempérées, l'apport de chaleur est obtenu à partir d'un chauffage alimenté par le biogaz produit; une partie de la production d'énergie est donc auto-consommée par le digesteur (30% en moyenne en Europe).

Parmi les autres facteurs importants, on notera le pH qui doit être supérieur à 6,8 et le rapport carbone/azote (C/N) du milieu qui définit les conditions de nutrition des micro-organismes. La présence de certains éléments toxiques ou inhibiteurs (métaux, azote ammoniacal, chlore, antibiotiques,...) peut parfois poser des problèmes.

Du fait des différentes réactions biologiques mises en jeu, la digestion anaérobie entraîne une diminution de la charge organique, donc polluante, du substrat initial. Elle est à ce titre une technique reconnue de dépollution, avec des performances variables selon la technique utilisée et le type de substrat.

III.3. Les co-produits

III.3.1. Le biogaz (diapo 8)

Le méthane et le gaz carbonique sont les composants essentiels du biogaz, mais il contient également en très faibles proportions de l'azote, de l'hydrogène, du monoxyde de carbone et de l'hydrogène sulfuré. Produit en milieu humide, le biogaz est par ailleurs saturé d'eau en sortie de digesteur.

La richesse du biogaz en méthane, qui conditionne son utilisation comme combustible ou comme carburant, est fonction de la nature du substrat digéré et s'exprime en fraction volumique (%). Plus riche en méthane (65 à 70%) lorsque le substrat est riche en azote comme dans le cas des déchets d'élevage et de certains effluents agro-industriels, la richesse diminue par contre (50 à 60%) pour les déchets végétaux et les ordures ménagères, plus pauvres en azote.

Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de quantité de ce combustible. On l'exprime à travers le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état de vapeur, ce qui est le cas de la plupart des équipements classiques d'utilisation du biogaz (brûleurs, moteurs à combustion). Le PCI du biogaz dépend de sa teneur en méthane, il est exprimé en kWh/m³ ou kWh/kg. Les principales caractéristiques comparées du biogaz, du méthane et de quelques combustibles ou carburants classiques sont données tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques comparées du biogaz et de quelques combustibles ou carburants.

Caractéristiques moyennes	Biogaz (60% CH ₄)	Méthane	Butane	Gaz naturel	Essence
PCI (kWh/kg)	4,89	13,70	13,56	13,61	12,78
Masse volumique (gaz - kg/Nm ³) (liquide - kg/l)	1,22	0,72	1,88	0,74	0,72
Densité par rapport à l'air	0,94	0,55	2,01	0,57	-
Limites d'inflammabilité dans l'air (%)	8 - 20	5 - 15	1,8 - 9	5 - 14	-

Le potentiel de production de biogaz est variable selon les déchets. Pour les effluents liquides, on peut considérer un rendement théorique de 350 l CH₄/kg DCO dégradé (DCO : demande chimique en oxygène). Pour les déchets solides, le rendement maximum est de 1100 l CH₄/kg MO dégradée (MO : matière organique).

Dans la plupart des cas, le biogaz peut être utilisé en l'état, sans être préalablement épuré. Les appareillages classiques ne nécessitent pas une pression d'alimentation élevée (maxi 10

mbar) aussi le stockage à basse pression est généralement suffisant lorsque les distances de distribution du biogaz ne sont pas trop élevées.

III.3.2. Le résidu ou digestat ([diapo 9](#))

Après digestion anaérobie, une partie plus ou moins importante de la matière organique a été transformée en biogaz, tandis que les éléments minéraux sont conservés et synthétisés en partie par la flore microbienne. Par rapport à la matière sèche initiale, du fait de la perte de carbone, le résidu méthanisé sera donc enrichi en éléments minéraux avec un rapport C/N réduit. La majeure partie de l'azote sera minéralisée et réduite sous forme d'ammoniaque. Le résidu sera de plus désodorisé et plus stable, donc stockable et épandable avec moins de nuisances. La digestion anaérobie en mésophilie permet de plus une réduction notable des parasites et bactéries pathogènes. En thermophilie, le résidu est exempt des principaux germes pathogènes.

Le résidu peut être utilisé directement comme fertilisant organo-minéral. C'est le cas, à très grande échelle, des lisiers méthanisés en Chine et en Inde. Pour les déchets solides, le résidu subit la plupart du temps un compostage aérobie complémentaire pendant plusieurs mois afin de parfaire sa [maturation](#). Le compostage mixte anaérobie puis aérobie a l'avantage, outre la production de biogaz, de permettre le compostage direct des déchets à forte humidité sans apport d'éléments structurants. C'est notamment le cas avec des déchets d'abattoir.

III.4. Technologies de digestion anaérobie ([diapo 10](#))

La fonction du digesteur est d'assurer la fermentation dans un réacteur fermé dont le volume doit être suffisant pour permettre des réactions biologiques performantes. On distingue deux grandes familles de digesteurs :

- les digesteurs pour effluents liquides: le substrat liquide (MST < 15%) s'écoule gravitairement ou sous l'action d'une pompe de l'entrée vers la sortie du réacteur; le modèle de base est représenté par la fosse sceptique conventionnelle;
- les digesteurs pour solides: le substrat solide ou pâteux est renouvelé périodiquement, en totalité ou partiellement, par des moyens mécaniques; le premier modèle "historique", sur la base d'une alimentation discontinue, a été mis au point par Isman et Ducellier à l'Ecole d'Agronomie d'Alger dans les années quarante.

Outre la cuve de fermentation proprement dite, le réacteur comprendra les dispositifs d'entrée et sortie du substrat et, dans certains cas, intégrera un équipement de chauffage avec régulation de température et un dispositif de stockage du biogaz. Une installation de digestion anaérobie comprend, en sus du digesteur, les ateliers suivants:

- stockage avec prétraitement éventuel du substrat,
- appareillages de stockage et utilisation du biogaz,
- stockage avec post-traitement éventuel du digestat.

En se basant sur des critères exogènes tels que le coût, la productivité, le rendement et la facilité d'exploitation, les installations actuelles varient du plus rudimentaire au plus sophistiqué, que ce soit à l'échelle familiale ou industrielle.

Les technologies de digestion anaérobie des effluents liquides sont relativement simples et l'on distingue celles à « biomasse libre » et celles à « biomasse fixée ». Les premières consistent en un réacteur mélangé avec ou sans décanteur en sortie. La principale variante est le digesteur à lit de boue dans lequel le décanteur est intégré. Dans les secondes, la rétention de la biomasse active à l'intérieur du digesteur est obtenue par fixation de celle-ci sur un support fixe (filtre anaérobie) ou mobile (lit fluidisé).

Dans les digesteurs pour solides, le substrat est, soit non immergé, soit immergé avec ou sans recirculation des liquides. Comme exposé précédemment, on entend par « solides » les déchets organiques à forte teneur en matières sèches, dits « pelletables », tels que par exemple les fumiers pailleux, les fèces d'animaux, la pulpe de café, les ordures ménagères ou les matières stercoraires d'abattoirs. On admet cependant que dans un digesteur, un taux d'humidité minimum de 60-65% est nécessaire aux échanges de chaleur et de nutriments. Le cycle de traitement peut être discontinu ou continu. En discontinu, la totalité du contenu du réacteur est renouvelé périodiquement en une seule fois, tandis qu'en continu, une fraction seulement du contenu est renouvelée à un pas de temps régulier. Nous décrirons d'abord 2 procédés adaptés pour de petites capacités de traitement (discontinu et Transpaille), puis un procédé industriel (Valorga).

Le procédé discontinu¹ (diapo 11) : c'est le plus simple; il ne nécessite qu'une enceinte isolée ou enterrée équipée d'un couvercle supérieur ou mieux, d'un dôme flottant ou d'une bâche assurant le stockage du biogaz (Figure 1). On charge le substrat prétraité ou non, puis on ferme l'enceinte et on laisse la digestion se dérouler pendant 20 à 40 jours selon la biodégradabilité et la température ambiante. Au cours de cette période, la production de biogaz augmente, passe par un maximum puis décroît. A l'issue de la digestion, on ouvre l'enceinte, on extrait le résidu solide en laissant les jus et l'on procède à un nouveau chargement. Pour obtenir une production de biogaz régulière, il est nécessaire de disposer au minimum de 3 digesteurs fonctionnant en parallèle avec un chargement décalé. Les principaux défauts de ce système très simple concernent son emprise foncière, le nécessaire stockage préalable des déchets, son exploitation qui nécessite des temps de travaux importants et son inadaptation aux substrats à profil de digestion acide qui induisent une acidification totale du milieu.

Le procédé TRANSPAILLE² (diapo 12) : breveté en 1983 et développé par le CIRAD, il utilise le principe du digesteur piston en continu. Il s'agit d'un long cylindre horizontal, d'une capacité unitaire maximum de 50m³, équipé à chacune de ces extrémités d'une trémie d'alimentation en déchets et d'une fosse d'évacuation du digestat (Figure 2). Pour favoriser la récupération du biogaz, le cylindre est incliné de 2 à 3 degrés. Le substrat s'écoule de l'entrée vers la sortie suivant un régime dit "piston" qui favorise les cinétiques de réaction et minimise les risques d'acidification. Le temps de séjour des déchets varie de 15 à 30 jours selon leur biodégradabilité et la température ambiante. Le procédé est basé sur un dispositif de transfert des solides en immersion, constitué d'un arbre central de transfert qui est actionné par un vérin hydraulique double effet. Le vérin n'effectue qu'un aller-retour par jour lors de l'opération de chargement du substrat, avec donc une très faible consommation d'énergie, de l'ordre de 0,3% de l'énergie produite. Les résidus digérés sont évacués manuellement ou mécaniquement, puis égouttés. Ils subissent ensuite un [compostage](#) de finition à l'air libre, avant recyclage agricole.

Le procédé VALORGA³ (diapo 13) : breveté en 1981, il utilise également le principe du digesteur piston en continu exposé précédemment. Le digesteur est une cuve cylindrique d'une capacité unitaire pouvant aller jusqu'à 4000 m³ et équipée d'une paroi centrale (Figure

¹ Théoleyre M.A., Héduit M., 1986. La méthanisation des fumiers - Guide pratique pour l'auto construction. GIDA/AFME, Paris, France.

² Elmaleh S., Elyaman F., Farinet J.L., Forest F., 1991. Méthanisation de déchets pailleux en réacteur tubulaire séquentiel. Récents Progrès en Génie des Procédés. Génie des réacteurs et des réactions. Antonini G. (Éd.), Ben Aim E. (Éd.), Paris, France, Lavoisier, p. 29-33.

³ Valorga, 1998. La filière méthanisation des déchets organiques et le procédé Valorga. Plaquette de présentation, Steinmüller Valorga, Montpellier.

3). Les déchets sont d'abord cisailés puis dilués dans un jus préalablement chauffé provenant du pressage des déchets déjà méthanisés. La pâte ainsi obtenue est introduite dans le digesteur. L'homogénéisation et le transit du contenu sont obtenus par injection de biogaz sous pression dans la masse en fermentation. Après extraction, le résidu subit un pressage mécanique d'où ressort un "pressat" à 55% de matière sèche et un jus qui est clarifié puis recyclé en tête pour la dilution des déchets entrants. Le pressat et les boues de clarification sont ensuite stabilisés par compostage sous bâtiment, puis affinés avant recyclage agricole.

IV. Le compostage

IV.1. Intérêt et déchets traités (diapo 14)

Le compostage permet la stabilisation des déchets organiques et leur hygiénisation. Il s'applique à tous les déchets riches en matière organique mais les déchets de consistance pâteuse doivent préalablement être mélangés à un matériau structurant (paille, copeaux de bois, etc.).

IV.2. Principe général

Le compostage est une biodégradation de la matière organique en présence d'oxygène. Les molécules organiques sont transformées par étapes successives en substances de poids moléculaire de plus en plus faibles et enfin en dioxyde de carbone (CO₂) et en eau. Cette fermentation s'opère en 3 phases successives :

- la phase de latence correspond au temps nécessaire à la colonisation du milieu par les micro-organismes (environ un jour). La température s'élève progressivement, elle résulte de l'activité respiratoire endogène des cellules vivantes présentes dans la masse;

- la phase de fermentation chaude, d'abord mésophile, grâce à la multiplication des micro-organismes qui provoquent le début de la fermentation. La réaction exothermique dégage de la chaleur et la température du mélange s'accroît fortement pour passer ensuite en régime thermophile. A 60-70°C, les micro-organismes thermophiles meurent (température optimale d'activité à 50-55°C) et le processus s'autorégule.

- la phase de refroidissement et de maturation à température ambiante termine le processus jusqu'à la raréfaction des matières facilement utilisables par les micro-organismes. Le compost a alors atteint son stade de maturité et est donc apte à un usage agricole.

Les principaux facteurs régissant le compostage concernent particulièrement la phase de fermentation chaude (diapo 15) :

Le taux d'oxygène lacunaire : tout organisme aérobie consomme de l'oxygène pour oxyder les composés organiques qui lui servent de nourriture. Le taux d'oxygène présent dans les espaces lacunaires du milieu en fermentation joue donc un rôle primordial. L'aérobiose est maintenue tant que le taux d'oxygène ne descend pas en dessous de 5%. Des valeurs de 30 à 40% d'espace lacunaire dans la masse en fermentation sont citées comme optimales.

Le taux d'humidité : il est en relation avec le volume d'espace lacunaire. Ainsi pour la fraction organique des ordures ménagères, le volume d'espace lacunaire optimal correspond à un taux d'humidité de 55 à 65%. Un taux d'humidité trop faible entraîne une baisse de l'activité des micro-organismes. Un taux d'humidité trop important se traduit par une obstruction des espaces lacunaires, d'où une disponibilité moins importante d'oxygène pour ces mêmes micro-organismes.

La température : obtenue dans la masse en fermentation, elle est le résultat d'un équilibre thermique avec le milieu extérieur, d'où l'importance des conditions climatiques. Son

évolution, caractéristique au fur et à mesure de l'avancement du compostage, dépend de la biodégradabilité du substrat et des conditions d'échange thermique. L'obtention d'une température supérieure à 55°C pendant au minimum 4 jours permet la destruction de certains germes pathogènes et parasites divers.

Le rapport C/N : au cours de leur évolution, les substrats organiques perdent plus facilement leur carbone que leur azote; il faut donc surveiller le rapport C/N. En effet, celui-ci décroît constamment au cours du compostage pour se stabiliser vers 8 à 10 dans un compost mûr. Au regard des études réalisées, les meilleurs rendements sont observés pour des rapports C/N initiaux compris entre 20 et 70. Pour des substrats moyennement fermentescibles, on considère que le rapport C/N optimal se situe entre 30 et 35.

Le pH : l'optimum pour les micro-organismes se situe au voisinage de la neutralité. Le pH baisse généralement au début du compostage puis remonte rapidement pour se stabiliser à des valeurs supérieures à 7,5.

En règle générale, la production finale de compost est de l'ordre de 45 à 55% du tonnage initial de déchets (en brut). En fonction de la durée de la phase de maturation, le produit final peut atteindre plusieurs stades de finition :

- amendement/fertilisation des sols : phase de maturation de 1 à 2 mois,
- support de culture : maturation prolongée (jusqu'à 12 mois).

IV.2. Les procédés de compostage (diapo 16)

Le compostage a évolué depuis une dizaine d'années vers une meilleure maîtrise des conditions de fermentation. La question des nuisances engendrées par les sites de compostage est devenue sensible, surtout si l'on traite des ordures ménagères, des déchets agricoles et/ou des boues d'épuration. Ainsi, le compostage passif, qui consiste à laisser un tas de déchets évoluer en l'état sans aucune intervention, n'est plus d'actualité sauf pour des unités individuelles traitant de petites quantités.

Les procédés de compostage se distinguent essentiellement au niveau des phases de latence et de fermentation chaude, de par le mode d'aération et le niveau de contrôle des différents facteurs. Nous distinguerons 3 procédés de compostage :

- le compostage extensif en andains retournés;
- le compostage intensif à aération forcée;
- le compostage industriel en réacteur fermé.

Nous évoquerons également un cas particulier : le lombri-compostage.

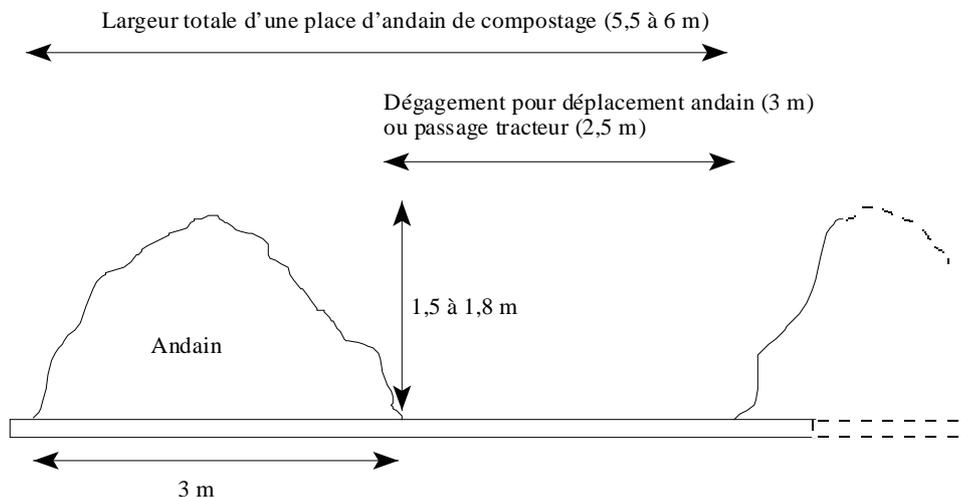
Compostage extensif en andains retournés (diapo 11)

C'est la technique souvent utilisée car l'oxygénation la plus efficace d'une masse en fermentation est obtenue par son retournement périodique qui assure une fermentation homogène. Les déchets sont disposés en andains de section triangulaire (base 2 à 4 m; hauteur 1.5 à 2 m; longueur à la demande) sur une aire étanche. Ces andains sont retournés manuellement ou mécaniquement à une certaine fréquence pour assurer l'apport d'oxygène dans le milieu. Le facteur limitant de cette technique est la teneur en oxygène dans la masse, qui retombe très rapidement après chaque retournement, surtout au cours de la première phase de fermentation chaude. En pratique, la fréquence et la qualité des retournements sont les paramètres clés de cette technique.

Pour la fraction organique des OM sous climat chaud, on admet une durée totale de latence et fermentation chaude de 1,5 à 2 mois avec un retournement des andains par semaine au cours

du premier mois, puis un retournement toutes les 2 semaines le deuxième mois. A la suite de la fermentation chaude, le pré-compost subit obligatoirement une maturation en tas pendant au minimum 2 mois.

En fonction des conditions locales et du débit de déchets à composter, le retournement des andains peut s'effectuer manuellement ou mécaniquement à l'aide d'équipements agricoles tels



que le retourneur d'andain ou l'épandeur à fumier ([diapo 18](#)). Dans les 2 cas, il faut prévoir un espace suffisant entre les andains pour leur déplacement ou pour le passage du tracteur.

Les andains sont disposés sur une dalle bétonnée légèrement inclinée (1 à 2%) qui facilite la récupération des jus et le nettoyage. En fonction de la pluviométrie une toiture peut être nécessaire.

A l'issue de la fermentation chaude en andains, le compost poursuit sa maturation en tas éventuellement retournés une fois par mois. Les tas en maturation d'un âge supérieur à 2 mois tiennent lieu de stockage avant un affinage par criblage et un éventuel conditionnement avant utilisation.

Compostage intensif en aération forcée ([diapo 19](#))

Les déchets sont disposés en andain de grande largeur, (largeur jusqu'à 6 m; hauteur 2,5 m; longueur à la demande), à l'air libre ou sous un bâtiment. L'aération forcée est réalisée par des drains d'injection d'air disposés sous les déchets et alimentées par un ventilateur extérieur qui aspire ou souffle l'air dans l'andain. La ventilation peut être réglée par la température de la masse en fermentation.

Pour la fraction organique des OM, la durée des phases de latence et fermentation chaude est de 3 à 4 semaines; la phase de maturation de 2 mois reste ensuite nécessaire. En phase de latence, l'air est soufflé dans l'andain afin d'assurer une aération homogène du milieu. Pendant la phase de fermentation qui libère des odeurs, l'air est plutôt aspiré à travers les déchets, puis refoulé dans un filtre constitué de compost mûr qui assure une bio-désodorisation. Certains procédés cumulent l'aération forcée avec un retournement périodique des andains, ce qui permet de réduire à 2 à 3 semaines la phase de fermentation chaude.

Par rapport au compostage extensif en andains retournés, le compostage intensif à aération forcée a l'avantage de réduire l'emprise foncière du dispositif et la main d'œuvre nécessaire, pour un coût d'investissement et un niveau de technicité cependant plus élevés. Il nécessite par ailleurs une alimentation électrique du site et engendre une consommation électrique élevée pour la ventilation.

Compostage industriel en réacteur (diapo 20)

Les déchets alimentent en continu ou discontinu un réacteur industriel généralement de type silo-tour, équipé d'une isolation, de dispositifs mécaniques de chargement/déchargement, d'une injection d'air ou d'oxygène et d'une régulation de la température et de l'humidité de leur contenu. L'ensemble permet de maintenir en permanence le produit dans les conditions idéales de fermentation. La durée de la phase de latence est pratiquement nulle et celle de la fermentation chaude est réduite : 2 à 20 jours suivant les procédés.

Plus rapides et d'une emprise foncière réduite, ces usines de compostage intègrent des dispositifs de traitement de l'air vicié et garantissent l'homogénéité du compost final. Dans tous les cas, une maturation finale du compost est nécessaire, d'une durée équivalente à celle des autres procédés.

Différents procédés, souvent brevetés et coûteux, sont développés par des firmes industrielles et parfois dédiés à des déchets ou des mélanges de déchets spécifiques.

Cas particulier du lombri-compostage (diapo 21)

Le lombri-compostage est une technique relativement récente développée à petite échelle dans différents pays. Il s'agit, après une phase initiale de fermentation chaude classique, d'une transformation du compost en couche mince qui utilise des vers adaptés, de la classe des épigés, pour dégrader par ingestion la matière organique. Après une inoculation au départ, la population de vers croît et s'auto-régule en fonction de la matière organique disponible. Après cette transformation, le compost subit une phase courte de maturation (1 mois).

Les principaux intérêts de cette technique résident dans l'homogénéité et la qualité visuelle du produit final. Dans le cas particulier des ordures ménagères brutes, il est possible de faire faire le travail de tri par les vers. Lors de la transformation, on observe en effet que les matériaux indésirables (non ingérables) se concentrent à la surface de la couche et que le compost peut être soutiré à la base.

Parmi les inconvénients, il faut noter l'emprise foncière très importante et le contrôle rigoureux des conditions de vie et de reproduction des vers (humidité de 55-60%, température entre 25 et 35°C).

ETUDE DE CAS

Critères de choix d'une technique de compostage des ordures ménagères à Essaouira, Maroc

(d'après Bonal et Farinet, 1999)

DONNEES DE BASE (diapo 22)

Les données sont issues d'une étude de faisabilité réalisée en 1998 pour le compte de la municipalité d'Essaouira.

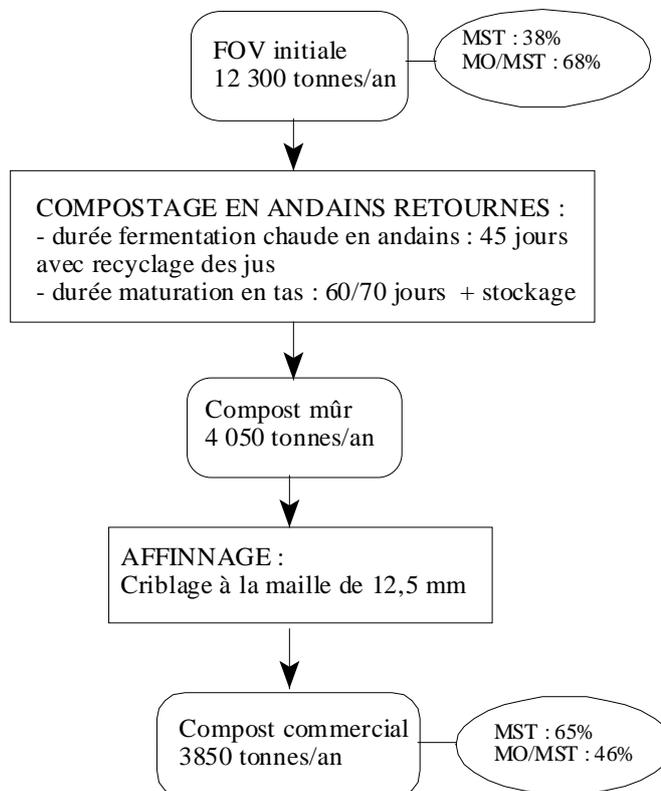
Ville d'Essaouira : 70 000 habitants en moyenne sur l'année, pointe à 100 000 habitants de juin à août

Quantité d'OM collectée : 22 000 t/an

Fraction organique valorisable (FOV) après tri : 12 300 t/an, soit 56% du tonnage OM

OPTIONS DE TRAITEMENT ET VALORISATION (diapo 23)

Les débouchés potentiels du compost dans la zone d'Essaouira ayant été déterminés, le compostage aérobique a été proposé comme filière de valorisation de la FOV. Il serait précédé d'une collecte ou d'un tri sélectif. Le bilan matière du compostage serait le suivant :



La municipalité souhaitant favoriser l'emploi, 2 alternatives ont été étudiées. Sur la base d'une technique de compostage en andains retournés, les opérations de transfert de matières (transport/chargement, andainage, retournement, stockage) peuvent être menées soit manuellement, soit mécaniquement. Dans le cas d'une exploitation manuelle, les opérations de transfert sont basées sur l'intervention d'employés équipés de pelles et brouettes. Pour une exploitation mécanisée, tout ou partie des différents transferts de matière sont conduits sur la base d'un équipement de type agricole ou travaux publics, à savoir : tracteur ou chargeur, remorques ou épandeurs, retourneurs d'andain.

BILAN DE L'ETUDE DE FAISABILITE

Les 2 alternatives d'exploitation se caractérisent par une infrastructure identique, mais des coûts en équipement et en fonctionnement différents. Elles se déclinent comme suit en terme d'emplois moyens annuels :

- exploitation manuelle : un chef de centre, 5 chefs d'équipe, 75 manœuvres;
- exploitation mécanisée : un chef de centre, 2 conducteurs d'engins, 11 manœuvres.

En terme de création d'emplois, les 2 alternatives ont un impact très différent en soulignant la difficulté, pour l'alternative manuelle, de gestion et organisation du personnel d'exploitation dans le respect des conditions d'hygiène et sécurité.

En termes économiques, le bilan général serait le suivant (en mFCFA ; 1 euros = 656 FCFA):

Postes	Exploitation manuelle	Exploitation mécanisée
Investissement	136 700	203 200
Amortissements	10 640	19 430
Fonctionnement annuel	76 700	29 570
- dont rémunération du personnel	71 940	12 980
Total charges annuelles	87 340	49 000
Produit annuel (vente compost)	25 700	25 700
Bilan = coût de traitement :		
- par an	61 640	23 300
- par tonne FOV	5,0	1,9

Le coût de traitement de la FOV, hors collecte et tri, est de 5000 FCFA/t pour l'alternative manuelle et de 1900 FCFA/t pour l'alternative mécanisée.

Une politique en faveur de l'emploi prend vite des proportions impressionnantes en terme de coût lorsque la taille des unités de traitement augmente. Dans ce cas particulier, le coût d'une telle politique serait 2,6 fois supérieur ; est ce justifiable pour la population qui paiera finalement la note ?

ETUDE DE CAS

Critères de choix d'une filière de compostage des ordures ménagères à Bakel, Sénégal

(D'après CIRAD/Municipalité de Bakel, 1996)

DONNEES DE BASE (diapo 24)

Les données sont issues d'une étude pilote sur 2 ans (1994/96) qui a permis de quantifier et caractériser les OM de la ville et de déterminer leur potentiel de méthanisation et compostage.

Ville de Bakel : 10 000 habitants, 650 concessions

Quantité d'OM collectée : 2500 t/an

Fraction organique valorisable (FOV) après tri : 2190 t /an, dont fines organiques 1500 t /an

OPTIONS DE TRAITEMENT ET VALORISATION

Volet commun : il regroupe la mise à disposition de poubelles, la collecte par charretiers sous contrat, le tri manuel, l'incinération de la fraction combustible, la mise en décharge de la fraction non recyclable ;

- Option1 : la FOV issue du tri est compostée classiquement en andains sur une durée de 3 mois ; production de compost : 1600 t/an (80% MST) ;
- Option 2: la FOV débarrassée des fines (soit 690 t/an) est méthanisée et on réincorpore ensuite les fines pour une phase finale de compostage en andains sensiblement identique à l'option 1 :
 - o production de biogaz : 66 240 m³/an, dont 15% autoconsommés
 - o production de compost : 1600 t/an (80% MST)

HYPOTHESES DE PRIX DE VENTE DES CO-PRODUITS (diapo 25)

- compost vendu au maraîchers à un prix plancher de 15 000 FCFA/t
- biogaz comprimé à basse pression et distribué dans un quartier proche à un prix de vente de 245 FCFA/m³ établi sur la base du prix réel du butane commercial, hors subvention de l'Etat.

BILAN DE L'ETUDE DE FAISABILITE

Options	Invest. (mFCFA)	Amortiss. (mFCFA/an)	Exploitat. (mFCFA/an)	Produit (mFCFA/an)	Coût du traitement (mFCFA)*			
					par an	par t.OM	par conces.	par hab.
Volet commun	20 700	2 190	14 500	-	16 690	6,7	25,7	1,7
option 1	9 100	950	4 880	24 000	(18 170)	(7,3)	(28,0)	(1,8)
total	29 800	3 140	19 380	24 000	(1 480)	(0,6)	(2,3)	(0,1)
option 2	182 500	13 830	7 180	13 800	7 210	2,9	11,1	0,7
total	212 300	16 970	26 560	37 800	5 730	2,3	8,8	0,6

(*) les chiffres entre parenthèses sont négatifs ; dans ce cas c'est une marge nette de valorisation

On peut d'abord imaginer que la Municipalité procède à la collecte et au tri et mette ensuite la FOV gratuitement à disposition des utilisateurs potentiels. Dans ce cas, le coût par habitant ressort à 1 700 FCFA/an, ce qui est tout juste supportable compte tenu du niveau de vie à Bakel. Pour la commune, le coût annuel serait de 16,7 millions FCFA, à mettre en rapport avec un budget annuel de l'ordre de 40 millions FCFA (!).

La vente du compost suivant l'option 1 permet de rentabiliser l'opération de traitement des ordures ménagères. La marge nette est faible (1,5 millions FCFA/an) et on tablera sur un équilibre des charges et des recettes pour cette option 1. Le coût total du compostage hors vente du co-produit est de 9 000 FCFA/t. OM, bien inférieur à celui admis en France pour des unités de tri-compostage d'une capacité plus importante (18 000 t OM/an), qui est de 22 000 FCFA/t. OM sans tenir compte de la collecte, mais en intégrant les intérêts sur les emprunts pour l'investissement.

L'option 2 avec production de biogaz n'est pas rentable et occasionne un coût de traitement de 600 FCFA/habitant.an, essentiellement à cause d'un investissement très supérieur. Ce résultat est classique dans le cas des énergies renouvelables, qui entraînent généralement un investissement très important pour des coûts récurrents faibles. On rappellera de plus que cette option nécessitera une subvention à hauteur de la subvention accordée au butane afin de mettre le biogaz à la disposition des consommateurs à un prix identique. Ce serait le prix à payer pour contribuer à la lutte contre la déforestation.....

V. Conclusions (diapo 26)

En premier lieu, on retiendra qu'aucune filière de transformation des déchets organiques n'est économiquement rentable et que la vente des coproduits permet au mieux de couvrir les coûts d'amortissement et de fonctionnement. Seul le compostage de déchets de qualité (fumiers d'élevage) avec ajout d'adjuvants destinés à augmenter la valeur fertilisante peut être rentable.

La digestion anaérobie et le compostage permettent d'obtenir un compost de qualité similaire. Par rapport au compostage, la digestion anaérobie a certains avantages :

- elle permet la production d'un gaz combustible qui peut être valorisé,
- elle évite le recours à des matériaux structurants pour les déchets trop humides ou pâteux,
- par rapport aux techniques classiques de compostage (andain retourné ou aération forcée), elle limite les nuisances et son emprise foncière est réduite.

Par contre, elle a aussi 2 inconvénients majeurs :

- un coût d'investissement élevé et une certaine complexité technologique, tant au niveau de la méthanisation en continu elle même, qu'au niveau du stockage et de l'utilisation du biogaz produit,
- elle implique de trouver une utilisation du biogaz proche du site et susceptible d'absorber la totalité de la production tout au long de l'année.