

MEMOIRE présenté à l'ENSIA – SIARC de MONTPELLIER

le 25 septembre 2003

Par Dahirou OUMAROU

Pour obtenir le

DIPLOME D' INGENIEUR de l' ENSIA spécialité IARC

Jury:

- Madame Sylvie AVALLONE, Enseignant chercheur
CIRAD/ENSIA - SIARC
- Monsieur Jean-Pierre GUYOT, Directeur de recherche IRD
- Monsieur Gérard LOISEAU, Enseignant chercheur
CIRAD/ENSIA - SIARC
- Monsieur Denis MONTANGE, Chercheur CIRAD

**OPTIMISATION DE PROCEDE DE COMPOSTAGE
DES EFFLUENTS DE DISTILLERIE VINICOLE**

Stage effectué au sein de l'équipe de Gestion des Ecosystèmes Cultivés au CIRAD de Montpellier

DK-516614.

CIRAD-DIST
Unité bibliothèque
Lavalette



MEMOIRE présenté à l'ENSIA – SIARC de MONTPELLIER

le 25 septembre 2003

Par Dahirou OUMAROU

Pour obtenir le

DIPLOME D' INGENIEUR de l' ENSIA spécialité IARC

Jury:

- Madame Sylvie AVALONE, Enseignant chercheur
CIRAD/ENSIA - SIARC
- Monsieur Jean-Pierre GUYOT, Directeur de recherche IRD
- Monsieur Gérard LOISEAU, Enseignant chercheur
CIRAD/ENSIA - SIARC
- Monsieur Denis MONTANGE, Chercheur CIRAD

**OPTIMISATION DE PROCEDE DE COMPOSTAGE
DES EFFLUENTS DE DISTILLERIE VINICOLE**

Stage effectué au sein de l'équipe de Gestion des Ecosystèmes Cultivés au CIRAD de Montpellier

REMERCIEMENTS

J'exprime ma reconnaissance à l'ensemble de l'équipe REGARD (du programme GEC-CIRAD- Montpellier), notamment J. L. Farinet, D. Montange, C. Saison, G. Lannes et N. Condom ainsi qu'à P. Cazevieille, C. Chevassus de l'équipe SOLEMI et au personnel du laboratoire d'analyses notamment, M. Szwarc, D. Babre, C. Jeanjean, K. Alary, et M. Weil.

Je n'oublie pas B. Mayor, O. Puard et C. Casino.

Axe de travail:

AUTEUR : Dahirou OUMAROU

TITRE: Optimisation de procédé de compostage des effluents de distillerie vinicole

Région: Languedoc Roussillon (Montpellier France)

Institutions: CIRAD Montpellier

Encadrants: Messieurs G. Loiseau, J. L. Farinet

Mots- clés: distillerie vinicole, marc de raisin, vinasse, compost, odeur

- RESUME-

Dans l'objectif de valorisation des sous produits de distillerie vinicole, sont conduits des expérimentations de compostage de ces sous produits en conditions contrôlées à savoir: mélanges avec des proportions variables des différents composés, retournement de ces mélanges pour des meilleures conditions d'aérobiose, maintien d'une humidité favorable à la décomposition des matières organiques, addition à ces mélanges de co-produits externes, etc. Ces essais sont nécessaires non seulement pour déterminer les principales causes des nuisances olfactives (très désagréables pour la population voisine) aux abords des zones de compostage et les réduire, mais aussi pour aboutir à un compost référencé de haute qualité agronomique. L'identification et la caractérisation de différents types de produit organique issu d'effluents de distilleries (leur composition moyenne, leur variabilité au cours de la période de production) a été au préalable nécessaire. L'étude que nous avons menée a permis de mettre en évidence l'amélioration du procédé de compostage des effluents de distillerie par ajout de matière structurante (paille de riz), retournement périodique et ajustement de l'humidité des composts, ainsi que l'utilisation de la vinasse brute, principal résidu liquide de production des distilleries vinicoles. Ce premier volet sera suivi par l'étude comportement du compost dans les sols récepteurs. Il sera conduit dans les laboratoires CIRAD à Montpellier ainsi qu'au laboratoire d'écologie microbienne du sol (UMR CNRS/INRA/Université de Lyon) pour l'étude microbiologique plus fine du compost et du système compost-sol représentatif de quelques situations d'épandage. Le dernier volet consistera à l'étude des conditions d'obtention d'un compost référencé. Des essais au champ pourront être effectués afin de permettre une étude du comportement des produits sélectionnés et l'acquisition de données en conditions réelles pour une homologation des produits.

Côte bibliothèque CNEARC / SIARC:

Axe de travail:

AUTHOR : Dahirou OUMAROU

TITEL: Composting Process Optimization of wine distillation by-products

Région: Languedoc Roussillon (Montpellier France)

Institutes: CIRAD Montpellier

Tuteurs: Messieurs G. Loiseau, J. L. Farinet

Keywords: distillation, grape marc, vinasse, compost, smell

- ABSTRACT -

Distillation of by-products of wine production are creating some solid and liquid residues. In order to get rid of them, compost is prepared using these by-products. However bad smells are usually occurring during this compost preparation. The following assumption was made: bad composting conditions were responsible for these smell release.

To understand which composting conditions are responsible for bad smells, laboratory and field experiments were realized on by-products of wine distillation to compare decomposition of mixtures with various proportions of by-products, different aeration patterns (by turning the compost piles), moisture patterns, addition of external vegetal material such as rice straw.

Follow-up of parameters (i.e. physical, chemical) in various composting patterns was done to find optimal conditions and compare the gaseous emissions during composting. The better treatment for compost making is the use of non concentrated vinasse together with wine solid by-products and rice straw addition, together with a good aeration by regular turning of the pile. This mixture is composting very rapidly without smell. This first part of the study will be completed by compost fine characterisation. Microbiological research will be done on impact on the soil microflora biodiversity and resilience of microbial activities after compost supply to the soil.

Côte bibliothèque CNEARC / SIARC:

Axe de travail:

AUTOR : Dahirou OUMAROU

TITULO : Máximo aprovechamiento del método de elaboración de abono de los efluentes de destilería vinícola

Région: Languedoc Roussillon (Montpellier France)

Instituciones: CIRAD Montpellier

Responsables: Messieurs G. Loiseau, J. L. Farinet

Palabras- clave: destilería vinícola, marc de uva, vinaza, abonos, odors

- RESUMEN -

Con propósito de valorización de los subproductos de destilería vinícola, se conducen experimentaciones de elaboración de abonos usando mezclas en varias proporciones de productos básicos, revocación de estas capas para mejores condiciones de aerobiosis, buenas condiciones de humedad para la decomposición de las materias orgánicas, adición de coproductos externos, etc. Es necesario estudiar esto no sólo para determinar las principales causas de las molestias olfativas (muy desagradables para los vecinos) alrededor de las zonas de elaboración de abono y reducirlos, sino también para conseguir un compost acabado de alta calidad agronómica. La definición y la caracterización de los varios tipos de producto orgánico resultante de basuras de destilerías (su composición media, su variabilidad durante el período de producción) fue de antemano necesario. El estudio que realizamos permitió caracterizar la mejora del método de elaboración de abonos usando basuras de destilería por adición de materia estructurante (paja de arroz), revocación periódica y ajuste de la humedad del compost, así como la utilización de la vinaza bruta, principal residuo líquido de producción de las destilerías vinícolas.

Côte bibliothèque CNEARC / SIARC

SOMMAIRE

Tables des illustrations.....	2
Introduction.....	3
Présentation générale.....	4
I. Le CIRAD	4
II. La FNDCV	4
Contexte et objectifs de l'étude.....	5
III. Objectifs généraux.....	5
IV. Objectifs spécifiques	5
V. Approche	6
Synthèse bibliographique.....	6
VI. Définitions du compostage	6
VII. Processus biologique lors du compostage	7
VIII. Techniques de compostage.....	7
IX. Paramètres de suivi du compostage	8
X. Indicateurs de maturité des composts	9
XI. Différentes filières de compostage.....	11
XII. Avantages tirés de l'utilisation d'un compost.....	12
XIII. Production des gaz lors du compostage	12
XIV. Législation sur les composts et les odeurs.....	14
Démarche expérimentale.....	15
XV. Constat et diagnostic	15
XVI. Suggestions	16
Matériels et méthodes	17
XVII. Plate forme de compostage (Compostage en andains)	17
XVIII. Essai au laboratoire (Compostage en bacs)	20
Résultats et discussions.....	23
XIX. Caractérisation des sous-produits de la distillerie FINEDOC	23
XX. Compostage en andains	24
XXI. Compostage en bacs (Essai au laboratoire)	30
Conclusions et recommandations	41
Références bibliographiques	42
ANNEXES	43

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 : <i>Flow sheet</i> de fabrication de la Distillerie FINEDOC	15
Figure 2 : Andain au milieu duquel est placée une canne en PVC	18
Figure 3 : Bac de compostage	21
Figure 4 : Évolution de la température des 4 andains.....	25
Figure 5 : Évolution de la masse brute (A) et de la matière sèche (B) des andains	27
Figure 6 : Evolution des taux de matière organique	29
Figure 7 : Évolution de la température du compost des bacs au cours de l'expérience.	31
Figure 8 : Évolution de la matière sèche des différents mélanges testés	32
Figure 9 : Évolution de la matière organique des différents mélanges testés	33
Figure 10 : Évolution du pH	34
Figure 11 : Évolution des nitrates	35
Figure 12 : Évolution de l'ammoniaque.....	35
Figure 13 : Évolution de l'ammoniac libre	35
Figure 14 : Évolution du dégagement de l'ammoniac	36
Figure 15 : Évolution des sulfures	37
Figure 16 : Évolution des sulfates	37
Figure 17 : Évolution de dégagement de diméthylsulfure.....	38
Figure 18 : Évolution de dégagement de dioxyde de soufre	38
Figure 19 : Évolution des acides volatils	39
Figure 20 : Évolution du dégagement d'acide acétique	40

Tableaux

Tableau 1 : Composition des mélanges des déchets des andains	19
Tableau 2 : Composition des mélanges des déchets des bacs de compostage au laboratoire	22
Tableau 3 : Caractéristiques des déchets, rafles et pulpes grossières à l'état initial	23
Tableau 4 : Caractéristiques des vinasses à l'état initial	23
Tableau 5 : Caractéristiques des vinasses à l'état initial.....	24
Tableau 6 : Caractéristiques de la matière structurante, la paille de riz.....	25
Tableau 7 : Analyse de la composition des andains au départ	25
Tableau 8 : Évolution des taux de MO, C org. et N total dans les andains	29
Tableau 9 : Evolution des teneurs en gaz dans les andains au cours du compostage.....	31

INTRODUCTION

L'importance du problème posé par la gestion des déchets ne cesse de s'accroître, notamment dans les pays développés. Dans ces pays, en raison des modes de production et de consommation, les déchets sont de plus en plus abondants, variés, complexes et nocifs pour l'environnement. La nécessité de les traiter s'impose, notamment au regard de la réglementation de plus en plus sévère en matière d'environnement.

En France, d'après la loi du 15 juillet 1975, on appelle "déchets" tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son propriétaire destine à l'abandon.

En industrie agro-alimentaire, les déchets sont de nature organique et comprennent notamment les écarts de triage, épluchures, pulpes, marcs, drêches, tourteaux, lactosérum etc. Ces sous produits dépendent donc du type d'industrie agro-alimentaire considéré. La gestion de ces déchets et sous produits a comme objectif final de les éliminer, tout en les valorisant au mieux en récupérant ou en formant des molécules d'intérêt industriel, puis en transformant la matière restante sous une forme non gênante pour l'environnement. Ainsi, la recherche de nouveaux produits et de nouveaux marchés peut permettre d'optimiser la gestion des déchets. En ce qui concerne les sous produits générés dans une filière de transformation et de production, en accompagnement des techniques classiques visant à valoriser et/ou éliminer, la recherche peut revêtir une importance stratégique (caractérisation, fractionnement, économie de matière première, techniques et produits nouveaux...). La filière vitivinicole constitue un exemple intéressant pour quantifier les possibilités actuelles et potentielles de valorisation des déchets. Concernant la valorisation et/ou dépollution des sous-produits viticoles, les distilleries vinicoles jouent un rôle très important. Les marcs de raisin et les lies de vin, sous-produits de la production de vin sont transformés en produits commercialisables, tout en générant des déchets qui sont traités par des procédés faisant appel soit à des techniques biologiques (épandage, compostage, méthanisation...) soit à des techniques physico-chimiques (techniques de filtration sur membranes par exemple).

Pour certaines distilleries de la FNDCV (Fédération Nationale des Distilleries Coopératives Vinicoles), la valorisation et/ou l'élimination de ces déchets solides et liquides passe par un compostage. Cette opération induit, dans certaines conditions, la production d'odeurs nauséabondes, très désagréables pour les riverains. Afin d'étudier les conditions d'une telle émission d'odeurs et tenter de remédier à ce problème, une convention de collaboration a été signée entre le Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement et la FNDCV.

Mes activités au sein du CIRAD ont eu pour cadre cette convention de travail avec plus particulièrement le suivi des phénomènes de compostage en vraie grandeur (expérimentation en andains) et en conditions contrôlées (bacs en laboratoire) afin d'optimiser les procédés de compostage des sous-produits de distillerie vinicole.

Ce rapport s'articulera en 6 parties:

Un premier chapitre de présentation générale,

le deuxième de synthèse bibliographique visera à détailler les techniques de compostage,

un troisième chapitre de démarche expérimentale aura pour objectif de poser le problème du compostage de la distillerie FINEDOC et de présenter les améliorations proposées,

le quatrième détaillera les matériels et méthodes utilisés,

le cinquième sera consacré à l'interprétation des résultats et discussion,

et enfin un sixième chapitre de conclusion de l'étude et des recommandations.

PRESENTATION GENERALE

I. Le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement).

En 1984, la fusion des instituts de recherches en sciences agronomiques, vétérinaires, forestières et agro-alimentaires des régions chaudes a donné naissance au CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement). Le CIRAD est donc un organisme de recherche spécialisé en agriculture des régions tropicales et subtropicales. Sa mission consiste à contribuer au développement de ces régions par des recherches, des réalisations expérimentales, la formation et l'information scientifique et technique.

Le CIRAD comprend sept départements de recherche : cultures annuelles (CA), cultures pérennes (CP), productions fruitières et horticoles (FLHOR), élevage et médecine vétérinaire (EMVT), forêts (FORETS), territoires environnements et acteurs (TERA), amélioration des méthodes pour l'innovation scientifique (AMIS). Chaque département est constitué de plusieurs programmes (qui à leur tour regroupent plusieurs équipes).

II. La FNDCV (Fédération Nationale des Distilleries Coopératives Vinicoles)

C'est dans les années "20" que les premières distilleries coopératives ont vu le jour. Extraire l'alcool des marcs et des lies de vin était leur seul objectif. La FNDCV quant à elle a été créée le 23 mars 1946 pour la livraison des prestations viniques comme toutes les autres distilleries vinicoles au niveau européen. Elles sont soumises à des règles semblables, elles ont endossé à l'origine le rôle de régulateur du marché des vins puis celui de l'outil indispensable de valorisation et/ou dépollution des produits issus de la vinification et enfin la valorisation des sous-produits de la distillation : pépins, pulpes, tartrate de chaux. A ce jour, 35 distilleries coopératives vinicoles adhèrent à la FNDCV, elles emploient 500 salariés régis par une convention collective nationale et génèrent plus de 200 millions d'euros de chiffre d'affaires.

Le rôle de la FNDCV s'inscrit essentiellement dans deux optiques :

- celle des entreprises sur le triple plan du droit coopératif, de l'environnement et du droit social,
- celle des productions avec notamment les modalités d'approvisionnement des marchés, et les débouchés d'alcools de prestations viniques.

L'adhérent coopérateur est le partenaire privilégié de la distillerie coopérative. Il est assuré d'un suivi et d'un soutien administratif, bénéficie des conseils pour les opérations de distillation, ainsi que de toute information sur la législation communautaire.

CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

III. Objectifs généraux

La valorisation ou l'épuration des effluents par épandage sur les sols cultivés représente un enjeu majeur de la gestion des déchets organiques pour les industries agro-alimentaires en général. La filière vitivinicole constitue un exemple intéressant pour quantifier les possibilités actuelles et potentielles de valorisation des déchets. Concernant la valorisation et/ou dépollution des sous produits viticoles, les distilleries vinicoles jouent un rôle très important.

Les marcs de raisin et les lies de vin, sous-produits de la production de vin, sont transformés en produits commercialisables (alcool et eaux-de-vie, produits tartriques sous forme d'essorés ou de tartrate de chaux, pépins de raisin destinés à la production d'huile, pulpes de raisin destinées aux engrais, à l'alimentation du bétail, ou aux combustibles, colorants (anthocyanes)).

Ces extractions génèrent des déchets (rafles, pulpes grossières, boues de lies, vinasses) qui sont traités par des procédés faisant appel soit à des techniques biologiques (épandage, compostage, méthanisation...) soit à des techniques physico-chimiques (techniques de filtration sur membranes par exemple).

Pour certaines distilleries de la FNDCV, la valorisation et/ou élimination de ces déchets solides et liquides passe par un compostage. Cette opération induit dans certaines conditions, la production d'odeurs très désagréables pour les riverains.

Afin d'étudier les conditions d'une telle émission d'odeurs et tenter de remédier à ce problème, une convention de collaboration a été signée entre le CIRAD et la FNDCV. Le CIRAD est également chargé de faire des études agronomiques sur les produits issus du compostage (essais de minéralisation du compost dans le sol et impact de la présence de compost sur la fertilité des sols et la microflore tellurique) afin de caractériser les produits obtenus et déboucher à moyen terme sur un compost de haute qualité agronomique.

Cette convention de collaboration concerne du côté du CIRAD l'équipe « Risque Environnemental, Gestion Agricole et Recyclage des Déchets » du programme Gestion des Ecosystèmes Cultivés (GEC) du Département de Cultures Annuelles (CA) et du côté de la FNDCV une quinzaine de distilleries réparties principalement dans le sud de la France. Pour répondre à l'attente de la FNDCV (réduire les nuisances olfactives, améliorer la qualité du compost, obtenir une homologation), le CIRAD propose d'améliorer dans un premier temps les procédés de compostage.

La distillerie FINEDOC de Vauvert (30) a été choisie comme lieu d'expérimentation privilégié, proche du CIRAD Montpellier.

IV. Objectifs spécifiques

En dehors de ce contexte global, des objectifs de nature méthodologique m'ont été fixés, et en particulier :

- de voir si on peut suivre – et donc piloter - le processus de compostage à partir des analyses physico-chimiques faites sur un extrait de compost. On essaiera de trouver une relation entre

les résultats de ces analyses de laboratoire et les mesures simples comme la température et le pH qui peuvent se faire dans des conditions de terrain. L'intérêt de cette étude est double car non seulement on peut suivre le compostage à partir de ces analyses, mais aussi on dispose des données sur l'évolution des différents éléments du substrat au cours du compostage.

- de faire ces analyses à l'aide d'un colorimètre de terrain en comparaison avec les analyses colorimétriques classiques de laboratoire. Le but est d'étudier s'il est envisageable de suivre le compostage avec ce type de matériel simple utilisant le plus souvent des kits de réactifs préparés à l'avance. Ceci permettrait le suivi du compostage même au niveau d'une entreprise qui ne dispose pas d'un laboratoire sophistiqué.

V. Approche

La réalisation de ce travail de recherche se fera sur trois axes:

Axe 1 : il s'agira d'optimiser le procédé de compostage, de déterminer les causes et les cinétiques d'apparition des mauvaises odeurs et de proposer des solutions économiquement rentables pour les faire disparaître ou pour le moins les atténuer. A cet effet, des expérimentations seront mises en place sur le terrain et, en complément, au laboratoire avec une conduite optimale de compostage. L'ensemble sera accompagné par un programme d'analyse des gaz ainsi que l'analyse et la caractérisation physico-chimique et microbiologique du substrat (en faisant l'hypothèse que leur évolution favorable sera accompagnée d'une élimination ou réduction des mauvaises odeurs).

Axe 2 : il consistera à caractériser le compost et à étudier son comportement dans les sols récepteurs. Il sera conduit dans les laboratoires CIRAD à Montpellier ainsi qu'au laboratoire d'écologie microbienne du sol (UMR CNRS/INRA/Université de Lyon) pour l'étude microbiologique plus fine du compostage et du couple compost-sol représentatif de quelques situations d'épandage.

Axe 3 : le dernier volet consiste à l'étude des conditions d'obtention d'un compost référencé, non soumis à un plan d'épandage. Des essais au champ pourront être effectués afin de permettre une étude du comportement des produits sélectionnés et l'acquisition de données en conditions réelles pour une homologation des produits.

Je tiens à préciser que mon stage et ce rapport ne concernent que l'axe 1 de ces travaux.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Le compostage

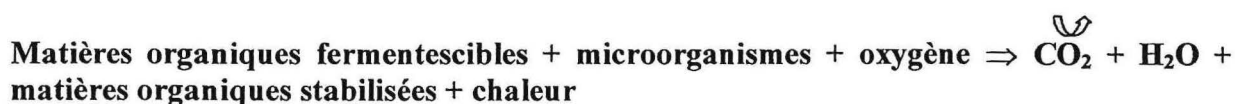
VI. Définitions

Le compostage est un mode de traitement biologique des déchets en présence d'oxygène (minéralisation aérobie). Ce procédé est adapté aux déchets végétaux et déchets organiques agricoles et industriels (fraction fermentescible des ordures ménagères, déchets verts, effluents d'élevages, déchets organiques des industries alimentaires...).

L'intérêt premier d'un compost est d'apporter des éléments fertilisants principaux (N, P, K) et secondaires (S, Mg, Ca), de la matière organique et quelques oligo-éléments aux sols agricoles et horticoles. Il a aussi pour rôle de contribuer à une meilleure stabilité structurale des horizons superficiels des sols, par cet apport de matière organique. Il reproduit en accéléré les étapes de transformation des résidus végétaux en substances humiques, transformations qui ont lieu dans un sol.

VII. Processus biologique lors du compostage

Le principe de base est la transformation des substances organiques fermentescibles des déchets en un amendement organique dont le niveau de stabilité dépend de la durée de traitement, par le biais de microorganismes indigènes (bactéries, levures, moisissures, algues microscopiques,...) dans des conditions contrôlées :



Le processus se déroule en 2 étapes principales :

a - phase thermophile ($t^\circ = 60^\circ\text{C}$)

C'est une phase de montée en température du fait de l'activité des microorganismes aérobies dégradant la matière organique facilement minéralisable. Cette phase dure de un à deux mois et entraîne l'hygiénisation du produit (destruction des graines d'adventices et des microorganismes indésirables).

b - phase de maturation

Cette deuxième phase est aussi appelée phase d'humification qui est le processus fondamental de production des humus (acides organiques de couleur brun – noir) à partir des composés organiques ayant subi une biodégradation. Pendant cette phase, la température est basse ; ceci s'explique par la diminution de l'activité microbienne après dégradation de tous les substrats organiques facilement métabolisables. Elle dure de deux à huit mois. La maturité d'un compost est définie par le degré de stabilisation de sa matière organique.

VIII. Techniques de compostage

Il existe plusieurs techniques de compostage, mais la manière la plus simple d'obtenir du compost consiste à disperser les déchets préalablement humidifiés (et broyés dans certaines conditions pour augmenter les surfaces d'échanges), en tas ou en andains sur des surfaces convenablement drainées.

Dans le cas de compostage en andains, l'aération est dite naturelle car elle se fait par convection naturelle de l'air au sein de la masse ; cependant, il convient de retourner régulièrement les déchets afin de réhomogénéiser le mélange et redistribuer les chemins préférentiels d'aération. Si les déchets sont peu poreux, l'incorporation de matières structurantes (comme la paille) peut améliorer la porosité ; de même, si les déchets sont trop humides, l'ajout de sous-produits peut pomper cet excès d'humidité (Moletta, 2000). Au bout de trois à douze mois, si les conditions sont respectées, on obtient un compost bien stabilisé.

Certains procédés de compostage en andain privilégient l'aération par aspiration ou insufflation d'air en lieu et place du retournement du mélange.

Le système "industriel" de compostage appelé minéralisation accélérée quant à lui vise à obtenir la même qualité de compost mais sur une durée moindre (Diaz *et al.* 2002). Les déchets sont introduits dans un tambour rotatif (bio-réacteur), où ils séjournent trois à quatre jours à une température de 50 à 60°C. Ils sont ensuite entreposés sur une aire de stockage, où ils resteront quelques mois, au cours desquels les phases de minéralisation et de maturation se succéderont pour aboutir à un compost mûr. Cette technique présente l'avantage d'un raccourcissement de la fabrication, de deux à quatre semaines, et d'une gestion continue des composts (occupe un minimum de surface au sol en comparaison avec le système des andains).

IX. Paramètres de suivi du compostage

a- Paramètres de la minéralisation

a-1- Température

La température non seulement a une influence sur l'humidité (évaporation augmentée par la chaleur), mais elle a aussi une incidence directe sur l'activité microbologique. Le taux de croissance des microorganismes est en effet fonction de la température, certains microorganismes étant plutôt mésophiles (taux de croissance optimal entre 30 et 45°C), d'autres thermophiles (taux de croissance optimal entre 45 et 70° C). La variation de la température au cours du traitement est donc due aux activités microbiennes. Elle entraîne ensuite une modification de la nature des souches les plus actives et une modification des taux d'utilisation des substrats. Si les cinétiques maximales de croissance ont été observées pour des températures supérieures à 50° C, au delà de certaines températures - 70 à 80° C selon les microorganismes - les activités métaboliques sont considérablement ralenties voire annulées. L'augmentation de température étant générée par l'activité microbologique et cette même augmentation pouvant générer l'arrêt de ces activités, on appelle ce phénomène le suicide microbien (Moletta, 2000). Une température basse est le signe d'une activité microbologique insuffisante et ceci peut avoir différentes causes :

- pH trop acide ou trop basique,
- humidité insuffisante,
- aération insuffisante,
- porosité inadaptée.

En phase de maturation, une augmentation de la température est le témoin d'une minéralisation inachevée.

a2- Humidité

L'eau étant utilisée par les microorganismes pour leur métabolisme, l'humidité des composts est un facteur à contrôler en priorité. L'humidité optimale est fonction de la nature des substrats mais est généralement comprise entre 55 et 75 % du poids frais du mélange (Mustin, 1987).

a3- Oxygène

Le compostage étant un traitement aérobie, l'apport d'oxygène aux microorganismes est le principal paramètre à contrôler. Une teneur en oxygène dans le gaz interstitiel inférieure à

5% ne permettrait pas le maintien des conditions aérobies (Mustin, 1987). Les besoins en oxygène seront d'autant plus importants que la matière organique sera plus facilement biodégradable. Il n'existe pas de méthode expérimentale permettant de quantifier directement le besoin d'oxygène pour la dégradation d'un déchet (Moletta, 2000).

a4- pH

Si les microorganismes ne sont pas capables de réguler leur propre température, ils peuvent par contre réguler leur pH interne. Cependant, la concentration en protons dans le milieu extérieur influe grandement sur la croissance des microorganismes qui est généralement optimale au voisinage de la neutralité (Mustin, 1987).

a5- Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des substrats

Le métabolisme des microorganismes nécessitant 15 à 30 fois plus de carbone assimilable que d'azote assimilable, des apports en azote seront effectués pour la stabilisation d'un substrat dont le rapport C/N (carbone organique sur azote total) serait supérieur à 30, alors que la dégradation d'un substrat de faible C/N nécessitera l'apport d'un co-produit carboné (Moletta, 2000). Le dosage sur la fraction soluble des éléments (dissous) : azote total, sulfates, sulfures, ammoniac, ammoniacque, DCO, acides gras volatils, nitrates, nitrites peut être envisagé pour suivre le compostage bien qu'il existe plusieurs inconvénients liés à l'utilisation de ce paramètre:

- difficulté de faire un échantillonnage représentatif de la masse en compostage,
- lourdeur des prétraitements (extraction, centrifugation, filtration) de l'échantillon avant analyse,
- difficulté de standardisation car les valeurs mesurées sont étroitement liées à la nature des substrats.

b) Paramètres expérimentaux de la maturation

Le processus d'humification, qui caractérise la maturation, met en jeu des phénomènes biologiques et physico-chimiques. S'agissant encore de transformations aérobies, certains paramètres de la maturation sont identiques à ceux de la première phase. Les cinétiques de transformation en maturation sont donc sensiblement plus faibles que celles observées en minéralisation. Ainsi des conditions aérobies devront être maintenues pour que s'achève la stabilisation et que puissent être synthétisés les précurseurs de l'humification. Les températures et les humidités nécessaires sont plus faibles que lors de la première phase (Moletta, 2000).

X. Indicateurs de maturité des composts

Il est très difficile de connaître la maturité d'un compost avec une extrême précision, cependant elle doit être évaluée avec une marge d'erreur faible pour éviter tout accident de production ou de commercialisation. Pour cela, il existe plusieurs tests d'évaluation appelés indicateurs de maturité, plus ou moins difficiles à mettre en place et dont voici quelques exemples :

a - Critères empiriques

- Odorat

Le compost doit se présenter sans odeur ammoniacale ou putride.

- Activité biologique

Si, après retournement et humidification (à 50 %) pour favoriser la phase aérobie et exothermique, la température n'augmente pas (+ de 35° C), alors le compost a atteint une certaine maturité.

b - Critères microbiologiques

Respirométrie

Ce test repose sur la mesure du CO₂ dégagé ou d'une dépression consécutive à la consommation d'O₂ dans une enceinte close (Chaussod, 1999). Plus le compost devient mature, moins il consomme d'oxygène et moins il produit de CO₂. La maturité est atteinte lorsque la respiration est inférieure à 40 mg d'oxygène par kg de matière sèche de compost et par heure dans le cas des composts urbains.

c - Critères chimiques

- la Demande Chimique en Oxygène (DCO) ne doit pas dépasser 350 mg par g de compost mûr,
- les indicateurs reposant sur une analyse chimique faite sur le produit sec et broyé comme le rapport C/N. Ce rapport doit être inférieur à 19 pour un compost mûr selon la norme suisse EAWAG3" (Mustin, 1987). Cette méthode est peu fiable car ce rapport est étroitement lié à la nature des déchets.

d - Critères biologiques

- phytotoxicité

On suit la phytotoxicité induite par l'ammoniac et les produits transitoires comme les acides gras volatils (acide butyrique, propionique, acétique...) sur la germination et la croissance des plantes. L'absence de phytotoxicité permet de distinguer un compost mûr d'un compost immature.

- dosage de l'ATP

Le dosage de l'adénosine triphosphate (ATP) montre que la teneur du compost en cette molécule diminue considérablement en fin de compostage (moins de 0,7 mg par g de compost sec).

e - Autres méthodes de caractérisation de la stabilité de la matière organique

Dans le cadre de la révision de la norme NFU 44-051 qui régit la mise sur le marché des amendements organiques (et donc des composts), deux méthodes expérimentales de caractérisation de la matière organique sont en cours de normalisation. Cette révision a pour

objectif d'inclure des critères d'une part garantissant l'innocuité des amendements et d'autre part permettant d'évaluer leur valeur agronomique.

Ces deux normes expérimentales renseignent sur :

- la stabilité de la matière organique des composts qui est évaluée sur la base d'un fractionnement biochimique de la matière organique (mesure d'Indice de Stabilité Biologique - ISB). De cette stabilité, dépend la valeur amendante des composts, c'est-à-dire leur capacité à entretenir le stock de matière organique dans les sols. En effet, seules les matières organiques stabilisées peuvent enrichir le sol à long terme (Houot *et al.*, 2002).

La valeur d'ISB est un indicateur de la proportion de la matière organique des composts contribuant à l'entretien du stock de matière organique/humus des sols (plus un compost est mûr, plus son ISB est important).

- la minéralisation potentielle de la matière organique et de l'azote organique. Elle se mesure au cours d'incubation en conditions contrôlées de laboratoire. La minéralisation de la matière organique est d'autant plus importante que le produit organique est facilement biodégradable. Elle est liée à la stabilité de la matière organique et varie inversement aux résultats d'ISB. La minéralisation de l'azote organique est également dépendante de l'état de stabilité de la matière organique et de l'équilibre initial entre le carbone et l'azote dans le produit. La cinétique de minéralisation de l'azote renseigne sur la disponibilité de l'azote de l'amendement au champ après apport. Plus le compost est mûr, plus son azote organique se minéralise lentement (Houot *et al.*, 2002).

XI. Différentes filières de compostage

En dehors du compostage des déchets organiques des industries alimentaires, d'autres filières peuvent être prises en compte :

- le compostage collectif comme son nom l'indique consiste à collecter tous les déchets organiques (ordures ménagères) d'une collectivité et à leur faire subir les traitements décrits précédemment,
- le tri-compostage des ordures ménagères brutes : actuellement une partie des déchets verts est orientée vers cette voie, bien que mal adaptée à leurs caractéristiques. En effet, le compost obtenu est de qualité médiocre, car la partie organique des déchets est contaminée par la fraction non organique (plastique, métaux, ...),
- le co-compostage : consiste en un mélange des déchets organiques de nature diverse (boues de station d'épuration, déchets de bois ...), dont la partie fermentescible des ordures ménagères. Mais ce mélange est une opération difficilement maîtrisable (modification du rapport C/N, taux d'humidité, variation quantitative saisonnière, variation qualitative, soin à apporter au mélange),
- le compostage individuel : son essor actuel est important grâce aux campagnes de promotion réalisées par les collectivités. Cela consiste à fournir aux personnes intéressées de petits composteurs de jardin (la plupart du temps, des bacs de bois ou de plastique munis d'un couvercle), qui sont destinés à recueillir tous les déchets verts des foyers (feuilles mortes, tontes de pelouse, tailles d'arbustes...) ainsi que les résidus organiques de la cuisine (restes de repas, pelures de fruits et légumes...). Ces déchets se décomposeront pendant plusieurs semaines. Le compost recueilli sera utilisé comme fertilisant pour le potager ou le jardin des ménages. Cependant, le compostage individuel reste un complément du compostage collectif organisé par la collectivité, car il ne concerne que les particuliers volontaires, habitant en maison indépendante ; de plus, les intéressés ne peuvent pas toujours prendre en charge la totalité des déchets lorsque ceux-ci deviennent trop volumineux.

XII. Avantages tirés de l'utilisation d'un compost

Un compost de bonne qualité est un outil précieux d'amendement des sols :

- il contribue au remplacement des éléments nutritifs principaux et des oligo-éléments exportés par la récolte et à la stabilisation du régime organique du sol,
- il stimule et augmente la population de microorganismes,
- il augmente le volume de pores et améliore le régime de l'air et de l'eau dans les sols lourds,
- il augmente la capacité de rétention des substances nutritives et de l'eau dans les sols légers,
- il augmente le pH des sols acides,
- il augmente la résistance des sols à l'érosion.

Le compost peut aussi servir à des usages plus spécifiques :

- il peut représenter de la terre à fouiller pour les porcelets : le compost est riche en moisissures, pénicilline et oxyde de fer dont les porcelets sont particulièrement friands,
- il peut servir de compost fertilisant : il s'agit de compost criblé additionné d'engrais organique (farine de poisson, farine de plumes de volailles ...),
- il peut aussi faire office de compost amélioré : on l'utilise pour les plantes en pot, les semis, les repiquages, les transplantations,
- le compost destiné au façonnage en série et à grande vitesse des mottes à ensemercer,
- on peut l'utiliser comme matière isolante : on a envisagé également d'utiliser le compost en mélange avec des déchets de bois pour des parois multicouches, parois isolantes, panneaux synthétiques,
- il peut servir à la couverture des décharges,
- il peut enfin être utilisé pour la stabilisation des pentes de ski.

De plus, le compost permet de réduire :

- le recours au stockage ou au dépôt sauvage des déchets, sources de gaz malodorants et de lixiviats polluants,
- l'engorgement des incinérateurs dont ils peuvent perturber le fonctionnement (leur abondance et la grande variété de leur pouvoir calorifique posent des problèmes d'alimentation et de conduite des équipements),
- l'achat d'amendements.

XIII. Production des gaz lors du compostage

a - Système olfactif et perception d'odeur

La sensation d'odeur est créée par les récepteurs olfactifs situés à la partie supérieure de chaque fosse nasale, reliés au bulbe olfactif cérébral à travers la lame criblée.

Le système olfactif apporte des informations sur un environnement chimique. Le support d'information n'est pas une grandeur physique, comme la longueur d'onde électromagnétique pour la vision, ou les variations fréquentielles de la pression pour l'audition, mais une conformation particulière, physico-chimique, de l'énergie, portée par des produits chimiques volatils (les molécules odorantes).

Le système olfactif joue deux fonctions:

- la fonction de discrimination permet l'extraction de signaux dans un bruit de fond et la distinction des signaux entre eux,

- la fonction d'identification réalise quant à elle une reconnaissance de ces signaux, les confrontant à des informations stockées, attribuant ainsi une signification au stimulus.

L'ensemble de ces fonctions qui conduisent à la perception olfactive repose sur des mécanismes physiologiques qui sont la réception des molécules odorantes et la mémoire olfactive.

La perception d'une odeur résulte d'un stimulus très rapide, presque instantané, qui comporte plusieurs informations parmi lesquelles, l'intensité et la qualité de l'odeur. Au niveau de l'intensité, notre odorat se comporte comme pour la notion de chaud et de froid. L'intensité du signal est importante au début de la perception puis baisse progressivement avec l'adaptation. Sur le plan qualitatif, notre odorat fonctionne comme pour la notion de goût. Nous pouvons reconnaître, apprécier et classer la qualité d'une odeur (David, 1999).

b - Mauvaises odeurs

L'odorat humain, bien que moins sensible que celui d'autres mammifères, est une source d'informations sur les substances chimiques de l'environnement. Les mauvaises odeurs contribuent souvent à l'inquiétude de la population quant à la qualité de l'air et influent sur leur style de vie car les odeurs sont facilement détectables. Elles sont souvent le principal motif de plaintes des riverains des entreprises de traitement des déchets. Parmi les « contaminants » de l'air, les molécules odorantes sont les plus difficiles à gérer, du fait de la subjectivité inhérente à la mesure et à la définition de ce qui constituerait un seuil de perception olfactif inacceptable. Le seuil de perception étant défini comme la concentration à laquelle 50% d'un jury chargé de sentir perçoit ou ne perçoit pas d'odeurs, c'est l'équivalent d'une unité odeur par mètre cube – $1 \text{ u o} / \text{m}^3$ (et le nombre de dilutions du mélange odorant nécessaire afin d'obtenir $1 \text{ u o} / \text{m}^3$ indique la concentration en $\text{u o} / \text{m}^3$). Les contaminants de l'air possédant une odeur désagréable sont bien plus souvent gênants que toxiques ou nocifs.

Les odeurs émises lors du traitement des déchets organiques sont souvent dues aux produits « frais » et non pas au traitement par compostage qui est souvent justifié en lui même comme un procédé biologique de suppression rapide des mauvaises odeurs (Mustin, 1987).

Ces mauvaises odeurs sont liées à diverses molécules organiques (les plus fréquentes sont des molécules soufrées à l'odeur d'œuf pourri, les molécules azotées qui sentent l'ammoniac, les acides gras volatils, les cétones et les aldéhydes à l'odeur âcre et rance). produites surtout par des minéralisations anaérobies (cf. annexe 1 Molécules malodorantes)

c – Métrologie

Il existe deux méthodes de caractérisation d'odeurs :

- analyses physico-chimiques qui permettent d'identifier (qualifier) et/ou quantifier les différents composés odorants (Zahn *et al.*, 2001),
- analyses olfactométriques qui permettent de déterminer le niveau d'odeur (concentration).

Pour ces dernières, le gaz malodorant est prélevé à la source (l'air est récolté en un point d'émission quelconque) et conditionné dans des boudins étanches en plastique. Dans un laboratoire, l'échantillon est branché sur un olfactomètre à l'intérieur duquel le gaz subit des dilutions successives avec un air de référence inodore. Ces différentes dilutions sont ensuite présentées à un jury d'au moins six personnes qui déterminent chacune leur propre limite de détection de l'odeur (seuil de perception défini précédemment). Les résultats des quantifications sont obtenus après un traitement statistique des réponses.

XIV. Législation sur les composts et les odeurs

La loi n° 79-595 du 13 juillet 1979 fixe l'organisation du contrôle des matières fertilisantes et des supports des cultures. Par matière fertilisante, le législateur désigne « les engrais, les amendements et d'une manière générale tous les produits dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols ». Les supports de culture sont quant à eux définis comme « des produits destinés à servir de milieu de culture à certains végétaux ».

Les composts sont définis dans le fascicule de documentation FD U 42-041 de 1985 comme des amendements organiques obtenus par minéralisation d'un mélange constitué principalement de résidus végétaux divers, avec éventuellement des matières organiques d'origine animale, et ayant une teneur limitée en matières minérales. Les caractéristiques de certains d'entre eux sont données par la norme NF U 44-051 pour les amendements organiques. Ces spécifications portent sur a/ le pourcentage minimal de matière organique dans le produit, b/ le rapport MO / azote organique et c/ le pourcentage maximal d'azote dans le produit. Les producteurs et importateurs de composts doivent faire procéder à l'analyse des teneurs en cadmium, mercure, plomb, chrome, cuivre, nickel, sélénium, zinc, arsenic et molybdène, tous les 6 mois et lors de tout changement de matières premières. Des examens d'évaluation de la présence des germes pathogènes sont également à réaliser.

Cette norme est aujourd'hui très peu satisfaisante. Notamment pour le compost urbain, elle ne fait aucune différence typologique entre les composts issus du tri à la source des déchets ménagers et ceux issus des déchets ménagers bruts. Elle ne contribue donc pas à rassurer les utilisateurs sur la nature et la qualité du substrat composté. Par ailleurs, l'effet du compost sur le sol et la plante n'est pas abordé : aucun test d'écotoxicité ou de phytotoxicité du produit n'y est prévu. L'efficacité du compost (effet amendant et fertilisant) n'est pas non plus appréciée par cette norme. Enfin, aucune limite n'est prévue concernant les éléments présentant un danger potentiel pour les hommes, i.e. métaux et pathogènes (Moletta, 2000).

La structure permettant de réaliser le compostage relève de la loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Cette loi vise à connaître, limiter et contrôler les effets néfastes ou indésirables de certaines activités. Les ICPE sont par définition des installations (usines, ateliers, dépôts, chantiers, élevages...) dont le fonctionnement peut engendrer des risques et des nuisances pour le voisinage et l'environnement. Le compost, quant à lui, doit répondre aux prescriptions de la loi du 13 juillet 1979 qui précise qu'un produit mis sur le marché doit être homologué ou avoir une autorisation provisoire de vente. Toutefois, un compost peut en être dispensé pourvu qu'il respecte les normes de composition rendues obligatoires. Suivant sa teneur en différents éléments, un compost peut être considéré soit comme engrais (NFU 42-001), soit comme amendement (NFU 44-051), soit comme support de culture (NFU 44-551). Enfin on note que plusieurs travaux ont été lancés afin de réviser la démarche d'homologation et la norme NF U 44-051.

En ce qui concerne les mauvaises odeurs qui ont un impact réel sur le mode de vie et le bien-être des gens, du simple fait qu'elles sont agaçantes, désagréables ou sources de complications, la Loi sur l'Air, (dite Loi Lepage) 96-1236 du 30/12/1996 (surveillance, information, objectifs de qualité de l'air, seuils d'alerte et valeurs limites) fixe des dispositions de surveillance de la qualité de l'air et de ses effets sur la santé et sur l'environnement. Cette loi vise principalement les molécules odorantes qui ont un effet nocif sur la santé ou qui ont des conséquences nuisibles autres qu'une simple gêne.

DEMARCHE EXPERIMENTALE

XV. Constat et diagnostic

Un diagnostic préalable sera effectué visant à identifier les sous-produits utilisés dans le processus de compostage (figure 1) (point de vue qualitatif et quantitatif) et les pratiques de compostage des distilleries de la FNDCV. Ce diagnostic devrait permettre de mieux comprendre les difficultés des distilleries à gérer leurs déchets ainsi que les solutions à rechercher pour mener un compostage optimal.

a - Identification des process et des sous produits générés

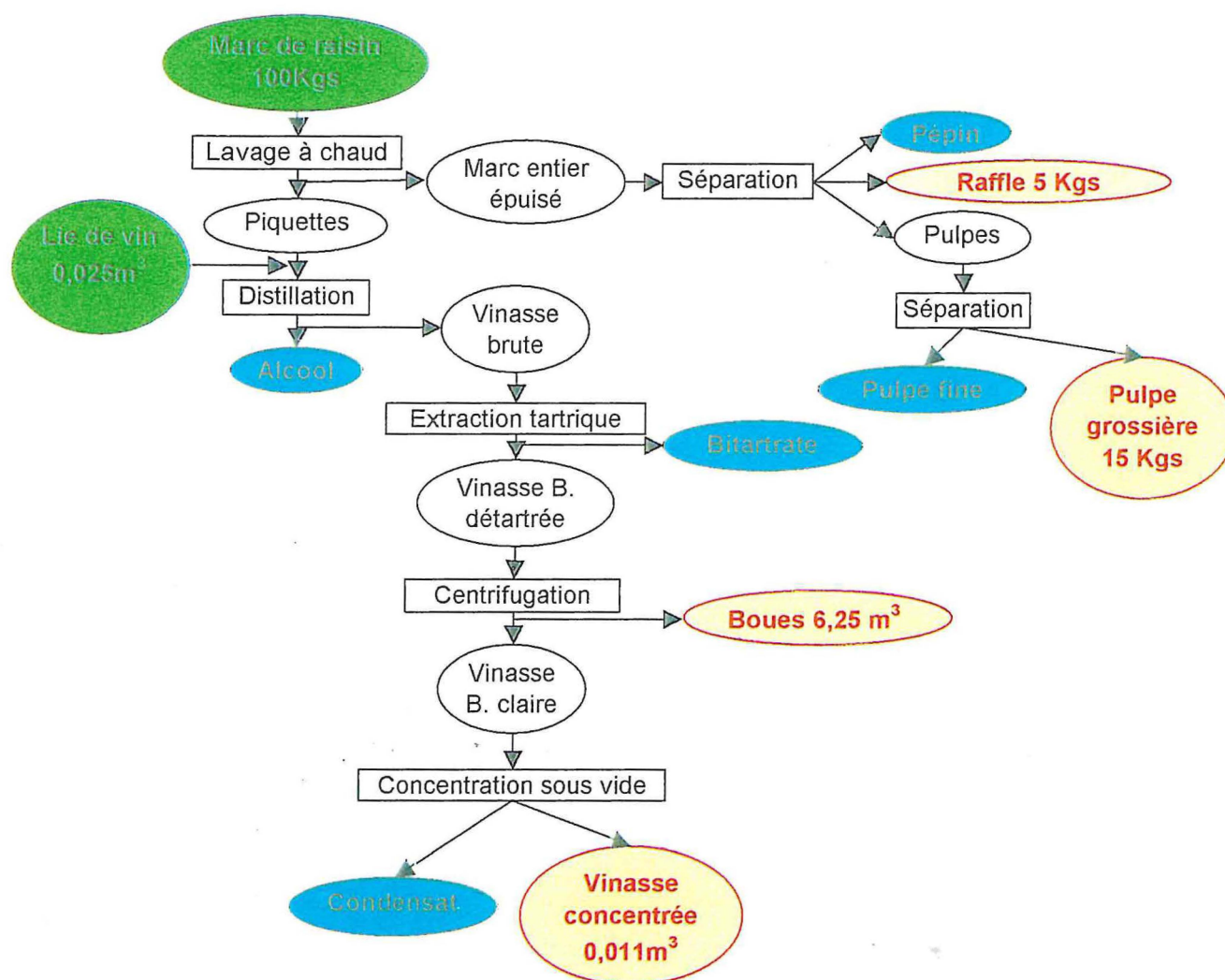


Figure 1 : Flow sheet de fabrication de la Distillerie FINEDOC (○ déchets rentrant dans le compostage)

b - Description du site et de la technique de compostage de FINEDOC

Le site de compostage de la distillerie FINEDOC s'étend sur 7 ha mais seule la moitié de cette surface environ est réellement exploitée. Les déchets solides (rafles, pulpes grossières,...) sont séparés au cours du process de distillation et collectés à l'extérieur de l'usine sur une plate-forme bétonnée. Les déchets liquides (vinasses) sont aussi rassemblés à l'extérieur de l'usine dans une fosse de collecte de 200 m³ et les boues issues de la centrifugation sont acheminées vers cette fosse à l'aide d'une pompe. La durée de stockage de ces effluents est relativement courte. Régulièrement, des déchets solides sont transportés à l'aide d'un chargeur à godet jusqu'à la fosse de collecte des liquides et sont mélangés sans matière structurante externe (paille de céréales, déchets verts...) avant d'être mis à composter en tas de plusieurs centaines de m³ (cf. annexe 2 photo vue sur la plate forme de compostage); les déchets sont superposés sur un tas et quelquefois mélangés, mais généralement les déchets suivants sont posés sur le tas constitué précédemment. Après plusieurs mois, ce compost supposé mûr est criblé pour séparer les particules fines des éléments grossiers (non utiles). Le compost est soit fourni sous forme brute aux agriculteurs (horticulteurs, viticulteurs et arboriculteurs) sous la forme d'amendement pour renforcer le statut organique des sols), soit il sert de base organique pour être mélangé à d'autres produits par exemple le guano ou la farine de plumes d'oiseaux qui apportent des éléments nutritifs à décomposition plus ou moins lente, pour faire un produit beaucoup plus complet de type engrais utilisé pour la nutrition des plantes).

Le site de compostage est découvert, il n'est pas placé sous un hangar, et ne dispose d'aucun matériel spécifique comme par exemple un composteur sur rails.

c - Bilan du compostage de la distillerie FINEDOC

La technique de compostage est relativement peu maîtrisée par la distillerie FINEDOC, elle souffre en particulier d'une fréquence de retournements des tas de déchets insuffisante ou mal adaptée durant le temps de compostage, en particulier pendant la phase thermophile. Ceci génère une anaérobiose avec production des composés malodorants : l'ammoniac (NH₃), acides gras volatils (AGV), les composés soufrés comme l'hydrogène sulfuré (H₂S), et les mercaptans ...

L'analyse physico-chimique des sous produits et du compost de FINEDOC confirme bien ce constat car :

- les déchets (sauf pour les rafles) ont un rapport C/N faible de l'ordre de 20 pour les pulpes, de 12 pour les boues et les vinasses concentrées (un rapport C/N favorable au bon compostage est de l'ordre de 30 – 35).
- la vinasse concentrée est très fermentescible, sa DCO est de l'ordre de 23000 mg/l, mais son C/N est faible,
- le compost fini est riche en sulfates solubles, ce qui le prédispose à la production de composés soufrés en partie responsables des mauvaises odeurs.

XVI. Suggestions

Pour améliorer les procédés de compostage, des essais seront réalisés sur le site d'expérimentation ainsi qu'au laboratoire (étude du potentiel de compostage) en tenant compte :

- du retournement des andains au cours de la phase de compostage thermophile pour éviter les conditions d'anaérobiose et donc la production de molécules malodorantes,

- de l'apport de matières structurantes (paille de riz sur le terrain, paille de riz et déchets verts au laboratoire) dans le mélange initial avant le compostage. L'addition de ces matériaux de porosité importante et riches en carbone, améliore non seulement l'aération du mélange (indispensable pour un bon compostage) mais assure aussi la fourniture d'énergie aux microorganismes en relevant le rapport C/N aux alentours de 35.

Nous proposons donc, afin d'évaluer ces améliorations, de mener deux expériences à deux échelles différentes. La première, à échelle du semi-terrain et en conditions climatiques naturelles, visera à examiner le déroulement du compostage de plusieurs andains, dont la composition sera détaillée dans la partie « matériels et méthodes ». La deuxième expérience, menée en bacs de compostage et en conditions contrôlées de laboratoire à beaucoup plus petite échelle, a des objectifs sensiblement identiques à la première expérience. Elle visera toutefois à examiner les possibilités de compostage potentiel, c'est à dire mené en conditions optimales, afin de voir quel type de compost peut-être obtenu avec les sous-produits de la distillerie, en termes de composition physico-chimique.

MATERIELS ET METHODES

XVII. Plate forme de compostage (Compostage en andains)

a - Matériels

→ *Déchets de distillerie à traiter:*

- rafles,
- pulpe grossière,
- boues,
- vinasse brute,
- vinasse concentrée.

→ *Sous-produit externe (matière structurante):*

- paille de riz

→ *Équipement :*

- un chargeur avec un godet de 5 m³ équipé d'un dispositif de pesée,
- un petit chargeur sans dispositif de pesée,
- un tracteur avec fourche,
- une remorque andaineuse équipée de chaînes de dilacération,
- une fosse de mélange avec arrivée de vinasse (3-5 m³ /h),
- des sondes de température placées dans des cannes en PVC et reliées à une centrale de collecte des données.

→ *Autres:*

- une pompe pour analyse gaz,
- une sonde de prélèvement d'échantillons de matériel végétal,
- des bacs (90 litres)

b - Méthodes

→ Mélanges de sous-produits pour la réalisation des andains

4 andains d'une trentaine de m³ (cf. Tableau 1) ont été réalisés à partir des déchets suivants :

n°1- rafles, pulpe grossière, boues et vinasses concentrées.

Ce mélange est le témoin correspondant au mélange habituel de la distillerie. Il ne sera pas retourné fréquemment (donc aération limitée) afin de respecter les pratiques de la distillerie.

n°2- un mélange identique au premier, mais avec retournement optimisé à la demande,

n°3- rafles, pulpe grossière, boues, vinasse concentrée et paille de riz ; avec retournement optimisé à la demande,

n°4- rafles, pulpe grossière, boues, vinasse brute et paille de riz; avec retournement optimisé à la demande.

Un retournement à la demande est un retournement qui se fait dans le but d'aérer un andain lorsque sa température en milieu de tas commence à baisser (traduisant une faible production d'énergie et donc une baisse de l'activité des microorganismes).

→ Méthode de mélange

Les différents déchets solides (pulpe grossière, rafles, boues et paille de riz), à composter sont pesés à l'aide du godet du chargeur. Ils sont ensuite introduits dans la fosse de mélange contenant de la vinasse (brute ou concentrée selon les mélanges) de volume connu, et mélangés. Après 2 heures d'imprégnation, les mélanges sont repris au godet et mis à égoutter en tas. A la fin de la percolation du liquide, ils sont pesés au godet avant d'être placés dans la remorque andaineuse qui assure le mélange final des produits en andains sur une plate forme bétonnée (la zone de compostage). Les andains ont une section triangulaire d'environ 3 mètres de base, 2 mètres de haut et 10 mètres de long (soit un volume de 30 m³ à peu près, (cf. Figure 2 et annexe 3). Des prélèvements pour analyses sont effectués avant et pendant le mélange.

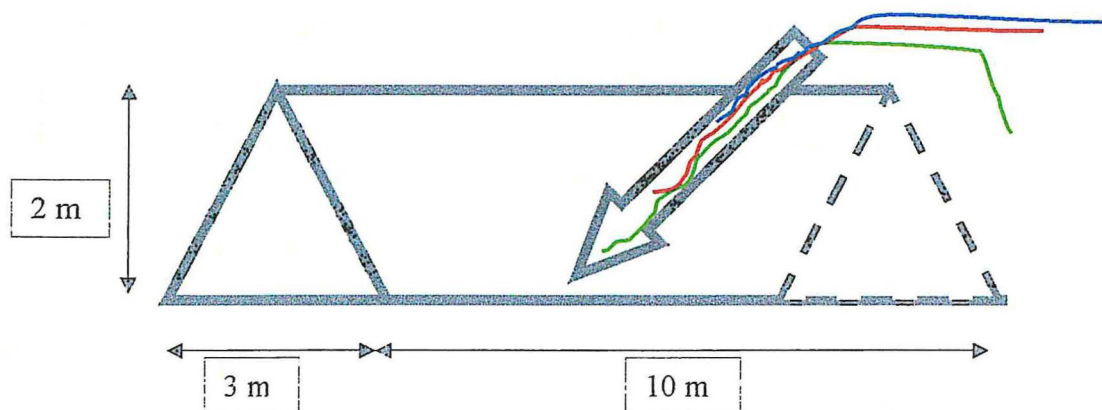


Figure 2 Andain au milieu duquel est placée une canne en PVC contenant 3 sondes de température et servant aussi de support de pompe pour l'analyse des gaz.

→ *Ratio de mélanges*

Afin de déterminer les ratios optimums, un essai d'imprégnation a été effectué pour déterminer le taux d'adsorption de la vinasse sur les matières solides (pulpe grossière, rafles, paille de riz), l'humidité et le rapport C/N des différents mélanges.

A partir des résultats obtenus, on a défini la quantité de chaque produit à mélanger en ayant comme objectif de s'approcher des valeurs optimales (favorables pour le compostage) suivantes :

- humidité du mélange = 60 %
- C/N = 35

Les mélanges suivants ont été effectués (cf. Tableau 1)

Tableau 1 : Composition des mélanges des déchets des andains (plate forme de compostage)

Traitements	1	2	3	4
Type mélange initial :	témoin	témoin	avec paille	avec paille
Taux concentration vinasse:	6,67	6,67	6,67	1,4
Kg paille /kg pulpe gross.	0,00	0,00	0,61	1,66
Type aération :	-	Retournement optimisé		
Paille (kg)	-	-	1230	1940
Rafles (kg)	2528	1782	700	400
Pulpe grossière (kg)	7638	5382	2010	1170
Boues (kg)	3168	2232	870	580
Vinasses (kg)	11246	7924	6950	4880
Total (kg)	24580	17320	11760	8970
Volume initial (m ³)	35	25	24	31
Densité (kg/m ³)	706	706	482	290
Humidité (%)	76	76	73	77
C/N	18	18	21	37

→ *Protocole de suivi*

Une analyse préalable de tous les composants initiaux entrant dans la composition des andains est effectuée (pulpe grossière, rafles, paille de riz, boues et vinasse).

Puis, jusqu'à la fin de la phase de minéralisation chaude, le suivi des andains sera basé sur :

- une mesure toutes les 3h de la température de chaque andain à 3 niveaux (haut, milieu, bas)
- une analyse régulière d'humidité (dessiccation à 75°C) pour juger de la possibilité d'incorporation supplémentaire de vinasse lors des retournements,
- le retournement optimisé des andains à la demande, à l'aide d'une remorque andaineuse équipée de chaînes de dilacération,
- une analyse des échantillons intermédiaires prélevés régulièrement à la sonde sur les 4 andains
- une analyse finale des produits compostés pour les 4 andains

Les analyses concernant les échantillons initiaux et finaux sont les suivantes : Matière sèche totale - MST à 105°C, Perte au feu à 500°C (pour la détermination de la quantité de matière organique), Carbone organique, Azote total; éléments totaux (P, K, Ca, Mg, Na, S, Mn, Fe, Cu, Zn), éléments solubles sur un extrait à l'eau 1/5 (cf. remarque ci-dessous) (pH,

N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻, S-SO₄²⁻, matières en suspension - MES, demande chimique en oxygène - DCO, et demande biochimique en oxygène - DBO₅ pour les déchets liquides). Pour les échantillons intermédiaires, les mêmes analyses sont effectuées à l'exception du dosage des éléments totaux et des sulfates. Les méthodes de dosages sont indiquées en annexe 4.

- analyse (qualitative) régulière des gaz malodorants par des tubes DRAEGER remplis d'indicateurs réagissant avec certains gaz par coloration progressive. La mesure se fait au milieu de l'andain à l'aide d'une pompe (100 ml d'air par coup de pompe) introduite à l'intérieure d'une canne en PVC mises en place sur l'andain (cf. figure 2). Les différents types de gaz suivis sont: diméthylsulfure - DMS, acétaldéhyde, ammoniac, acide acétique, formaldéhyde, vapeurs nitreuses, dioxyde de soufre - SO₂, dioxyde d'azote, mercaptan, hydrogène sulfureux - H₂S, bisulfure de carbone - CS₂ et les amines. Les méthodes de dosages sont indiquées en annexe 4.

Remarque :

Compte tenu de leur nature, certaines mesures et analyses ne peuvent être réalisées que sur un extrait liquide de compost. Les différents éléments dosés ne concernent donc que la fraction dissoute dans la solution. Le protocole d'extraction (1/5) est le suivant :

20 g de compost sont mis en contact avec 100 ml d'eau distillée, la suspension est agitée pendant 2h puis centrifugée à 15000 t/mn pendant 25mn, et pour certaines analyses comme les acides gras volatils, on procède si nécessaire à une filtration à 0,22 µm sur filtre Millipore en cellulose).

Au terme de la phase thermophile, les andains seront mis en tas pour la phase de maturation et leur suivi sera basé sur le contrôle périodique de la température et l'analyse finale des produits.

XVIII. Essai au laboratoire (Compostage en bacs)

a - Matériels

→ *Déchets de distillerie à traiter:*

- rafles,
- pulpe grossière,
- boues,
- vinasse brute,
- vinasse concentrée

→ *Sous-produit externes (matières structurantes):*

- paille de riz
- déchets verts (résidus de taille de conifères).

→ *Equipements:*

- Bacs en polyéthylène de 75 L (L=55cm, l=35cm, h=39cm, cf. Figure 3 et annexe 5) à l'intérieur desquels on place un tapis chauffant : fil nickel chrome en nappe inséré entre deux trames de tissu de verre siliconé (puissance = 8 kW/m², tension nominale= 12 à 240 V). En effet, étant donné que le volume du compost à étudier est trop faible, la déperdition thermique est importante, d'où l'intérêt de chauffer pour maintenir la température à un niveau favorable au développement des microorganismes thermophiles.

- thermostat de régulation
- balance
- sonde de mesure de température
- pompe pour analyse des gaz

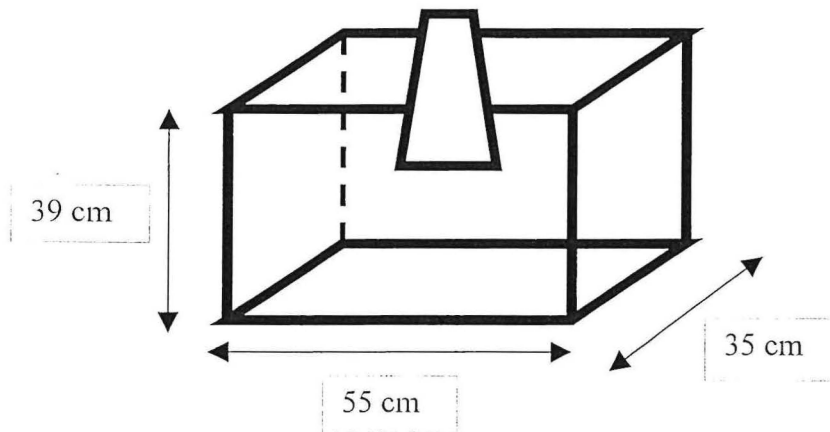


Figure 3 Bac de compostage présentant au centre un pot servant de cloche pour l'analyse des gaz.

b - Méthodes

→ *Mélanges*

5 mélanges de $0,13 \text{ m}^3$ chacun ont été effectués (cf. Tableau 2) sur la base des déchets suivants :

1- rafles, pulpe grossière, boues et vinasse concentrée.

Ce mélange est le témoin correspondant au mélange habituel de la distillerie (il constitue également l'équivalent du mélange n°1 de la plate forme de compostage),

2- rafles, pulpe grossière, boues, vinasse brute et paille de riz (ce mélange constitue l'équivalent de l'andain n°4 de la plate forme de compostage),

3- rafles, pulpe grossière, boues, vinasse brute et déchets verts.

Deux répétitions sont effectuées pour chaque traitement, le volume initial est divisé en deux et mis dans deux bacs contenant chacun $0,065 \text{ m}^3$ de compost. Ainsi, tous les résultats relatifs à cette expérience sont issus de la moyenne des deux valeurs correspondant à chacune des deux répétitions.

→ *Méthode de mélange*

Les différents déchets solides (pulpe grossière, rafles, boues et paille de riz) à composter sont pesés. Ils sont ensuite introduits dans une bétonnière contenant de la vinasse (brute ou concentrée selon les mélanges) de volume connu, et mis à mélanger. Après 1h d'imprégnation, les mélanges sont mis dans leur bacs et inclinés afin de favoriser l'égouttage. Après 1h, les bacs sont pesés (poids initiaux) et mis à chauffer en augmentant la température de consigne progressivement jusqu'à atteindre 55° C . Des prélèvements pour analyses sont effectués avant et pendant le mélange.

→ *Ratio de mélanges*

Les ratios sont les même que ceux utilisés pour l'essai à l'échelle réelle (voir ci-dessus). En revanche pour les déchets verts, un essai d'imprégnation a été effectué pour

déterminer le taux d'adsorption de la vinasse sur les déchets verts, l'humidité et le rapport C/N du mélange final. La quantité de chaque produit à mélanger a été définie en tenant compte du volume du bac de compostage (75 litres) par rapport au volume des andains à l'échelle réelle. Les mélanges suivants ont été effectués (cf. Tableau 2).

Tableau 2 : Composition des mélanges des déchets des bacs de compostage au laboratoire

TRAITEMENTS	Témoin	Avec Paille	Déchets Verts
Taux de concentration de la vinasse	6,67	1,4	1,4
Paille (Kg)	-	4,1	
Déchets Verts(Kg)	-	-	6,1
Rafles (Kg)	4,7	0,8	1,2
Pulpe grossière (Kg)	14,2	2,5	3,7
Boue (Kg)	5,9	1,0	1,5
Vinasse concentrée(Kg)	22,7	-	-
Vinasse brute (Kg)	-	12,9	17,1
TOTAL (Kg)	47,6	21,3	29,7
Volume (m ³)		0.065	
Densité(kg/m ³)	733	328	456
Humidité (%)	76%	80%	75%
C/N	17,9	35,8	26,5

→ *Protocole de suivi*

Jusqu'à la fin de la phase thermophile, le suivi des bacs sera basé sur :

- l'analyse préalable de toutes les composantes initiales (pulpe grossière, rafles, paille de riz, boues et vinasses, déchets verts),
- deux mesures journalières de la température (1 le matin et 1 le soir) au milieu de chaque bac
- l'analyse régulière d'humidité (à 75° C) pour suivre la minéralisation et juger de la possibilité d'humecter à nouveau les mélanges.
- la pesée des bacs tous les 10 jours pour déterminer les pertes de matières,
- l'analyse des échantillons intermédiaires prélevés (tous les jours pendant les 10 premiers jours et 2 fois par semaine pendant 7 semaines) sur chacun des bacs,
- l'analyse finale des produits compostés pour chacun des bacs.

Les analyses réalisées sur les échantillons initiaux/finaux et intermédiaires sont identiques à celles du compost en andains (sur le terrain). On dosera en plus les acides volatils totaux et l'ammoniac libre sur les échantillons de compost du laboratoire (le dosage des sulfures, sulfates et acides volatils se fera à l'aide d'un colorimètre de terrain).

- analyse (qualitative) des gaz malodorants par des tubes remplis d'indicateurs réagissant avec certains gaz par coloration progressive. En fonction de leur importance, certains gaz sont mesurés tous les jours à savoir : diméthylsulfure - DMS, acétaldéhyde, ammoniac, acide acétique, formaldéhyde. D'autres sont suivis une fois par semaine à savoir : vapeurs nitreuses, dioxyde de soufre - SO₂, dioxyde d'azote, mercaptan , hydrogène sulfureux - H₂S, bisulfure de carbone - CS₂ et amines.

La mesure se fait au milieu du bac à l'aide d'une pompe (100 ml d'air par coup de pompe) introduite à l'intérieur d'une cloche installée dans le bac 1h auparavant (cf. Figure 3). Les méthodes de dosages sont indiquées en annexe 4.

Pendant la phase de maturation, le suivi sera basé sur le contrôle périodique de la température et l'analyse finale des produits.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

XIX. Caractérisation des sous-produits de la distillerie FINEDOC et de la matière structurante (paille) entrant dans la composition des mélanges

Avant de préparer les essais, divers échantillonnages et analyses physico-chimiques des sous produits de la distillerie FINEDOC et de la matière structurante proposée ont été réalisés. Les principaux résultats sont donnés dans les Tableau 3, 4, 5 et 6.

Tableau 3: Caractéristiques des déchets, rafles et pulpes grossières à l'état initial

Déchets solides	pH extrait 1/5	CE à 25 °C extrait 1/5 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	MST (%)	Matière organique (%MST)	Carbone organique (%MST)	Azote Total (%MST)	C/N
Rafles	7.8	2240	22.30	95.31	48.11	1.52	32
Pulpe grossière	7.46	1420	31.0	94.91	49.57	2.3	22
Boues	5.92	12433	43	40.25	19.11	1.57	12.14

C E = conductivité électrique

MST = matière sèche totale

Tableau 4: Caractéristiques des vinasses à l'état initial

Déchets liquides	pH	CE*10 ³ à 25°C ($\mu\text{S}/\text{m}$)	MST (kg/m ³)	Densité à 15°C (kg/m ³)	Carbone organique (kg/m ³)	Azote total (kg/m ³)	C/N
Vinasse concentrée	6.56	10420	364.6	1155	126	11.1	11
Vinasse brute	5.47	15900	93.64	1021.4	28.65	1.92	14.92

Tableau 5: Caractéristiques des vinasses à l'état initial: Concentration des vinasses en éléments solubles

Éléments	Éléments solubles (mg l ⁻¹)						
	Ca	Mg	K	Na	Fe	Al	Mn
Vinasse brute	1600	417	12005	70.60	0.98	0.25	0.50
Vinasse concentré	3413	945	22930	83.90	2.59	0.61	1.55

Tableau 6 : Caractéristiques de la matière structurante, la paille de riz.

Matière structurante	pH extrait 1/5	CE à 25°C extrait 1/5 (μS/cm)	MST (%)	Matière organique (%MST)	Carbone organique (%MST)	Azote total (%MST)	C/N	K ₂ O (%MST)
Paille de riz	8.27	7110	75.3	85.93	39.19	0.38	104	1.8

XX. Compostage en andains

Introduction

Le compostage sur le terrain a débuté le 21 mars 2003 et se poursuit actuellement. Quatre andains ont été réalisés, et leur composition est spécifiée dans le Tableau 1. A diverses dates, des échantillons de plusieurs centaines de grammes ont été prélevés, sur lesquels ont été mesurés différents paramètres : humidité, matière organique (par perte au feu à 500°C), carbone organique, azote total et rapport C/N.

Des échantillons ont été prélevés dans chacun d'eux et analysés au laboratoire afin de connaître leur composition au départ. Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 5.

a - Caractéristique des andains

D'après les résultats des analyses, la paille de riz semble bien adaptée pour répondre au besoin d'apporter du carbone aux différents mélanges car son rapport C/N est de 104 (cf. Tableau 6). Cette alternative est aussi intéressante pour certaines périodes de la campagne de distillation où la « matière première » entrant dans la distillerie n'est constituée que de lie de vin. En effet, l'absence des marcs de raisin pendant ces périodes prive les mélanges à composter de la rafle dont le C/N de 32 reste favorable au bon compostage. La vinasse brute a un C/N légèrement supérieur à celui de la vinasse concentrée, son utilisation lors du compostage peut non seulement le favoriser mais aussi réduire le coût de l'énergie dépensée pour sa concentration.

Tableau 7: Analyse de la composition des andains au départ

Eléments	Andain 1	Andain 2	Andain 3	Andain 4
Humidité (%)	68.3	67.7	67.8	74.9
pH eau	7.54	7.3	7.62	8.2
MO (%MST)	63.9	64.1	60.4	59.5
Corg (%)	37.0	37.2	35.0	34.5
Nt (%)	2.03	2.09	1.86	1.58
C/N	18	18	19	22
N-NH4 (%)	0.120	0.085	0.224	0.079
N-NO3 (%)	0.00	0.00	0.01	0.00
P2O5 (%)	1.5	1.5	2.13	1.31
CaO (%)	6.0	5.4	3.9	4.8
MgO (%)	0.4	0.4	0.6	0.5
K2O (%)	5.1	5.1	8.1	4.2
S (%)	2.8	2.4	1.4	1.3

On remarque que conformément au protocole prévu, les andains 1 et 2 sont d'une composition similaire ce qui indique que les mélanges de produits ont été réalisés de façon homogène (Tableau 7). Le taux d'humidité est semblable dans les 3 premiers andains, de

l'ordre de 68%, alors qu'il est de près de 75 % dans l'andain 4. Ceci s'explique par l'emploi de vinasse brute pour cet andain. Les taux de matière organique et de carbone sont légèrement inférieurs dans les andains 3 et 4 qui incorporent de la paille. Dans tous les cas, on remarque que l'essentiel de l'azote est présent sous forme organique, la fraction minérale ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) ne représentant qu'une faible proportion de l'azote total. On note également la quasi-absence de nitrates. Les rapports C/N sont assez voisins et proches de 18 dans les 3 premiers andains. Ce rapport est un peu plus élevé dans l'andain 4, de l'ordre de 22.

b - Chronologie des opérations sur les andains et évolution des températures

L'andain 1 n'a subi qu'un retournement au bout de 2 mois afin de représenter la pratique actuelle dans la distillerie FINEDOC. Pour les andains 2, 3 et 4, les opérations de retournement ont été gérées en fonction de la température. Dans le cas de l'andain 4, des apports complémentaires de vinasse brute ont été opérés en début de compostage afin de maximiser la capacité de traitement. L'ensemble de ces opérations pour les 80 premiers jours de compostage est répertorié ci après :

- J7 : retournement A4
- J18 : retournement A2 et A3
retournement A4 avec ajout de vinasse brute
- J28 : retournement A4 avec ajout de vinasse brute
- J45 : retournement A4
- J68 : retournement A1 et A4

L'évolution de la température au cœur des 4 andains sur les 75 premiers jours est donnée dans la Figure 4.

c - Température

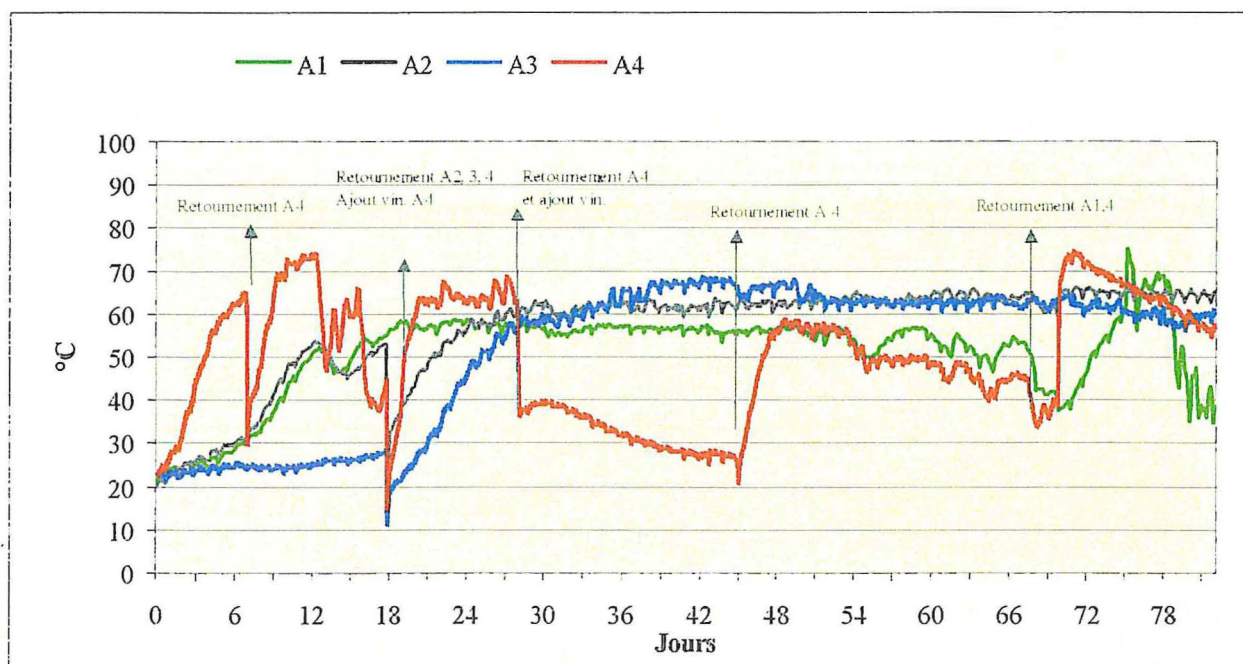


Figure 4 : Évolution de la température des 4 andains

Pour les andains A1 et A2, de composition identique, la phase de montée en température (cf. Figure 4) est similaire avec une élévation lente pour atteindre 55°C au bout de 15 à 16 jours. Le retournement de A2 en J18 permet ensuite d'atteindre et de stabiliser en permanence sa température à plus de 60°C, alors que pour A1, la température ne parvient jamais à atteindre cette limite et décroît à partir du 50^{ème} jour. Le retournement de A1 au 68^{ème} jour permet une nouvelle remontée de la température qui atteint plus de 70°C et induit ensuite une instabilité de la minéralisation avec une chute progressive jusqu'à 40°C.

Pour l'andain A3, on n'observe pas de montée en température suite à sa mise en place, ce qui indique un blocage de la minéralisation aérobie. La texture très compacte de ce mélange est certainement à l'origine de ce blocage. Le retournement opéré au 18^{ème} jour permet un démarrage rapide de la minéralisation avec une température qui se stabilise ensuite en permanence au delà de 60°C.

Pour l'andain 4, la montée en température est très rapide et celle-ci atteint 65°C au 7^{ème} jour. Le retournement effectué le 8^{ème} jour est de nouveau suivi d'une remontée rapide de la température qui parvient à dépasser 70°C ce qui s'est traduit par une inhibition des bactéries avec une chute rapide de la température jusqu'à 50°C puis une reprise instable avec une température finale inférieure à 40°C. Le retournement avec ajout de vinasse opéré au 18^{ème} jour a permis une nette reprise de la minéralisation avec une montée rapide de la température qui s'est stabilisée à 65°C. Le second ajout de vinasse effectué lors d'un retournement de l'andain au 28^{ème} jour a occasionné un blocage total de la minéralisation avec une température finale proche de la température ambiante. A ce stade, la structure de la paille était déjà très dégradée et sa capacité d'absorption était diminuée. Seul un retournement opéré au 45^{ème} jour a permis une reprise de la phase thermophile avec toutefois une température inférieure à 60°C et qui chute ensuite lentement jusqu'à 35°C, ce qui a nécessité un nouveau retournement au 68^{ème} jour pour que la phase thermophile reprenne. La température est alors remontée rapidement pour dépasser 70°C puis chuter de nouveau en deçà de 60°C. De ce suivi du compostage, on peut tirer quelques enseignements.

Le compostage dans les andains A1 et A2 composés du même mélange démarre de façon identique mais le retournement de A2 opéré au 18^{ème} jour semble favorable au maintien d'une minéralisation très active sur le long terme, avec une température toujours supérieure à 60°C. Pour A1, la température n'a jamais atteint cette valeur et la minéralisation est plus instable avec une chute de l'activité au 50^{ème} jour.

Malgré un blocage au démarrage dans les premiers jours, le compostage dans l'andain A3 a rapidement bénéficié du retournement au 18^{ème} jour. Là encore comme pour l'andain A2, on observe qu'après ce retournement, la minéralisation reste très active sur le long terme et que la température reste supérieure à 60°C.

Dans le cas de l'andain 4, la phase de démarrage est beaucoup plus rapide que pour les autres andains avec cependant une gestion ultérieure plus délicate car les retournements peuvent provoquer des surchauffes et les ajouts de vinasse trop tardifs peuvent bloquer la minéralisation.

d) Évolution des masses brute et sèche dans les andains

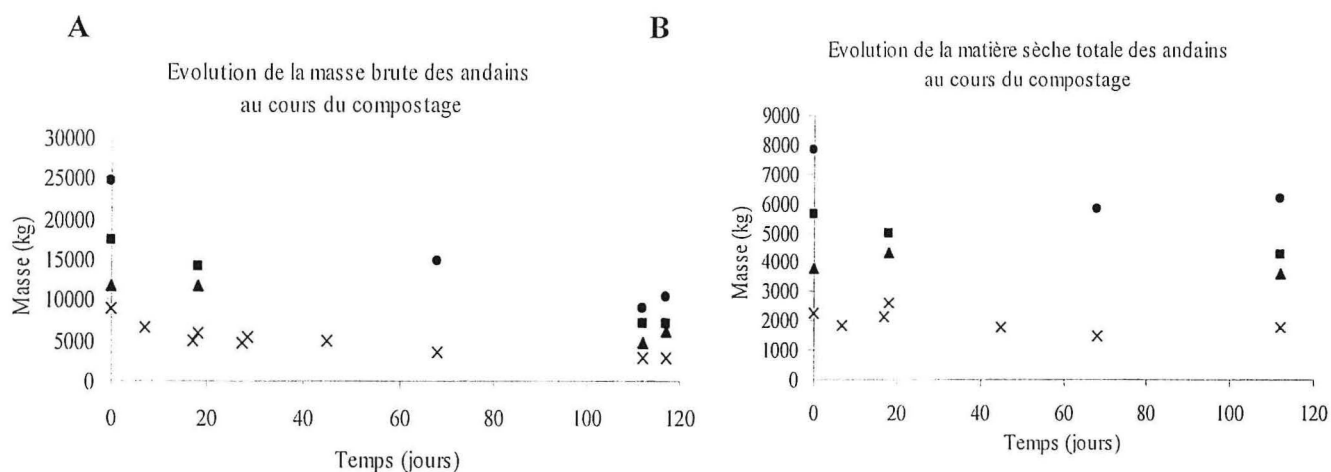


Figure 5: Évolution de la masse brute (A) et de la matière sèche (B) des andains au cours du compostage (● : andain 1, ■ : andain 2, ▲ : andain 3, et x : andain 4).

La Figure 5 (A et B) présente l'évolution de la masse brute (i.e. humide) et sèche des différents andains au cours du compostage.

La figure 5 (A) met en évidence une diminution globale de la masse des 4 andains au cours du temps, en raison du processus de compostage. Ce processus occasionne en effet des pertes de matière, principalement de carbone, en raison de la minéralisation du carbone notamment en CO_2 . Il est possible également que d'autres gaz soient produits au cours du compostage, provoquant des odeurs indésirables, mais ce point sera abordé ultérieurement dans ce chapitre. L'andain 1 voit ainsi sa masse brute diminuer de 58% par rapport à son poids initial ; en 120 jours, cette baisse est de 59% pour l'andain 2, de 49% pour l'andain 3, et de 68 % pour l'andain 4. La baisse, en matière sèche (Figure 5 (B)) est donc de 20.6%, 23.4%, 4.9% et de 22.4% respectivement, pour les andains 1, 2, 3 et 4, par rapport à leurs poids initiaux en matière sèche. Ce bilan ne prend toutefois pas en compte l'ajout de vinasse, à deux reprises (aux jours 18 et 28) sur l'andain 4, ajout qui contribue à apporter à l'andain de la matière sèche (cf composition de la vinasse en matière sèche dans le Tableau 4). Nous constatons que la baisse de matière sèche pour l'andain 3 est très faible, conséquence de son blocage par l'apport de vinasse concentrée. Cette dernière a contribué à former une « couche » imperméable, limitant l'évolution de cet andain, ce que nous constatons en terme d'évolution de la matière sèche : le compostage est faible).

e - Évolution des paramètres matière organique, carbone organique, azote total dans les andains

L'ensemble des données pour ces paramètres n'est pas disponible, car l'expérimentation en andains est encore en cours et les délais d'analyse pour les paramètres sont longs, ce qui explique le caractère très incomplet de ce paragraphe. Toutefois, certaines évolutions peuvent être observées :

Tableau 8 : Évolution des taux de MO, C org. et N total dans les andains

Temps (jours)	Matière organique % MS			C organique % MS			N total ‰MS		
	0	18	38	0	18	38	0	18	38
Andain 1	73,62	63,62	69,02	37,04	35,65	38,74	20,32	31,49	32,38
Andain 2	73,12	68,13	67,41	37,17	38,04	38,92	20,93	29,85	29,96
Andain 3	69,54	68,28	68,49	35,01	38,09	43,50	18,61	24,36	25,28
Andain 4	71,36	62,31	61,36	34,50	32,80	33,88	15,82	23,71	25,48

f - Évolution au cours du temps

Dans les quatre andains étudiés, au cours du temps, nous mesurons un taux de matière organique (tableau 8) légèrement décroissant (pour les andains 1 et 2) voire constant, pour l'andain 3 au cours de la période étudiée, c'est à dire en 38 jours. Le taux de carbone organique est quant à lui constant, rapporté à la matière sèche, mais cette dernière diminuant au cours du temps, cela signifie qu'il y a des pertes de carbone dans tous les andains, au cours du compostage. En revanche, le taux d'azote total augmente au cours des 18 premiers jours, ce que nous nous expliquons par une immobilisation de l'azote, ou organisation par les microorganismes. La matière sèche ainsi que le carbone, diminuent donc au cours du temps, alors que très peu d'azote est perdu, ce qui explique cette hausse de N total au cours des 18 premiers jours.

g - Effet des différents traitements sur ces paramètres

Les différents traitements testés ne semblent pas avoir d'effet significatif sur les paramètres mesurés, à savoir matière organique, carbone organique et azote total. Seul l'andain 4 voit son taux de matière organique diminuer significativement au cours des 38 premiers jours de compostage (cf. paragraphe suivant) ; l'analyse de sous-échantillons de ces andains en fin d'expérimentation devrait confirmer ces premières observations.

Andain n°4 :

Les résultats relatifs à l'andain 4 sont présentés en Figure 6. Nous observons que le taux de matière organique subit une diminution d'environ 10% lors des 7 premiers jours de compostage, probablement en raison d'une activité biologique intense en début de phase thermophile, qui contribue à minéraliser une partie de la matière organique présente.

Evolution des taux de MO, Corg, N total et C/N dans l'andain 4

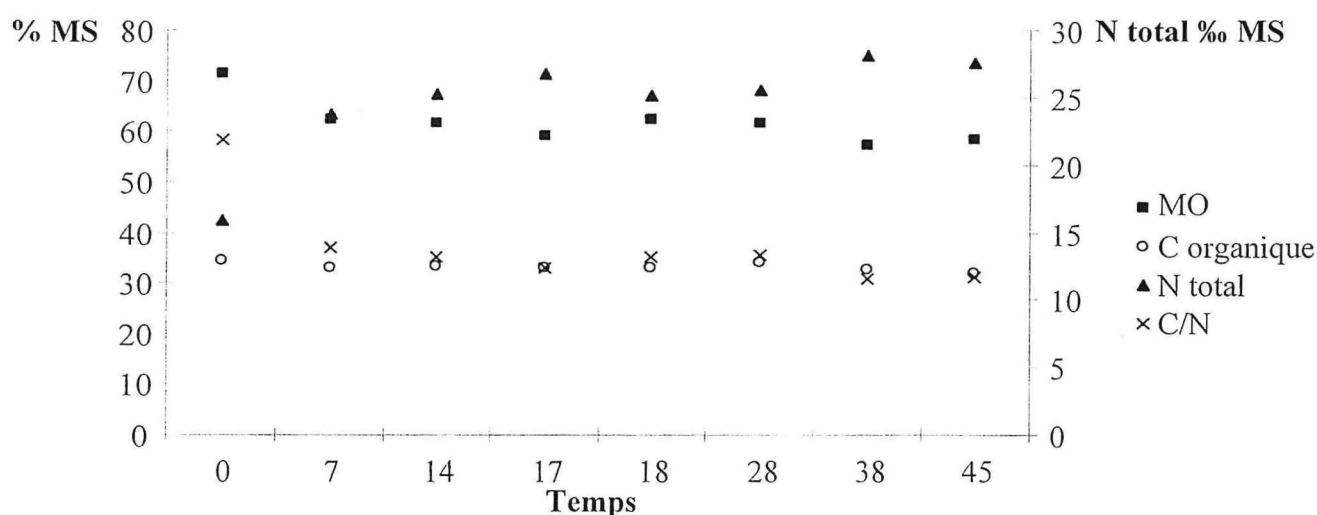


Figure 6: Evolution des taux de matière organique (obtenus par perte au feu à 500°C), de carbone organique, d'azote total et du ratio C/N dans l'andain 4 au cours des deux premiers mois de compostage.

Le carbone organique présente, quant à lui, une évolution relativement constante au cours du temps, oscillant en moyenne à 33% MS. En revanche, le taux d'azote total est en hausse importante au cours des 7 premiers jours de compostage (passage de 15 à 23 ‰ en 7 jours), ce qui explique d'ailleurs l'évolution contraire du C/N pendant cette même période, et qui peut s'expliquer par une immobilisation de cet élément par les microorganismes à ce moment là, alors que le taux de carbone diminue, étant donnée la respiration des microorganismes qui décomposent la matière organique.

h - Analyse de gaz

Le paragraphe suivant est consacré à l'analyse de certains gaz dégagés par les andains (Tableau) et susceptibles de générer de mauvaises odeurs. Nous précisons cependant que la relation entre la quantité de gaz dégagée et l'analyse d'odeurs n'a pas été effectuée, cette démarche étant complexe et nécessitant l'application de normes très précises, l'intervention de jurys d'odeurs, d'olfactomètres... Or, nous ne disposons pas de ces équipements ni de ces compétences au CIRAD. Nous sommes donc en présence d'une réponse « binaire » : il y a ou il n'y a pas de dégagement de molécules « odorantes » dans les conditions du compostage.

Tableau 9: Evolution des teneurs en gaz dans les andains au cours du compostage. Les valeurs sont données en mg/m³ d'air.

Jours	4	7				14		18		28		45				68				88			
Andain	A2	A1	A2	A3	A4	A1	A4	A2	A4	A1	A3	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
Sulfure de diméthyl	6.45	10.3						4		40	40				>40					18	10	10	2.6
Vapeurs nitreuses	7.7									190	190				>19				2				>190
Aldéhyde formique										6.3													
Mer captan	0.15		0.2		4.3										>21					4			
Amines					P	P	P		P	P	A					P			P	P	P	P	P
Acétaldéhyde	366		1830	91.5	1100	915	730	730							>180								
Ammoniac NH ₃					3.5	9.2	57		4.3	39	1.4	13	11	7		3	13	50	2	>50	28	>70	43
Acide acétique	15				200					200	12.5				150					12.5			
Anhydride sulfureux										13.3	27									53	53	67	

P : indique « présence » du gaz : ce dernier a été détecté, mais non quantifié.

De la même manière, « A » : absence.

Quand une des cellules du tableau n'est pas renseignée, cela signifie que la valeur est nulle.

Concernant chaque gaz considéré individuellement, il n'apparaît pas au cours du temps de tendance quant à l'évolution de leurs teneurs dans l'atmosphère des différents andains. Nous ne distinguons pas non plus de tendance quant à l'effet des traitements sur l'émission des gaz recherchés. Il est à noter toutefois que des mercaptans (connus pour leurs odeurs nauséabondes) sont détectés dans tous les andains, à des concentrations certes peu importantes (de 0,15 mg/m³ à plus de 21 mg/m³), mais peut-être susceptibles d'être perçus.

L'acétaldéhyde, quand il est détecté, est émis en quantité relativement importante, de 91 mg/m³ à 183 mg/m³.

i - Conclusion partielle sur le compostage en andains:

L'andain n°4, représentant le mélange avec vinasse brute et paille et ayant un rapport C/N supérieur aux trois autres au eu un démarrage de phase thermophile beaucoup plus rapide que les mélanges avec la vinasse concentrée. Le choix du matériau structurant et l'utilisation de vinasse brute permettent donc d'envisager une décomposition plus importante des déchets. Cependant, les ajouts de vinasse sont à ajuster au plus près de la nécessité du maintien d'un équilibre entre la porosité et l'humidité du mélange. Le deuxième ajout de vinasse, trop important, a complètement inhibé la microflore. Le mélange sans structurant (n°2) donne des résultats également intéressants quand les retournements sont raisonnés. Cependant, les durées de phase thermophile nous ont surpris, car inhabituellement longues, par rapport, par exemple aux mélanges paille/lisier de porc. Une explication serait à chercher dans la composition de la phase carbonée du mélange, qui semble libérer des composés facilement minéralisables sur une durée très longue.

XXI. Compostage en bacs (Essai au laboratoire)

L'expérimentation menée en conditions contrôlées de laboratoire, en bacs de compostage, visait à étudier un potentiel de compostage, c'est à dire menée en conditions optimales de température, d'humidité et d'aération. Cette expérience avait pour but de déterminer en combien de temps s'effectuait le compostage et surtout d'examiner l'évolution de certains paramètres chimiques en relation avec l'émission de gaz.

a - Mesure des températures

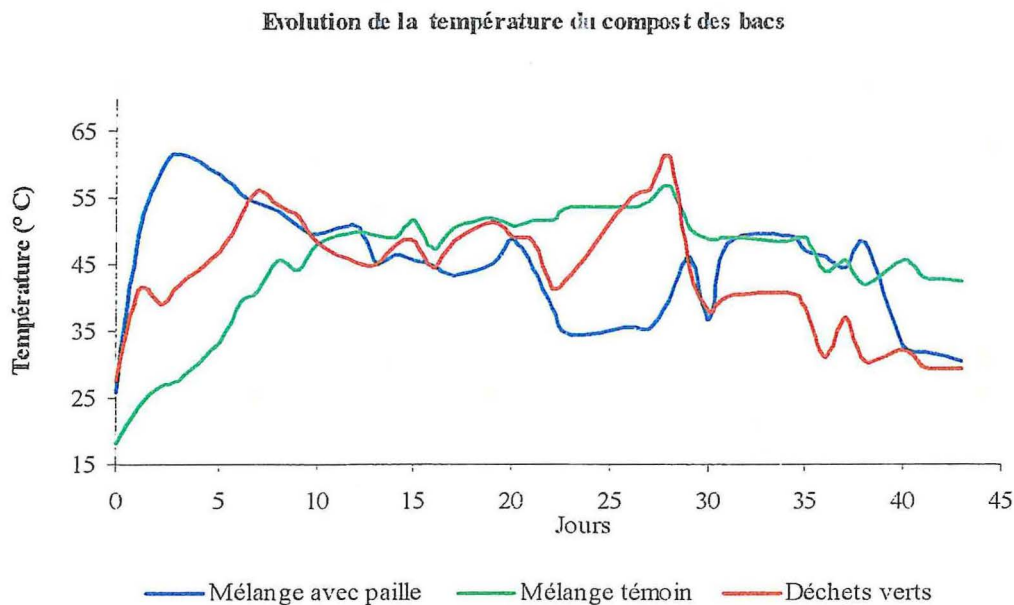


Figure 7 : Évolution de la température du compost des bacs au cours de l'expérience.

Les différents mélanges au laboratoire ont un comportement similaire à ceux du terrain. Les mélanges contenant de la paille et de la vinasse brute ont atteint une température supérieure à 60° C au bout du 2^{ème} jour de compostage (Figure 7). Par contre les mélanges classiques de distillerie FINEDOC ont atteint 50°C aux environs du 10^{ème} jour. Le mélange contenant les déchets verts a quant à lui un comportement intermédiaire par rapport aux deux autres traitements au début de l'expérience. Les mélanges classiques de distillerie FINEDOC ainsi que le mélange contenant les déchets verts n'ont jamais dépassé la température de 55° C sauf lorsqu'on les a humidifiés et remélangés le 28^{ème} jour.

Dans tous les cas au laboratoire, le faible volume des bacs de compostage pose deux problèmes : une perte rapide d'humidité des composts et en même temps de la chaleur produite lors de la minéralisation. Ceci entraîne donc une baisse de l'activité biologique et de la température qui fluctue entre 40 et 50° C pour les mélanges classiques de distillerie et déchets verts et entre 35 et 50°C pour les mélanges contenant de la paille jusqu'au 28^{ème} jour. Le mélange avec paille étant plus poreux, par conséquent ce problème de conservation de chaleur est beaucoup plus important. Après 20 jours de compostage, à la vue des températures, l'activité biologique semble se réduire. Devant ce constat et compte tenu des humidités mesurées, nous avons décidé d'humecter les composts le 28^{ème} jour. Les quantités d'eau ajoutées sont au prorata du poids des composts.

A partir du 29^{ème} jour, pour des raisons de sécurité de l'installation électrique, le chauffage des bacs par les tapis ne s'effectue que le jour pendant les heures de travail, c'est ce qui explique les écarts importants de température relevés quotidiennement et les faibles valeurs de température enregistrées. L'expérience a été arrêtée le 43^{ème} jour.

b - Bilan matière

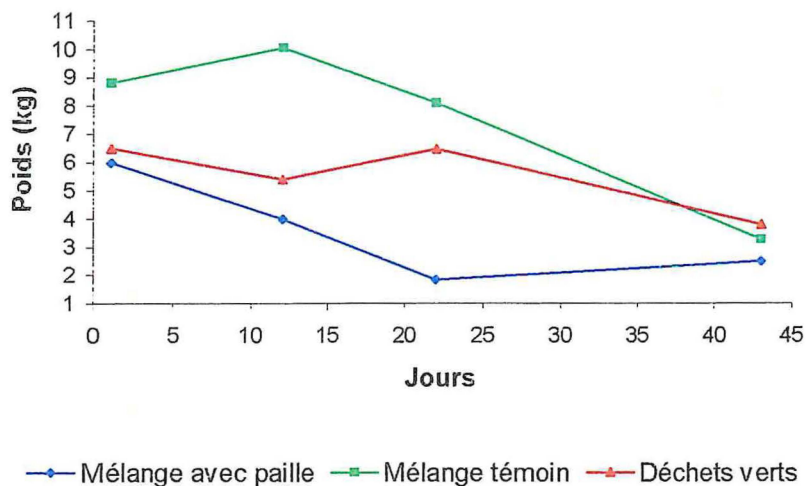


Figure 8 : Évolution de la matière sèche des différents mélanges testés au cours du compostage en bacs.

Le bilan matière nous permet d'apprécier la perte de matière subie au cours du compostage par transformation du carbone en CO_2 notamment, mais aussi par émission d'autres gaz, comme nous le verrons par la suite. Le mélange avec paille est celui pour lequel la perte de matière est la plus marquée, au cours des 22 premiers jours de compostage (Figure 8). Pour les deux autres mélanges testés, l'évolution des pertes en matière sèche fait apparaître des points aberrants (car correspondant à une hausse de matière sèche, ce qui n'est pas possible car rien n'a été ajouté au système – cependant, ces hausses ne sont pas significatives) : au 28^{ème} jour pour le mélange « déchets verts », et au 14^{ème} jour pour le mélange témoin. Ceci souligne l'hétérogénéité au sein d'un même bac, et les difficultés de prélever un échantillon représentatif du mélange. Ces pertes sont limitées à partir du 28^{ème} jour car les problèmes de conservation de chaleur rencontrés après l'humidification des bacs ont fortement ralenti l'activité biologique. Au 43^{ème} jour, les différences entre bacs ne semblent pas être significatives, malgré des poids de départ plus disparates. En effet, la matière sèche, par bac, était en moyenne de 8,8, 6,5 et 6 kg pour le témoin, les déchets verts et la paille. Au 43^{ème} jour, ces valeurs sont de 3,3, 3,8 et 2,5 kg MS, dans le même ordre. Il semble donc que le potentiel soit le même, quel que soit le type de déchets mis à composter au départ avec le mélange classique de distillerie, i.e. déchets verts ou paille.

c - Évolution des caractéristiques analytiques moyennes des mélanges

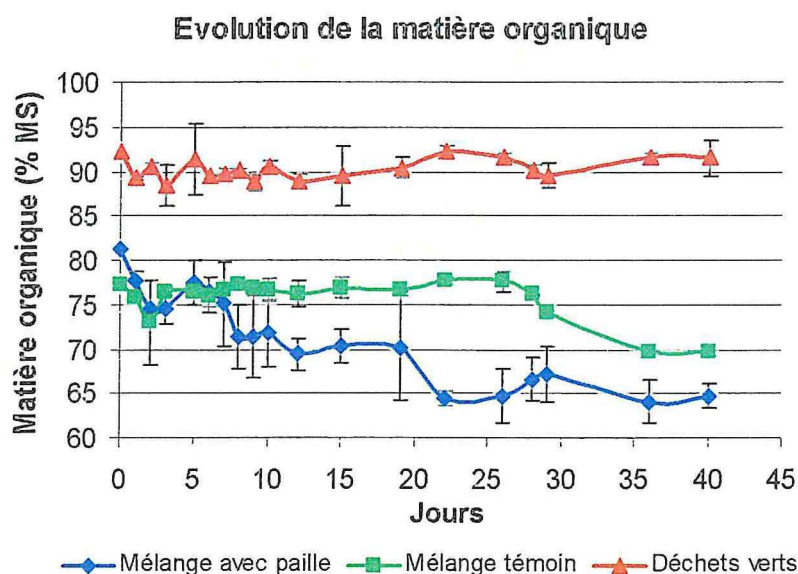


Figure 9 : Évolution de la matière organique des différents mélanges testés au cours du compostage en bacs. (La valeur correspond à la moyenne des deux répétitions).

L'examen de l'évolution des taux de matière organique (Figure 9) au cours du processus de compostage amène à plusieurs remarques : le taux de matières organiques du mélange avec déchets verts reste constant et proche de 90 %, soulignant une faible minéralisation de la matière organique. Les déchets verts étant de nature ligneuse et cellulosique, leur dégradation est peut-être limitée par l'absence de bactéries/champignons compétents et spécialisés et /ou inhibées par des substances toxiques présentes dans les aiguilles de résineux. En revanche, le mélange « avec paille » voit son taux de matière organique diminuer régulièrement au cours du temps (passant de 82 % de MO au début de l'expérience, à 65 % de MO à 40 jours), traduisant un processus de compostage correct. Ceci indique donc que le choix de l'apport de paille s'est avéré bon : celle-ci a en effet dû contribuer à une plus grande porosité du mélange, et, de par son C/N élevé, amener des composés carbonés facilement biodégradables, stimulant ainsi l'activité microbienne. Le mélange témoin a une évolution intermédiaire entre les deux mélanges précités, son taux de MO passe de 78 % à 70 % en 43 jours.

d - Mesures physico-chimiques

d-1- Le pH

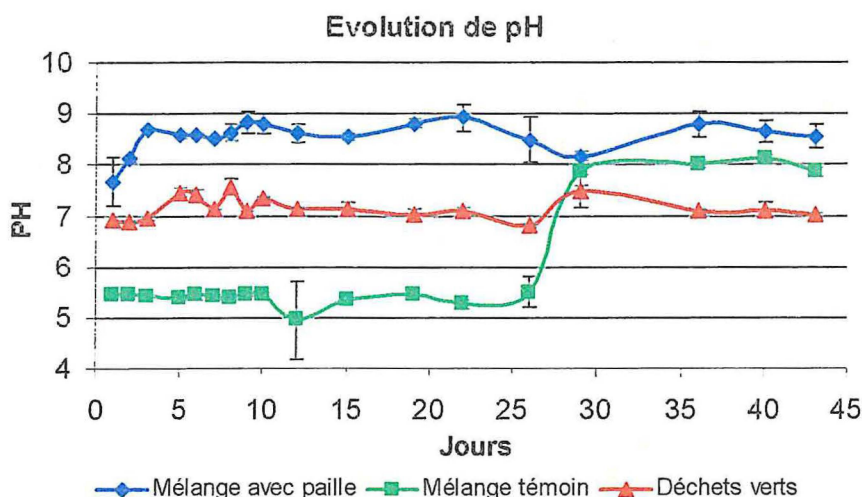


Figure 10 : Évolution du pH dans les composts à l'intérieur des bacs au cours de l'expérience (mesure sur l'extrait aqueux 1/5).

Toutes les valeurs de pH présentées dans ce paragraphe ont été obtenues par mesure sur un extrait eau 1/5. Le mélange avec paille a le pH le plus élevé des trois mélanges testés (Figure 10) au début de l'expérience, en raison de la paille de riz dont le pH est de 8,27 (cf Tableau). Le pH du mélange, de 7,66 au départ, augmente jusqu'à atteindre 8,69 le 3^{ème} jour, ensuite il reste relativement stable entre 8 et 9 et atteint sa valeur maximale de 8,92 le 22^{ème} jour avant de commencer à baisser. Ces fluctuations ne sont toutefois pas significatives sur l'ensemble de la période étudiée. Le pH des déchets verts suit à peu près la même évolution que celui du mélange avec paille, mais environ une unité de pH en dessous. Le mélange classique de distillerie a un pH au départ de 5.46, il reste stable pendant 10 jours avant de baisser et atteindre une valeur minimale de 4.95, le 12^{ème} jour. Ensuite le pH a augmenté pour atteindre 5.27 et reste stable jusqu'à l'humidification où on enregistre une montée brusque, avec une valeur mesurée de 7,89 le 29^{ème} jour.

Après l'humidification/aération, on a observé une évolution des pH des trois mélanges. Lors de cette humidification/aération, les composts ont été retournés à la main, les mottes ont été bien séparées ce qui a favorisé l'aération du milieu. Ces deux facteurs, l'humidité et l'aération semblent « relancer » l'activité biologique, ce qui aurait une influence sur l'équilibre acide/base.

e - Analyses physico-chimiques et analyse des gaz

Pour des raisons pratiques (proximité, équipements de laboratoire, temps de travail, etc...), le suivi du compostage à l'aide des analyses physico-chimiques a été concentré sur les échantillons de composts en bacs du laboratoire. Ces analyses seront effectuées sur un extrait liquide de compost. Les éléments étudiés seront regroupés en famille, à savoir les composés azotés et soufrés ainsi que les acides volatils. On procédera à une étude comparée de leur évolution. En ce qui concerne la mesure du dégagement gazeux, on note que plusieurs gaz ont été suivis au cours de cette expérience ; certains, comme les vapeurs nitreuses, dioxyde d'azote, bisulfure de carbone, hydrogène sulfureux et mercaptan n'ont jamais été détectés dans les bacs. Étant donné que les résultats des analyses physico-chimiques sont exprimés en

mg/Kg de MS et ceux de dégagement gazeux en mg/m³ d'air , on ne mettra pas directement en parallèle ces deux résultats, on se contentera tout simplement de suivre la tendance évolutive (on n'est pas en mesure de relier la production des gaz à la quantité de compost).

e-1- Les composés azotés

Le suivi de l'élément azote se fera par l'étude de l'évolution des teneurs en ammoniacale, ammoniac, nitrates et ammoniac libre dans les extraits aqueux de composts ainsi que le dégagement d'ammoniac dans l'environnement gazeux des bacs.

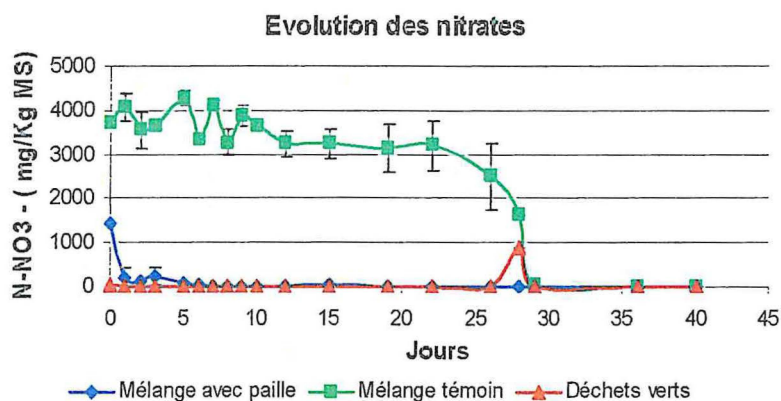


Figure 11 : Évolution des nitrates des différents mélanges testés au cours du compostage en bacs.

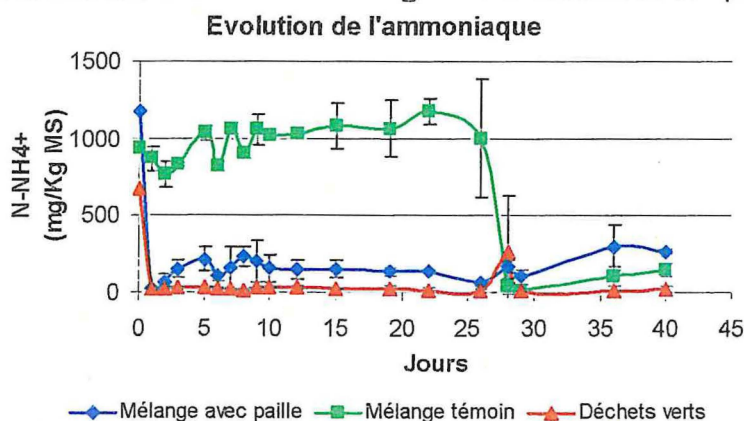


Figure 12 : Évolution de l'ammoniaque des différents mélanges s au cours du compostage en bacs.

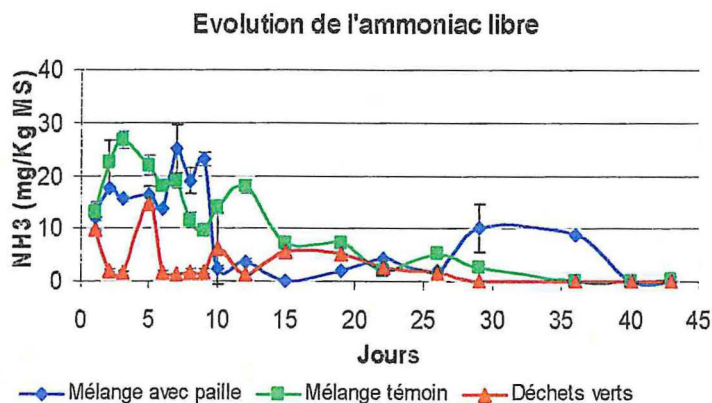


Figure 13 : Évolution de l'ammoniac libre des différents mélanges testés au cours du compostage en bacs. (La valeur correspond à la moyenne des deux répétitions).

D'après les résultats (Figure 11, 12 et 13), dans les mélanges avec paille, l'évolution des composés azotés se fait en favorisant l'équilibre vers la formation d'ammoniac au détriment de la nitrification bien que le potentiel redox dans ces mélanges soit important. La concentration en nitrates passe de 1500 mg de $\text{N-NO}_3/\text{kg MS}$ à 0 dès le 5^{ème} jour. L'ammoniaque dont la concentration est élevée au début de l'expérience (1175 mg de N/Kg MS) chute à 0 dès le 2^{ème} jour avant de remonter et de se stabiliser au voisinage de 300 mg/Kg MS. Ce taux augmente après l'humidification/aération.

Dans le mélange témoin, la concentration en nitrate baisse considérablement car elle passe de 3700 mg/Kg MS au début de l'expérience à 1640 mg/Kg MS le 28^{ème} jour et s'annule le 29^{ème} jour. Par contre la concentration en ammoniaque de 930 mg/Kg MS augmente légèrement, puis reste constante jusqu'au 22^{ème} jour avant de commencer à chuter (42.5 mg/Kg MS le 28^{ème} jour). Comme pour les mélanges avec paille, l'humidification/aération a favorisé la hausse de taux de cet élément dans le compost. On peut penser que la forte baisse des taux d'azote minéral entre le 22 et 28^{ème} jour dans ce mélange témoin est liée au fait que les microorganismes ont utilisé cet azote minéral facilement accessible pour leurs propres synthèses, ce qui a pour effet d'immobiliser cet azote qui n'est alors plus disponible pour la volatilisation ou la dénitrification. En effet, les mesures d'azote total n'ont pas montré de diminution significative du taux au cours de l'étude (cf. Figure 14), donc les pertes gazeuses ont été très limitées. Les déchets verts ont une faible concentration en azote, le nitrate étant de 30 mg/Kg MS au début chute à 0 au bout du 5^{ème} jour. Le 28^{ème} jour cette concentration atteint 900 mg/Kg MS pour chuter le lendemain à 0, ce qui illustre sans doute les difficultés à effectuer un échantillonnage homogène. L'ammoniaque a évolué à peu près de la même manière que les nitrates, la concentration initiale de 670 mg/Kg MS a baissé jusqu'à 25 mg/Kg MS un jour après. On observe aussi une augmentation le 28^{ème} jour (260mg/Kg MS) et une chute le 29^{ème} jour (10 mg/Kg MS).

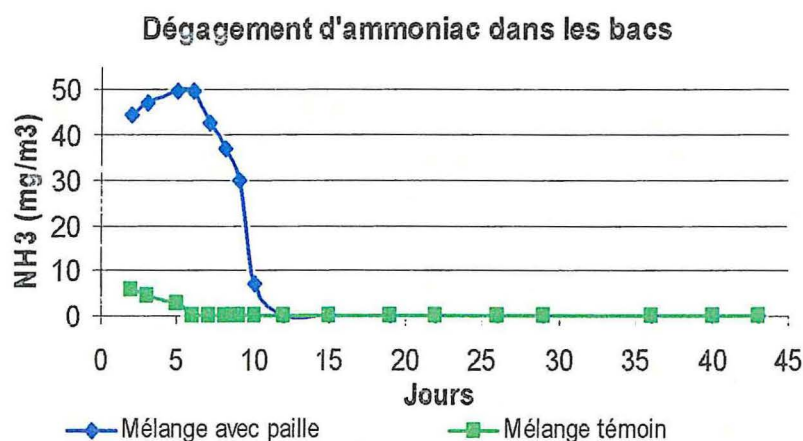


Figure 14 : Évolution du dégagement de l'ammoniac des différents mélanges testés au cours du compostage en bacs.

L'ammoniac gazeux libre contenu dans le mélange avec paille s'échappe sous forme de gaz (seuil de perception = 5 ppm avec 1 ppm $\text{NH}_3 = 0.71 \text{ mg NH}_3/\text{m}^3$) comme le montrent les résultats des analyses de gaz (figure 14). Il passe de 44 mg/m^3 à 50 mg/m^3 le 6^{ème} jour et baisse progressivement pour atteindre 7 mg/m^3 le 10^{ème} jour. On peut expliquer ceci par le fait que le pH du milieu est basique ($\text{pH} > 8$) pendant toute la durée de l'expérience, l'ammoniaque se transforme donc en ammoniac comme le montre la réaction suivante :



←

Les amines ont également été détectées dans ces mélanges avec paille pendant les 16 premiers jours de l'expérience (du 12/6 au 28/6). Les amines, selon l'appellation DRAEGER, étant constituées d'ammoniac, cyclohexylamine, triéthylamine, et éthylamine etc., leur mesure par un test de présence/absence renforce l'hypothèse émise ci-dessus. En ce qui concerne le mélange témoin, le dégagement de l'ammoniac est de 6 mg/m³ au début et diminue progressivement pour s'annuler le 6^{ème} jour. Dans le mélange avec déchets verts, le dégagement d'ammoniac est nul durant toute la durée de l'expérience.

e-2- Les composés soufrés

La dynamique du soufre est suivie par l'intermédiaire de la mesure des sulfures et des sulfates sur l'extrait aqueux de compost et par la mesure du dioxyde de soufre et du diméthylsulfure, dans la partie gazeuse.

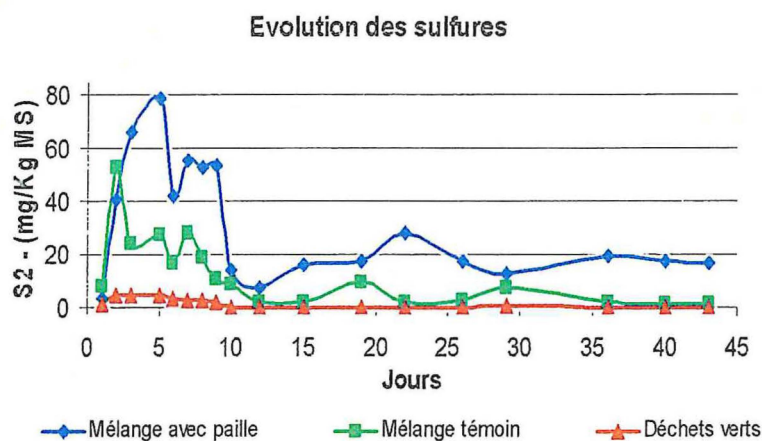


Figure 15 : Évolution des sulfures des différents mélanges testés au cours du compostage en bacs. (La valeur correspond à la moyenne des deux répétitions).

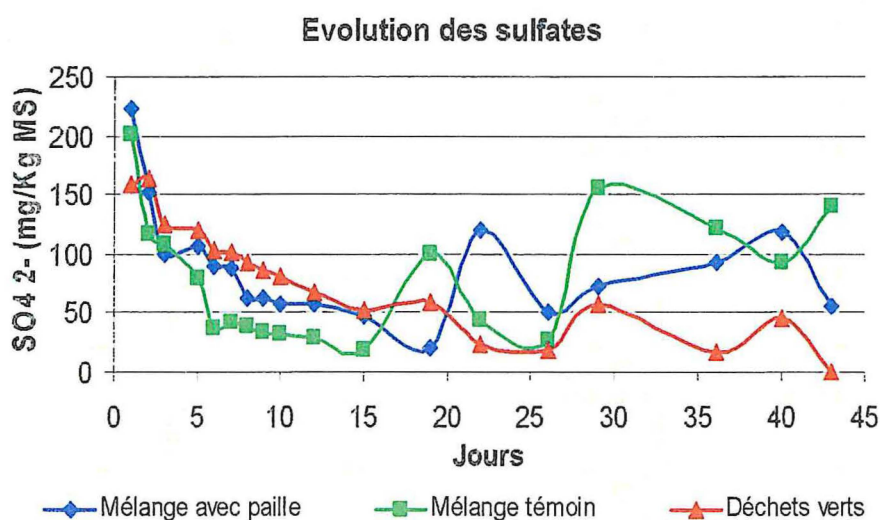


Figure 16 : Évolution des sulfates des différents mélanges testés au cours du compostage en bacs. (La valeur correspond à la moyenne des deux répétitions).

Dans les trois mélanges durant les cinq premiers jours, on observe une baisse des sulfates et une augmentation des sulfures, ensuite la concentration de ces deux éléments baisse avant de se mettre à fluctuer (Figure 15 et 16). Ces fluctuations donnent des pics orientés dans le même sens pour les mêmes dates dans le mélange avec paille et le mélange témoin. Cette évolution est aberrante, pour cela ces résultats sont inexploitable.

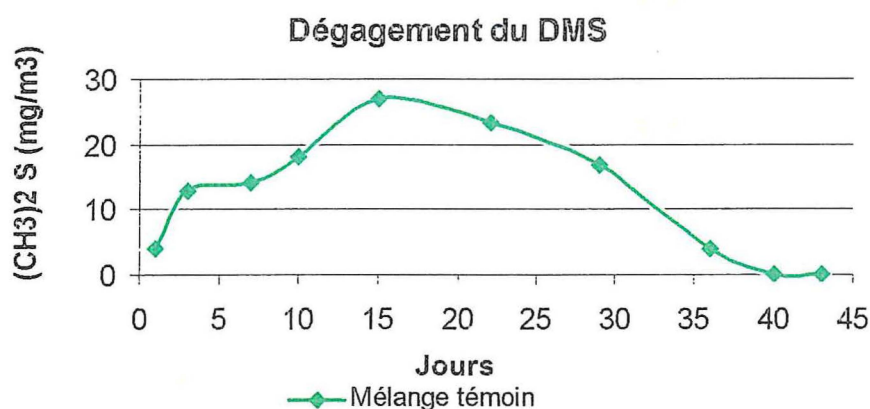


Figure 17 : Évolution de dégagement de diméthylsulfure des différents mélanges testés au cours du compostage en bacs.

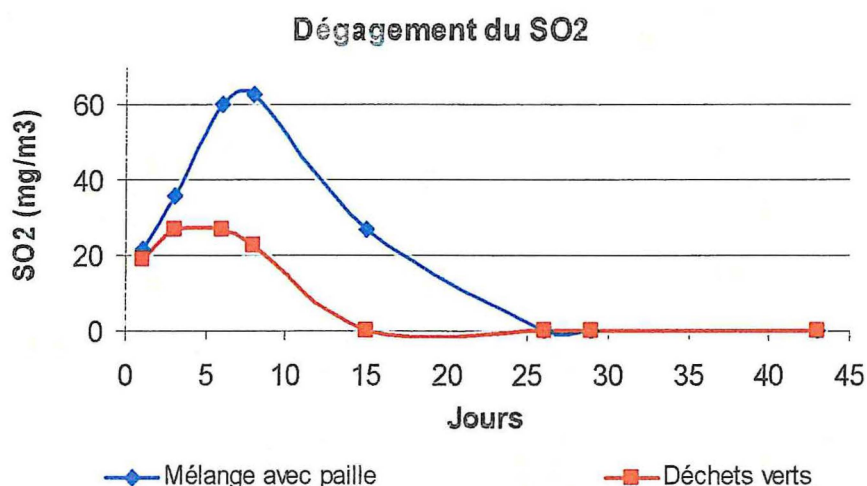


Figure 18: Évolution de dégagement de dioxyde de soufre des différents mélanges testés au cours du compostage en bacs.

En ce qui concerne le dégagement gazeux, on constate que le diméthylsulfure - DMS (Figure 17) n'est produit que dans le mélange témoin et le dioxyde de soufre -SO₂ dans les mélanges avec paille et déchets verts, qui sont plus aérés que le mélange témoin.

La concentration en DMS (seuil de perception Draeger : 0.001 ppm avec 1 ppm DMS = 2.58 mg DMS/m³) passe de 4 mg/m³ à 27 mg/m³ le 15^{ème} jour, puis baisse progressivement avant de s'annuler. La production de SO₂ (seuil de perception Draeger = 0.5 ppm avec 1 ppm SO₂ = 2.67 mg SO₂/m³) dans le mélange avec paille (Figure 18), passe de 21 mg/m³ à 63 mg/m³ le 8^{ème} jour avant de baisser et s'annuler également. Tandis que dans les déchets verts, le maximum atteint est de 27 mg/m³ le 6^{ème} jour.

e-3- Les acides volatils totaux

Les acides volatils totaux sont suivis par l'intermédiaire de la mesure des AV T (acides volatils) sur l'extrait aqueux de compost et par la mesure de l'acide acétique dans les gaz (puisqu'il fait partie des AVT).

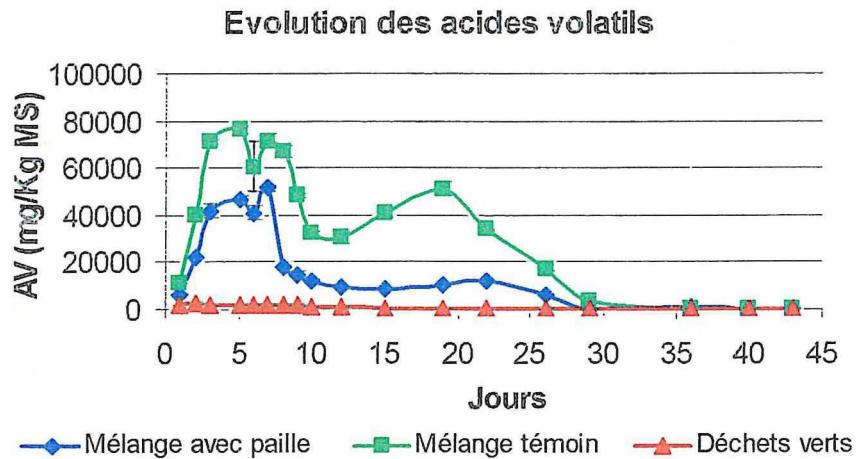


Figure 19 : Évolution des acides volatils des différents mélanges testés au cours du compostage en bacs.

Dans le mélange avec paille, la concentration des acides volatils de 6270 mg/Kg MS augmente pour atteindre un maximum de 51340 mg/Kg MS le 7^{ème} jour (Figure 19). Ce taux baisse à 8390 mg/Kg MS le 15^{ème} jour puis continue à baisser progressivement pour s'annuler vers le 29^{ème} jour. Dans le mélange témoin, la production des acides volatils est beaucoup plus importante que dans les autres traitements. La valeur initiale de 11350 mg/Kg MS évolue en donnant 2 pics importants, le premier est de 76500 mg/Kg MS le 5^{ème} jour et le deuxième de 50980 mg/Kg MS le 19^{ème} jour (avec une concentration minimale entre les deux pics de 31860 mg/Kg MS le 10^{ème} jour). Cette concentration baisse progressivement pour s'annuler vers le 36^{ème} jour. Les déchets verts présentent un faible taux d'acides volatils. La production des acides volatils (lactate, acétate, propionate, formate, butyrate, pyruvate, valérate etc...) qui ont une odeur âcre et rance est beaucoup plus importante dans le mélange témoin par rapport aux autres mélanges. Par conséquent ce mélange est susceptible de produire plus de mauvaises odeurs.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'objectif majeur de ce travail consistait à optimiser le procédé de compostage afin d'éliminer ou de réduire la production des mauvaises odeurs lors du compostage des déchets de distillerie. On est parti de l'hypothèse que l'évolution favorable des caractéristiques physico-chimiques des mélanges à composter entraînera une réduction et/ou élimination des molécules malodorantes. Un diagnostic de la situation actuelle a été effectué, un co-produit (matière structurante) a été proposé et le ratio des mélanges défini bien que difficile à cause des diversités des déchets. Plusieurs paramètres de suivi ont été adoptés dans le protocole afin d'atteindre les meilleures performances du procédé. Néanmoins en tenant compte de la température au cœur des andains, on note que la phase de compostage actif (phase thermophile) n'est pas achevée. Il est donc difficile aujourd'hui de trancher sur la durée de compostage actif à retenir pour les déchets de distillerie. En revanche, d'après les résultats obtenus, on constate que la composition des mélanges initiaux (déchets de distillerie seuls/déchets de distillerie plus sous-produits), la nature des matières structurantes apportées (paille de riz/déchets verts), le taux de concentration des déchets liquides (vinasse brute/vinasse concentrée), et les pratiques appliquées (retournements/humidification) influent sensiblement sur le processus du compostage. Ainsi la minéralisation dans les mélanges contenant de la paille démarre plus rapidement que dans les mélanges témoins ne contenant que les déchets classiques de distillerie. Le volume et la masse des mélanges avec paille diminuent plus rapidement que ceux des mélanges classiques. La production des gaz azotés et soufrés ainsi que les acides volatils responsables des mauvaises odeurs est plus fréquente et importante dans les mélanges témoins. L'utilisation de la vinasse concentrée dans le compostage entraîne le colmatage des déchets, réduit la circulation de l'air et favorise les conditions d'anaérobiose et par conséquent la production des molécules malodorantes. Le retournement périodique des composts et éventuellement l'humidification favorisent les conditions optimales de l'activité biologique des microorganismes aérobies des composts. Toujours sur la base des résultats du suivi, le sous-produit le mieux adaptés pour composter les déchets de distillerie avec le minimum de nuisances olfactives semblent être la paille de riz (car l'utilisation des déchets verts « résidus de taille de conifères » comme matière structurante dans le compostage des déchets de distillerie a donné un résultats très médiocre).

Dans le système de fonctionnement actuel, la seule possibilité offerte à la distillerie FINEDOC pour améliorer le compostage et réduire les nuisances olfactives est de s'orienter vers un compostage avec apport de paille de riz comme matière structurante, l'utilisation des vinasses brutes et des retournements périodiques des composts et d'investir dans d'autres systèmes de compostage beaucoup plus modernes.

Cette étude revêtant essentiellement un caractère méthodologique, les conclusions présentées ci-dessus sont limitées aux quelques essais réalisés. Sur la base de la méthode ainsi proposée, d'autres essais et des répétitions seraient nécessaires avant de statuer sur l'efficacité de cette méthode.

Enfin il sera intéressant de compléter la présente études par d'autres travaux afin de connaître la valeur agronomique de ces composts et leurs comportements dans le sol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Chaussod, R. (1999) "Caractériser" la Matière Organique: pourquoi et comment ?
Commentaire sur ISB, CBM et K1. *Echo-MO* (HS) **1**, 24-27.
- David (1999) : La perception des odeurs. Site Internet <http://www.innovalor.com/odeurs.htm>
- Diaz, M. J., Madejon, E., Arizaza, J., Lopez, R. and Cabrera, F. (2002) Cocomposting of Beet
Vinasse and Grape Marc in Windrows and Static Pile Systems. *Compost science and
utilization* **3**, 258-269.
- Houot, S. , Francou, C., Lineres, M. , et Le villio, M. (2002) Gestion de la Maturité des
Composts: conséquence sur leur valeur valeur amendante et disponibilité de leur azoté.
Echo-MO **34**, 3 et **35**, 3.
- Moletta, R. (2000) Gestion des Problèmes Environnementaux dans les Industries Agro-
alimentaires. Ed Lavoisier Tech Doc 600 p.
- Mustin, M. (1987) Le Compost : Gestion de la Matière Organique. Ed François Dubusc, Paris
954 p.
- Zahn, J. A., DiSpirito, A. A., Do, Y. S, Brooks, B. E., Cooper, E. E. and Hatfiels, J. L. (2001)
Odor Quantification by Chemical Methods. *Journal of Environmental Quality*, **30**, 635-
647.

TABLES DES ANNEXES

- ANNEXE 1 :Reconnaissance de certaines molécules malodorantes suivies lors du compostage
- ANNEXE 2 :Vue sur la plate forme de compostage de la distillerie FINEDOC
- ANNEXE 3 :Mesure de température et des gaz sur un andain
- ANNEXE 4 :Références des méthodes d'analyses
- ANNEXE 5 :Essai de compostage en bacs au laboratoire

ANNEXE 1 :Reconnaissance de certaines molécules malodorantes suivies lors du compostage

Reconnaissance d'odeurs	
Hydrogène sulfuré	oeuf pourri
Méthylmercaptan	choux
Ethylmercaptan	choux en décomposition
Allylmercaptan	ail
Ammoniac	très piquante, irritante
Méthylamine	poisson en décomposition
Acide acétique	vinaigre
Acide butyrique	beurre rance
Acide valérique	sueur, transpiration
Formaldéhyde	acre, suffocante
Acétaldéhyde	fruit, pomme
Dimethylsulfure	légumes en décomposition

Le vocabulaire humain ne permet pas de nommer avec précision une odeur comme il est possible de le faire pour décrire une couleur. Par contre, notre mémoire nous permet d'associer une odeur à une situation vécue ou à un événement particulièrement marquant. Le tableau ci-dessus présente quelques substances chimiques remarquables que nous avons coutume d'associer à un nom d'odeur.

ANNEXE 2 : Vue sur la plate forme de compostage de la distillerie FINEDOC : remorque andaineuse



ANNEXE 3 : Mesure de température et des gaz sur un andain : noter les fils des thermocouples sortant du tube en PVC



ANNEXE 4 : Références des méthodes d'analyse

Tableau 1 : Méthodes/Références des analyses physico-chimiques utilisées

Analyses	Méthodes - Références	Matériels
Matière organique - MO	Perte au feu	
Carbone organique - Corg	NF ISO 10694-Juin 1995	Analyseurs élémentaires THERMOQUEST 2100
Azote total - Nt	NF ISO 13878-Juillet 1998	Analyseurs élémentaires THERMOQUEST 2100
Humidité	NF ISO 11465-Août 1994	
N-NO₃⁻	Complexe coloré sel de diazonium et dichlorure de naphtalène diamine	Colorimètre à flux continue EVOLUTION 2
N-NH₄⁺	Berthelot au bleu d'indophénol	Colorimètre à flux continue EVOLUTION 2

Tableau 2 : Méthodes/Références des analyses physico-chimiques effectuées par le colorimètre de terrain

Analyses	Méthodes - Références	Matériels
Sulfures	Bleu de méthylène (USEPA 376.2)	colorimètre de terrain HACH DR/890
Sulfates	SulfaVer 4 (USEPA 375.4)	colorimètre de terrain HACH DR/890
Acides volatils	Estérification	colorimètre de terrain HACH DR/890

Remarque : l'analyse des gaz s'effectue selon les méthodes de détection colorimétriques DREGER utilisant des tubes des réactifs DRAEGER.

ANNEXE 5 : Essai de compostage en bacs au laboratoire



