

Amélioration d'une ligne
d'affinage de compost
sur l'usine
de Saint Malo (35).

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1. Problèmes occasionnés par le compostage
2. Situation en France et dans le monde (pourcentage de déchets compostés)

A. AVANT-PROPOS

I. CADRAGE REGLEMENTAIRE

II. CADRAGE SCIENTIFIQUE

1. Phénomènes intervenant lors du compostage
2. Paramètres à prendre en compte (T, humidité, qualité du compost...)

B. LE COMPOSTAGE

I AVANT LE COMPOSTAGE

1. Caractérisation des déchets
2. Préparation avant la décomposition
3. Suivi des paramètres

I. COMPOSTAGE EN ENDAINS SIMPLES

1. Process et mise en oeuvre
2. Dimensionnement
3. Equipement et fournitures
4. Bilan économique

II. COMPOSTAGE EN ENDAIN ACCELERE

1. Process et mise en oeuvre
2. Dimensionnement
3. Equipement et fournitures
4. Bilan économique

III. COMPARAISON DES DEUX MODES DE COMPOSTAGE

Synthèse + tableau récapitulatif

1. Synthèse
 - a. Point de vue économique (rentabilité, éléments coûtant le + cher)
 - b. Efficacité (rapidité, qualité du compost)
 - c. Contraintes de chaque mode

IV VARIANTES

1. Le co-compostage
2. Utilisation de matériel spécifiquement + performant

CONCLUSION

INTRODUCTION

Dans le contexte actuel où la loi du 13 juillet 1992 devrait interdire l'accès des décharges aux déchets organiques en 2002 et où des surcoûts sont imposés à l'incinération (circulaire mâchefers, stabilisation obligatoire des réfioms avant la mise en décharge, etc...) le compostage peut séduire.

De plus l'ADEME offre une aide de 20% à tout projet de compostage respectant un cahier des charges précis et 35% pour des projets plus innovants.

1.Situation actuelle

La production française mobilisable de déchets verts (tontes de gazon, produits d'élagage, feuilles mortes, ect..) est estimée à 17 millions de m³, soit 3.4 millions de tonnes environ.(Données 1994)

a. Gisement, Production, et Typologie.

La ville de Bruz, 12000 habitants, à un gisement de 1100 tonnes de déchets verts par an. La production annuelle par habitant est donc de 90 kg. Et celle-ci devrait augmenter encore.

Cette augmentation du volume de déchets végétaux par habitant s'explique par trois raisons:

1.L'amélioration de la qualité du milieu de vie; L'architecture paysagère prend en effet de plus en plus de place dans une société qui s'urbanise.

2. Le développement rapide de la construction individuelle avec son jardin d'agrément ceinturé par une protection végétale.

3. L'intérêt croissant porté au jardinage amateur dans une société où les loisirs occupent une place de plus en plus importante.

Bruz est une ville en expansion dont la superficie d'espaces verts par rapport à la surface de la ville dépasse les 7.5% habituels.⁽²⁵⁾

D'après une étude du CEMAGREF 1993, la composition volumique du gisement de déchets verts d'une ville de plus de 10000 habitants se repartie comme ce qui suit.

tontes	21.4%	abattages	4.9%
feuilles mortes	22.2%	taille	17.2%
déchets floraux	3.6%	élagage	18.4%
déchets nettoisement	11.0%	plan d'eau	2.4%

(Tableau -Destination des déchets végétaux-)

Brûlage	9.1%
Décharge	45.7%
Traitement des OM	17.3%
Compostage	18.4%
Paillage	5.0%
Autres	4.5%

Situation à Bruz:

Actuellement, une partie des déchets verts est déposée par les habitants de Bruz au lieu dit «La Garenne». Ces déchets verts sont ensuite enlevés par la société TRIBORD (Rennes), puis broyés par la société THREAU et enfin transporté vers la plate-forme de compostage d'Angers.

Données en 1993:

6% du gisement national (135.000 à 150.000 tonnes de déchets verts) sont traités par une trentaine de plates-formes (MAZAUD 1994).

Données en 1995:

58 plates-formes de compostage dont 43 traitent seulement les déchets verts.

2. Les problèmes pour la valorisation des déchets

a. Le caractère saisonnier des flux de déchets verts:

La mise en place d'un traitement conjoint des déchets verts est une solution intéressante à condition que les ratios de mélange soient assurés en permanence.

Les tontes de pelouse sont en effet effectuées d'avril à novembre, alors que l'égailage des arbres se pratique en hiver, que le ramassage des feuilles mortes à lieu en automne et que la taille des haies et des arbustes est réalisée de juin à septembre. On observera par conséquent, en hiver, des flux importants de déchets de nature ligneuse et des flux faibles de déchets riches en nutriments (gazon, feuilles) alors que c'est l'inverse au printemps. (Valorisation et traitement des déchets verts, Alain Seguin).⁽⁹⁾

b. Les sources d'odeurs.⁽²⁶⁾

Lorsque la décomposition devient anaérobie, des composés odorants apparaissent:

- sulfure d'hydrogène: H_2S
- acides gras
- amines telles que cadaverine et putrescine
- sulfure organique
- terpènes

En condition aérobie, il peut y avoir des dégagements d'odeurs par l'ammoniac, produit lorsque le rapport C/N est inférieur à 25/1 et lorsque le pH est alcalin.

c. Recommandations techniques.

- Eviter de composter uniquement de l'herbe de tonte.
- assurer une oxygénation régulière par des retournements fréquents.
- ne pas aïer des andains trop grands: H=2m et L=4m suffisent
- mettre en place un lit de broyats ligneux à la base des andains. C'est le cas par exemple à ISLIP (Long Island USA)(The art and science of composting, p130-131, 1991)⁽²⁷⁾ et à Aacher (Allemagne)(Mullund Abfull, p124-130, 04/1990).
- Utiliser des biofiltres (Biocycle, 10/1992).⁽²⁸⁾

d. Débouchés du compost.

A l'heure actuelle la production de compost végétal se situe entre 110.000 et 40.000 t/an. Une grande part de ces tonnages finit en décharge et annule par conséquent l'intérêt d'une plate-forme de compostage. Ce phénomène s'explique par une mauvaise estimation préalable du marché local. Le problème serait résolu par une relation directe avec l'utilisateur ou avec un réseau commercial.

A. AVANT-PROPOS

II. CADRAGE REGLEMENTAIRE

• **Loi N° 75-633 du 15 Juillet 1975** relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux (article 2, cf. annexe):

Toute personne doit assurer ou faire assurer l'élimination des déchets portant atteinte à la santé de l'Homme et à l'environnement.

• **Décret N° 72-676 du 27 Juin 1972** portant approbation du cahier des charges type pour l'exploitation d'installations de traitement par compostage de résidus urbains (cf. annexe):

Article 4 (nature et prise en charge des résidus à traiter): les résidus à traiter comprennent les feuilles, les balayures et d'une façon générale tous les produits qui proviennent du nettoyage des voies publiques, voies privées abonnées au balayage, jardins publics, parcs, cimetières et de leurs dépendances.

Article 5 (obligation de l'exploitant): pendant le contrat, l'exploitant est le seul responsable de l'installation et doit donc contracter toutes les assurances utiles. Il doit au minimum avoir un représentant responsable sur l'installation.

Article 6 (conditions générales de fonctionnement de l'installation): l'installation doit être parfaitement propre et son exploitation doit être dictée par les conditions fixées par le Règlement Sanitaire Départemental (R.S.D.), aux obligations découlant de la réglementation sur les établissements classés.

Article 8 (capacité de l'installation): l'installation de compostage comporte: une fosse de réception de x mètres cubes de capacité utile, un circuit de manutention dont la capacité horaire est de x tonnes à la sortie de la fosse, « n » broyeurs de x tonnes de capacité horaire, « n » unités de fermentation accélérée de x tonnes de capacité journalière, un four de brûlage des refus de x tonnes de capacité horaire, une aire de fermentation de x m² de superficie, une aire de stockage de x m² de superficie.

Article 13 (redevances dues par la collectivité): les redevances dues par la collectivité rémunèrent l'exploitant de la totalité des prestations réalisées par celui-ci. Le compost produit étant la propriété de la collectivité (TVA non incluse). Selon une première formule et selon une variante A, l'exploitant est rémunéré par la collectivité exclusivement par une redevance composée d'une partie forfaitaire annuelle et d'une partie proportionnelle par tonne de résidus traités. Ceci doit permettre à l'exploitant de garantir le gros entretien et le renouvellement.

Article 14 (modalités de paiement): selon la même formule qu'à l'article 13, le montant des parties forfaitaires sera payable d'avance mensuellement (trimestriellement), le montant de celles-ci étant égal au douzième (quart) du forfait annuel. En ce qui concerne le montant des parties proportionnelles, il sera payable mensuellement (trimestriellement) sur la base du tonnage mensuel (trimestriel) traité à la fin de chaque mois (trimestre).

Article 15 (actualisation des prix):

Partie forfaitaire annuelle: $P_1 = P_0 * (a * S / S_0 + b * P_{sdC} / P_{sdCo})$ avec $a + b = 1$

Partie proportionnelle: $P_1 = P_0 * (a * S / S_0 + b * I / I_0 + c * F / F_0 + d * P_{sdB} / P_{sdBo})$ avec $a + b + c + d = 1$

P_0 , S , S_0 , P_{sdC} , P_{sdCo} , I , I_0 , F , F_0 , P_{sdB} , P_{sdBo} sont définis dans l'article 15 (cf. annexe).

• **Norme NF U 44-051** pour les amendements organiques (décembre 1981, cf. annexe):

Cette norme prend en compte les amendements organiques uniquement. Les autres matières fertilisantes ne rentrent pas dans son champ d'application. Actuellement les produits organiques destinés à l'amélioration des qualités physiques du sol sont essentiellement à base de matières organiques végétales. Le champ d'application de cette norme ne concerne pas les matières organiques d'origine animale traitées industriellement qui sont des engrais.

La présente norme fixe les dénominations et spécifications des amendements organiques. Ces derniers sont des matières fertilisantes composées principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale, fermentées ou fermentescibles, destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de la matière organique du sol.

Concernant le compostage de déchets verts les dénominations et spécifications possibles des amendements organiques sont:

N°	Dénomination	Matière organique % min en masse		Matière organique/azote organique Rapport max	N total % max en masse
		sur produit brut	sur produit sec		
3	Matière végétale brute	40	70		4
9	Amendement végétal non fermenté	50	60	50	3
10	Amendement végétal fermenté	35	50	55	4
11	Compost végétal	20	30	55	3
12	Compost d'écorces	30	50	80	2
15.1	Tourbe acide		80		4
15.2	Tourbe alcaline		40		4
16	Compost de tourbe	35	60		4

• Règlement Sanitaire Départemental (R.S.D., cf. annexe):

Article 158 relatif aux dépôts de matières fermentescibles destinés à la fertilisation des sols.

• **Décret N° 77-1133 du 21 Septembre 1977**, application de la loi N° 76-663 du 19 Juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement. Le décret N° 93-1412 du 29 Décembre 1993 a modifié la nomenclature des installations classées du décret N° 77-1133 (d'après « des déchets verts au compost végétal, CEMAGREF »). Le décret 77-1133 pose les dispositions relatives aux installations soumises à **autorisation** et celles soumises à **déclaration**.

Le décret 93-1412 du 29 Décembre 1993:

Lorsque la capacité de production est supérieure ou égale à 10 tonnes par jour, l'installation est soumise à autorisation. Le rayon d'affichage pour l'enquête publique est alors de 3 km. Lorsque la capacité de production est supérieure à 1 tonne par jour et inférieure à 10 tonnes par jour, l'installation est soumise à déclaration (ce qui est le cas pour la commune de Bruz).

Le dépôt en Préfecture d'une déclaration comporte:

- les renseignements sur le pétitionnaire
- l'emplacement de l'installation
- la nature et le volume des activités et rubriques correspondantes
- les plans de situation et d'ensemble.

Si le Préfet estime que le dossier est complet, après rapport de l'Inspection des Installations Classées et avis du Conseil Départemental d'Hygiène (C.D.H.), un projet d'arrêté est soumis au déclarant qui a 15 jours pour formuler par écrit ses observations. Il faut que tout transfert d'installation nécessite une nouvelle déclaration.

II. CADRAGE SCIENTIFIQUE

1.Intro

Lors du compostage, la décomposition des matières organiques s'effectue, comme dans le sol, suivant des chaînes de transformations naturelles: fermentations et respirations.

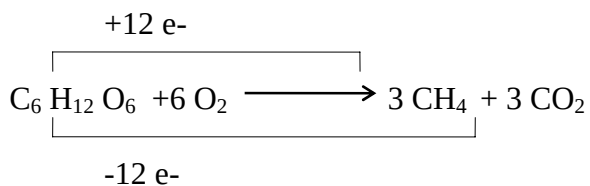
Il conduit: -pour des fractions organiques simples(sucres, protéines, hemicellulose,...) à des produits minéraux: CO_2 , H_2O , NO_3 ,...

-pour des fractions organiques complexes(lignine, lignocellulose) à des substances humiques ou préhumiques, plus stables, qui vont avoir tendance à s'accumuler au cours du compostage.

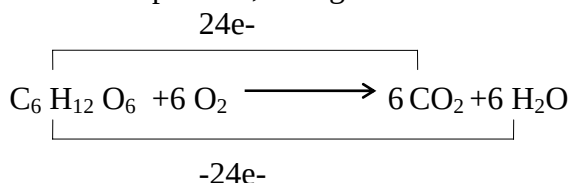
Le produit final, le compost, est donc constitué en majeure partie d'une matière organique dite stabilisée et de substances minérales.

La fermentation est une réaction d'oxydoréduction dans laquelle le donneur et l'accepteur d'électrons proviennent de la même molécule organique.

Exemple du glucose:



Dans la respiration, la dégradation de la molécule est oxydative(présence d' O_2).



Lors de la respiration 55% de l'énergie du glucose est stockée sous forme d'ATP, tandis que 3% est utilisée lors de la fermentation.

Dan la pratique, le compostage s'effectue en présence d'oxygène, on n'a donc pas de fermentations au sens strict du terme. Par contre, certaines réactions sont de type fermentaire(fermentation aérobie).

Le compostage est une bio-oxydation, c'est un processus microbiologique continue de dégradation de la matière organique en présence d'oxygène.

Il comporte 3 phases:

la phase initiale qui dure quelques jours, pendant lesquels les composés simples(sucres, protéines, hémicellulose) sont dégradés en produits minéraux(CO_2 , H_2O , NO_3). La température s'élève progressivement à 45°C à cause de l'activité croissante des micro-organismes mésophiles aérobies.

la phase thermophile qui dure parfois plusieurs mois, et où la température peut atteindre 70°C . La fraction organique cellulaire(lignine, lignocellulose) est dégradées en substances humiques et préhumiques plus stables.

La dernière phase est une phase de stabilisation durant laquelle le taux de décomposition décroît et la température chute.
On a progressivement cerné les paramètres qui agissent sur ces transformations.

2.Paramètres du compostage

_LE TAUX D'OXYGENE LACUNAIRE

Le taux d'oxygène lacunaire, défini comme le pourcentage d'oxygène dans l'air des «vides», joue donc un **rôle primordial** dans le compostage aérobie des déchets solides.

(cf annexe : fig1)

La plupart des microorganismes ont besoin d'air. L'oxygène sert à oxyder les composés organiques sur le modèle de la respiration. Les besoins en O_2 varient au cours du temps: ils sont maximums au démarrage du compostage quand la dégradation de la matière organique fermentescible est intense. La disparition progressive de cette fraction provoque une diminution proportionnelle des besoins en oxygène, ceci jusqu'à la maturation où une faible consommation est enregistrée.

Les conditions aérobies sont maintenues tant que le taux d' O_2 ne passe pas en dessous de 5%.

Si ce seuil est atteint, les microorganismes aérobies meurent et sont remplacés par des micro-organismes anaérobies.

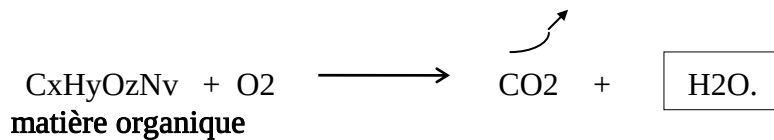
_L'HUMIDITE OU LA TENEUR EN EAU DU SUBSTRAT

Les molécules d'eau sont présentes dans le film liquide autour des particules, dans la fraction solide des particules organiques et dans les espaces lacunaires(vapeur d'eau).

Plus le pourcentage de l'espace lacunaire est fort plus la circulation de l'air est aisée. **Le compostage optimal dans les premières phases est obtenu pour des valeurs de 30 à 36% d'espace lacunaire dans la masse.**

Pendant le compostage la teneur en eau varie pour deux types de raisons:

1. **la teneur en eau à tendance à augmenter** car il y a production d'eau par les micro-organismes qui dégradent la matière organique en présence d'O₂ suivant la réaction globale:



Cette eau issue du métabolisme des microorganismes est appelée «eau métabolique».

2. **elle a tendance à diminuer** par évaporation due à la température croissante et à l'aération forcée.

Un taux d'humidité trop faible peut inhiber l'activité des microorganismes. Ce qui importe c'est la **disponibilité** en eau du substrat ceux-ci. On parle **d'humidité relative des volumes lacunaires**.

schéma de la couche d'eau sur colloïde

On observe que plus le milieu se dessèche, et plus l'activité des bactéries et actinomycètes se réduit au profit des champignons.

Dès que l'humidité relative devient inférieure à 93% seuls les champignons maintiennent l'activité du compostage et les températures s'abaissent vers 40°C.

A chaque taux d'humidité correspond un type de microorganisme pouvant se développer de façon préférentielle.

Bactéries	croissance et activité si l'humidité relative est supérieure à 0.93
Actinomycètes	idem, parfois plus résistante à la sécheresse
Champignons	encore actif vers Hr= 0.75. Le seuil minimum se situe vers Hr=0.61(milieu déjà sec)

(Mustin M,1987 d'après J.Lacey 1973)

Tableau 1: Comportement physiologique de quelques microorganismes.

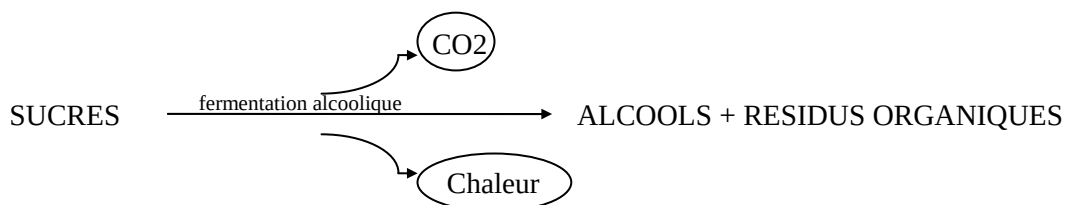
_LA TEMPERATURE

(cf annexe :fig 2)

L' énergie, stockée sous forme de liaisons chimiques dans les molécules organiques de la biomasse, peut être libérée de plusieurs façons:

1. Libération brutale par combustion:toute l'énergie est libérée sous forme de chaleur, et le résidu ultime est un produit minéral: les cendres.

2. Libération progressive par oxydation partielle lors des fermentations avec production d'autres composés organiques et de chaleur, comme dans le cas du compostage (fermentation à dominante aérobie) ou dans le cas de la fermentation alcoolique:



Les microorganismes produisent de la chaleur en oxydant la matière organique des substrats.

La chaleur n'est plus produite dès que l'oxygène lacunaire a été consommé. On classe les microorganismes selon leur température optimale de croissance:

-les psychrophiles dont la température optimale de croissance est inférieure à 30°C et qui se multiplient encore à 0°C.

-les mésophiles(les plus nombreux) dont la température optimale est comprise entre 30 et 45°C.

-les thermophiles(peu nombreux) dont la température optimale se situe au delà de 45°C et dont la température maximale de croissance peut être supérieure à 90°C.

Le flux de chaleur est un témoin direct de la fermentation aérobie.

La température varie en fonction de la composition des substrats :

-les déchets riches en composés fermentescibles (végétaux riches en sucres) atteignent rapidement, lors du compostage, des températures élevées.

-les déchets riches en graisses et huiles dégagent, d'autre part, davantage de chaleur par unité de masse que les autres composés organiques: l'oxydation complète d'un gramme de glucide libère 4.5 Kcal, alors que celle d'1 g de lipide libère en moyenne 9.4 Kcal.

-LE pH.

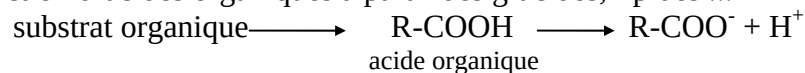
Pour les bactéries le pH optimal est 7, il varie entre 5 et 8.5 pour les champignons.

Au cours du processus de dégradation le pH varie selon la courbe de la figure 3. Au début de l'humification de l'andain s'acidifie à cause de la production d'acides organiques (ac.acétique, propionique, butyrique) à partir des glucides peu polymérisés, des lipides et de la production de CO₂ se dissolvant dans l'eau. Puis il s'alcalinise par la libération de bases auparavant intégrées dans la matière organique. Si le pH est trop grand, l'azote se transforme en NH₃, et s'il est inférieur à 6 les microorganismes meurent.

Au cours du compostage, plusieurs processus sont susceptibles de faire varier le pH de la masse organique:

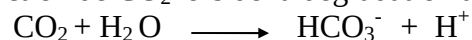
L'acidification peut avoir plusieurs origines:

-Production d'acides organiques à partir des glucides, lipides ...



Ces acides se dissocient en solution aqueuse et peuvent s'accumuler jusqu'à acidifier fortement le substrat (pH=4).

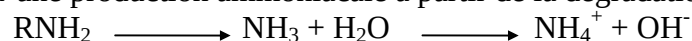
-Production de CO₂ lors de la dégradation aérobie, qui se dissout dans l'eau:



Ces phénomènes peuvent être amplifiés par le départ des bases solubles.

L'alcalinisation est le résultat:

-Soit d'une production ammoniacale à partir de la dégradation des amines.

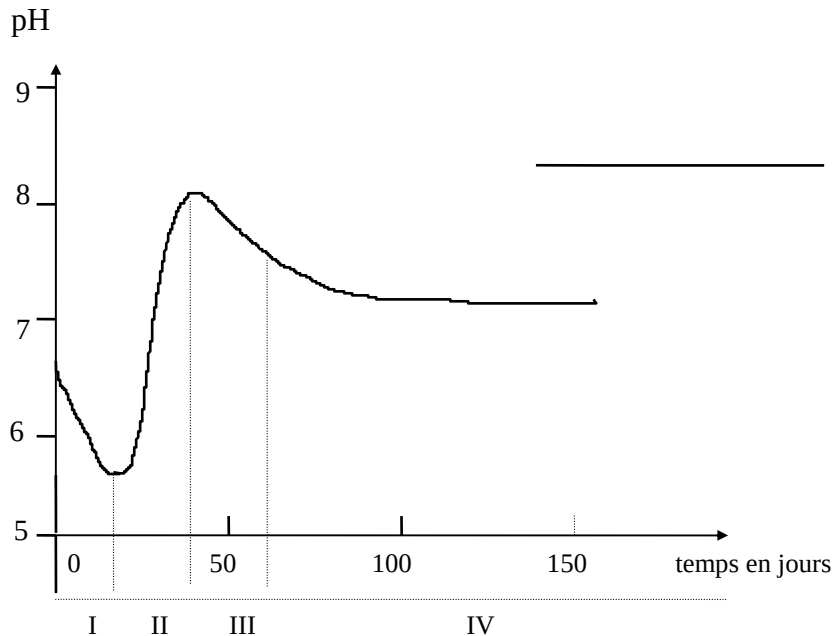


-Soit de la libération des bases auparavant intégrées à la matière organique.

L'évolution du pH au cours du compostage renseigne sur les différentes phases du processus microbiologique en cours.

-Relation entre le pH et les microorganismes du compost:

Si les microorganismes ne sont pas capables de réguler leur propre température, ils peuvent par contre réguler leur pH interne. Cependant, la concentration en ions H^+ dans le milieu extérieur influe grandement sur la croissance des microorganismes.



Phase I: acidogénèse, intense production de CO_2 et d'acides organiques en début de phase thermophile (dominance flore mésophile).

Phase II: alcalinisation (flore thermophile dominante avec hydrolyse bactérienne de l'azote protéique et organique, productrice d'ammoniac).

Phase III: C/N a diminué, réaction plus lentes, de l'ammoniac a été perdu par volatilisation, et azote utilisé par microorganismes pour biosynthèse des matières humiques.

Phase IV: compost en voie de maturation, stabilité du pH due aux réactions lentes de maturation et au pouvoir tampon de l'humus.

Fig .3: Courbe théorique des variations du pH au cours du compostage (M.Mustin 1987)

Si le pH des milieux de compostage dépend des substrats de départ, il peut être aussi modifié par le métabolisme des microorganismes en croissance.

Il existe des microorganismes anaérobies, qui tendent à neutraliser leur propre milieu de vie et le rendre ainsi plus favorable.

Le contrôle du pH est souvent utile en fermentation, parfois indispensable. Il permet soit de suivre un processus fermentaire, soit de l'orienter favorablement.

_LES CONDITIONS PHYSICO-CHIMIQUES:

Les microorganismes utilisent dans leur métabolisme les éléments; C, N, P, K, S, et les oligo-éléments.

Le rapport C/N détermine la disponibilité en carbone et en azote qui sont des facteurs limitants. L'azote est utilisé dans la formation du squelette cellulaire, le carbone est utilisé comme source d'énergie. La consommation de carbone est 20 fois supérieure à celle de l'azote.

De plus ce rapport est considéré comme étant le seul indice quantitatif capable de révéler la vitesse de décomposition. Un substrat riche en carbone dégradable aura un rapport C/N optimum bas, c'est le cas du gazon. Par contre un substrat riche en carbone peu dégradable(lignine, cellulose) aura un rapport optimum élevé⁽¹⁾.

Si le rapport C/N est supérieur à 35 les microorganismes oxydent la matière en excès avant d'atteindre un C/N plus favorable. Autour de 29, il favorise au maximum le développement du processus, alors qu'un rapport inférieur au départ à 20 peut retarder la décomposition et accroître la perte en azote. Il se pose donc un problème de ratios de mélange des déchets.

Le phosphore pour ne pas être facteur limitant doit avoir un rapport N/P entre 2 et 5.

Le calcium est nécessaire pour la nutrition des bactéries et contribue à neutraliser les acides formés pendant l'humification.

LES ASPECTS MICROBIOLOGIQUES

Les microorganismes sont d'origine tellurique, et appartiennent aux groupes suivants:

- Bactéries
- Actinomycètes
- Champignons
- Protozoaires
- Algues

(cf annexes 3,4,5)

Les microorganismes sont déjà présents en grande quantité dans tout les substrats. De nombreuses réactions enzymatiques ont cours, on distingue:

-les enzymes **extracellulaires** produites et excrétées par les microorganismes en activité.

-les enzymes **intracellulaires** libérées lors de la mort ou de la destruction des cellules, et peuvent opérer indépendamment des cellules productrices. Celles-ci indiquent qu'il **existe une activité enzymatique du compost**, en dehors des êtres vivants qui le peuplent.

(cf annexes 6.7)

Le milieu thermique sélectionne les populations de microorganismes qui ont un **équipement enzymatique propre à s'adapter à la température du substrat**.

LA CHALEUR (conduction, convection, radiation)

Au cours du compostage on observe 3 modes de transfert de la chaleur:

-**la conduction**: transfert de chaleur entre deux points, par différence de température sans transfert de masse.

-**la convection**: mouvement de masse entre une zone chaude où la chaleur est acceptée et une zone froide où la chaleur est cédée. Dans le compostage aéré, où de l'air extérieur plus

froid diffuse ou est pulsé, l'air chaud et humide interne est poussé vers des zones externes plus froides où il se refroidit et se condense en cédant de la chaleur.

-**la radiation:** elle consiste en un échange de radiations de nature électromagnétique entre deux corps qui ne sont pas à la même température. L'énergie radiante se transmet même dans le vide et ne dépend donc pas du «contact physique entre deux corps» ou «du mouvement de tout fluide entre ces corps».

En pratique, pour les températures des masses de compost toujours inférieures à 300°C, la quasi totalité des radiations émises sont des **radiations infrarouges**. De l'énergie radiante est donc perdue en permanence par un tas de compost dont la température de surface est supérieure à celle de l'air ambiant.

-La conductivité thermique est relativement faible dans la gamme des taux d'humidité optima du compostage, dans ces conditions **un tas important est donc «auto isolant» et garde beaucoup mieux sa chaleur interne** qu'un petit tas.

-**un tas de compost qui monte mal en température par excès d'humidité** (fort pourcentage d'eau et peu de volume d'espace lacunaire) **est surtout un tas qui perd vite sa chaleur.**

Approche du bilan thermique:

Quand des conditions favorables sont réunies, les microorganismes dégradent la matière organique fraîche et la chaleur libérée augmente la température des particules solides, des solutions liquides du compost et des gaz des espaces lacunaires.

En particulier cette chaleur induit une évaporation de l'eau et une légère augmentation du volume des gaz présents (air plus azote, oxygène, gaz carbonique et vapeur d'eau).

La température d'un compost ne dépasse donc jamais le point où un équilibre thermique dynamique est atteint, la production de chaleur égalant l'ensemble des pertes.

La température est un paramètre majeur du compostage.

Les températures optimales lors du compostage sont celles qui permettent d'atteindre les objectifs de chaque phase:

- **hygiénisation des substrats**
- **vitesse de dégradation rapide**
- **humification active**

B. LE COMPOSTAGE

I AVANT LE COMPOSTAGE

1.Caractérisation des déchets

La présentation et la composition des déchets définissent leur aptitude au compostage. Parmi les déchets verts, on distingue deux extrêmes:

- Les déchets d'égouttage: avant broyage, ils sont inaptes au compostage en raison de leur caractère ligneux et surtout de leur foisonnement. Après broyage, ils peuvent être compostés. Ils évoluent alors lentement si le rapport C/N initial n'est pas rectifié.

- Les tontes de pelouse: seules, elles sont inaptes au compostage en raison de leur teneur en eau trop élevée et de leur sensibilité au tassement (anaérobiose).

Le traitement conjoint vise à utiliser les défauts et qualités respectifs de chaque catégorie et il convient d'ajuster ainsi l'aération, l'humidité et le rapport C/N du mélange.

2. Préparation avant la décomposition

- Le broyage.

Cette phase importante va modifier profondément les caractéristiques de la biomasse collectée. Elle concerne essentiellement les déchets de nature ligneuse (résidus d'égouttage, bois de palettes...), on évite ainsi un compostage trop lent. Feuilles et gazons ne sont pas broyés pour éviter une décomposition trop rapide provoquant l'anaérobiose et le dégagement d'odeurs.(9)

Elle permet d'homogénéiser le compost et d'accélérer sa décomposition, car en réduisant le volume des déchets, elle augmente leur surface spécifique sur laquelle les micro-organismes vont agir.

-Le tamisage.

Le but de cette phase est d'éliminer les particules poussières, les particules ligneuses, ainsi que d'autres déchets (les sacs plastiques par exemple). On utilise un tamisage de 3 à 10 cm.(9)

-Les ratios de mélange.

Afin d'optimiser au maximum la fermentation, on utilisera des ratios précis. Ceux-ci permettront de réduire les odeurs dues à la fermentation du gazon et d'obtenir un compost de bonne qualité.

Selon le gisement, on cherchera à obtenir les ratios suivants: (9)

- Herbes/Feuilles = 1/3
- Herbes/Feuilles et Branchages = 1/2
- Herbes/Branchages = 1/1

Notons que l'on trouve parfois des boues co-compostées avec les déchets verts. Cependant cette technique demande un suivi beaucoup plus rigoureux, exige une aération forcée et pose des problèmes d'odeurs. De plus, la commune de Bruz ayant déjà une filière d'élimination des boues issue de sa station d'épuration, elle ne souhaite pas alourdir le procédé par l'incorporation de ces dernières. Cette étude se limitera donc au compostage des seuls déchets verts.

- Préparation du site.

Pour éviter d'éventuelles nuisances olfactives, les installations de compostage se trouvent souvent à plus de 600 m des habitations.

Dans la plupart des cas, la préparation du site consiste à nettoyer la surface de compostage et à créer une pente de 2% de façon à évacuer les lixiviats.

Cette pente existe déjà sur le site de la commune de Bruz (Cf plan en ANNEXE).

La préparation la plus coûteuse consiste à mettre en place une surface bétonnée ou bitumeuse pour le stockage des déchets verts et du compost. On utilisera des agrégats concernés, de l'argile ou du gravier pour mieux contrôler les eaux de ruissellement et de percolation et pour faciliter l'accès à l'installation par tout temps.

- Réception et stockage.

Dès leur réception, les déchets doivent être stockés

-de façon séparée: un tas d'herbes, un tas de feuilles, un tas de déchets ligneux. De manière à pouvoir décider des ratios de mélanges lors de la mise en andains.

- sous abris, éventuellement sur une plateforme cimentée, ceci afin d'éviter le commencement de la fermentation avant la mise en andains et surtout les dégagements d'odeurs dus à l'anaérobiose.

- Destockage et mise en andain.

Les déchets verts sont mis en andain (tas allongé d'environ 2m de haut par 4m de large et de longueur variable) le jour du broyage. Afin de débiter la fermentation, l'arrosage se fait immédiatement. Notons qu'il est possible d'effectuer ces deux opérations simultanément à l'aide d'une rampe d'arrosage déversant directement l'eau à l'intérieur de la chambre de broyage. Ceci permet une meilleure humidification.(Metallic)

3. Suivi des paramètres

La plupart des paramètres du compostage sont les facteurs favorisant le métabolisme des micro-organismes.

- L'humidité.

L'eau permet de dissoudre les nutriments des microorganismes et crée un environnement adéquat à l'accroissement de leur population. Une humidité élevée est favorable tant qu'elle ne limite pas la diffusion de l'air. On considère que le taux optimal d'humidité se situe autour de 60% du poids brut. Cette humidité diminue par évaporation à cause de l'augmentation de température et des aérations. Un arrosage est donc nécessaire au moins pendant les premières semaines de fermentation.(4)

La quantité d'eau à apporter pour atteindre ce taux est calculée de la façon suivante (4):

$$Q=M(H_2-H_1)/(1-H_2)$$

avec

Q: quantité d'eau à apporter (en tonnes)

M: masse de l'andain (en tonnes)

H₁: humidité initiale de l'andain (en % de masse, mesurée par pesée différentielle avant et après séchage à 80°C à l'étuve)

H₂: humidité souhaitée

Ainsi, pour atteindre 60% d'humidité, on a:

$$Q=M(0,6-H_1)/0,4$$

Par la suite, l'arrosage se fera juste avant le retournement de façon à obtenir une répartition homogène de l'humidité dans les tas. Pour le maintien de ce taux d'humidité pendant la phase de fermentation, il est intéressant de retourner et d'arroser les tas plus souvent pendant cette première étape.

- La température.

Lorsque la fermentation se déroule correctement, la température atteint facilement 60°C au coeur de l'andain. Cette dernière est un témoin de l'activité biologique.

Le contrôle thermique est essentiel pour garantir un maximum de désinfection au cours du traitement car une élévation de température au dessus de 65°C pendant au moins quatre jours permet l'élimination des germes pathogènes et des graines de mauvaises herbes. (12)

Ce contrôle peut être effectué à l'aide de sondes thermocouples placées au coeur de l'andain. Lorsqu'on constate une chute de température, il s'agit de retourner l'andain pour l'aérer et «relancer» ainsi la fermentation aérobie. Cependant, il existe une certaine inertie thermique du compost qui lui confère une capacité isolante. On peut donc avoir une température encore élevée dans le tas alors que la fermentation a diminué. Des mesures du taux d'oxygène pourront alors venir compléter les mesures de température.

- Le rapport C/N.

On le mesure grâce à la détermination du carbone organique ANNE (C) et de l'azote organique KJELDAHL (N).

La valeur de ce rapport se situe en général entre 20 et 30 lors de la mise en andains. Il diminue par la suite pour approcher 10 lorsque le compost est mûr.

C/N sert à évaluer l'aptitude du compost à être incorporé au sol. En effet, si on épand un compost dont le rapport C/N est trop élevé, les microorganismes vont consommer l'azote du sol pour oxyder le carbone en excès. Dès lors, ils vont entrer en concurrence avec les végétaux et limiter la croissance de ces derniers.(4)

Ici encore, la qualité du retournement (et de l'aération) est un facteur important car en évitant la fermentation anaérobie, il limite la perte de l'azote dans l'air.

- Le taux d'oxygène ou l'aération.

Il permet de réguler les paramètres précédents en empêchant l'anaérobiose.

Le taux limite d'oxygène nécessaire pour maintenir les conditions de l'aérobiose est de 5%.(MUSTIN)

Les teneurs en O₂ et CO₂ sont mesurées en aspirant les gaz au moyen d'un drain et d'une pompe à vide (la pompe et les drains utilisés pour l'aération forcée pourront être utilisés à cet effet). L'analyse des gaz est réalisée avec des tubes réactifs DRAEGER (précision 5 à 10%)

II. COMPOSTAGE EN ANDAIN SIMPLE

1. Process et mise en oeuvre

On réalise en général un andain par mois, d' Avril à Novembre, **soit 8 andains par an**, et on stocke les déchets, majoritairement ligneux, apportés en hiver de manière à équilibrer l'apport massif de gazon au printemps

a. Choix du procédé.

La commune de Bruz souhaitant effectuer un minimum de retournements, nous avons retenu deux méthodes de compostage sur aire naturelle, sans ajout extérieur et ne nécessitant qu'un matériel agricole.

Il s'agit de deux procédés utilisés aux Etats-Unis, appelés 'Low Technology' et 'Minimal Technology'. Les caractéristiques de leur mise en place sont données dans le tableau suivant:(biocycle, 09 1990)

Flux de déchets (en m ³ /an)	Type de procédé	Fréquence de retournement	Hauteur des andains	Largeur des andains à la base	Durée du compostage
<4000 m ³	Andains statiques 'Minimal Technology'	1 fois/an	3 m 60	7 m 20	3 ans
>4000 m ³ <40 000 m ³	Andains statiques 'Low Technology'	3-5 fois/an	1 m 80	3 m 60	2 ans 1/2

Etant donné que la plateforme devra traiter environ 4500 m³/an (soit 1100 tonnes/an de déchets bruts à la densité 0,25), on a le choix entre ces deux procédés. Toutefois la hauteur des andains du procédé 'Low Technology' est difficile à mettre en oeuvre avec un matériel agricole. Par ailleurs, les andains contenant une forte proportion de tontes, comme c'est le cas à Bruz, doivent être de plus petite taille de manière à éviter les tassements excessifs et l'anaérobiose⁽⁹⁾. Le choix du procédé 'Low Technology' semble donc préférable.

Les andains mis en place pourront donc avoir les dimensions suivantes:

- Hauteur: 2m
- Largeur: 4m
- Longueur: 45m

Le volume d' un andain correspond à 1/8^{ème} du volume annuel de déchets broyés:

	Déchets bruts	Déchets broyés	compost stocké
Densité	.2 à 0.3 ⁽⁹⁾	0.4 à 0.5 ⁽⁵⁾	0.55 à 0.8 ^(Mustin)
Tonnage (annuel(en T/an))	1100	1100	600 à 900
Volume annuel (en m ³)	3700 à 5500	2200 à 2800	1100 à 1600
Volume par andain (en m ³)	460 à 690	280 à 350	140 à 200

Tableau: Evolution massique et volumique du compost

La durée de mise en andain varie en fonction de l'adéquation des retournement avec le suivis des paramètres (humidité, température...). Dans le procédé 'Low Technology', la durée du compostage est répartie de la façon suivante:

- 2 ans de fermentation
- 6 mois de maturation (arrêt des retournements) ⁽³⁾

Le passage à la phase de maturation est signalé par une chute de la température qui traduit le ralentissement de l'activité bactériologique.⁽⁴⁾ Cette phase peut être interrompue en fonction du rapport C/N que l'on souhaite obtenir.

Notons qu' il est possible de réduire la durée de la phase de fermentation grâce à un meilleur suivi des andains comme c'est le cas dans le procédé Végéterre mis au point par l'ADEME d'Angers sur la plateforme de Villechien⁽⁵⁾.

- Le retournement des andains se fait tous les mois pour une meilleure aération. Ceci limite les pertes d' azote dans l'air, la qualité du compost s'en trouve donc améliorée.

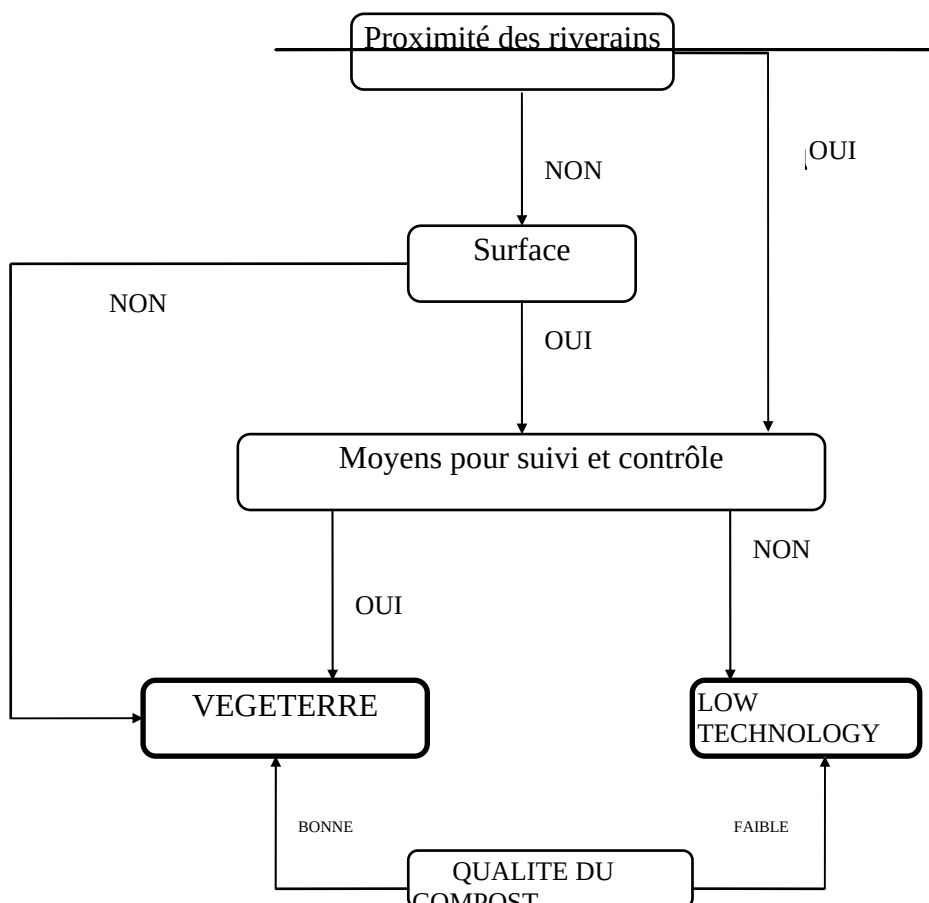
- Le taux d'humidité est maintenu à 60% pendant les trois ou quatre premiers mois par un arrosage régulier. Puis, au bout de 6 mois, à la fin de la phase de fermentation, ce taux est abaissé à 40% pour la phase de maturation. Le contrôle de ce taux d'humidité passe par la réalisation d' échantillons prélevés uniformément dans les andains et passés à l'étuve.

Comme le montre le tableau suivant, en réduisant la durée de la phase de fermentation, on réduit le nombre d' andains à stocker et donc la surface de la plateforme.

	nombre d'andains par mois	durée du compostage	fréquence de retournement	nombre total de retournements	nombre d'andains en compostage	Surface occupée par les andains
procédé 'Low technology'	1 (pdt 8 mois)	2 ans 1/2	3 à 5 fois/an	6 à 10	20	3600 m ² (20*180m ²)
procédé Vegeterre	1 (pdt 8 mois)	1 an	1fois/mois	6	8	1500 m ² (8*180m ²)

Pour un nombre égal de retournements, voire supérieur, le procédé 'Low technology' demande une surface de stockage des andains 2.5 fois plus grande et une durée de compostage 2.5 fois plus longue. De plus, la qualité du compost est moindre du fait de la perte d'azote durant les périodes d'anaérobiose. Cependant, ce procédé exige moins de suivi.

Le grafctet suivant permet d'orienter le choix vers un des deux procédés en fonction des objectifs, des contraintes et des moyens mis en oeuvre.



Le procédé Vegeterre, s'applique à des volumes supérieurs à 5000 m³. En effet, les puissances mises en oeuvre nécessitent des engins de forte capacité. La chaîne d'équipement classique, avec broyeur, chargeur et crible nécessite un investissement matériel important, qui ne peut être justifié à l'échelle des petites collectivités.

Lorsque le gisement est groupé mais peu important (de 1000 à 5000 m³/an dans le cas d'une collectivité ayant une déchetterie et la production de déchets verts municipaux), on cherchera une solution plus adaptée.

- Un broyeur de dimension modeste mais qui n'acceptera que des déchets de petit diamètre.
- Un aménagement des aires plus rustique (unité fermée pour éviter tout dépôt sauvage) qui comprendra :
 - * Une surface suffisante pour le stockage des déchets verts,
 - * Une aire d'évolution du broyeur,
 - * Des aires de fermentation et de maturation,
 - * Un accès par camion ou tracteur,
 - * Une alimentation en eau (sécurité incendie et arrosage).
- Le chargeur peut être remplacé par un ou deux tracteur agricoles équipés d'une griffe ou par un tracto-pelle.
- Une opération à cette échelle ne justifie pas forcément l'acquisition d'un crible.

2. Dimensionnement

a. Les surfaces

La plateforme devra comprendre 5 zones distinctes:

- Une zone de stockage des déchets bruts
- Une zone de compostage des andains
- Une zone de stockage du compost mûr
- Une surface occupée par la lagune
- Une zone de circulation
- la surface accueillant le broyeur

Le dimensionnement de ces différentes parties a été calculé comme il suit:

- Stockage des déchets bruts.

Le volume de déchets verts est de 5500 m³ par an. Soit 460 m³ par mois.
D'après une étude du CEMAGREF, le gisement d'une ville de 10 000 habitants comporte 20% de tontes. Selon M. SAUVEE (responsable environnement de la municipalité de Bruz), ces dernières sont largement majoritaires en été, on considère donc qu'on a 30% de gazon dans le gisement bruzois.

Le flux mensuel des autres déchets est donc de 320 m³.

En hiver (4 mois), on devra donc stocker 1300 m³.

La surface de l'aire de stockage des déchets bruts est donnée par la formule suivante:

$$S = \text{Volume à stocker} / (\text{Hauteur du tas} \cdot 0,75)$$

0,75: coefficient tenant compte de la circulation du système de préhension des déchets et du broyeur mobile (dans le cas où on souhaiterait en utiliser un).

Ainsi pour une hauteur de stockage de 3m (comme c'est le cas à Bruz), on a:

$$S_{\text{DECHETS BRUTS}} = 600 \text{ m}^2$$

- Aire de compostage.

On dimensionne cette aire dans le cas du procédé végétier d'une part, et dans le cas du procédé 'Low Technology' d'autre part.

Les andains sont disposés par paire, 4m séparent deux paires voisines de manière à permettre le passage des engins de retournement.

Les dimensions au sol d'un andain sont de 4m*45m. Une paire d'andain et un passage occupent donc 540 m².

	Nombre d'andains	surface de la plateforme
'Low Technology'	20	5400 m ²
Végéterre	8	2200 m ²

- Le stockage du compost mûr.

La réduction de volume qui intervient entre les déchets bruts et le compost mûr étant de 70 % ⁽⁹⁾, à la fin de la phase de maturation, on obtient des andains de 200 m³. On dimensionne la plateforme de stockage en fonction d'une capacité d'accueil de 3 mois, cette période pouvant correspondre à une diminution des épandages agricoles pendant l'été. La surface est donnée par la formule utilisée pour la plateforme des déchets bruts. Ainsi on obtient pour un stockage sur 3m de haut:

$$S_{\text{COMPOST}}=270 \text{ m}^2$$

- Le lagunage.

En ce qui concerne les eaux pluviales, la rétention en eau des andains est importante et aucun jus n'est à craindre de ce côté là. Cependant, les eaux pluviales entraînent les particules fines du compost. Il est donc vivement conseiller de prévoir une collecte des eaux vers un bassin de rétention. La consommation en eau étant importante, un recyclage doit être prévu, de même qu'un suivi des rejets résiduels

On considère une pluviométrie moyenne de 700 mm par an, répartie à 80% sur la période allant d'octobre à avril. Soit un débit sur cette période de 80 mm/ mois.

	Période de mise en andain											
mois	mar	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	dec	jan	fev
nombre de mois de compostage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
nombre d'andains en compostage	1	2	3	4	5	6	7	8	8	8	8	8
nombre d'andains à arroser	1	2	3	4	5	5 (6-1)	5 (7-2)	5 (8-3)	4 (8-4)	3 (8-5)	2 (8-6)	1 (8-7)
Quantité d'eau à apporter (en m ³)	67 (Q)	134 2Q	200 3Q	270 4Q	340 5Q	340 5Q	340 5Q	340 5Q	270 4Q	200 3Q	134 2Q	67 Q
total par an (m ³)	2700 (40 Q)											

Q est la quantité d'eau à apporter à un andain pour élever son taux d'humidité de 40 % à 60 %. La perte d'humidité étant environ de 10 % en 2 semaines⁽⁴⁾ (soit 20 % en un mois), on doit apporter Q m³ d'eau par mois à chaque andain. On considère également que l'humidité des déchets bruts avoisine les 40 %.

Etant donnée la quantité d'eau requise annuellement pour l'arrosage, on aura intérêt à récupérer les eaux de pluies collectées sur la plateforme. Cette dernière reçoit:

$$700 \text{ mm/an} * 10\,000 \text{ m}^2 = 7000 \text{ m}^3/\text{hectare/an}$$

Le coût engendré par l'arrosage uniquement avec de l'eau du réseau est de:

$$2700 \text{ m}^3 * 15\text{f/m}^3 = 40\,500 \text{ F}$$

Il est possible de réduire ce coût en stockant temporairement l'eau de pluie dans une lagune. On la dimensionnera de façon à stocker la quantité d'eau nécessaire à l'arrosage

durant les mois ‘secs’: de mai à septembre. Soit une quantité de 1 400 m³ sur une hauteur de 2 m, ce qui représente une surface 700 m². Le prix d’une lagune est de 150 F/m³ (trou et géomembrane), soit 210 000 F pour 1 400 m³.⁽²⁵⁾

On réalise donc un amortissement de cet investissement sur 5 ans.

Notons que ce calcul a été réalisé pour le procédé Végéterre, pour le procédé ‘low Technology’ la fermentation est étalée sur deux ans et la température est moins élevée en moyenne. Les besoins annuels en eau sont donc grossièrement les mêmes.

- Aire de broyage.

Les dimensions du broyeur sont de 8 m sur 3 m, on prévoit donc une aire de 30 m².

- L’aire de circulation.

On la calculera de façon à laisser un espace d’au moins 4 m autour de toutes installations.

b. Equipement et fournitures

Matériel	Utilisation	Marque/ Références	Caractéristiques	Quantité	Prix (kF)
Broyeur	broyage des déchets bruts	métallique/ broyeur cyclone	mobile 155 cv (turbo diesel 15 t/h	1	400 (HT)
		Willibald/ MZA 1400	mobile 115 cv (85 kW) 45 à 90 m ³ /h (11 à 25 t/h)	1	368 (HT)
Epandeur agricole	mise en place et retournement des andains	Blanchard (distributeur)	capacité: 8 t	1	70
Chargeur	chargement du compost dans le broyeur et dans l’épandeur	Mailleux (distributeur)/ hydrofourche		1	20 à 35
Tracteur (location)	mise en place et retournement des andains		100 cv	1	6/ semain e ou3000 f/3j
Tracteur + chargeur		Renault- Blanchard	85 cv		230 (neuf)

(achat)					120 (occasion)
Pompe à eau	pompage d' eau dans la lagune	pompe agricole	débit: 50m ³ /h	2	25
Canalisations	collecte des eaux pluviales dans la lagune	La Cana (distributeur)	diamètre: 180 mm	XPIF	0.11/m
Clôture	fermeture du site		2 m de haut		20/100 m
Toiture	stockage des déchets bruts & compost mûr	doc. (25)		270 m ²	0.4/m ²
Plateforme bétonnée	hangar matériel	doc. (25)		100 m ²	0.6/m ²
Gravier, couche + sous couche	aire de circulation	La SETUR		2250 m ²	0.7/m ²
Lance à eau	Arrosage des andains				

4. Bilan économique

		prix unitaire (kF)			
	quantité	HT	TTC	prix total (kF)	Location (kF)
MATERIEL					
Broyeur	1	368	444	444	
Chargeur	1		35		0.3/3j
Epandeur	1		70		0.8/3j
Tracteur	1	230			3/3j
Lance à eau	2				
Pompes	2		25	50	
INFRASTRUCTURE					
Clôture	400 m (Végéterre) 550m ('Low Tech.')		20 pour100 m	80 ou 105	
Toiture	270 m ²		0.4/m ²	110	
Plateforme béton	100 m ²		0.6/m ²	60	
Canalisations	200 m		0.11/m	22	
Lagune	1400 m ³		0.15/m ³	210	
Gravier	1000 m ²		0.7/m ²	70	
FRAIS DE FONCTIONNEMENT					
Personnel	1 personne 1 semaine /		0.14/h	70	

	mois				
Electricité	puissance	capacité	temps de fonctionnement	Coût annuel (0.6 F/kWh)	
Pompe à eau	7.5 kW	50 m ³ /h	54 h/an	0.25 kF	
Broyeur	115 cv 85 kW	11 à 25 t/h	100 h/an	5.1 kF	

Afin d'optimiser le processus, on pourra effectuer des analyses de température, de mesures d'humidité. Celle ci pourront être effectuées à l'EME.

Afin de contrôler les eaux résiduaires et pluviales, il sera nécessaire de surveiller la DCO (20 F par échantillon), la DBO, et la non toxicité des lixiviats.(recherche de germes pathogènes, streptocoques...). Ces analyses pourront elles aussi s'effectuer à l'EME.

III. COMPOSTAGE EN ANDAIN ACCELERE AVEC AERATION FORCEE

Le compostage aéré par retournement et insuflation ou aspiration est utilisé pour des projets de co-compostage (Déchets verts et boue de STEP) avec des installations recevant un flux de déchet supérieur à 4000 m³/an. Ce procédé utilisé aux US est appelé « High Technology ». Ce type de compostage a aussi fait l'objet en France d'un projet pilote de traitement de déchets de jardin. La société OTVD a mis en place le procédé SILODA combinant la fermentation en andains et aération forcée conçue pour les déchets fermentescibles.

Le compostage aéré permet la réduction de la phase active de la fermentation à 21 jours, de limiter les surfaces de traitement et un éloignement des habitations moins grand que dans le cas d'un compostage statique.

Cependant, il faut noter que l'aération forcée des déchets peut conduire à un séchage excessif et un refroidissement de la masse en particulier quand l'andain est constitué majoritairement de broyats d'élague et de végétation sèche. Cela est dû à la porosité des déchets qui diminue également la capacité de rétention d'eau.

1. Process et mise en oeuvre

Comme précédemment les déchets sont broyés , criblés puis mis en andains. On réalise en général un andain par mois d'avril à novembre soit un andain de 2m de haut 4m de large et 45m de long. Lors du broyage, on procède à une adjonction d'eau à l'aide d'une pompe et d'une rampe d'arrosage..

L'insuflation ou l'aspiration d'air est réalisée par l'intermédiaire d'une gaine perforée et bouclée alimentée par une pompe située à l'extérieur de l'andain. L'aération de l'andain est effectuée en alternance avec les retournements de l'andain à l'aide d'un retourneur d'andain. Lors des retournements, le compost homogénéisé est arrosé pour maintenir le taux d'humidité à 60 % du poids brut et la fréquence de retournement sera de 2 fois par semaine.

A la fin de la fermentation, au bout de 21 jours, l'andain est déplacé vers la zone de maturation du compost. La maturation dure entre 4 et 6 mois et ne nécessite aucune intervention.

Les taux d'oxygène et d'humidité et la température sont des paramètres essentiels à ce type de compostage. L'achat de sonde de température et d'oxygène, les prélèvements d'échantillon pour l'analyse de l'humidité sont nécessaires.

2. Dimensionnement

2.1 Dimensionnement de la plateforme

La plateforme comportera 5 zones similaires au compostage statique mais avec des zones de compostage et de maturation différentes :

~ la zone de compostage comportera un andain tabulaire disposé sur une aire bétonnée de pente de 2% permettant de récupérer les lixiviats avec une surface au sol de 200 m². Les canalisations d'insuflation seront englobées dans la masse bétonnée de l'aire et seule la partie supérieure de la canalisation permettra la diffusion d'air dans l'andain. Cette technique réduit la surface d'échange drain/compost mais facilite le passage du retourneur d'andain. Le rebouclage de la gaine permettra une recirculation de l'air non diffusé à travers l'andain

~ la zone de maturation : en fin de fermentation, le volume de l'andain va baissé de 50% (Mustin page 164). L'andain aura donc une surface au sol de 45 m². Avec une maturation de 6 mois, 6 andains au maximum se succéderont sur l'aire donc une surface au sol de 270 m², avec un intervalle de 4m entre deux andains voisins permettant le fonctionnement du retourneur, la zone aura une superficie de 770m².

Tableau récapitulatif du dimensionnement de la plateforme d'après le bilan matière :

	DUREE	HAUTEUR (m)	SURFACE (m ²)
Aire de stockage des déchets bruts	1 mois	2	600
Aire de fermentation	21 jours	2	200
Aire de maturation	4 à 6 mois		500
Aire de stockage	2 mois		270
		TOTAL	1570
		CIRCULATION + 20%	1884

La plateforme de compostage aéré aura donc une superficie de 2000 m².

2.2 Détermination des besoins en oxygène

Le besoin en oxygène d'un andain est le paramètre le plus difficile à déterminer. En effet, il dépend de la nature des déchets à composter et varie au cours du temps de la fermentation. Il peut être déterminé de façon théorique à partir des formules d'oxydation de

la matière organique mais va être ensuite modifier par le manipulateur au cours du compostage pour une meilleure optimisation du fonctionnement de la pompe.

Le Compost de Michel Mustin donne un besoin d'oxygène variant de 1 à 4 g / g de matière organique oxydée. Par exemple la dégradation aérobie complète d'une boue demande environ 2 g d'O₂ / g de matière organique oxydée. La dégradation des matières riches en atomes d'oxygène comme les celluloses demande environ 1 g d'O₂ / g de matière organique oxydée. D'après Mustin (page 164), au départ du compostage, la matière organique représente 35% de la masse totale de l'andain. En fin de compostage, il reste environ 10% de la masse totale, donc une disparition de 25 % de la masse totale soit 34,375 tonnes (t) de matière organique oxydée sachant que la masse totale de déchet à composter après broyage est de 137.5 t.

Comme la connaissance du gisement initial de déchets est trop superficiel, on va considérer deux cas pour obtenir une valeur minimale et maximale du besoin en oxygène.

1^{er} CAS : 1 g d'O₂ / g de matière organique oxydée

Au cours du compostage, les 34,375 tonnes de matière organique oxydée nécessite donc 34,375 t d'O₂. L'air comprend 80% N₂ et 20% O₂. La quantité d'O₂ à fournir est donc égale à 171,875 t. 100 g d'air correspondant à 76016 litres, on a donc un volume de 130 900 m³ à fournir pendant 21 jours la période de fermentation.

2^{ème} CAS : 4 g d'O₂ / g de matière organique oxydée

Dans ce cas, on a environ 137.5 t d'O₂ à fournir soit environ 171,875 t d'air qui représente 523 600 m³ d'air à injecter dans l'andain.

La fermentation est divisée en deux périodes pendant lesquelles la demande en oxygène est différente : la phase thermophile consommant environ 70% de la quantité d'air à fournir d'une durée de 10 jours et la deuxième d'une durée de 11 jours consommant environ 30% de la quantité d'air à fournir (Mustin page 128).

Dans ce tableau, on a résumé les différentes quantités d'O₂ à fournir en fonction de la phase et du cas. On calcule ensuite le débit d'oxygène à fournir dans l'andain.

	Premier Cas		Deuxième Cas	
Première Phase	91 630 m ³	6,36 m ³ / min	366 520 m ³	25,44 m ³ / min
Deuxième Phase	39 270 m ³	2,5 m ³ / min	157 080 m ³	10 m ³ / min

Pour rendre des résultats comparables avec le Mustin (Méthode de BELSTVILLE), on donne les quantités d'oxygène à apporter par m³ / tonne de matière sèche / heure.

	Premier Cas	Deuxième Cas
Première Phase	7 m ³ / TMS / H	27.75 m ³ / TMS / H
Deuxième Phase	2.72 m ³ / TMS / H	10 m ³ / TMS / H

2.2 Dimensionnement de la pompe

Le type de pompe à choisir doit tenir compte du débit d'air à fournir dans l'andain et de la perte de charge résultante dans la gaine d'insuflation.

A. La perte de charge : Le déplacement d'air à travers les canalisations et la masse du compost occasionne des pertes de charge dans la gaine d'insuflation ou d'aspiration. Le calcul de la perte de charge est donné dans le Mustin (page 219) par la formule de CHEN .

PERTE DE CHARGE = $C \times H^j \times V^n$ avec $C = 1.43$ (On choisit la valeur maximum pour obtenir une perte de charge maximum)

$$j = 1.41$$

$$n = 1.48$$

$V = 0.14$ m/min Vitesse de circulation de l'air dans l'andain ($V = \text{débit d'air maximum} / \text{surface de l'andain} = [25 \text{ m}^3 / \text{min}] / [180 \text{ m}^2]$)

$$H = 2 \text{ m}$$
 Hauteur de l'andain

PERTE DE CHARGE = 0.2 cm d'eau soit 2 mm d'eau.

Le Mustin indique que les pertes de charge se situent en général entre 2 et 25 cm. La faiblesse de la valeur obtenue ici s'explique par la faible vitesse de circulation de l'air dans l'andain. Néanmoins, on choisira une pompe fonctionnant à une pression suffisamment élevée afin de garantir une marge de sécurité.

B. Le débit : La société Systemair Axia [ATIB 13, rue Gustave Eiffel 44980 St LUCE SUR LOIRE] nous a conseillé les différentes pompes suivantes utilisables dans le cas de l'aération du compostage.

TYPE	DIAMETRE (mm)	DEBIT (m ³ / h)	PRESSIO N (mm d'eau)	PUISSANC E (kw)
USB 30.4	315	3000	38	1.1
RKJ 500	section rectangulaire 661x661	3000	40	1.35
RKJ 500	idem	4600	35	1.35
RKJ 500	idem	5200	30	1.35

Le Débit de chaque type de pompe va nous donner les fréquences d'insuflation en fonction de la demande en oxygène choisie (1 à 4 g d'O₂ / g de MO oxydée) et de la période de fermentation (Première ou deuxième phase)

Pour un débit de 3000 m³ :

	Premier Cas (1 g d'O ₂)	Deuxième Cas (4 g d'O ₂)
Première Phase - 10 jours	3.5 h / j	12 h / j

Deuxième Phase - 11 jours	1.18 h / j	5 h / j
---------------------------	------------	---------

Pour un débit de 5200 m³

	Premier Cas	Deuxième Cas
Première Phase - 10 jours	3 h / j	7.5 h / j
Deuxième Phase - 11 jours	30 min / j	3 h / j

Pour un débit de 4600 m³

	Premier Cas	Deuxième Cas
Première Phase - 10 jours	2 h / j	8 h / j
Deuxième Phase - 11 jours	50 min / j	3.5 h / j

Pour le premier cas, la pompe de 3000 m³ de débit est idéal avec un fonctionnement de 1 heure et 15 minutes toutes les 8 heures pendant les 10 premiers jours et 20 minutes toutes les 8 heures pendant 11 jours.

Dans le deuxième cas, les débits de 4600 et 5200 m³ sont utilisables. On représente sur le tableau ci-dessous les fréquences d'insuflation pour les deux débits.

	4600 m ³	5200 m ³
Première Phase - 10 jours	2.5 h toutes les 8 heures	2.4 h toutes les 8 heures
Deuxième Phase - 11 jours	1.1 h toutes les 8 heures	1 h toutes les 8 heures

Le choix de la pompe se fera en fonction de la typologie du gisement et de l'investissement prévu. Ainsi que la méthode d'aération (insuflation ou aspiration) sera laissée à l'appréciation de l'exploitant. Cependant, l'aspiration limite le problème d'odeur et présente un coût d'investissement similaire à l'insuflation.

2.3 Description du retourneur d'andain

Lors du fonctionnement de la plate forme, l'acquisition d'un retourneur d'andains s'avère vite indispensable pour plusieurs raisons : meilleure aération des broyats raccourcissement du cycle de fermentation et si la plateforme venait à recevoir un flux de déchets plus important possibilité d'avoir plusieurs ateliers de fermentation. Deux entreprises sont spécialisées dans la commercialisation de retourneur d'andains et propose des modèles intéressants pour la plateforme de BRUZ.

~ METALLIC ZI 38110 St Didier de la tour

~ D HANTSCH SA Broyeurs Willibald ZI BP 6 67520 Marlenheim

A. Le retourneur d'andain de chez Metallic tractable

REFERENC E	POIDS	ANDAINS	PUISSANC E	DEBIT
483	10 t	6 x 2.7	85 CV	2500 m ³ /H

Principe de fonctionnement : Un large tapis métallique, tournant à grande vitesse, soulève et effrite les matériaux puis les redépose.

Avantages : faible usure des pièces en mouvement (Dents) faible consommation d'énergie

B. Le retourneur enjambeur type WSU 4000 de Hantsch-willibald

REFERENC E	POIDS	ANDAINS	PUISSANC E	DEBIT
WSU 4000	9.5 t	4.2 x 2	248 CV	1500 m ³ / H

Principe de fonctionnement : Un rotor fixé sur un pont enjambeur pivote et permet l'homogénéisation de la masse du compost.

Avantages : grande largeur et hauteur de retournement

3. Equipements et Fournitures

Pour le compostage aéré, le matériel suivant sera utilisé avec plusieurs choix possibles de pompes, retourneurs, cribleurs.

Matériel	Utilisation	Marque/ Références	Caractéristiques	Quantité	Prix (F)
Drain	Aération de l'andain	La Cana		90 m	70 f/ m
Gaine pour RKJ 500	Raccord pompe et drain	Systemair		2 m	795 F/2m
Pompe USB 30.4	Aération de l'andain	Systemair	Puissance 1.1 Kw	1	10 230 F
Pompe RKJ 500	Aération de l'andain	Systemair	Puissance 1.35 Kw	1	13 965 F
Gaine pour USB 30.4		Systemair		2 m	98 f /m
Grille de protection	Protection de la pompe contre les rongeurs			1	120 f
Surface bétonnée	Aménagement du site de fermentation			200 m ²	400 f/ m ²
Retourneur	Homogénéisation de l'andain	Metallic / 483	Puissance 85 CV	1	280 000 f HT
Retourneur	Homogénéisation de l'andain	Hantsch / WSU 4000	Puissance 248 CV	1	390 000 f HT
Cribleur	Tamissage du compostage mûr	Metallic/ C85		1	300 000 f (HT)
Cribleur	Tamissage du compostage mûr	Location avec chauffeur		1	30 f /m ³

Le matériel du compostage statique est aussi utilisé dans le compostage aéré.

Matériel	Utilisation	Marque/	Caractéristiques	Quantité	Prix
----------	-------------	---------	------------------	----------	------

		Références			(kF)
Broyeur	broyage des déchets bruts	métallique/ broyeur cyclone	mobile 155 cv (turbo diesel 15 t/h	1	400 (HT)
		Willibald/ MZA 1400	mobile 115 cv (85 kW) 45 à 90 m ³ /h (11 à 25 t/h)	1	368 (HT)
Epandeur agricole	mise en place et retournement des andains	Blanchard (distributeur)	capacité: 8 t	1	70
Chargeur	chargement du compost dans le broyeur et dans l'épandeur	Mailleux (distributeur)/ hydrofourche		1	20 à 35
Tracteur (location)	mise en place et retournement des andains		100 cv	1	6/ semaine ou3000f/3j
Tracteur + chargeur (achat)		Renault- Blanchard	85 cv		230 (neuf) 120 (occasion)
Pompe à eau	pompage d' eau dans la lagune	pompe agricole	débit: 50m ³ /h	2	25
Canalisations	collecte des eaux pluviales dans la lagune	La Cana (distributeur)	diamètre: 180 mm	XPIF	0.11/m
Clôture	fermeture du site		2 m de haut		20/100m
Toiture	stockage des déchets bruts & compost mûr	doc. (25)		270 m ²	0.4/m ²
Plateforme bétonnée	hangar matériel	doc. (25)		100 m ²	0.6/m ²
Gravier, couche + sous couche	aire de circulation	La SETUR		2250 m ²	0.7/m ²
Lance à eau	Arrosage des andains				

4. Bilan Economique:

		prix unitaire (kF)			
	quantité	HT	TTC	prix total (kF)	Location (kF)
MATERIEL					
Broyeur	1	368	444	444	
Chargeur	1		35		0.3/3 j
Epandeur	1		70		0.8/3 j

Tracteur	1	230			3/ 3 j
Lance à eau	2				
Pompe	2		25	50	
Drain	90 m		98 F / m	8.890	
Gaine RKJ 500	2 m		795 F/ m	0.795	
Grille de protection	1		120 F	0.120	
Pompe US 30.4	1		5300 F	5.3	
Cribleur	1		30 F /m ³		
Retourneur Metallic 483	1	280 kF	338 kF	338	
Cribleur C 85	1	300 kF		362	
INFRASTRUCTURE					
Clôture	400 m (Végéterre) 550 m (Low Tech)		20 pour 100 m	80 ou 105	
Toiture	270 m ²		0.4 / m ²	110	
Plateforme béton	100 m ²		0.6 / m ²	60	
Canalisations	200 m		0.11 / m	22	
Lagune	1400 m ³		0.15 / m ³	210	
Gravier	2500 m ²		0.4 / m ²		
Surface bétonnée	200 m ²		400 F/m ²	80	
FRAIS DE FONCTIONNEMENT					
Personnel	1 personne Plein temps		.140 F/h	280	
Electricité	puissance	capacité		temps de fonctionnement	Coût annuel
Pompe USB 30.4	1.1 kW	3000 m ³		1730	0.6 kf
Pompe à eau	7.5 kW	50 m ³ /h		54 h/an	0.25 kF
Broyeur	115 cv 85 kW	11 à 25 t/h		100 h/an	5.1 kF

VI. COMPARAISON DES DEUX MODES DE COMPOSTAGE

a. Point de vue économique

	Andains statiques	Andains aérés
CHARGES DIRECTES (kF/an)		
frais de personnel	70	280
frais de fonctionnement du matériel	6 +10*	6+20*
frais de location et de prestation	30	20
frais divers (exemple)	10	10
FRAIS D' AMORTISSEMENT(kF/an)		
broyeur	90	90
chargeur		
cribleur		51
retourneur d'andains		48
plateforme et infrastructure	55	76
CHARGES INDIRECTES **(exemple⁽¹⁰⁾)		
frais généraux	5	5
TOTAL	275	606
Tonnage traité dans l'année (T)	1100	1100
Coût de traitement (kf/T)	0.25/T (50 F/m ³)*	0.55/ T (110 F/ m ³)

La période d'amortissement du matériel est de 5 ans et celle de l'infrastructure de 10 ans.⁽¹⁰⁾
 (*) Notons qu'un coût de traitement performant avoisine les 25 F/ m³

b. Efficacité (rapidité, qualité du compost)

	Andains statiques	Andains aérés
Surface de la plateforme (m ²)	2200	2000
Durée du compostage (mois)	12	7
Qualité du compost	bonne	optimale

c. Contraintes de chaque mode

Au niveau du compostage aéré, un imposant coût d'investissement et de fonctionnement est nécessaire pour mettre en place le système d'aération. Au début de leur fonctionnement les plateformes fonctionnant en compostage aéré éprouvent des difficultés de mise en oeuvre et d'optimisation du système d'aération.

Au niveau compostage statique, il demande une superficie de plateforme importante avec des temps de compostage long notamment le procédé « Low Tech » demande une superficie de 5400 m² avec une durée de compostage de 2 ans. Il fournit de plus un compost de moins bonne qualité que dans le compostage aéré.

VII. VARIANTES

1.Le co-compostage

Le co-compostage des déchets verts est devenu une pratique répandue. La combinaison des déchets végétaux riches en carbone et pauvres en azote, avec des boues de stations, des lisiers ou des fientes, très riches en azote, mais de consistance visqueuse voire liquide, permet d'assurer une meilleure décomposition biologique. Pour les exploitants des installations de co-compostage, l'utilisation des déchets végétaux permet de réduire le coût des agents de structure. Pour les responsables des services d'entretien municipaux, c'est une solution économique car elle évite de mettre en décharge les déchets d'élagage et les tailles de haies.

Cependant, pour les vendeurs de compost, ce mariage n'est pas sans problème; il mélange, selon eux, un produit à risque bactériologique (boues, lisiers...) à un produit propre et sain, ce qui déprécie le produit final lors de sa commercialisation.
(Valorisation et traitement des déchets verts)

2.Le lombricompostage

D'autres expériences de lombricompostage, (compostage suivi d'une digestion par les lombrics) ont eu lieu. Mais ce procédé n'a pas été retenu car trop coûteux: 750f la tonne traitée (anonyme 1993).

VIII. CONCLUSION

La compostage par insufflation d'air est rentable à partir d'un volume de déchets supérieur $5400 \text{ m}^3 / \text{mois}$ ⁽⁹⁾. Il est donc évident que cette solution n'est pas envisageable dans le cas de Bruz qui recherche un coût d'investissement et de fonctionnement minimum. Le compostage statique s'avère une solution plus appropriée pour la Mairie. Son coût de fonctionnement reste cependant un peu élevé, plusieurs solutions sont envisageables pour diminuer ce coût :

- ~ Baisse des frais d'infrastructure (quantité de gravier, pas de stockage couvert du compost mûr).

- ~ Personnel commun avec la déchetterie (le gardien de la déchetterie responsable de la plateforme) .

- ~ Emploi systématique des agriculteurs de la commune et de leur matériel à frais réduits et/ou en échange du compost produit.

- ~ Vente du compost comme remblais et éventuellement aux particuliers.

fig.1 courbe théorique des besoins en oxygène
au cours du compostage

Zone 1: Activité maximale de dégradation aérobie
Besoin en oxygène: **fort** (0.5 à 1 m³ air/mn/T de M.S)
Zone 2: Activité moyenne de dégradation aérobie
Besoin en oxygène: **moyen** (0.1 à 0.5 m³ air/mn/T de M.S)
Zone 3: Activité faible de dégradation aérobie
phase de maturation dominante
Besoin en oxygène: **faible** (inférieur à 1 m³ air/mn/T de M.S)

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

1_Le compost « Gestion de la matière organique » Michel Mustin
Edition Française François Dubux Paris