

Sommaire

PARTIE 1 : INTRODUCTION	1
I – CONTEXTE DE L’ÉTUDE	1
I.1 – PRÉSENTATION DU CIRAD	1
I.2 – PRÉSENTATION DU SUJET D’ÉTUDE.....	3
II –ÉTAT DE L’ART : LE COMPOSTAGE	4
II.1 – DÉFINITION DU COMPOSTAGE	4
II.2 – LES PARAMÈTRES DU COMPOSTAGE	5
II.3 – LES PRINCIPALES PHASES DU COMPOSTAGE.....	6
II.4 – LES TECHNIQUES DE COMPOSTAGE	7
II.4.1 – LES ANDAINS RETOURNÉS.....	7
II.4.2 – LES ANDAINS AÉRÉS PASSIVEMENT.....	8
II.4.3 – L’AÉRATION FORCÉE	8
II.4.4 – LES RÉACTEURS INDUSTRIELS.....	8
III – PROGRAMME DE TRAVAIL ET OBJECTIFS	9
PARTIE 2 : MATERIELS ET METHODES.....	10
I – ÉLABORATION D’UNE BANQUE DE DONNÉES SUR LE COMPOSTAGE.....	10
II – LE BANC DE COMPOSTAGE DU CIRAD	10
III - LES MATÉRIAUX ET SUBSTRATS.....	10
IV - ESSAIS THERMIQUES DU BANC DE COMPOSTAGE	12
IV.1 – ESSAI À SEC : ÉTUDE DE L’HOMOGÉNÉITÉ DES TEMPÉRATURES SUR LA SURFACE DES TABLES CHAUFFANTES.....	12
IV.2 - ESSAI EN HUMIDE : ÉTUDE DE LA VARIATION DES TEMPÉRATURES DANS DIFFÉRENTS MATÉRIAUX HUMIDIFIÉS EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE DE CONSIGNE	12
V - ESSAI DE COMPOSTAGE	14
V.1 – PREMIER ESSAI : PAILLE DE BLÉ/VINASSE ET COPEAUX/VINASSE	14
V.2 – DEUXIÈME ESSAI : FUMIER DE CHÈVRE	16
VI – CARACTÉRISATION DES MATIÈRES PREMIÈRES ET DES SUBSTRATS DE COMPOSTAGE	16
VI.1 – ANALYSES DE BASE.....	16
VI.2 – ANALYSES SPÉCIFIQUES	16
VI.2.1 – FRACTIONNEMENT DE LA MO SELON VAN SOEST ET CARBONE BIODÉGRADABLE.....	16
VI.2.2 – N DISPONIBLE	18
VI.2.3 – LA DEMANDE CHIMIQUE EN OXYGÈNE (DCO).....	18
PARTIE 3 : RESULTATS.....	21
I – RÉSULTATS RECUEILIS DANS LA BANQUE DE DONNÉES.....	21
II – ESSAI THERMIQUE DU BANC	21
II.1 – LES ESSAIS À SEC	21
II.1.1 – LES DONNÉES	21
II.1.2 – TRAITEMENT STATISTIQUE	21
II.2 - LES ESSAIS EN HUMIDE	25
III – CARACTÉRISTIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES ET DES MÉLANGES.....	25
III.1 – PREMIER ESSAI	25
III.1.1 – LES MATIÈRES PREMIÈRES.....	25
III.1.2 – LES MÉLANGES INITIAUX.....	27
III.2 – DEUXIÈME ESSAI	27
IV – ÉVOLUTION DU COMPOST.....	29
IV.1 – PREMIER ESSAI	29
IV.1.1 – ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE ET FERMENTATION	29
IV.1.2 – BILAN MATIÈRE	29
IV.2 – DEUXIÈME ESSAI	31
IV.2.1 – ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE	31
IV.2.2 – BILAN MATIÈRE	31
PARTIE 4 : DISCUSSION.....	33
PARTIE 5 : CONCLUSION.....	36
BIBLIOGRAPHIE	
WEBOGRAPHIE	
ANNEXES	

TABLES DES ILLUSTRATIONS

LES FIGURES

FIGURE 1 : FINANCEMENT DU CIRAD.....	1
FIGURE 2 : ORGANIGRAMME DU CIRAD.....	2
FIGURE 3 : FLUX ET TRANSFERT DE DÉCHETS ORGANIQUES.....	3
FIGURE 4 : LES DIFFÉRENTES PHASES DU COMPOSTAGE.....	6
FIGURE 5 : EXEMPLE D'ANDAINS RETOURNÉS.....	7
FIGURE 6 : SCHÉMA DU TAS STATIQUE AÉRÉ	8
FIGURE 7 : ÉCHANTILLONNAGE ET RÉPARTITION DES PRÉLÈVEMENTS	17
FIGURE 8 : ILLUSTRATION DES ÉTAPES DE LA PROCÉDURE VAN SOEST.....	19
FIGURE 9 : CONDITION DE VALIDITÉ ESSAI À SEC À 55°C.....	22
FIGURE 10 : CONDITION DE VALIDITÉ ESSAI À SEC À 65°C.....	24
FIGURE 12 : RÉSULTAT DU TEST ANOVA À 2 DIMENSIONS, UNE INTER (NIVEAUX INDÉPENDANTS) ET UNE INTRA (MESURES RÉPÉTÉES, DÉPENDANTES), POUR L'ESSAI À SEC À 65°C	26
FIGURE 13 : FACTEURS CLÉS DU COMPOSTAGE.....	34

LES GRAPHIQUES

GRAPHIQUE 1 : ESSAI À SEC À 55°C, TABLE DE CHAUFFE N°1	20
GRAPHIQUE 2 : ESSAI À SEC À 55°C, TABLE DE CHAUFFE N°2	20
GRAPHIQUE 3 : ESSAI À SEC À 65°C, TABLE DE CHAUFFE N°1	20
GRAPHIQUE 4 : ESSAI À SEC À 65°C, TABLE DE CHAUFFE N°2	20
GRAPHIQUE 5 : COURBES DE CHAUFFE DE LA TABLE CHAUFFANTE 1.....	26
GRAPHIQUE 6 : COURBES DE CHAUFFE DE LA TABLE CHAUFFANTE 2.....	26
GRAPHIQUE 7 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE VAN SOEST SUR LES MÉLANGES INITIAUX.....	28
GRAPHIQUE 8 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE VAN SOEST SUR LES MÉLANGES À J 19.....	28
GRAPHIQUE 9 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE, MÉLANGE PAILLE/VINASSE – ESSAI COMPOSTAGE 1.....	30
GRAPHIQUE 10 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE, MÉLANGE COPEAUX/VINASSE – ESSAI COMPOSTAGE 1.....	30
GRAPHIQUE 11 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DU FUMIER – ESSAI COMPOSTAGE 2	30
GRAPHIQUE 12 : COMPARAISON DES ÉVOLUTIONS DES TEMPÉRATURES ESSAI 1/ESSAI 2	32

LES TABLEAUX

TABEAU 1 : CALCULATEUR DE MÉLANGE DE DÉCHET POUR LES BACS PAILLE.....	13
TABEAU 2 : CALCULATEUR DE MÉLANGE DE DÉCHET POUR LES BACS COPEAUX.....	13
TABEAU 3 : CARACTÉRISTIQUES DE VARIATION DES 16 THERMOCOUPLES ET DES TABLES DE CHAUFFE 1 ET 2 POUR L'ESSAI À SEC À 55°C	22
TABEAU 4 : CARACTÉRISTIQUES DE VARIATION DES 16 THERMOCOUPLES ET DES TABLES DE CHAUFFE 1 ET 2 POUR L'ESSAI À SEC À 65°C	22
TABEAU 5 : CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX STRUCTURANTS À L'ÉTAT INITIAL	28
TABEAU 6 : CARACTÉRISTIQUES DE L'EFFLUENT À L'ÉTAT INITIAL.....	28
TABEAU 7 : CARACTÉRISTIQUES DES MÉLANGES INITIAUX DU PREMIER ESSAI	28
TABEAU 8 : CARACTÉRISTIQUES DU SUBSTRAT DU DEUXIÈME ESSAI	30
TABEAU 9 : BILAN MATIÈRE ESSAI COMPOSTAGE 1	32
TABEAU 10 : BILAN MATIÈRE ESSAI COMPOSTAGE 2	32

LES PHOTOGRAPHIES

PHOTO 1 : SYSTÈME DE CHAUFFAGE DES TABLES.....	11
PHOTO 2 : ESSAI À SEC.....	11
PHOTO 3: CENTRAL D'ACQUISITION CR10X DE CAMPBELL.....	11
PHOTO 4 : BAC PAILLE/VINASSE.....	13
PHOTO 5 : BAC COPEAUX/VINASSE.....	15
PHOTO 6 : ESSAI COMPOSTAGE 1	15
PHOTO 7 : MISE EN PLACE DU DEUXIÈME ESSAI DE COMPOSTAGE	15
PHOTO 8 : BAC FUMIER À L'ÉTAT INITIAL.....	15

Les annexes

Annexe 1 : Schéma de principe d'un réacteur de compostage et du banc de compostage

Annexe 2 : Protocole des essais thermiques du banc

Annexe 3 : Protocole de l'essai compostage

Annexe 4 : Méthode d'analyse du carbone et de l'azote

Annexe 5 : Mode opératoire de la procédure Van Soest

Annexe 6 : Mode opératoire de l'extraction de l'azote disponible

Annexe 7 : Photo du fumier en fermentation – Essai compostage 2

PARTIE 1 : INTRODUCTION

I – Contexte de l'étude

I.1 – Présentation du CIRAD

Vieille de plus de cent ans, la recherche agronomique tropicale française a connu un essor lorsque l'expansion et l'exploitation des productions tropicales ont été prises en considération dans l'économie nationale. La création du CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) fut l'aboutissement de ce processus, en 1984, sous la forme d'un EPIC (établissement public à caractère industriel et commercial).

Sa mission est de faire de la recherche agronomique, de la formation et de l'information scientifique et technique des instruments efficaces du développement économique et social des pays du sud. Pour une grande partie de ces pays, l'agriculture est la base de l'économie et l'objectif est de les aider à se développer tout en prenant en compte les conséquences écologiques, économiques et sociales.

Au fil des années, le CIRAD a conforté sa réputation auprès des industriels et des entreprises publiques, son expertise est maintenant reconnue et intéresse des entreprises du secteur privé qui souhaitent utiliser ses compétences. Cela permet d'apporter des financements privés non négligeables. En effet, si l'État joue de nos jours un rôle important et central dans le financement de la recherche, une grande partie est tout de même financée sur fonds privés. Les ressources du CIRAD en 2008 s'élevaient à 203 millions d'euros (Figure 1).

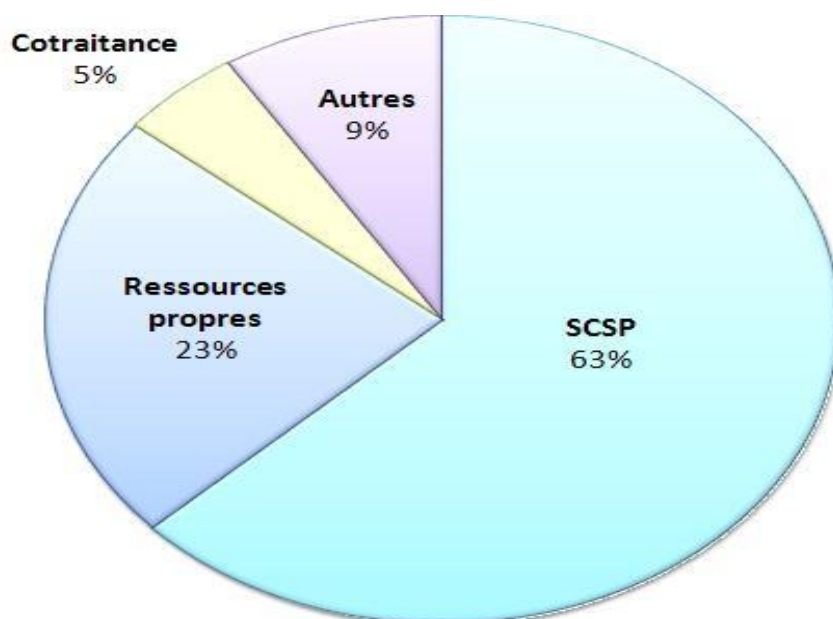


Figure 1 : Financement du Cirad

Le CIRAD travaille en coopération avec plus de 90 pays répartis sur les cinq continents. Son effectif est de 1800 personnes dont 800 chercheurs. Il comprend 3 départements de recherche (Figure 2) dont le département Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux (PERSYST), qui regroupe plusieurs unités de recherches et notamment l'unité propre de recherche (UPR) « Recyclage et risque »

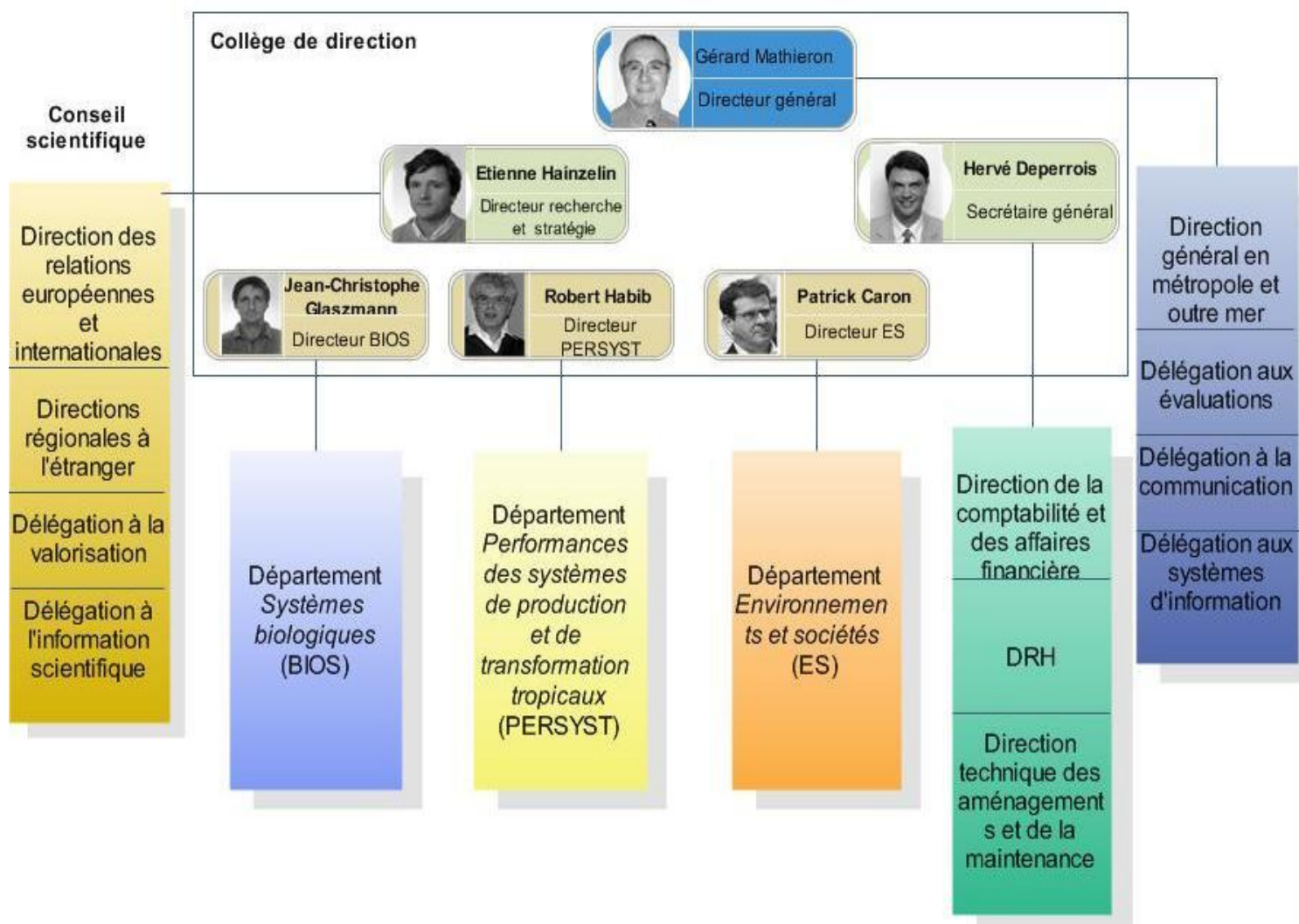


Figure 2 : Organigramme du Cirad

L'unité étudie le rôle joué par le recyclage des déchets dans le fonctionnement des écosystèmes cultivés. Pour contrôler son incidence sur la production et l'environnement, il est nécessaire de comprendre les multiples processus en jeu à tous les niveaux d'organisation. Le principal défi scientifique que l'unité doit relever consiste à articuler, dans une même démarche ou dans les mêmes modèles, les connaissances issues de l'étude des processus

biophysiques à l'échelle de la parcelle cultivée et celles relatives à la gestion intégrée des sols et du risque environnemental qui requièrent une démarche plus globale.

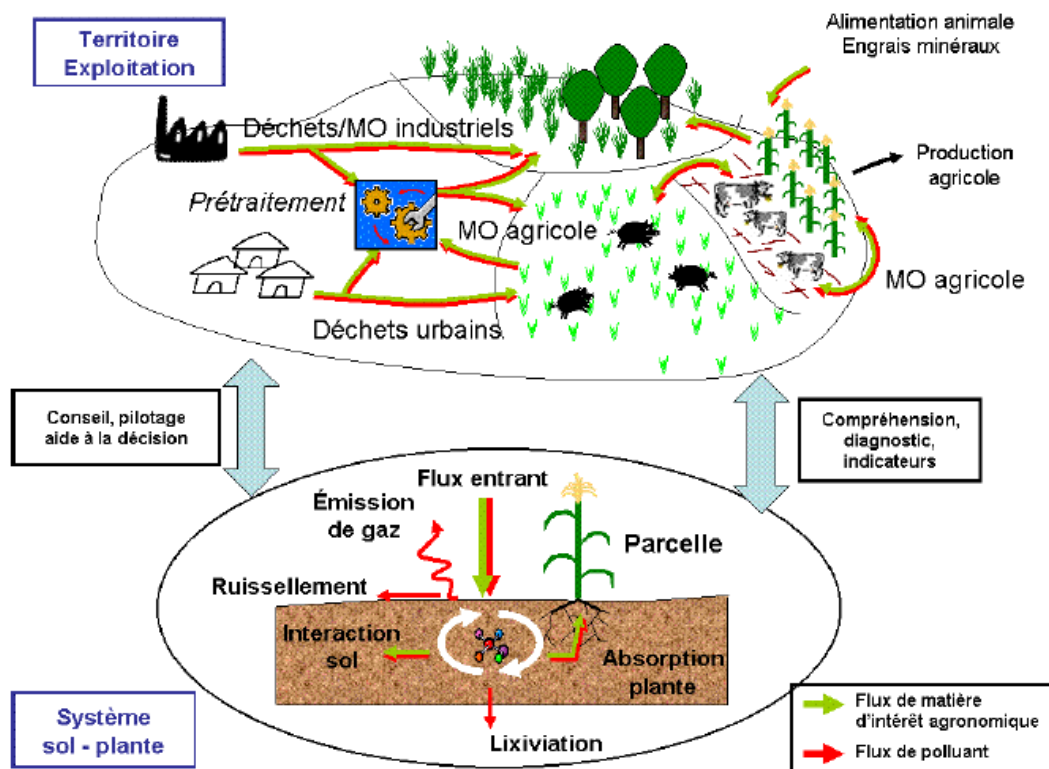


Figure 3 : Flux et transfert de déchets organiques (source : CIRAD)

I.2 – Présentation du sujet d'étude

Les déchets de notre civilisation constituent l'une des faiblesses des systèmes économiques qui se sont développés dans beaucoup de pays du monde, notamment dans les pays industrialisés. Ces pays, en raison des modes de production et de consommation, sont confrontés au problème préoccupant qui est celui de l'élimination des déchets. De plus ces déchets sont de plus en plus variés, complexes et nocifs pour l'environnement.

La quantité totale de déchets produits en France en 2008 est de 868 millions de tonnes et environ 70% de ces déchets sont des déchets organiques (1).

Une des techniques les plus simples et économiquement les plus avantageuses pour valoriser ces déchets organiques est le compostage. Ce procédé consiste à utiliser le processus

de transformation de la matière organique d'origine végétale et animale par les décomposeurs pour obtenir un produit fini voisin des humus naturels (acides organiques bruns/noirs). L'épandage sur des terres agricoles de cette substance nutritive, utilisée comme source d'engrais, enrichit les sols pauvres ou appauvris par les techniques culturales intensives et aide à la structuration des systèmes édaphiques, mais ce, à condition de contrôler le phénomène. En effet, il n'est pas sans impact possible sur l'environnement : pollution azotée des nappes, altération des propriétés physiques des sols, etc... (Figure 3).

Le travail que j'ai réalisé dans le cadre de mon stage au CIRAD consistait à contribuer à la modélisation du processus du compostage à travers la mise au point et les essais d'un banc de compostage. Il s'inscrit dans le projet ISARD (Intensification écologique des systèmes de production agricoles par le recyclage des déchets), financé par l'Agence Nationale de la Recherche et qui a pour objectif de mettre au point un ensemble de méthodes et d'outils permettant d'utiliser le recyclage des produits résiduels organiques (PRO) pour augmenter les productions agricoles via l'intensification des processus écologiques se déroulant dans les sols, tout en limitant les risques posés par ces pratiques. Le projet intervient sur des sites contrastés (La Réunion, Dakar, Mahajanga et la plaine de Versailles) en prenant en compte des situations de pays du nord et du sud, pour valider et proposer après quatre ans, en interdisciplinarité entre sciences biotechniques et sciences sociales, une démarche intégrée de gestion territoriale des PRO.

II – État de l'art : le compostage

II.1 – Définition du compostage

Le compostage est défini comme un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en conditions aérobies, entraînant une montée en température, et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée (Francou Cédric). Ce processus est similaire à celui de l'humification naturelle des résidus organiques dans les sols.

Au cours de ce processus, les micro-organismes aérobies décomposent la matière organique et produisent du gaz carbonique (CO_2), de l'ammoniac, de l'eau et de la chaleur. Le compost, résidu organique final du processus, est relativement stable. Si la température monte à plus de 55°C pendant plusieurs jours, de nombreux micro-organismes pathogènes pour les humains ou les plantes sont détruits, ainsi que les graines d'adventices. Le compost ainsi obtenu n'induit que très peu de risques de phytotoxicité.

II.2 – Les paramètres du compostage

- **L'aération** : les microorganismes consomment de l'oxygène pour oxyder les composés organiques qui leur servent de nourriture. Une teneur en oxygène inférieure à 5% dans la masse en compostage ne permet pas le maintien des conditions aérobies (Mustin Michel). La capacité d'aération du milieu est fonction de sa porosité ou plus précisément de son taux d'espaces lacunaires.

- **L'humidité ou la teneur en eau** : sa relation avec le taux d'espaces lacunaires est différente pour chaque type de déchet et est fonction de sa granulométrie et de sa capacité de rétention de l'eau. Le taux optimal d'humidité, pour un substrat donné, est déterminé par le taux maximal d'espace lacunaire qui n'entraîne pas d'inhibition de l'activité des microorganismes. En général, la teneur en eau optimale se situe entre 55 et 75% (Mustin Michel).

- **La température** : le processus de compostage met en œuvre deux gammes de température: mésophile et thermophile. Alors que la température idéale pour la phase initiale de compostage est de 20 à 45°C, par la suite, les organismes thermophiles ayant pris le contrôle des étapes ultérieures, une température située entre 50 et 70°C est idéale (Misra et al.). Les températures élevées caractérisent les processus du compostage aérobie et sont les indicateurs d'une activité microbienne importante. On retiendra cependant que la température atteinte n'est que la résultante de l'équilibre entre la production et les pertes de chaleur.

- **Les caractéristiques physico-chimiques des substrats** :

- les éléments nutritifs et leurs proportions : les micro-organismes ont besoin de carbone (C), d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K) comme éléments nutritifs principaux. Le rapport C/N (carbone organique / azote total) diminue pendant le compostage. Ce paramètre est le plus couramment utilisé pour évaluer la maturité d'un compost, avec une valeur de 10 – 15 pour un produit stable bien que le ratio final dépende des matières initiales utilisées (Chefetz et al., et Namkoong et al.). Le C/N des composts est comparé à celui, proche de 10, des sols humiques (Charnay Florence).

- le pH : Le pH a été l'un des premiers indicateurs chimiques de la maturité des composts et a été utilisé dans de nombreuses études. Les pH acides sont caractéristiques des composts immatures alors que les composts mûrs ont des pH compris entre 7 et 9 (Avnimelech et al.).

- la teneur en lignine : La lignine est un des principaux constituants des parois cellulaires des plantes et sa structure chimique complexe la rend hautement résistante à la dégradation microbienne (Richard Tom). La nature de la lignine a deux implications : premièrement, la lignine réduit la biodisponibilité des autres constituants des parois cellulaires, ce qui se traduit par un rapport réel C/N (rapport entre C biodégradable et N) plus faible que celui

généralement mentionné, et deuxièmement, la lignine sert d'amplificateur de porosité, ce qui crée des conditions favorables pour l'aération (Misra et al.).

• **Les aspects microbiologiques du compostage** : sur le plan microbiologique, le compostage se définit comme une « bio-oxydation de la matière organique par des microorganismes ». Ils sont d'origine tellurique et appartiennent aux groupes des Bactéries, des Actinomycètes, des Champignons, responsables à 95% de l'activité, les 5% restant étant dus aux Protozoaires et aux Algues. Les réactions sont dues aux nombreuses enzymes extracellulaires et intracellulaires (hydrolases, transférases et isomérases, oxydoréductases et synthétases) (Mustin Michel).

II.3 – Les principales phases du compostage

Les phases consécutives du compostage sont déterminées par l'évolution de la température du milieu (Figure 4). Le processus se déroule en 3 phases principales :

- Phase de démarrage (mésophile) : montée progressive en température due à la croissance rapide de l'activité microbienne aérobie lors de la minéralisation de la matière organique facilement biodégradable.
- Phase de fermentation (thermophile) : stabilisation de la température en zone thermophile ($> 45^{\circ}\text{C}$) sous l'effet de la minéralisation continue de la matière organique.
- Phase de maturation ou d'humification (mésophile) : refroidissement jusqu'à la température ambiante avec arrêt progressif de la minéralisation et mise en place de processus complexes qui entraînent la transformation en humus de la matière organique résiduelle.

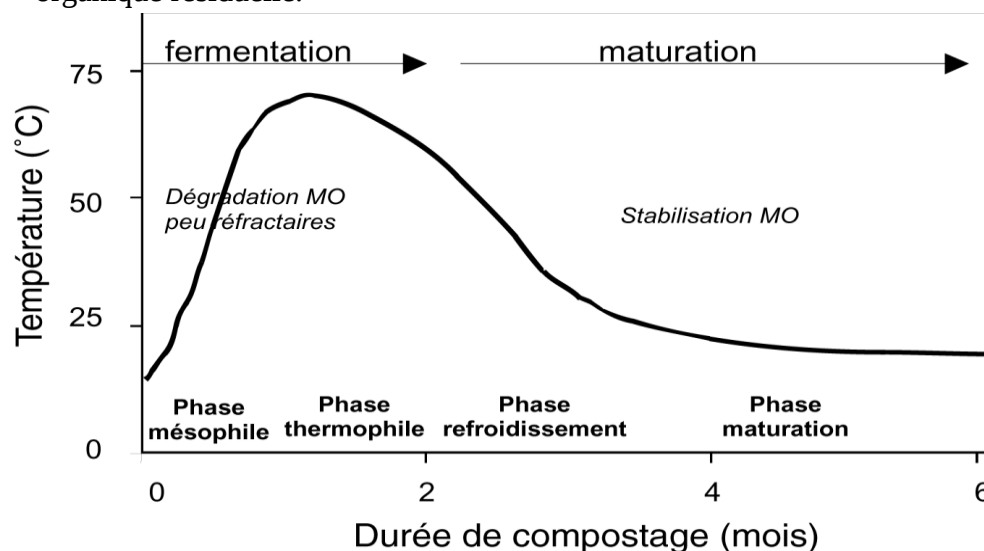


Figure 4 : les différentes phases du compostage

II.4 – Les techniques de compostage

Les techniques de compostage se différencient uniquement dans la conduite de la phase de fermentation thermophile. La maturation est quant à elle pratiquement toujours conduite en tas statiques disposés sous abri. Il existe une grande variété d'usines de compostage allant des plateformes les plus simples, constituées uniquement d'une surface à l'air libre pour placer les andains et de quelques engins (broyeurs, tractopelles), aux plateformes les plus sophistiquées constituées d'espaces abrités, d'appareils de transfert et de réacteurs à contrôle continu de la température, de l'humidité et de la teneur en oxygène.

II.4.1 – Les andains retournés

Le compostage en andains consiste à disposer le mélange de matières premières en de longs tas étroits appelés andains (Figure 5) qui sont retournés de façon régulière. Ces andains sont aérés essentiellement par le mouvement naturel de l'air (convection et diffusion gazeuse). Le taux d'échange avec l'air dépend de la porosité de l'andain : quand l'andain est trop massif, des zones anaérobies peuvent apparaître à proximité du centre. Par contre, les andains trop petits perdent rapidement de la chaleur et risquent de ne pas atteindre une température suffisamment élevée pour permettre le compostage. Lors des retournements, le chargeur ou le retourneur soulève les matériaux de l'andain et les déverse à nouveau sous forme d'un autre andain à proximité, mélangeant ainsi les matières et les mettant en contact avec l'air. La fréquence de retournement est fonction du taux de décomposition, du taux d'humidité et de la porosité des matériaux, ainsi que de la durée de la phase de fermentation. Comme le taux de décomposition est plus important au début du processus, la fréquence de retournement diminue au fur et à mesure de l'avancement de la fermentation (Misra et al.).



Figure 5 : Exemple d'andains retournés

II.4.2 – Les andains aérés passivement

Avec cette méthode, de l'air est fourni par des tuyaux perforés enfoncés verticalement dans l'andain, ce qui élimine la nécessité du retournement. Les extrémités des tuyaux sont ouvertes et l'air circule ainsi de l'andain vers les tuyaux en raison de l'effet de tirage créé par les gaz chauds qui s'échappent (Misra et al.). Comme les andains ne sont pas retournés les matières premières doivent être parfaitement mélangées et suffisamment structurées au départ pour éviter leur compactage.

II.4.3 – L'aération forcée

Cette méthode utilise un système d'aération actif à l'aide d'un ventilateur qui aspire ou injecte de l'air dans le tas (Figure 6). Un contrôle direct du processus est possible ce qui permet de travailler avec des tas plus importants sans retournement. La sélection et le mélange initial des matières premières sont cruciaux afin d'éviter une mauvaise répartition de l'air dans la masse avec pour conséquence un compostage irrégulier. Le mélange doit avoir une bonne structure initiale afin de conserver sa porosité tout au long de la fermentation. Selon les cas, l'air peut être fourni de deux façons, par aspiration en début de fermentation puis ensuite par soufflage à travers le tas (Misra et al.)

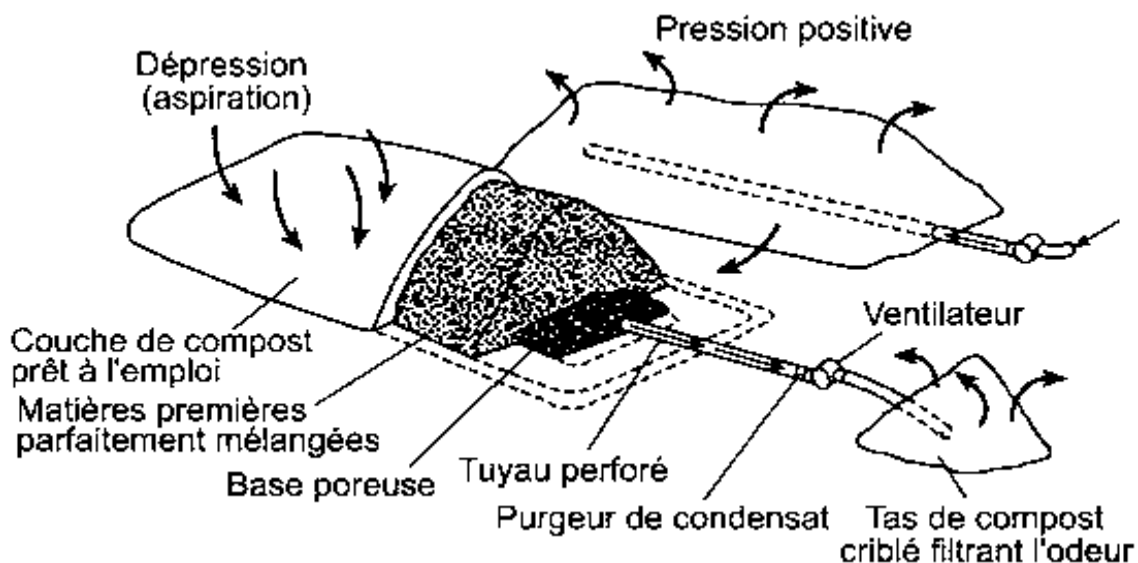


Figure 6 : Schéma du tas statique aéré

II.4.4 – Les réacteurs industriels

Le système industriel de compostage appelé « minéralisation ou oxydation accélérée » vise à réduire la durée de la phase de fermentation (Diaz et al.). Il est souvent appliqué aux déchets urbains, notamment les ordures ménagères résiduelles. Les déchets sont introduits dans un bioréacteur stabilisateur (BRS) constitué d'un tambour rotatif dans lequel ils

séjournent trois ou quatre jours à une température de 50 à 60°C. Ils sont déchetés et remués en permanence ainsi qu'humidifiés et aérés de façon continue afin de favoriser leur fermentation accélérée. Après un tri pour éliminer les inertes, le fermentât est entreposé sous la forme d'andains pendant 3 mois, au cours desquels la poursuite de la minéralisation et la phase de maturation se succéderont. D'autres types de réacteurs existent mais dans tous les cas, cette technique particulière de compostage présente l'avantage d'un contrôle total de la température, de l'aération et de l'humidité, avec une gestion en continu des déchets.

III – Programme de travail et objectifs

- Élaboration d'une base de données bibliographique sur le compostage en réacteur.
- Choix des matières premières à utiliser afin d'obtenir deux matériaux bien différents sur le plan de leurs caractéristiques physiques et de leur composition chimique.
- Aménagement du banc de compostage avec mise en place des thermocouples et des sondes d'humidité reliées à la centrale d'acquisition Campbell et mise en place de l'irrigation.
- Programmation de la centrale d'acquisition CR 10X de Campbell : création des programmes pour chaque essai.
- Rédaction des protocoles d'essai du banc de compostage et des procédures pour l'extraction de l'azote disponible et pour la programmation et le raccordement de la centrale d'acquisition.
- Essais thermiques du banc de compostage et traitement statistique des résultats afin de vérifier que chaque table chauffe de façon homogène en surface.
- Essai d'imprégnation et compostage en conditions contrôlées avec mesures, échantillonnages et analyses physico-chimiques.

PARTIE 2 : MATERIELS ET METHODES

I – Élaboration d’une banque de données sur le compostage en réacteur

Un procédé de compostage peut être caractérisé par la façon dont sont gérés l'approvisionnement en eau et en oxygène des micro-organismes et les contraintes de perte de chaleur dues au rapport masse/surface du substrat. En effet, un faible volume de réacteur de compostage peut induire une perte rapide d’humidité et une température trop basse, ce qui entraîne une diminution de l’activité biologique. Les réacteurs de laboratoire sont identifiés généralement comme étant ceux d’un volume inférieur à 100 L tandis que les réacteurs pilotes ont un volume de 100 à 2000 L. Différents types de réacteurs peuvent être utilisés : réacteur à température fixe, réacteur à auto-échauffement, réacteurs à différence de température contrôlées ou réacteurs à flux de chaleur contrôlés.

La banque de données a été réalisée grâce à l’étude bibliographique effectuée à partir d’une collection de la revue Compost Science & Utilization, de Déclics, moteur de recherche fédéré du CIRAD (2) permettant d’interroger de nombreuses sources d’informations et grâce à une webographie sur le site Sciences Direct (3). Nos recherches se sont concentrées uniquement sur les articles présentant suffisamment de résultats en terme de bilan de matière, de durée, de température, sur des essais de compostage en réacteur pilote ou de laboratoire d’un volume inférieur à 25m³.

II – Le banc de compostage du CIRAD

Par rapport à la typologie énoncée précédemment, il s’agit d’un système hybride entre température fixe et auto-échauffement. La température de compostage est obtenue par un complément de chauffage externe (Photo 1) qui compense pour partie les pertes thermiques. Ce système permet de rester dans des conditions proches des conditions réelles. C’est une option relativement peu coûteuse qui permet de multiplier le nombre de réacteurs en parallèle et donc de faire des répétitions. (Annexe 1 : Schéma de principe)

III - Les matériaux et substrats

Pour la mise au point du banc de compostage, il s’agissait de travailler avec des substrats bien différenciés sur le plan de leurs caractéristiques physiques et de leur composition chimique. Compte tenu des résultats antérieurs, nous avons utilisé 4 matières premières dont 3 matériaux solides : paille de blé, copeaux de bois grossiers, copeaux de bois fins et un effluent industriel, une vinasse de betterave à sucre concentrée à 60%.



Photo 1: Système de chauffage des tables



Photo 2 : Essai à sec

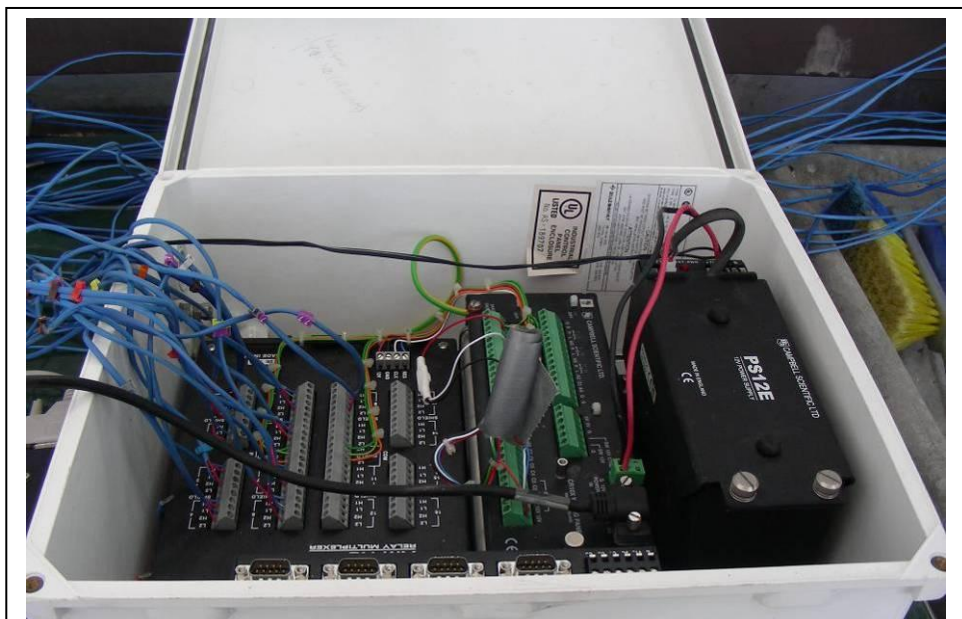


Photo 3 : Centrale d'acquisition CR 10X de Campbell

Les copeaux de bois grossiers ayant une granulométrie proche de celle de la paille, nous avons décidé de les mélanger avec les copeaux fin (2/3) afin d'obtenir 2 matériaux bien différents. Les résultats avec ces matériaux n'étant pas concluants, nous avons réalisé un deuxième essai avec du fumier de chèvre afin de tester le banc de compostage.

IV - Essais thermiques du banc de compostage

IV.1 – Essai à sec : étude de l'homogénéité des températures sur la surface des tables chauffantes

L'objectif de ce premier essai consiste à vérifier que la quantité de chaleur fournie par les tables est homogène sur toute leur surface. En effet, il est important que chaque bac soit chauffé de la même façon pour pouvoir comparer leurs résultats. A cette fin, on mesure la température de surface en différents points de la table à l'aide de 8 thermocouples répartis sur chaque table chauffante au niveau des empreintes des bacs de compostage. Pour éviter de trop fortes variations, les sondes sont isolées en les recouvrant avec les bacs remplis de paille (Photo 2). La température de consigne des 2 tables chauffantes est réglée à l'identique et les températures de surface sont enregistrées toutes les 15 minutes par une centrale d'acquisition CR10X de Campbell (Photo 3). Pour chaque température de consigne testée, la durée de l'essai est au minimum de 24 heures, de façon à observer les variations entre le jour et la nuit. Un protocole d'essai détaillé a été rédigé pour cet essai et figure en annexe 2.

Les données de température font ensuite l'objet d'une analyse statistique par une ANOVA à deux dimensions pour mesures appariées, pour vérifier l'homogénéité de la chauffe pour chaque table puis pour l'ensemble.

IV.2 - Essai en humide : étude des variations de la température de différents matériaux humides en fonction de la température de consigne

L'objectif de cet essai est d'obtenir une courbe de chauffe, exprimant la température du matériau humide en fonction de la température de consigne, pour chacun des matériaux et pour chaque table. Ces courbes permettront ultérieurement de commander la montée et le maintien en température des substrats au cours du compostage.

A cet effet, nous mesurons la température dans le matériau humide et saturé à l'eau javellisée pour empêcher la fermentation. Pour chaque table, l'essai concerne 2 matériaux différents avec 2 répétitions, soit 4 bacs par table. Pendant une durée minimum de 48 heures, 5 valeurs de température de consigne sont testées. Les mesures sont recueillies grâce à 16 thermocouples (2 par bac) reliés à la centrale d'acquisition. Pour cet essai, un protocole détaillé a été rédigé et figure en annexe 2.

Tableau 1 : calculateur de mélange de déchet pour les bacs paille

Pour les bacs Paille

N°	Type	Déchets	Hum (%)	C (%MS)	N (%MS)	Masse (g)
1	Matériau adsorbant	paille	7,2	45,0	0,39	14636
2	Effluent imprégné	vinasse à 21,5%	78,5	27,8	2,47	31764
3	Adjuvant	-				
4	Eau		100,0	0,0	0,0	0
						Total
						Humidité
						C/N
						46400
						56%
						36

Tableau 2 : calculateur de mélange de déchet pour les bacs copeaux

Pour les bacs copeaux

N°	Type	Déchets	Hum (%)	C (%MS)	N (%MS)	Masse (g)
1	Matériau adsorbant	copeaux mixte	6,1	49,1	0,07	10036
2	Effluent imprégné	vinasse à 10%	90,0	27,8	2,47	31212
3	Adjuvant	nitrate ammonium	35,5	0,0	44,70	255
4	Eau		100,0	0,0	0,0	0
						Total
						Humidité
						C/N
						41503
						69%
						35



Photo 4 : Bac paille/vinasse

V- Essai de compostage

V.1 – Premier essai : matériaux imprégnés « paille/vinasse » et « copeaux/vinasse »

L'objectif de cet essai est d'étudier la reproductibilité des résultats de la phase thermophile du compostage. A cet effet, les paramètres caractéristiques de cette phase sont observés pour des substrats différents avec plusieurs répétitions. Pour notre essai, le choix s'est porté sur des mélanges « paille/vinasse » (Photo 4) et « copeaux/vinasse » (Photo 5) ayant une humidité/porosité différente pour un rapport C/N similaire. Chacun de ces substrats constitue un traitement qui a été répété 3 fois (Photo 6).

Pour déterminer la proportion de matériau et de vinasse diluée pour chaque traitement, nous avons utilisé un calculateur de mélange qui ajuste les quantités de matériau absorbant, d'effluent et éventuellement d'adjuvant, notamment du nitrate d'ammonium, dans les mélanges matériaux/vinasse, pour atteindre le rapport C/N désiré à un taux d'humidité déterminé (Tableau 1 et 2). Les ratios d'absorption de la vinasse à différentes concentrations sur la paille et les 2 types de copeaux ont été déterminés antérieurement par le CIRAD (Mochini Medhi). Les résultats d'analyse n'étant pas disponibles au moment de la fabrication des mélanges, les teneurs en C et N datant de 2007 ont été utilisées.

Chaque bac est équipé de 2 thermocouples pour la mesure de la température. Ils sont pesés et la hauteur du substrat dans les bacs est mesurée au départ puis lors de chaque manipulation. Au départ, la consigne de régulation des tables est fixée à 50°C, par la suite, la température moyenne des bacs de chaque traitement est comparée à la température obtenue lors des essais en humide pour le mélange de porosité/humidité similaire. Si la température est supérieure, on suppose qu'il y a fermentation et la consigne est augmentée de 5°C. On procède ainsi par paliers jusqu'à l'obtention d'une température stable supérieure à 45°C. L'humidité des substrats est maintenue par des aspersions d'eau 2 fois par jour.

Au cours de l'essai, les substrats en fermentation sont homogénéisés, aérés et réhumidifiés si besoin selon un planning préétabli qui peut être modifié en fonction de l'évolution de la température. Ainsi une baisse de la température peut être le signe d'une diminution de l'activité des micro-organismes par manque d'oxygène.



Photo 5 : Bac copeaux/vinasse



Photo 6 : Essai compostage 1



Photo 7 : Mise en place du deuxième essai de compostage



Photo 8 : Bac fumier à l'état initial

Lors de chaque manipulation des substrats, des prélèvements sont effectués pour analyse (Figure 7).

Un protocole détaillé pour la préparation des mélanges, la constitution des différents bacs et leur suivi a été rédigé et figure en annexe 3.

Les résultats de l'essai sont appréciés à travers l'analyse comparée des bilans matière pour chaque répétition et entre les traitements.

V.2 – Deuxième essai : fumier de chèvre

Les résultats obtenus lors du compostage des 2 substrats n'étant pas concluants, nous avons réalisé un deuxième essai de compostage avec de la litière de chèvre fraîche récupérée dans la chèvrerie de la ferme Lafon de Lacan sur le domaine de Saint Pargoire. Pour ce deuxième essai, nous avons réalisé un seul traitement et quatre répétitions. Les 4 bacs de compostage ont été remplis simultanément en tassant légèrement, leur poids final étant d'environ 11 kg, puis disposés sur la table chauffante n°2. Pour cet essai, les étapes e/ à i/ du protocole du premier essai (Annexe 3) ont été réalisées à l'identique (Photo 7 et 8).

VI – Caractérisation des matières premières et des substrats de compostage

VI.1 – Analyses de base

- La matière sèche (MST): les substrats sont séchés à 65°C avec une pesée avant et après passage à l'étuve. La température de 65°C est un compromis entre les risques de pertes d'éléments volatils et la rapidité du séchage. Le séchage est considéré comme complet lorsque la masse séchée est constante (environ 120 heures pour 10 g de substrat humide).
- La Matière organique (MO) : La teneur en matière organique totale (MO en % de MS) est déterminée par la perte de masse lors d'une calcination à 550°C durant 7 heures, du produit séché à 105°C.
- Les éléments élémentaires C et N : les teneurs en carbone organique (C) et en azote total (N) ont été déterminées à l'aide d'un analyseur ELEMENTAR selon la méthode DUMAS (NF ISO 10694 – juin 1995) (Annexe 4)
- Dosage des ions ammonium et nitrate : leur dosage est effectué par un colorimètre à flux continu « EVOLUTION 2 » de ALLIANCE INSTRUMENTS (Annexe 4).

VI.2 – Analyses spécifiques

VI.2.1 – Fractionnement de la MO selon Van Soest et Carbone biodégradable

- **Objectifs** : La matière organique des déchets végétaux est essentiellement composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine (constituants pariétaux) avec d'autres substances plus

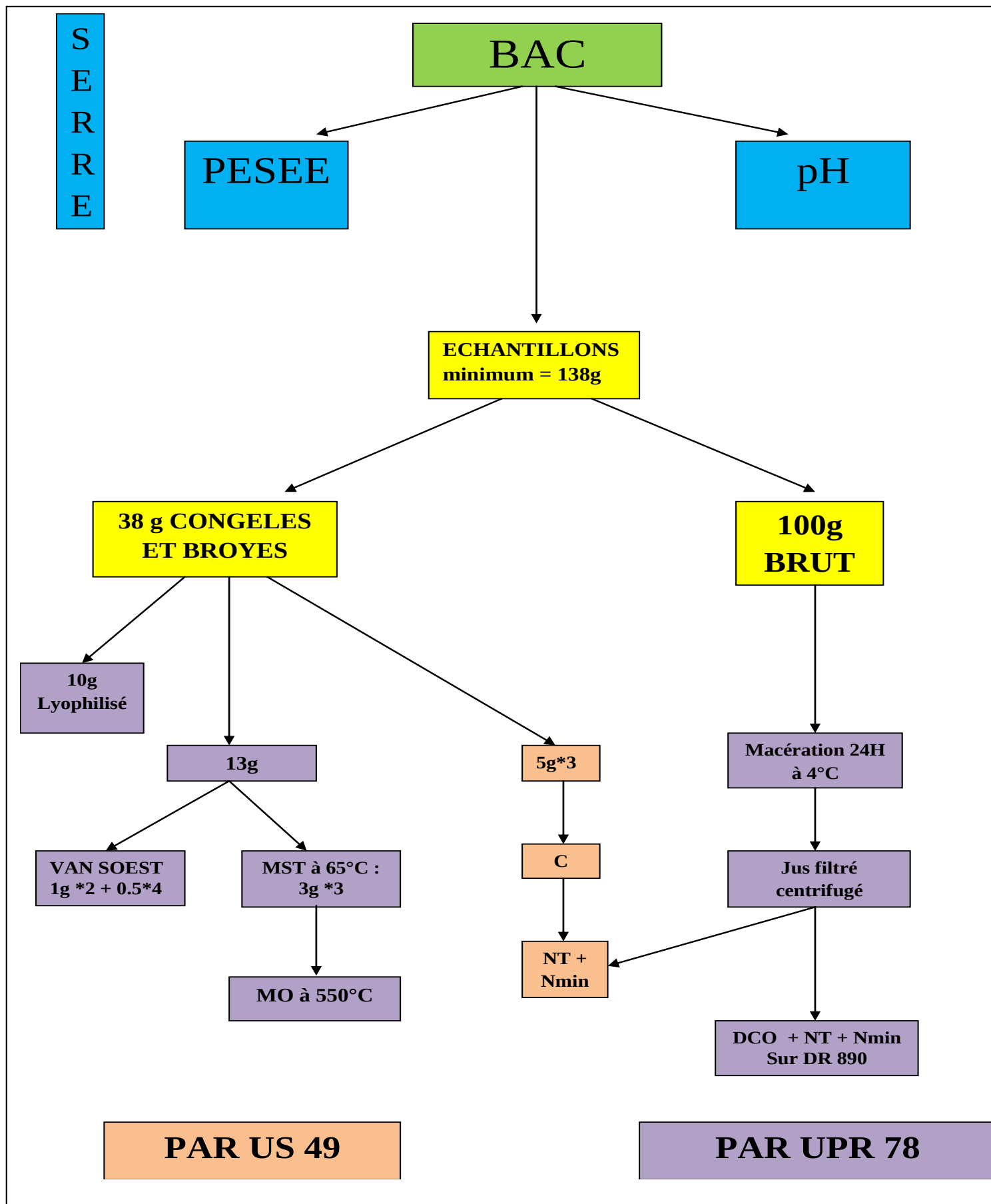


Figure 7 : échantillonnage et répartition des prélèvements

ou moins solubles. Le fractionnement par la méthode de Van Soest est un procédé permettant la quantification des éléments pariétaux présents dans les végétaux. Cette analyse est indispensable, car selon la composition, le compostage se fera plus ou moins vite en sachant que l'hémicellulose est plus facilement biodégradable que la cellulose, elle-même plus facilement biodégradable que la lignine.

- **Principe** : La méthode Van Soest est basée sur la destruction des composés pariétaux sous l'effet de détergents. Les composés, du plus au moins soluble, seront dissous à l'aide de détergents de plus en plus acides pour finalement être calcinés pour détruire la lignine (insoluble avec les détergents utilisés). Les pertes de poids à chaque étape du processus permettent d'apprécier la composition pariétale des produits analysés (Figure 8). Le carbone considéré comme très biodégradable (Cb) regroupe les fractions solubles et hemicellulosiques.

- **Matériels et mode opératoire** : cf. Annexe 5

- **Résultats** Ils sont exprimés en termes de proportions par rapport au produit sec (MST à 105°C) puis rapportés à la MO ou à C.

VI.2.2 – N disponible

- **Principe** : extraction puis dosage de l'azote facilement disponible (Nd) pour les microorganismes par macération du substrat dans l'eau à pH compris entre 4 et 4.5 pour piéger les formes ammoniacales et à une température de 4°C pour éviter la fermentation.

- **Matériels et mode opératoire** : cf. Annexe 6.

- **Résultat** : la concentration en N sera d'abord multipliée par la masse totale en macération pour calculer la quantité d'azote extraite. Celle-ci sera ensuite rapportée à la masse de déchet brut initiale pour obtenir la concentration en Nd.

VI.2.3 – La demande chimique en oxygène

La demande chimique en oxygène (DCO) renseigne sur la quantité de matière organique oxydable. Elle est parfois utilisée comme indicateur de maturité des composts (350 mg O₂ maximum par g de compost mûr). Les matières organiques sont oxydées en milieu sulfurique par un excès de bichromate. La DCO correspond à la fraction qui a été consommée, elle s'exprime en mg d'O₂. Dans notre cas, le dosage est effectué sur le jus de macération obtenu lors du dosage de l'azote disponible. On a utilisé la méthode dite « rapide » basée sur des tubes prêts à l'emploi et selon la norme AFNOR NF T90-101 « Système d'oxydation au bichromate de potassium en milieu sulfurique à 150°C » en utilisant le photomètre HACH DR 890.

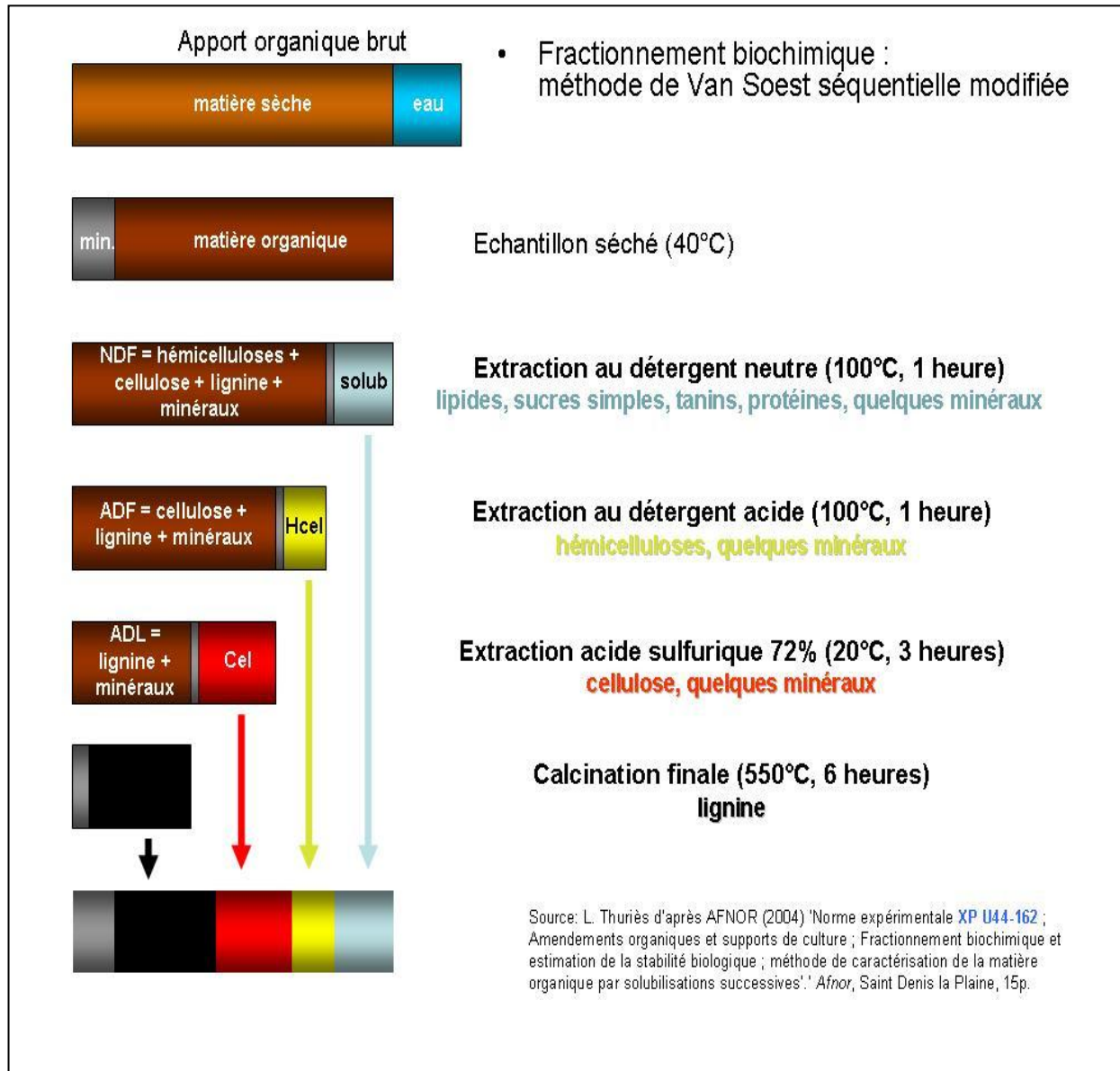
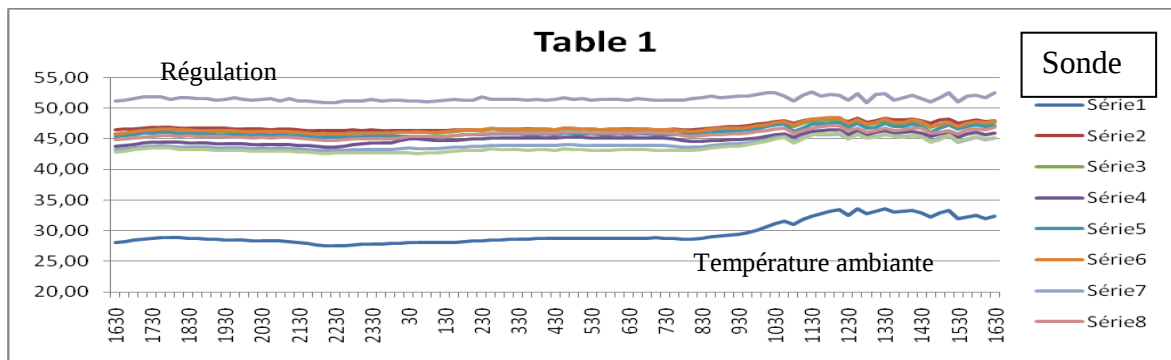
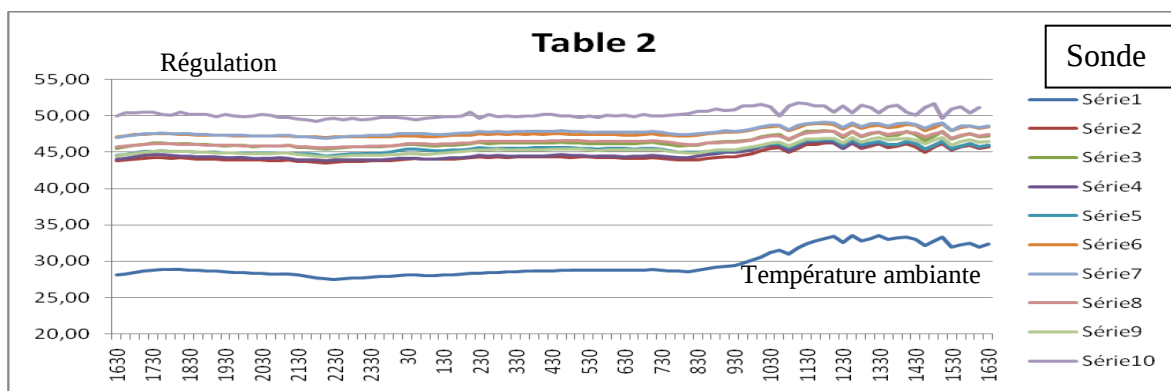


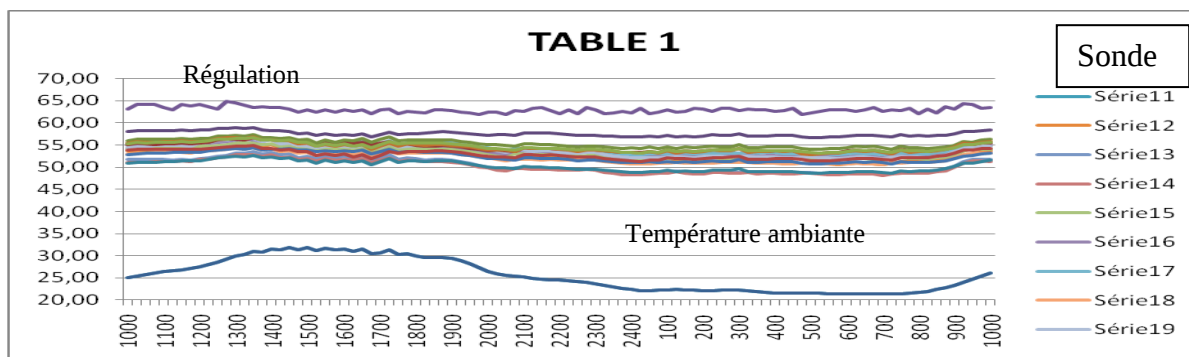
Figure 8 : Illustration des étapes de la procédure Van Soest



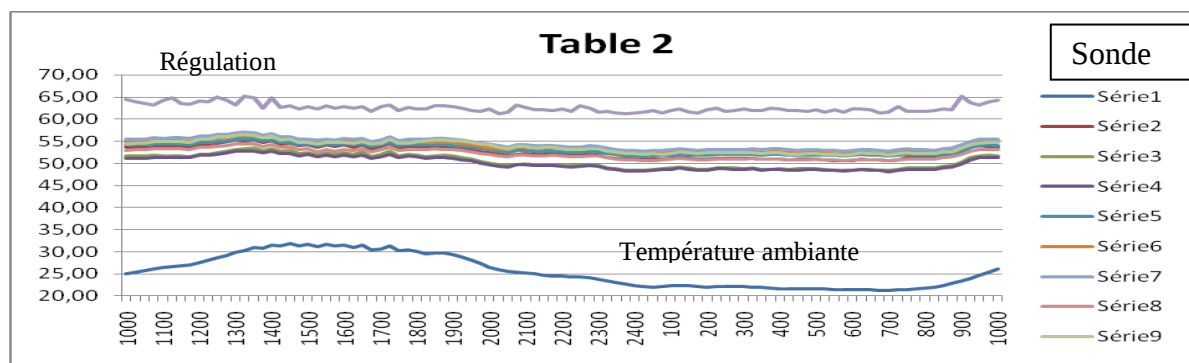
Graphique 1 : Essai à sec à 55°C, table de chauffe N°1



Graphique 2 : Essai à sec à 55°C, table de chauffe N°2



Graphique 3 : Essai à sec à 65°C, table de chauffe N°1



Graphique 4 : Essai à sec à 65°C, table de chauffe N°2

PARTIE 3 : RESULTATS

I – Résultats recueillis dans la banque de données

De mes différentes sources, j'ai pu recueillir 41 références traitant de compostage à petite échelle, c'est-à-dire en réacteur pilote ou de laboratoire. Ces références concernent des déchets très diversifiés allant du fumier aux déchets verts, en passant par des déchets de coquillages. Parmi les dispositifs, seuls 5 avaient un système de chauffage et 4 ont bénéficié d'un apport d'azote externe. Sur les mélanges initiaux, le taux d'humidité pouvait aller de 8 à 75% pour aboutir dans le compost final entre 22 et 72%. Le carbone biodégradable n'a jamais été renseigné et seulement 2 articles ont renseigné le carbone soluble. La durée de la phase thermophile s'étend de 8 à 193 jours (mélange rafles/pulpe/boue/vinasse en andain) et les températures se sont élevées de 55°C jusqu'à 85°C. Pour le compost final, le rendement en MST est peu renseigné (7 articles) contrairement au rendement en carbone qui varie de 31 à 92%. Les pertes en azote, quant à elles, vont de 0 à 56%.

II – Essais thermiques du banc

II.1 – L'essai à sec

II.1.1 – Les données

Pour vérifier l'homogénéité de la chauffe par table et entre les deux tables, nous avons disposé 8 thermocouples par table sur les empreintes des réacteurs de compostage et les mesures de température ont été récoltées grâce à la centrale d'acquisition programmée spécifiquement pour cet essai.

Les données sont représentées sur 24 heures, graphiques 1 et 2 pour l'essai à 55°C et 3 et 4 pour l'essai à 65°C. Ces graphiques montrent qu'il y a une évolution parallèle des températures pour les deux essais ; dans le détail il y a cependant des courbes qui se croisent. On observe des températures différentes en divers points d'une table et ces différences sont persistantes.

II.1.2 – Le traitement statistique

• Sur chaque table les températures sont-elles homogènes ?

Les coefficients de variation sont de 1,45% pour la table 1 et 1,50% pour la table 2 pour l'essai à 55° (Tableau 3). Si l'on admet qu'un coefficient de variation de moins de 5% est un indicateur d'une bonne homogénéité des mesures, on peut donc dire que chaque table chauffe de la même façon pour cette consigne. De plus, les coefficients de variation des mesures relevées par chaque sonde sont aussi tous inférieurs à 5%, ce qui signifie qu'au cours du

Tableau 3 : caractéristiques de variation des 16 thermocouples et des tables de chauffe 1 et 2 pour l'essai à sec à 55°C

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Table 1
Minimum	45,3	43,6	45,3	44,0	46,2	47,0	46,1	46,5	45,8
Maximum	47,9	46,7	47,6	46,6	48,8	49,0	48,2	48,8	48,3
Moyenne	46,8	45,4	46,6	45,4	47,7	48,0	47,3	47,7	47,1
Ecart-type	0,7	0,8	0,6	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
Amplitude	2,6	3,1	2,3	2,6	2,6	2,0	2,1	2,3	2,5
Coeff. variation (%)	1,48	1,81	1,29	1,66	1,34	1,20	1,22	1,34	1,45
	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	Table 2
Minimum	47,5	47,1	44,3	48,3	45,8	44,2	44,8	44,2	45,5
Maximum	49,7	49,1	47,0	50,1	48,5	47,2	47,4	47,3	47,9
Moyenne	48,6	48,0	46,0	49,2	47,3	45,8	46,5	45,7	46,9
Ecart-type	0,6	0,6	0,7	0,5	0,7	0,8	0,6	0,9	0,7
Amplitude	2,2	2,0	2,6	1,8	2,8	3,0	2,4	3,1	2,4
Coeff. variation (%)	1,22	1,29	1,49	1,06	1,54	1,82	1,38	2,07	1,50

Tableau 4 : caractéristiques de variation des 16 thermocouples et des tables de chauffe 1 et 2 pour l'essai à sec à 65°C

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Table 1
Minimum	50,6	48,4	48,2	51,6	52,2	52,8	50,6	51,9	50,8
Maximum	55,4	53,5	53,0	55,6	56,3	57,0	54,4	56,4	55,2
Moyenne	52,7	50,6	50,3	53,3	54,0	54,6	52,3	53,9	52,7
Ecart-type	1,7	1,9	1,7	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5
Amplitude	4,8	5,1	4,8	4,0	4,1	4,2	3,8	4,5	4,4
Coef. Variation %	3,18	3,72	3,43	2,55	2,62	2,61	2,61	2,74	2,91
	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	Table 2
Minimum	53,1	54,1	56,6	48,6	52,9	50,7	51,3	53,2	52,6
Maximum	56,6	57,2	58,7	52,6	56,7	54,4	54,7	56,6	55,9
Moyenne	54,6	55,5	57,6	50,5	54,6	52,4	53,0	54,7	54,1
Ecart-type	1,1	1,0	0,6	1,5	1,2	1,3	1,1	1,1	1,1
Amplitude	3,5	3,1	2,1	4,0	3,8	3,7	3,3	3,4	3,3
Coef. Variation %	2,03	1,87	1,01	2,89	2,21	2,45	2,14	2,06	2,05

Vérifiez les conditions de validité

1. Homogénéité des variances

1.1. Homogénéité inter-groupes

F	F limite 95%
2,59	4,99

Les variances entre groupes ne sont pas trop hétérogènes

1.2. Homogénéité intra-groupes

F	F limite 95%
1,61	1,67

Les variances intra-groupes ne sont pas trop hétérogènes

Figure 9 : Conditions de validité de l'essai à sec à 55°C

temps et malgré les variations de la température ambiante (effet jour/nuit sous serre), la chauffe de la table induit des températures de surface homogènes.

Pour l'essai à sec à 65°C, les mêmes conclusions s'imposent (tableau 4). Les coefficients de variation sont de 2.91% pour la table 1 et de 2.05% pour la table 2 et tous les coefficients de variation des mesures relevées par chaque sonde sont inférieurs à 5%.

On peut donc conclure que la chauffe des deux tables est homogène en tous points pour les 2 consignes testées.

• Y a-t-il une différence significative entre les deux tables pour l'essai à sec à 55°C et à 65°C ?

Du fait que nos données sont des mesures répétées dans le temps, elles sont appariées, nous avons donc utilisé le test ANOVA à 2 dimensions, une dimension inter sujets (niveaux indépendants) et une intra (mesures répétées, dépendantes).

Comme pour les analyses de variance classiques, les conditions de validité du test concernent l'homogénéité des variances :

- **Homogénéité des variances inter-sujets** : Il est possible de réaliser pour chaque sonde la somme des mesures répétées. Ces totaux par sujets doivent présenter des variances homogènes d'un groupe à l'autre. Comme il y a plus de deux groupes indépendants on pourra utiliser le test du FMax (ou test de Hartley). On considère toutefois que l'analyse de variance est relativement robuste même si cette condition n'est pas tout à fait respectée.
- **Homogénéité des variances intra-sujets** : elle revient ici à dire que les interactions Heure x Sondes sont constantes entre les groupes indépendants. Il suffit alors de calculer cette interaction dans chaque groupe et d'en faire le rapport, l'hétérogénéité étant vérifiée par le test du FMax.

Dans nos essais à 55°C et à 65°C, les conditions de validité sont respectées (Figures 9 et 10). Sous le logiciel R, les données sont présentées ainsi :

- un facteur Table à 2 modalités indépendantes,
- un facteur Heure à 178 niveaux appariés,
- un facteur Thermocouple à 16 niveaux (facteur « individus »).

Les résultats des deux essais montrent que la différence entre les deux tables n'est pas significative, que la variation entre les heures est significative et que les changements au cours du temps ne sont pas les mêmes sur les deux tables (Figure 11 pour l'essai à 55°C et Figure 12 pour l'essai à 65°C). Autrement dit, les deux tables chauffent de la même façon, mais la

Vérifiez les conditions de validité

1. Homogénéité des variances

1.1. Homogénéité inter-groupes

F	F limite 95%
1,63	4,99

Les variances entre groupes ne sont pas trop hétérogènes

1.2. Homogénéité intra-groupes

F	F limite 95%
1,65	1,67

Les variances intra-groupes ne sont pas trop hétérogènes

Figure 10 : condition de validité essai à sec à 65°C

Résultat logiciel R

```
> res<-aov(Mesure ~ Table*Heure + Error(Sonde / Heure))
```

```
> summary(res)
```

Error: Sonde

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Table	1	255.16	255.16	1.2776	0.2773
Residuals	14	2796.00	199.72		

<= la différence entre les tables n'est pas significative

Error: Sonde : Heure

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Heure	177	1179.76	6.6653	17.8283	< 2.2e-16 ***
Table:Heure	177	100.48	0.5677	1.5184	2.402e-05 ***
Residuals	2478	926.43	0.3739		

<= la variation selon les heures est significative

<= l'interaction est significative :

les changements au cours du temps ne sont pas les mêmes pour les deux tables

Figure 11 : résultat du test ANOVA à 2 dimensions, une inter (niveaux indépendants) et une intra (mesures répétées, dépendantes) sous R, pour l'essai à 55°C

température extérieure induit une fluctuation de la chauffe et cette fluctuation n'est pas la même sur les deux tables.

II.2 Les essais en humide

Pour ces essais nous avons mesurés la température dans le matériau imprégné à l'eau de Javel pour empêcher toute fermentation. Cet essai a concerné deux matériaux différents : paille de blé et copeaux avec deux répétitions, soit 4 bacs par table, pour 5 valeurs de température de consigne (50, 55, 60, 65, 70°C). Dans chaque bac étaient disposés deux thermocouples et une sonde d'humidité. Nous avons collecté les mesures de température pendant 3 jours pour chaque valeur de température de consigne afin de tracer les courbes de chauffe par matériau et par table, en exprimant la température du matériau humide en fonction de la température de consigne.

Les courbes de chauffe (Graphique 5 pour la table 1 et Graphique 6 pour la table 2) montrent d'une part, que la température est très homogène dans les copeaux imprégnés mais beaucoup moins dans la paille (les écarts-types étant beaucoup plus importants) et d'autre part, que la température atteinte par les copeaux est supérieure à celle de la paille. Cette différence est due à l'influence de la teneur en eau sur la porosité des substrats et donc sur les échanges thermiques.

On peut constater aussi, pour les 2 tables, que la température atteinte par les matériaux est une fonction linéaire de la température de consigne dans la gamme testée, le coefficient de régression étant de 0.99 pour les 2 courbes de chauffe des copeaux et de 0.88 et 0.81 pour les courbes de chauffe de la paille.

III – Caractéristiques des matières premières et des mélanges

III.1 – Premier essai de compostage

III.1.1 – Les matières premières

Avant de préparer les essais, divers échantillonnages et analyses physico-chimiques des matériaux initiaux ont été réalisés (Tableau 5 pour les matériaux structurants et Tableau 6 pour la vinasse concentrée). Les résultats nous sont parvenus tardivement.

Les matériaux structurants sont très secs. Il semble, d'après les analyses, bien adaptés pour répondre au besoin d'apport de carbone dans les mélanges car leur C/N est très élevé (Tableau 5). L'azote disponible dans ces matériaux ne représente qu'une très faible part de l'azote total. La vinasse, quant à elle, est très riche en matière minérale (40%

Résultat de l'analyse de variance

TABLEAU DE L'ANALYSE DE VARIANCE

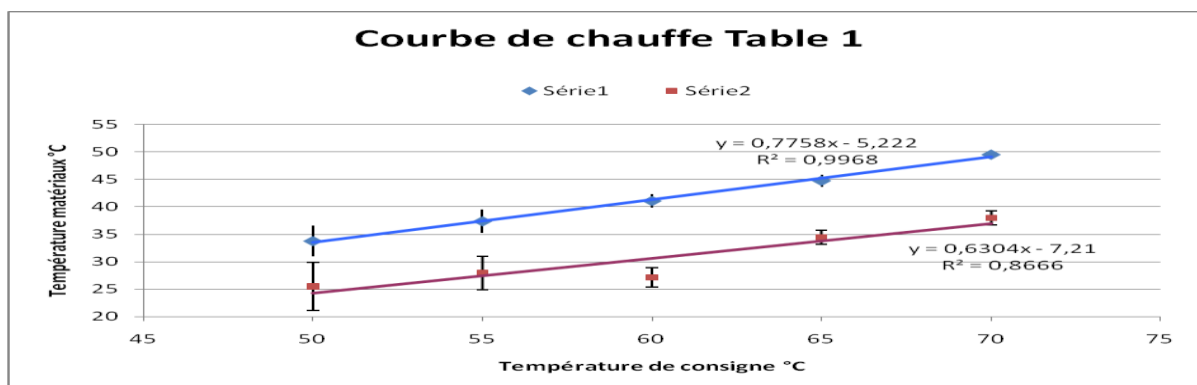
Sources	SCE	ddl	CM	F	F limite à 5%	F limite à 1%	p
Entre groupes	845,61	15	56,37				
Groupes indép	92,40	1	92,40	1,72	4,60	8,86	0,21110
Intra groupes	753,21	14	53,80				
Intra groupes	95,98	224					
Répétitions	86,48	14	6,18	265,09	1,74	2,17	0,00000
GroupesxRépétition	4,93	14	0,35	15,11	1,74	2,17	0,00000
Répétition Sujets	4,57	196	0,02				

La différence entre groupes indépendants n'est pas significative

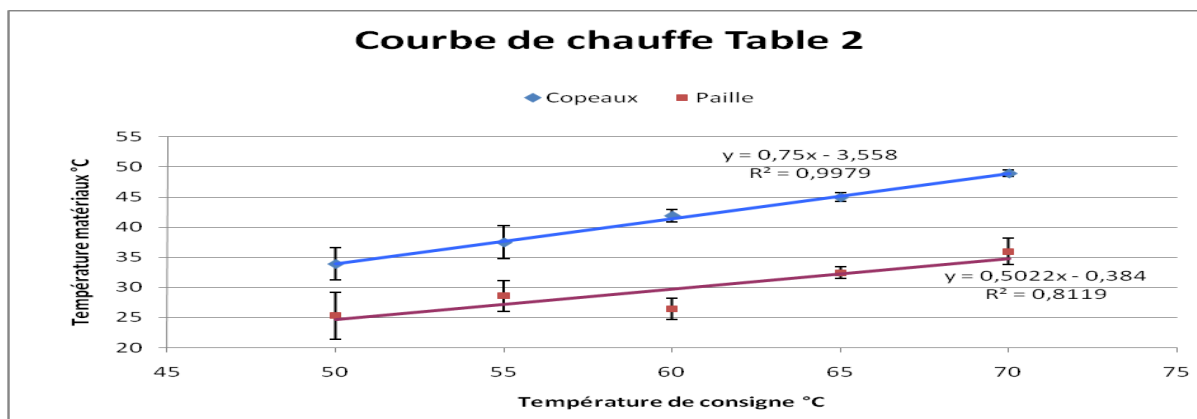
Le changement au cours des mesures est significatif à 1%

L'interaction Groupes x Répétitions est significative à 1%

Figure 12 : résultat du test ANOVA à 2 dimensions, une inter (niveaux indépendants) et une intra (mesures répétées, dépendantes), pour l'essai à sec à 65°C



Graphique 5 : courbe de chauffe de la table chauffante 1



Graphique 6 : courbe de chauffe de la table chauffante 2

de la MST) et elle apporte de l'azote dont 10% environ sous forme disponible. Son rapport DCO/DBO est inférieur à 2 (1.1) ce qui nous indique qu'elle est très biodégradable (tableau 6).

III.1.2 – Les mélanges initiaux

Le mélange copeaux/vinasse a un pH de 7.4 et un taux d'humidité de 70%, tandis que le mélange paille/vinasse a un pH de 6.6 et un taux d'humidité de 55% (Tableau 7). Ce dernier est donc dans la limite minimale du taux d'humidité, en deçà l'activité des microorganismes pourrait être inhibée.

Les mélanges ont été réalisés afin d'obtenir un rapport C/N similaire d'environ 35. Or, après analyse, on constate que ce rapport est égal à 16 pour le mélange paille/vinasse et 26 pour le mélange copeaux/vinasse. Ceci est dû à l'emploi d'anciens résultats d'analyse et il s'avère, en comparant les taux de C et N des analyses antérieures (Tableaux 1 et 2) aux résultats d'analyses plus récents (Tableaux 5 et 6), que la vinasse a perdu beaucoup de carbone ($278 \text{ g.kg MST}^{-1}$ contre $129.6 \text{ g.kg MST}^{-1}$) et la paille beaucoup d'azote ($3.90 \text{ g.kg MST}^{-1}$ contre $2.97 \text{ g.kg MST}^{-1}$). La quantité d'azote disponible est 6 fois plus importante dans le mélange copeaux/vinasse que dans le mélange paille/vinasse (Tableau 7), ce qui est normal compte tenu de l'apport de nitrate d'ammonium.

D'après l'analyse Van Soest (Graphique 7), le mélange paille/vinasse a un taux de matière organique facilement biodégradable assez faible (20% de la masse totale du support) et c'est pire pour le mélange copeaux/vinasse (14%). Le taux de lignine est très faible dans le mélange pailleux car il est inférieur à 5% (1.7%) ; en revanche ce taux est de 11.4% dans le mélange à base de copeaux ce qui n'est pas négligeable. Ce résultat semble logique car la paille est généralement récoltée avant la phase de lignification des graminées afin d'avoir une bonne qualité pour l'alimentation animale. Concernant le taux de cendres, c'est-à-dire les substances minérales non biodégradables, nous constatons qu'il est assez élevé, environ 20% de la masse totale du support, dans les deux mélanges.

D'un point de vue général, ces résultats d'analyse laissent présager que le processus de dégradation risque d'être relativement long.

III.2. – Deuxième essai de compostage

Tous les résultats d'analyses du fumier de chèvre ne sont pas disponibles car les délais du laboratoire sont relativement longs. Les taux d'humidité et de MO mesurés par nos soins (Tableau 8) sont classiques pour du fumier. Par contre le pH est anormalement élevé et la DCO est faible par rapport aux mélanges utilisés précédemment.

Tableau 5 : Caractéristiques des matériaux structurants à l'état initial

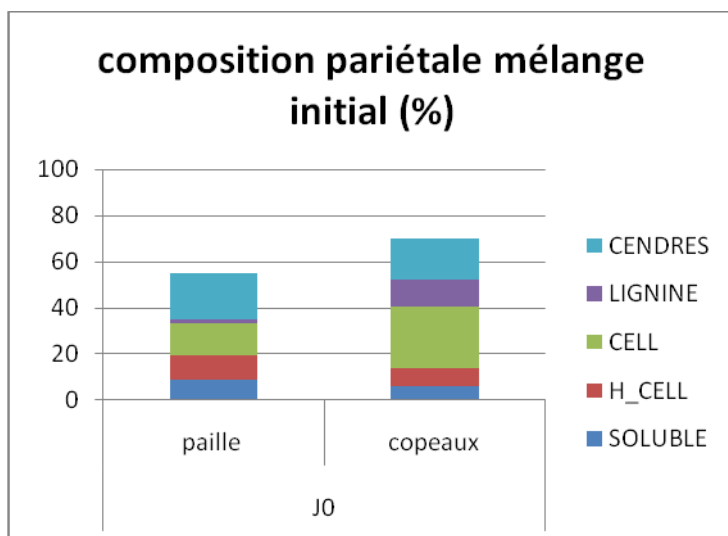
Matières structurantes	pH extrait 1/5	MST (%)	MO (% MST)	C (g. kg MST ⁻¹)	N (g. kg MST ⁻¹)	C/N	Nd (g. kg MST ⁻¹)
Paille de blé	8.3	92.81	94.96	429.17	2.97	144	35.71
Copeaux de chêne	7.2	93.21	99.06	475.64	1.08	441	25.88
Copeaux fins	7.3	94.13	99.78	466.38	1.10	425	23.25

Tableau 6 : Caractéristiques de l'effluent à l'état initial

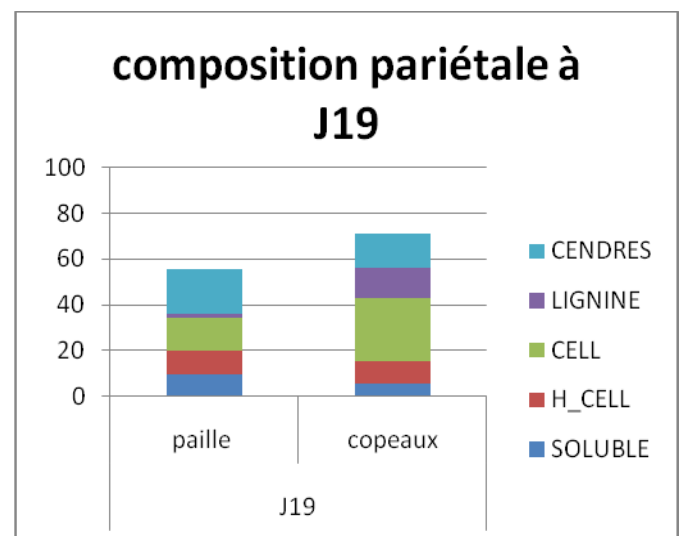
Effluent	pH extrait 1/5	MST (%)	MO (% MST)	C (g. kg MST ⁻¹)	N (g. kg MST ⁻¹)	C / N	DCO (mg d'O ₂ /L)	DCO/ DBO	Nd (g. kg MST ⁻¹)
Vinasse concentrée à 60%	6.5	59.27	698.06	129.57	21.83	6	486698	1.1	2.40

Tableau 7 : Caractéristiques des mélanges initiaux du premier essai

Mélange	pH extrait 1/5	MST (%)	MO (% MST)	C (g. kg MST ⁻¹)	N (g. kg MST ⁻¹)	C/N	Nd (g. kg MST ⁻¹)	DCO (mg.kg MST ⁻¹)
Paille/vinasse	6.6	44.53	95.82	191,46	12,24	16	0.94	28523
Copeaux/vinasse	7.4	30.81	96.72	146,12	5,51	26	5.70	14511



Graphique 7 : Résultats de l'analyse Van Soest sur les mélanges initiaux



Graphique 8 : Résultats de l'analyse Van Soest sur les mélanges à J 19

IV – Déroulement du compostage

IV.1 – Premier essai

IV.1.1 – Évolution de la température et régime de fermentation

La température du mélange paille/vinasse est montée plus rapidement que celle du mélange copeaux/vinasse. Les bacs ont atteint en moyenne 50°C en 36 heures puis leur température moyenne a ensuite varié entre 40 et 50°C, soit un niveau à peine supérieur à celui atteint par la paille humide. En 36 heures, les bacs « copeaux » n'ont atteint que 45°C en moyenne puis leur température a continué à augmenter pour dépasser 50°C en 72 heures et elle s'est stabilisée autour de cette valeur qui est similaire à celle atteinte par les copeaux humides (Graphique 9 et 10). A J3, J6 et J19, les bacs ont été entièrement vidés, les substrats ont été mélangés afin d'apporter de l'O₂, la température est ensuite remontée autour de 50°C et s'est maintenue. La température ne dépassant pas 55°C, cela nous indique que les substrats ne sont pas rentrés en phase thermophile donc qu'il n'y a pas de fermentation.

Après 20 jours les bacs n'étant visiblement toujours pas entrés en fermentation thermophile, nous avons décidé de vérifier la présence de micro-organismes dans les mélanges en ensemençant des milieux bactériens (GNO) avec des jus extraits des mélanges de chaque bac obtenu par agitation de 100 g de matière dans 300 ml d'eau distillée pendant 4 h. Nous avonsensemencé 2 boîtes de Pétri par bac, une incubée à 37°C pour vérifier la présence de bactéries mésophiles et l'autre à 55°C pour vérifier la présence de bactéries thermophiles. Après 24 heures nous avons pu constater la présence de bactéries mésophile non exigeantes en très faible quantité (quelques dizaine de colonies par boîte, de 5 types différents), et de champignons non exigeants. Nous avons également constaté l'absence de bactéries thermophiles et la présence de champignons thermophiles.

IV.1.2 – Bilans matière

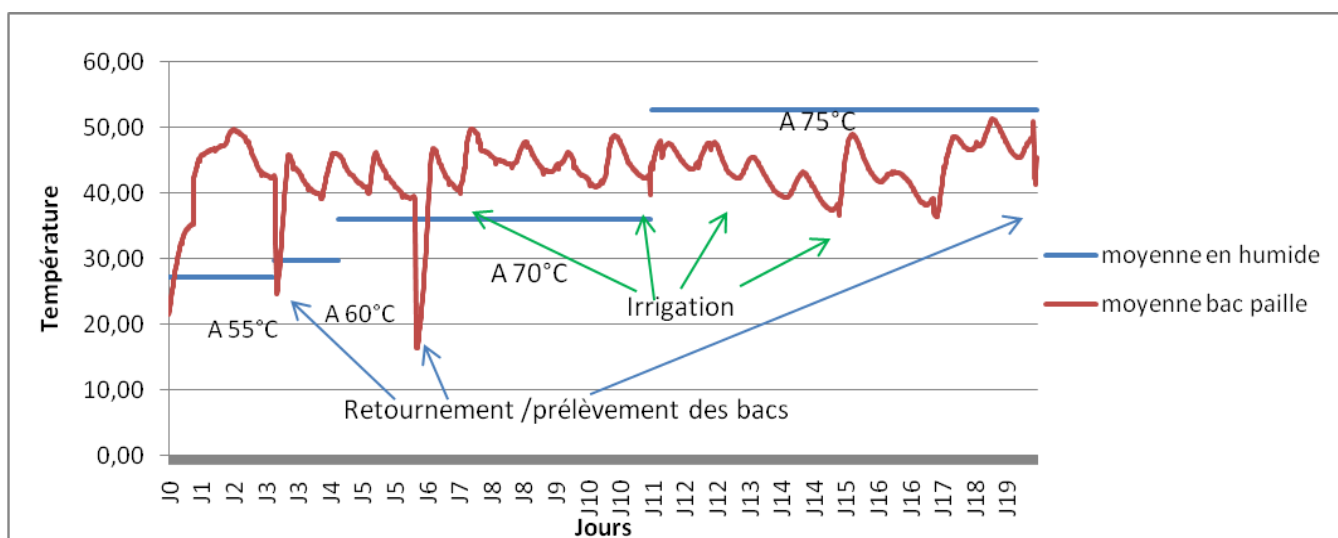
La variation de la MST, de la MO et du carbone, inférieure à 15%, n'est pas significative compte tenu des modes opératoires et de la difficulté d'obtenir un prélèvement puis une prise d'essai représentatifs du contenu des bacs.

La perte de poids entre J0 et J19 (paille 10%, copeaux 3%) est due essentiellement à une perte d'humidité compte tenu de l'ambiance extrêmement sèche régnant dans la serre. Le taux de MST et de MO sont restés stables durant toute l'expérience (Tableau 9).

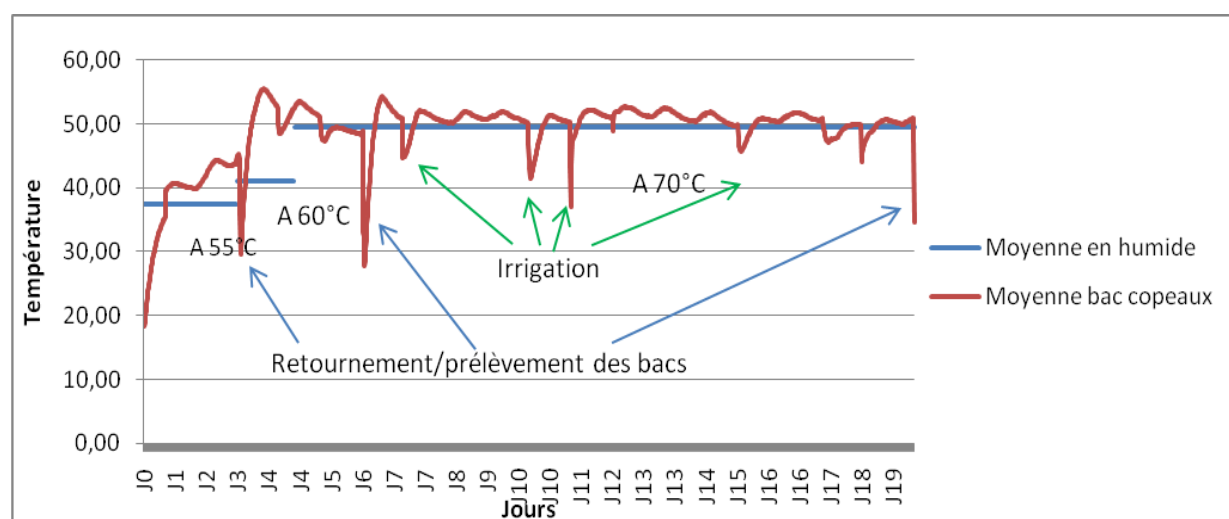
La quantité de matière organique lors du compostage doit diminuer et sa dégradation conduit à la formation de dioxyde de carbone et d'eau. Au cours de cet essai on ne constate aucune diminution, ce qui confirme qu'il n'y a pas de fermentation. La légère augmentation

Tableau 8 : caractéristiques du substrat du deuxième essai

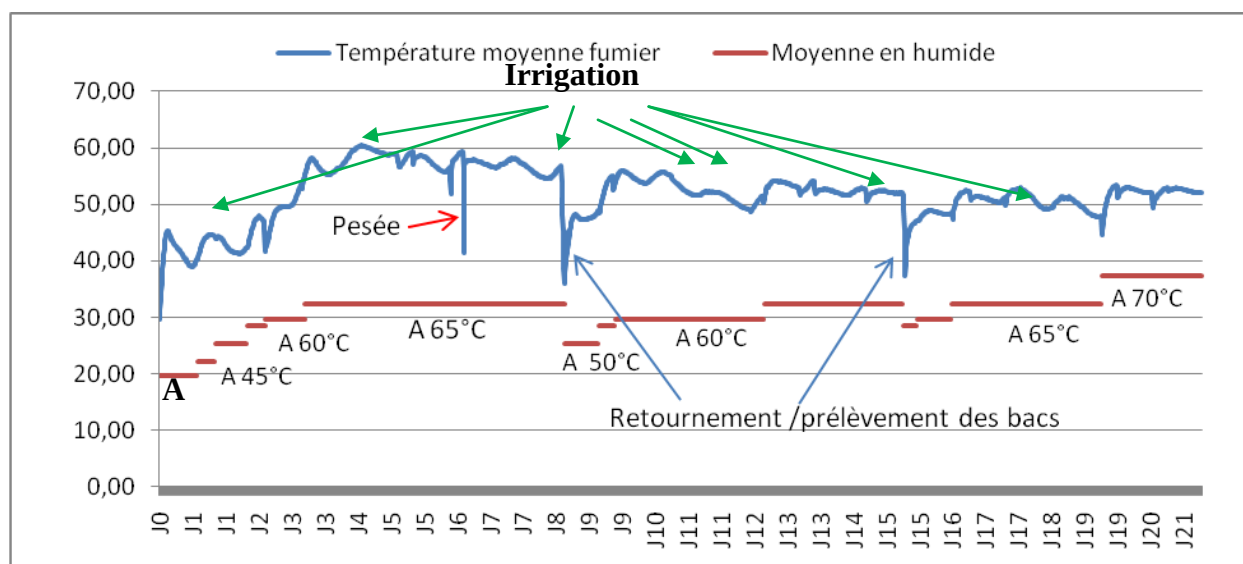
Mélange	pH extrait 1/5	MST (%)	MO (% MST)	C (g. kg MST ⁻¹)	N (g. kg MST ⁻¹)	C/N	Nd	DCO (mg.kg MST ⁻¹)
Fumier	9.1	45.57	95.73					6447



Graphique 9 : Évolution de la température, mélange paille/vinasse – Essai compostage 1



Graphique 10 : Évolution de la température, mélange copeaux/vinasse – Essai compostage 1



Graphique 11 : Évolution de la température du fumier – Essai compostage 2

de la quantité de carbone entre J0 et J3 est due à l'échantillonnage. L'analyse Van Soest en fin d'expérience (J19) montre que les composants pariétaux des substrats n'ont subi aucune modification (Graphique 8). Pour l'azote, on observe surtout une perte de 30% dans les copeaux et moins de 10% dans la paille.

Nous signalerons qu'au cours de l'essai nous avons relevé à partir du 3^{ème} jour des valeurs de pH très élevées, 9.5 à 10, dans les 2 mélanges et ce alors que le pH au départ était voisin de 7.

IV.2 – Deuxième essai

IV.2.1 – Évolution de la température et régime de fermentation

La température moyenne dans les bacs est montée rapidement pour atteindre 60°C le quatrième jour puis s'est maintenue au dessus de 55°C jusqu'au huitième jour (Graphique 11). A J8, l'écart entre la température ambiante et la température moyenne des bacs ayant tendance à diminuer, nous avons procédé au mélange de chacun des bacs afin de les homogénéiser et d'apporter de l'oxygène au milieu. Après chaque mélange à J8, J15 et J22, la température est remontée jusqu'à plus de 55°C et s'est maintenue bien au-delà de la température du mélange humide similaire. Le graphique 12 montre la différence de comportement de la température entre le premier essai, caractérisé par l'absence de fermentation, et le deuxième, pour lequel la phase thermophile du compostage fut très active.

IV.2.2 – Bilans matière

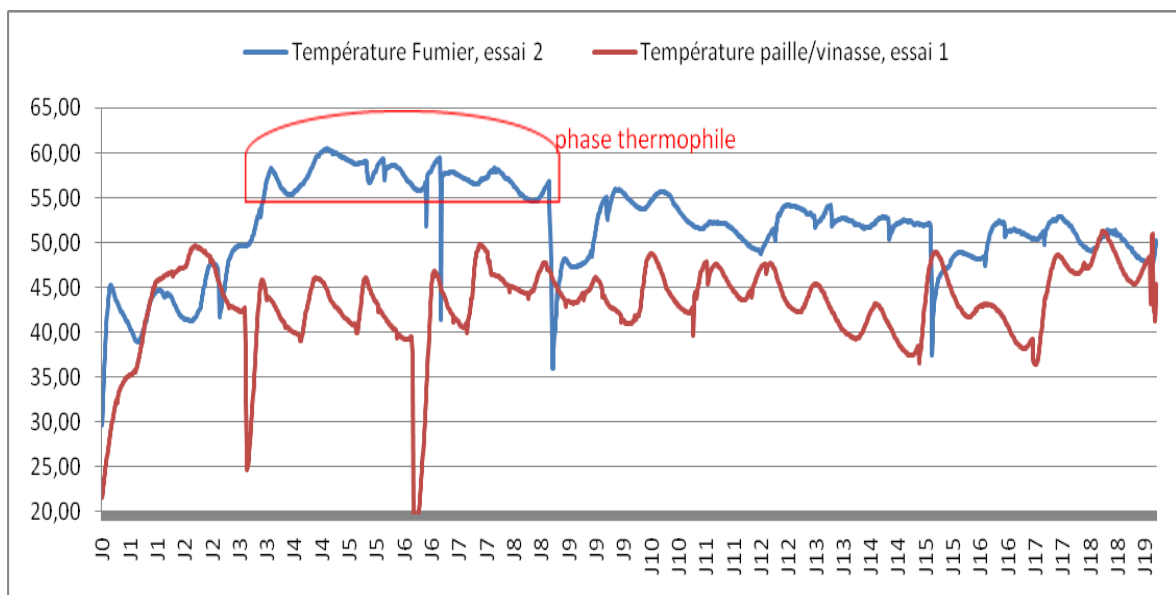
On a observé une perte de poids de près de 40% entre J0 et J22, ainsi qu'une perte de 90% en volume sur 22 jours (Tableau 10).

Une couche de 20 cm d'actinomycètes était observable durant les 10 premiers jours et de nombreux champignons ont colonisé le fumier, ce qui est le signe d'une activité biologique importante (Annexe 7 : Photos 9 et 10).

Nous avons également observé une perte moyenne de MST de plus de 60% et une diminution moyenne de la MO de 64% en 22 jours. La densité, quant à elle, a augmenté de près de 70%.

		J3	J6		J19	
		Perte par rapport à J0 en %	Perte par rapport à J3 en %	Perte par rapport à J0 en %	Perte par rapport J6 en %	Perte par rapport J0 en %
Masse	paille	11,4	5,7	16,5	-7,2	10,4
	copeaux	9,8	-2,5	7,5	-5,3	2,7
MST	paille	1,8	0,4	2,2	9.0	11.0
	copeaux	0,4	5,8	6,2	7.0	13.0
MO	paille	0,4	0,1	0,5	0	1
	copeaux	0,4	1,6	2,0	0	2
C	paille	-6,2	7,3	1,5		
	copeaux	-13,1	10,4	7,8		
N	paille	6,9	1,8	8,6		
	copeaux	-3,6	33,2	30,8		
Nd	paille	-21,4	12,5	-6,2		
	copeaux	18,9	-18,1	4,3		

Tableau 9 : Bilan matière essai compostage 1



Graphique 12 : comparaison des évolutions des températures essai 1/essai 2

	J0	J8	Perte par rapport à J0 (%)	J15	Perte par rapport à J0 (%)	J22	Perte par rapport à J0 (%)
Masse (kg)	10,9	8,6	26	7,5	43	7,2	39
MST (kg)	5,0	3,3	27	2,5	52	2,1	61
MO (kg)	4,8	3,2	26	2,3	53	1,9	64
volume (L)	48	35	23	21	41	5	90
Densité (kg/m3)	230	264	-15	298	-30	383	-67

Tableau 10 : Bilan matière essai compostage 2

PARTIE 4 : DISCUSSION

Par rapport au contexte décrit dans l'introduction, les travaux du projet ISARD proposent de développer des méthodes et des outils permettant à plusieurs catégories d'acteurs et à différentes échelles, d'augmenter la production agricole par la mise en œuvre des pratiques de recyclage, notamment à travers la modélisation des systèmes complexes associant processus biophysiques (par exemple le compostage) et dynamique sociale. Les connaissances acquises permettront d'assurer une meilleure utilisation des fonctions de maintien de la fertilité des sols, de nutrition des plantes et d'activités biologiques, tout en réduisant les pertes dans l'écosystème.

Le compostage des mélanges de déchets et d'effluents organiques est influencé par différents facteurs qui dépendent de variables ayant essentiellement trait aux caractéristiques physico-chimiques des substrats initiaux et à leur comportement en mélange (Figure 13). Notre objectif est de formaliser l'influence de ces variables sur le déroulement de la phase thermophile du compostage et, ceci, en vue d'une modélisation.

Bien que le compostage en réacteur soit souvent controversé, par le fait qu'il ne représente pas la réalité d'un compostage à grande échelle, notre objectif est de déterminer le potentiel de compostage des déchets en optimisant la température et en observant l'influence de l'humidité, de la porosité et des proportions de carbone facilement biodégradable et d'azote disponible pour les micro-organismes.

L'objectif premier de nos essais était de caler le banc de compostage et de vérifier la répétabilité des résultats pour pouvoir ensuite réaliser des essais avec des mélanges extrêmes (faible/fort taux d'humidité, faible/fort rapport C/N, faible/forte granulométrie etc.). Les résultats permettront de définir les conditions aux limites de la modélisation.

La banque de données bibliographiques sur le compostage en réacteur pilote ou de laboratoire constitue une autre voie pour appréhender l'influence des paramètres du compostage. Elle mérite d'être complétée par d'autres références avant d'être analysée par des méthodes adaptées, par exemple l'analyse en composante principale.

Le traitement statistique des essais à sec a établi l'homogénéité de la chauffe à la surface des tables, ce qui nous a permis de disposer nos réacteurs de façon aléatoire sans avoir à les changer de place pour pallier aux variations.

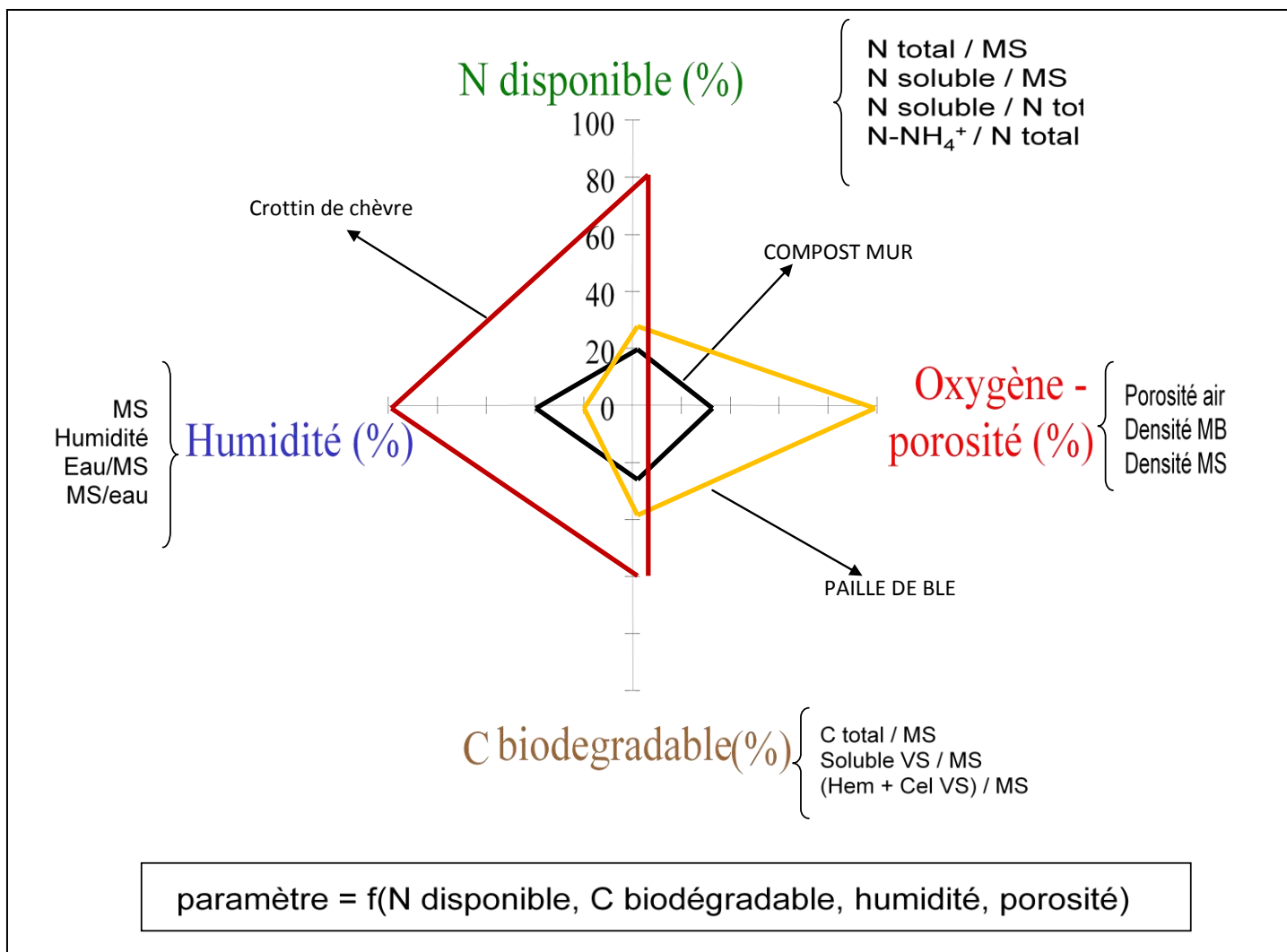


Figure 13 : Facteurs clés du compostage

Les courbes de chauffe obtenues grâce aux essais en humide nous ont permis d'accompagner la montée en température puis de la maintenir pendant la phase thermophile du compostage. La différence de température atteinte par les 2 types de matériaux humides est de 10 à 15°C. Elle peut être attribuée à leur différence d'humidité (55 contre 70%) qui induit des espaces lacunaires plus importants dans la paille, ce qui favorise les échanges thermiques avec le milieu extérieur (convection).

Le premier essai de compostage de mélanges imprégnés n'a pas été concluant ; en effet il n'y a pas eu de fermentation et donc pas de phase thermophile, ni de dégradation de la matière organique. Les résultats obtenus sont concordants, la température n'a pas dépassé celle des matériaux humides similaires et le bilan matière est resté stable. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que la paille et les copeaux, stockés de longue date dans la serre, de même que la vinasse concentrée, stockée en chambre froide depuis 3 ans, soient pratiquement

stériles. De plus, les mélanges ont été réalisés à partir de résultats d'analyse anciens et malgré la conservation en chambre froide à 4°C la vinasse a perdu plus de 50% de son carbone tandis que la paille a perdu 25% d'azote. Nos prévisions pour le rapport C/N ont donc été faussées. Enfin les analyses ont révélé que la composition pariétale des mélanges n'était pas propice à un processus de dégradation rapide. Nous n'avons par ailleurs pas d'explication par rapport aux valeurs de pH très élevées qui ont été relevées au cours de l'essai (pollution par la bétonnière lors des mélanges ?). Ces valeurs sont *a priori* peu propices à l'implantation d'une microflore bactérienne indispensable au compostage. C'est à notre avis l'ensemble de ces éléments négatifs qui ont conduit à l'échec de ce premier essai de compostage.

Le deuxième essai est entré en phase thermophile au bout de 3 jours, ce qui a révélé une fermentation intense. Les tables chauffantes ont maintenu la température des réacteurs autour de 55°C malgré une variation importante de la température extérieure (période fraîche lors de l'essai) et en dépit du faible volume des bacs. Bien que l'ensemble des résultats d'analyse ne soit pas disponible, nous avons pu observer une dégradation très rapide de la matière organique avec une activité biologique très intense en début de phase thermophile. Les réductions du volume et des masses (brute, MST et MO) ont été très importantes en l'espace de 2 semaines. Dans ce cas, le pH élevé du fumier au départ n'a pas été un obstacle, certainement parce que la microflore était déjà présente et adaptée à ces conditions.

PARTIE 5 : CONCLUSION

L'intérêt premier du compostage est de permettre une meilleure gestion des déchets et des effluents organiques en réduisant les risques de pollution des eaux et de dégagement de gaz à effet de serre. Le produit final obtenu, le compost, permet le maintien de la fertilité des sols et l'immobilisation de carbone au même titre par exemple que les systèmes de couverture végétale (SCV). Cet aspect est particulièrement important dans les pays du sud où la surabondance de déchets organiques en milieu urbain se conjugue avec le coût croissant des fertilisants chimiques.

La maîtrise du processus de compostage est une nécessité, d'une part pour éviter le dégagement de gaz à effet de serre et les nuisances olfactives et d'autre part pour prévoir les transformations de la matière dans les plans ou scénarios de gestion des déchets à l'échelle territoriale. La modélisation est une des voies possibles pour cette maîtrise et là encore, les pays du sud pourraient en tirer avantage car ils sont aujourd'hui dépourvus de tout plan d'élimination ou de valorisation des déchets organiques.

En général, dans les essais de compostage à petite échelle, le faible volume des réacteurs pose deux problèmes : une perte rapide d'humidité de leur contenu et une perte de chaleur qui ne permet pas le maintien de conditions thermophiles. Les mélanges pailleux étant plus poreux, ce problème de conservation de chaleur est beaucoup plus important. Ces essais nous ont permis de mettre au point un dispositif et un mode opératoire permettant de pallier à ces 2 problèmes.

BIBLIOGRAPHIE

Amir, S. (2005). *Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage: devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost*. Toulouse: Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomie, Institut National Polytechnique (ENSAT-INP).

Avnimelech, Y. B. (1996). Stability indexes for municipal solid waste compost. *Compost Science & Utilization* 4 , 13-20.

Campbell, C. D., Darbyshire, J. F., & Anderson, J. G. (1990). The composting of tree bark in small reactors: self-heating experiments. *Biological Wastes* 31 , 145-161.

Charnay, F. (2005). *Compostage des déchets urbains dans les Pays en Développement - Elaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost*. Thèse de Doctorat, Université de Limoges.

Chefetz, B. H. (1996). Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality* 25 , 776-785.

Diaz, M. J., Madejon, E., Arizaza, J., Lopez, R., & Cabrera, F. (2002). Cocomposting of beet vinasse and grape marc in windrows and static pile system. *Compost science and utilization* 3 , 258-269.

Francou, C. (2003). *Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - Recherche d'indicateurs pertinents*. Thèse de doctorat INAPG, Institut National de Recherche Agronomique Paris-Grignon, p. 289.

Mason, I. G., & Milke, M. W. (2005). Physical modelling of the composting environment: A review. - Part 1: Reactor systems. *Waste Management* 25 , 481-500.

Misra, R. V., Roy, R. V., & Hiraoka, H. (2005). *On-farm composting methods*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nation .

Mohcini Medhi (2007). Étude de faisabilité des techniques d'imprégnation-compostage sur un effluent agro-industriel. Rapport interne CIRAD

Mustin, M. (1987). *Le compost - Gestion de la matière organique*. Paris: François Dubusc, p 117-263.

Namkoong, W. H. (1999). A comparative evaluation of maturity parameters for food waste composting. *Compost Science & Utilization* 7 , 55-62.

Richard, T. (1996). *The effect of lignin on biodegradability*. New York: Cornell Waste Management Institut.

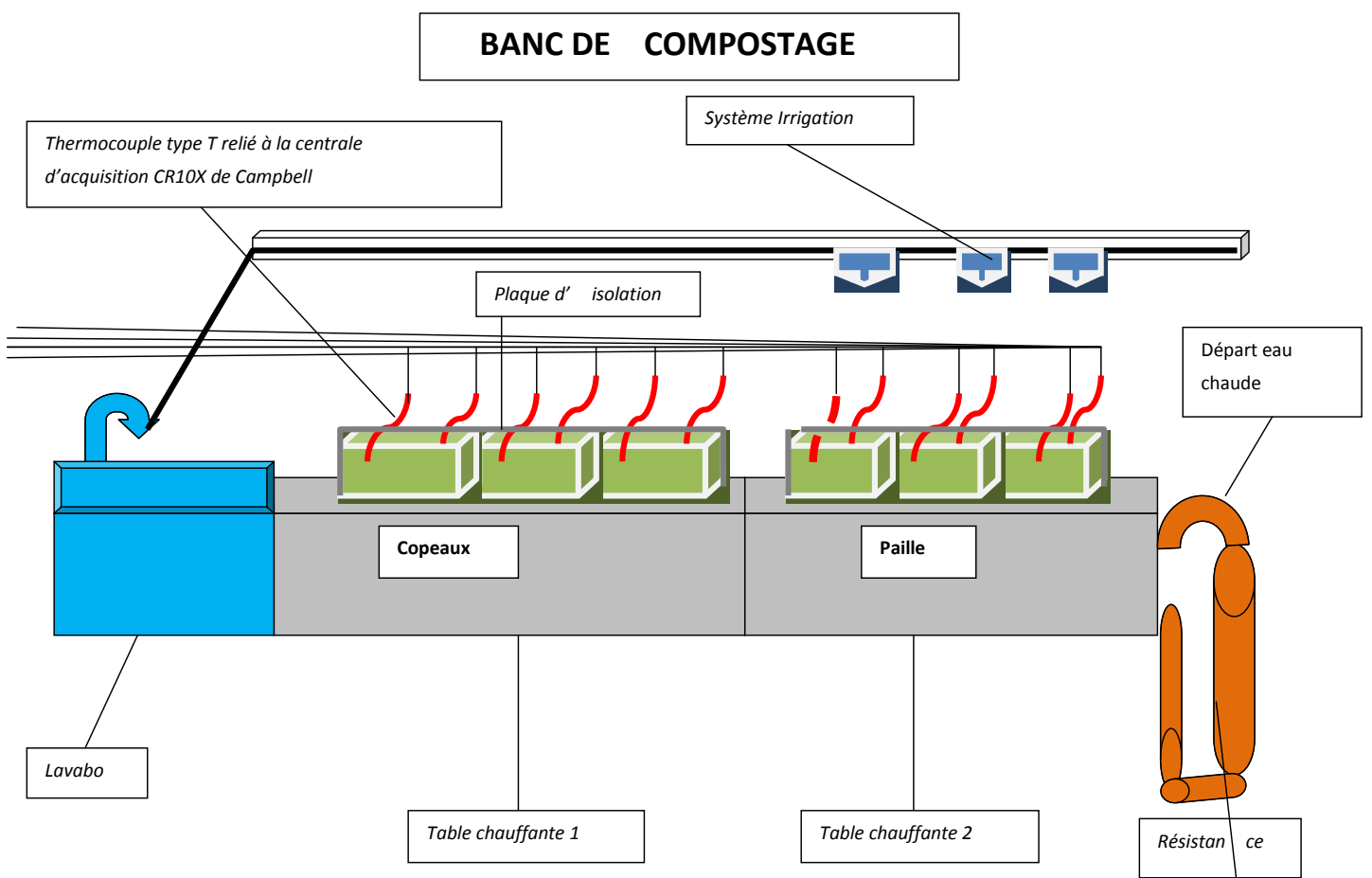
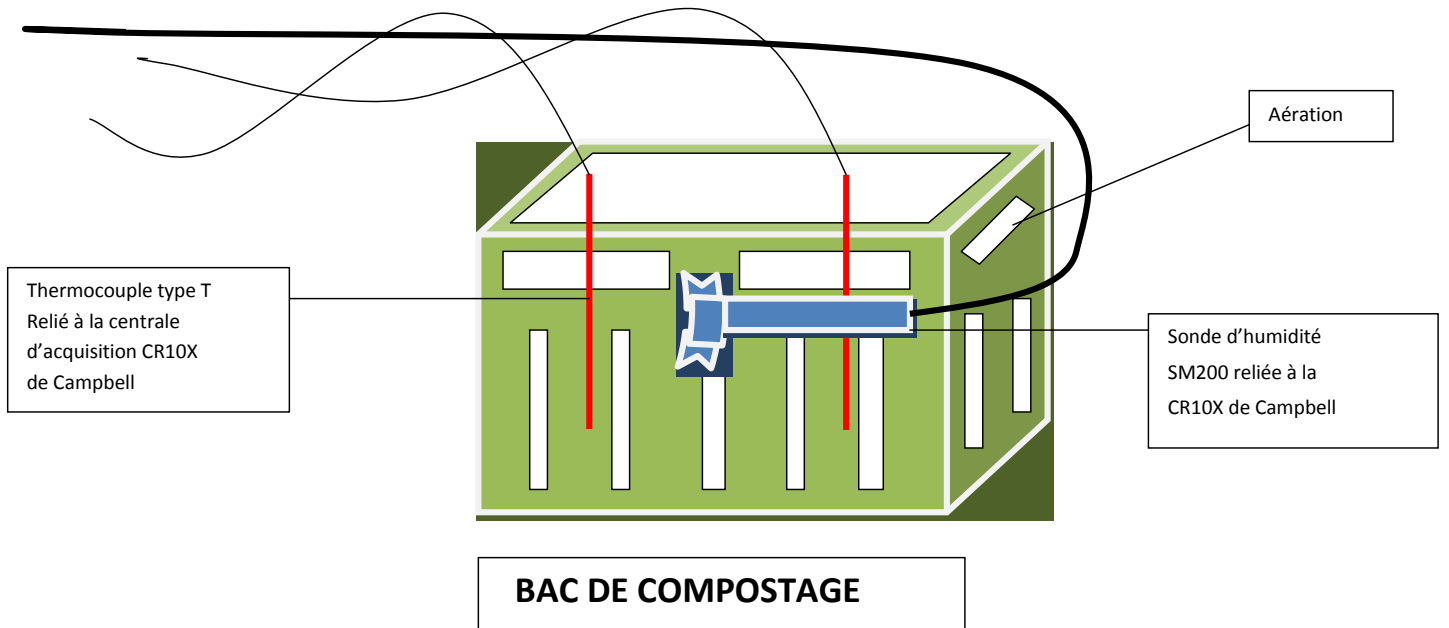
WEBOGRAPHIE

1.www2.ademe.fr.

2.<http://declics.cirad.fr>.

3.www.sciencedirect.com

ANNEXE 1 : SCHEMAS DE PRINCIPE



ANNEXE 2– Protocole des essais thermiques du banc

I – L'essai à sec

- **Principe** : Des thermocouples sont répartis sur les 2 tables chauffantes au niveau des empreintes des bacs de compostage. La température de consigne des 2 tables chauffantes est réglée à l'identique et les températures de surface sont enregistrées par une centrale d'acquisition CR10X de Campbell.

- **Matériels** : Centrale d'acquisition CR10X de Campbell avec multiplexeur AM416, 16 sondes thermocouples type T et 2 thermocouples bracelet type T

- **Mode opératoire** :

- 1/ Placer 8 sondes par table chauffante, réparties en quinconce sur les empreintes des bacs de compostage, placer les 2 thermocouples bracelet sur les tuyauteries départ chaud des 2 circuits de chauffage et relier toutes les sondes à la centrale d'acquisition CR10X.

- 2/ Remplir 8 bacs de compostage avec de la paille en tassant légèrement

- 3/ Placer 4 bacs par table et vérifier que les sondes sont bien recouvertes par les bacs

- 5/ Régler la température de consigne des 2 tables chauffantes à 50°C et déclencher l'acquisition des températures avec une période de 15 minutes

- 6/ La durée de l'essai sera au minimum de 24 heures avec une période jour et nuit

- 7/ Procéder de la même façon avec une température de consigne de 65°C

- **Résultat** : L'homogénéité de la température pour chaque table puis entre les 2 tables sera appréciée à travers une analyse de variance et une comparaison de moyennes pour chaque température de consigne.

II – L'essai en humide

- **Principe** : Établissement des courbes de chauffe par la mesure de la température dans le matériau humide et saturé à l'eau javellisée pour empêcher la fermentation, en fonction de la température de consigne. Pour chaque table chauffante, l'essai concernera 2 matériaux différents avec 2 répétitions, soit 4 bacs par table, et 5 valeurs de la température de consigne

- **Matériels** : 8 bacs en polyéthylène de 75 L (L=55cm, l=35cm, h=39cm), 2 portes 90 L, déchets (paille de blé et copeau de bois), eau javellisée à 2.6% de chlore actif pour un litre, la centrale d'acquisition CR10X de Campbell avec multiplexeur AM416, 16 sondes thermocouples type T, 2 thermocouples bracelet type T, 4 sondes d'humidité SM200, Balance de portée minimum 30 kg, précision 10^{-1} kg

• **Mode opératoire :**

a/ Calcul des quantités de substrat nécessaires :

D'après de précédents essais (Mochini, Medhi), la densité apparente de la paille après imprégnation à l'eau est de 80g/L et celle des copeaux de 110 g/L, Les bacs de 75 L seront remplis à 65L et pèseront donc respectivement 5.20 kg et 7.15 kg.

Sachant que la quantité d'eau maximale absorbée par quantité de support sec est de 2.79 kg/kg pour la paille et de 3.97 kg/kg pour les copeaux, les quantités de matériaux nécessaires pour les 4 bacs seront de 5,48 kg de paille, 5,76 kg de copeaux (2,88 kg de copeaux grossiers et 2,88 kg de copeaux fins) et 38,16 L d'eau javellisé (dont 60ml d'eau de javel à 2.6% par litre soit 2.290 L d'eau de javel).

b/ Pour préparer le contenu d'un bac de paille ou copeaux :

- 1/ Peser environ 6kg de matériau et le disposer dans une comporte de 90 L,
- 2/ Verser progressivement l'eau javellisée sur le matériau, mélanger à la main gantée et s'assurer de l'immersion du matériau en disposant au dessus du matériau une grille de type moustiquaire lestée
- 3/ Laisser imprégner pendant 240 min en agitant de temps en temps. Incliner la comporte pour évacuer lentement l'excès d'eau à travers la grille et laisser égoutter en la maintenant inclinée à 45° pendant 1h.
- 4/ Peser le bac de compostage vide puis prélever le matériau imprégné et le disposer dans le bac en tassant légèrement jusqu'à la limite correspondant à 65 L

c/ Équipements de mesure d'un bac de compostage :

- 5/ Placer 2 sondes thermocouple au centre du bac, enfoncées aux 3/4 de la hauteur du matériau
- 6/ Placer horizontalement 1 sonde d'humidité SM200 par bac enfoncée au 1/3 de la hauteur du matériau
- 7/ Recouvrir la surface du bac avec une toile microporeuse en pratiquant des trous pour le passage des fils de sondes
- 8/ Pulvériser de l'eau javellisée sur la toile
- 9/ Peser précisément le poids de l'ensemble

d/ Dispositif d'essai et mesures :

L'essai nécessite la préparation et l'équipement de 4 bacs de paille et 4 bacs de copeaux imprégnés. Les 8 bacs de compostage seront disposés sur le banc à raison de 4 bacs par table de chauffage (2 pailles + 2 copeaux par table).

Toutes les sondes de mesure seront reliées à la centrale d'acquisition Campbell avec une fréquence de scrutation de 60 secondes et une donnée moyenne toutes les 15 minutes.

Les 2 tables chauffantes seront réglées à la même température de consigne pendant au moins 48H pour obtenir des données stables. Températures de consigne testées : 50, 55, 60, 65, 70°C 10/Le contrôle du maintien de l'humidité dans les bacs sera effectué en surveillant la constance des mesures données par les sondes d'humidité et en pesant les bacs une fois par jour. La perte d'eau sera compensée par des apports d'eau javellisée sur la toile à la surface des bacs.

- **Résultat** : Pour chacune des tables chauffantes et pour chacun des matériaux, on tracera la courbe de chauffe exprimant la température du matériau humide en fonction de la température de consigne. Ces courbes permettront d'augmenter la température des tables chauffantes pendant l'essai de compostage, dès que les mélanges de compostage dépasseront la température moyenne des matériaux pendant l'essai en humide, afin d'accompagner la phase exothermique des composts et de combler les pertes de chaleur dues au petit volume des bacs de compostage.

ANNEXE 3 : Protocole de l'essai compostage

- **Principe** : Observer les paramètres caractéristiques de la phase exothermique du compostage d'un substrat avec plusieurs répétitions. Pour notre essai, choix de 2 substrats ayant une humidité/porosité différente pour un rapport C/N similaire. Chacun des substrats constitue un traitement qui sera répété 3 fois.

- **Matériels** : 6 bacs en polyéthylène de 75 litres (L=55cm, l=35cm, h=39cm), 2 comports de 90 L, matériaux (paille de blé, copeaux de bois grossiers, copeaux de bois fins), Effluent : vinasse de levurerie concentrée à 60% MS, la centrale d'acquisition CR10X de Campbell avec multiplexeur AM416, 12 sondes thermocouples type T, 2 thermocouples bracelet type T, une balance de portée minimum 30 kg précision 10^{-1} kg, une bétonnière 350 L environ.

- **Mode opératoire** :

a/ Pour déterminer la proportion matériau/vinasse diluée de chaque traitement :

Pour préparer nos traitements ayant un taux d'humidité différents et un rapport C/N similaire, nous avons utilisé un calculateur de mélange qui calcule la quantité de matériau absorbant, d'effluent et éventuellement d'adjuvant nécessaire pour obtenir un rapport C/N et un taux d'humidité déterminé (Tableau 1 et 2).

b/ Pour préparer le contenu d'un bac de paille (traitement 1) :

1/Peser environ 12.2 kg de matériau, le disposer dans une comporte de 90 L et préparer 26.4 kg de vinasse à 21.5% MS

2/ Mettre 2.5 kg de paille dans la bétonnière, la faire tourner et verser progressivement 6 kg de vinasse ; laisser tourner en variant l'inclinaison de la bétonnière jusqu'à ce que la vinasse ait été complètement absorbée.

3/ Numéroter et peser les 3 bacs de compostage vides puis répartir la paille imprégnée dans les 3 bacs en tassant assez fortement.

4/Recommencer l'opération jusqu'au remplissage des bacs (5 fois) sachant que le poids final de matériau imprégné doit être de l'ordre de 11 à 12 kg par bac. Au fil du remplissage faire des prélèvements pour constituer un échantillon de 140 g.

c/ Pour préparer le contenu d'un bac de copeaux mixtes (traitement 2) :

1/Peser environ 5.2 kg de copeaux grossier et 5.2 kg de copeaux fin et les disposer dans une comporte de 90 L puis préparer 32.3 kg de vinasse à 10% MS.

2/ Mettre 1.2 kg de copeaux grossiers et 1.2 kg de copeaux fins dans la bétonnière, la faire tourner et verser progressivement 8.9kg de vinasse; laisser tourner en variant l'inclinaison de la bétonnière jusqu'à ce que la vinasse ait été complètement absorbée.

3/ numéroté et peser les 3 bacs de compostage vides puis répartir les copeaux imprégnés dans les 3 bacs en tassant légèrement.

4/Recommencer l'opération jusqu'au remplissage des bacs sachant que le poids final de matériau imprégné doit être de l'ordre de 13 kg par bac. Au fil du remplissage faire des prélèvements pour constituer un échantillon de 140 g.

d/ Dispositif d'essai et mesures :

L'essai nécessite la préparation et l'équipement de 3 bacs de paille et 3 bacs de copeaux imprégnés.

e/ Équipements de mesure d'un bac de compostage :

1/ Uniformiser la surface du substrat et mesurer sa hauteur moyenne.

2/ Recouvrir la surface du bac avec une toile microporeuse et pulvériser de l'eau sur la toile de façon à la mouiller correctement.

3/ Peser précisément le poids de l'ensemble puis poser le bac sur une table de chauffage.

4/ Placer 2 sondes thermocouples T au 1/3 et au 2/3 de la ligne médiane du bac, enfoncées aux 2/3 de la hauteur de substrat en pratiquant des trous dans la toile.

f/ Disposition des bacs, isolation et température de chauffe au départ

Chaque traitement est disposé sur une table chauffante, les 3 bacs d'un même traitement sont collés les uns aux autres et sont recouverts de plaque d'isolant sur les 2 côtés latéraux et sur le dessus. La température de consigne des deux tables au départ est réglée à 50°C.

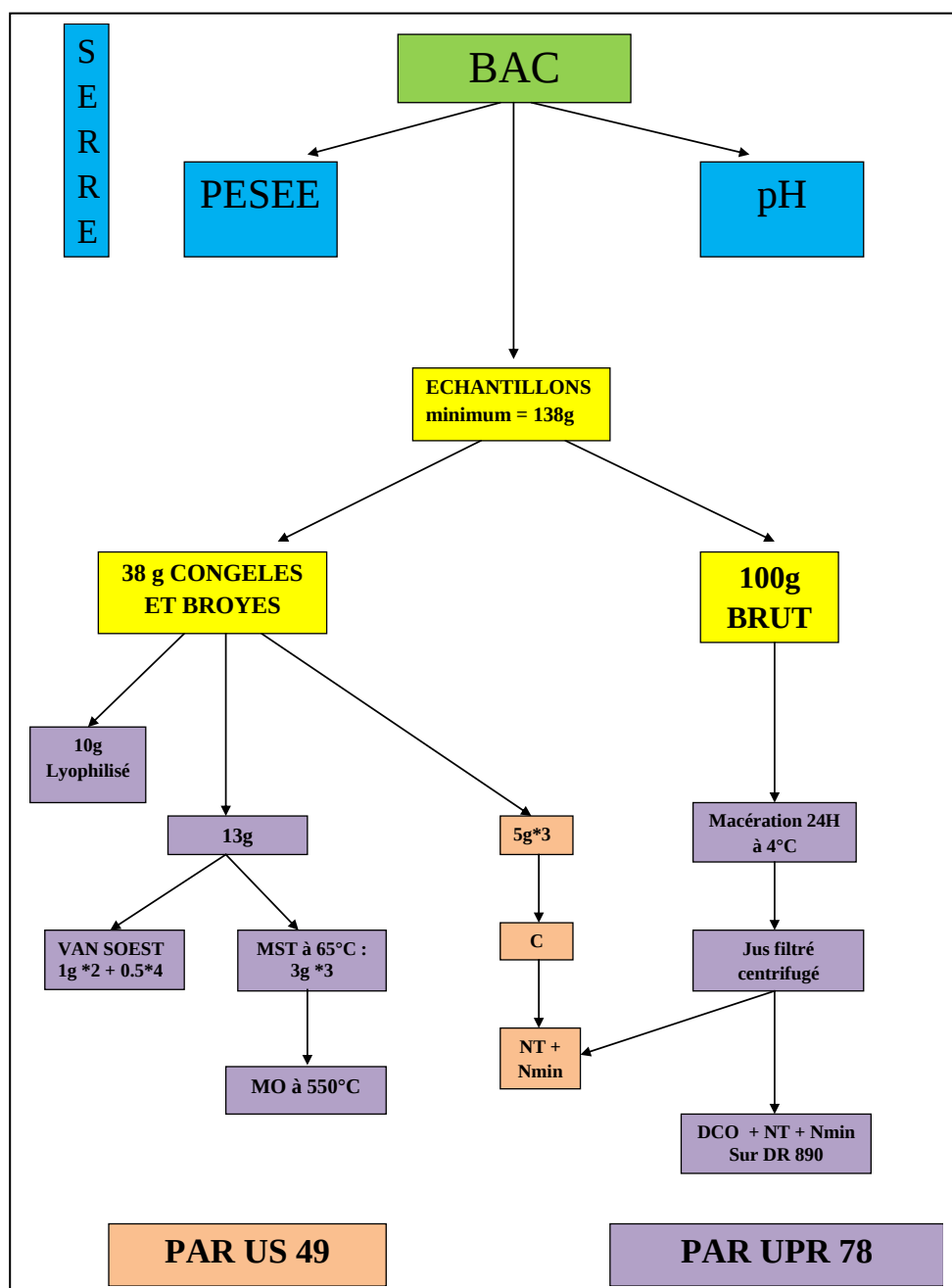
g/ Suivi de la température, augmentation de la chauffe et maintien de l'humidité

Toutes les sondes de mesure seront reliées à la centrale d'acquisition Campbell avec une fréquence de scrutation de 60 secondes et une donnée moyenne toutes les 15 minutes. Chaque jour, on vérifiera la température moyenne dans les bacs en la comparant aux valeurs de la courbe de chauffe. Dès que le substrat dépassera la température du matériau humide similaire, la température de consigne sera augmentée de 5°C. De même, après chaque opération de mélange et prélèvement la température de consigne sera ramenée à 50°C et ensuite augmentée par pas de 5°C dès que le substrat dépassera la température du matériau humide similaire. Tous les bacs sont humidifiés 2 fois par jour grâce à un vaporisateur, en projetant de l'eau sur la toile microporeuse et sur les côtés pour éviter l'assèchement en surface

h/ Mélange et prélèvements d'échantillons au cours de l'essai :

Selon un planning prédéterminé ou en fonction de l'évolution de la température des bacs, ceux-ci seront aérés et mélangés. Au préalable, chaque bac sera pesé et la hauteur de substrat mesurée (P1, H1). Le bac sera ensuite vidé entièrement sur une bâche en plastique et mélangé à la main gantée pour la paille et à la pelle pour les copeaux. Un premier prélèvement sera effectué. On pourra éventuellement procéder à une humidification par pulvérisation d'eau si le substrat semble trop sec. Lors du remplissage du bac, un second prélèvement d'au moins 150 g sera effectué puis la hauteur du substrat sera de nouveau mesurée (H2) avant de replacer la toile microporeuse, de l'humidifier puis de peser l'ensemble (P2). Sur la table de chauffage, les thermocouples seront remplacés tel que précédemment

i/ Répartition et analyse des prélèvements



ANNEXE 4

Méthode DUMAS – Détermination de la teneur en carbone et azote totaux après Combustion sèche (analyseur ELEMENTAR, NF ISO 10694 – juin 1995)

L'analyse est réalisée sur des échantillons séchés à 40°C pour éviter trop de pertes de composés volatiles.

Une prise d'essai de chaque échantillon préalablement broyé et homogénéisé (de 50 à 150 mg selon le type d'échantillon) est pesée dans une feuille d'étain (4-1) et placée sur le passeur d'échantillon.

L'échantillon solide, placé dans la capsule d'étain, est introduit dans un four à 850°C traversé par un courant d'hélium. Un apport d'oxygène provoque une montée en température (1800°C) très brève et une combustion totale.

Les gaz de combustion subissent une série de piégeage pour éliminer les poussières, les halogènes, la vapeur d'eau et les oxydes de carbone.

Une réduction sur colonne de cuivre à 730°C dans un flux d'hélium permet de réduire les oxydes d'azote en gaz N₂ et le C en CO₂ qui sont analysés par chromatographie en phase gazeuse.

Les teneurs respectives en C et N sont quantifiées par chromatographie gazeuse après une calibration appropriée avec des substances de composition connue en C et N (EDTA, atropine,...).

Dosage des ions ammonium et nitrate par colorimétrie à flux continue

Le laboratoire dispose d'analyseurs multicanaux à flux continu (ALLIANCE INSTRUMENTS Alliance et Evolution) permettant entre autre le dosage des anions ammonium et nitrate.

Leurs dosages sont réalisés sur un colorimètre à flux continu "EVOLUTION 2" de Alliance Instrument muni de membranes de dialyse. Les nitrates sont réduits en nitrites par passage dans une colonne de cadmium conditionnée au cuivre, puis transformés en composé diazoïque par la réaction de Griess-Ilosvay (complexe coloré sel de diazonium et dichlorure de naphtalène diamine), l'absorbance est mesurée à 550nm. L'ammonium est dosé selon la réaction de Berthelot (bleu d'indophénol) en milieu alcalin et l'absorbance est mesurée à 660 nm.

ANNEXE 5 – Mode opératoire Van Soest

- **Matériels** : Appareil Fibersac, solution d'extraction au détergent neutre (NDS), solution d'extraction au détergent acide (ADS), solution d'extraction d'acide sulfurique à 72% (ADL)

- **Mode Opératoire** :

Extraction de la fraction NDF :

- 1/ Humidifier les sacs préalablement dans un bêcher contenant de l'eau froide,
- 2/ placer les sacs dans le FIBERSAC, remplir le réservoir du FIBERSAC avec le réactif NDS
- 3/ Mettre en agitation et chauffer 1 heure à 100 °C puis arrêter le chauffage
- 4/ Vider la cuve à l'aide du robinet prévu à cet effet
- 5/ Remplir très rapidement la cuve d'eau bouillante et rincer 4 min les échantillons en actionnant l'agitation, répéter 3 fois l'opération de rinçage
- 6/ sortir le panier et mettre les sacs dans un bêcher de 2 L contenant de l'eau bouillante agiter en pressant fortement les sacs à la main gantée de façon à éliminer les résidus colorés répéter cette opération jusqu'à obtention d'un liquide clair
- 7/ mettre les sacs dans un bêcher de 1 L, les recouvrir d'acétone sous la hotte presser les sacs à la main gantée puis égoutter les sacs sous la hotte pendant 30 min pour évaporer l'acétone
- 8/ mettre les sacs à sécher à l'étuve à 40 °C et les peser jusqu'à obtention d'un poids constant
- 9/ récupérer une répétition de chaque échantillon et les mettre à 105 °C, peser les sacs jusqu'à obtention d'un poids constant.

Extraction de la fraction ADF :

- 1/ Sortir les sacs de l'étuve à 40 °C et les humidifier dans un bêcher contenant de l'eau froide
- 2/ Remplir le réservoir du FIBERSAC avec le réactif ADS puis fermer le couvercle et répéter les étapes de 3 à 9 de l'extraction au NDS.

Extraction de la fraction ADL

- 1/ Sortir les sacs de l'étuve à 40 °C et les mettre dans un bêcher de 1 L, les recouvrir d'acide sulfurique à 72% sous la hotte, laisser agir pendant 3 heures et agiter toutes les 30 min
- 2/ rincer abondamment à l'eau chaude en les pressant fortement avec la main gantée de façon à éliminer les résidus colorés, répéter cette opération jusqu'à obtention d'un liquide clair
- 3/ égoutter les sacs en les pressant fortement puis les mettre dans un bêcher de 1 L, les recouvrir d'acétone sous la hotte et les presser à la main gantée
- 4/ égoutter les sacs sous la hotte pendant 30 min pour évaporer l'acétone puis les mettre à sécher à l'étuve à 40 °C toute la nuit, peser les sacs jusqu'à obtention d'un poids constant
- 5/ récupérer les 2 dernières répétitions de chaque échantillon et les mettre à 105 °C, peser les sacs jusqu'à obtention d'un poids constant.

ANNEXE 6 – Matériels et Mode opératoire extraction de l'azote disponible

• **Matériels** : un analyseur ELEMENTAR THERMOQUEST 2100 (NF ISO 10694 – juin 1995) et une répétition par colorimétrie sur le HACH DR 890.

• **Mode opératoire** :

1. tarer un bocal étanche à col large de 1 L (masse T).
2. peser environ mais précisément 200 à 300 g d'échantillon frais ou congelé/dilacéré dans le bocal afin de le remplir au 2/3 (masse M1).
3. couvrir la prise d'essai avec de l'eau distillée, agiter à l'aide d'une baguette en verre et laisser reposer environ 5 mn.
4. plonger l'électrode de pH dans le mélange, noter le pH de départ et ajouter l'acide sulfurique très lentement en agitant le mélange jusqu'à pH 4 - 4.5.
5. peser le bocal (masse M2).
6. laisser macérer 12 à 24 heures à 4°C.
7. agiter puis prélever la quantité de surnageant nécessaire pour les analyses (20 ml pour le dosage de l'azote total + 10 ml pour l'ammoniacal + 10 ml pour les nitrates, soit 50 ml minimum).
8. centrifuger et filtrer le prélèvement.
9. conserver à 4°C en flacons plastiques bouchés pendant 2 à 3 jours au maximum ou bien congelé.

ANNEXE 7 : Photo 9 et 10



Photo 9 : Essai compostage 2 – Actinomycètes



Photo 10 : Essai compostage 2 – Champignons

Résumé

Le compostage, fermentation en présence d'oxygène des déchets organiques, est une pratique empirique millénaire de l'agriculture revenue au premier plan avec des technologies de traitement et de valorisation de la biomasse. Les divers déchets organiques d'origine agricole ou agroindustriels, mal ou peu recyclés, conduisent à des risques de pollution ainsi qu'à une diminution du taux d'humus dans les sols accélérant l'érosion. Gérer leur devenir est devenu un objectif prioritaire et le compostage se positionne comme une technologie à part entière, une écotechnologie. Le compostage des mélanges de déchets et effluents organiques est influencé par différents facteurs qui dépendent de variables ayant essentiellement trait aux caractéristiques physico-chimiques des substrats initiaux et à leur comportement en mélange. L'objectif d'un des projets du CIRAD est de formaliser l'influence de ces variables sur le déroulement de la phase thermophile du compostage, en vue d'une modélisation. La première phase des travaux, réalisée pour partie au cours de ce stage, a consisté à mettre au point un banc de compostage afin de réaliser des essais à petite échelle permettant d'estimer l'aptitude à la transformation de mélanges originaux. La difficulté était de pallier aux pertes de chaleur, et par voie de conséquence à la diminution de l'activité biologique thermophile, inhérentes au faible volume mis en œuvre.

The composting is the fermentation of various organic wastes in the presence of oxygen, it is applicable for agriculture in the third millennium to treat organic waste and improve soil biomass. The accumulation of various organic wastes in urban zones lead to a serious decrease of the humus rate in the soil, leading to accelerated erosion. For an appropriate management of organic wastes, and fight against pollution, the composting is an adapted ecotechnology. The composting of mixed organic wastes and effluents are affected by several factors, depending on variables that mainly relate to physicochemical characteristics of initial substrates and their behavior as mixture. Our objective is to quantify the influence of these variables and to conduct the thermophilic phase of composting process, in order to prepare a standard model for this important process. The first phase of this project is partly realized through this work: to develop a databank of composting studies with quantified data and to be able to perform laboratory tests to estimate the transformation of organic mixtures. The challenge was to overcome the loss of heat reducing the thermophilic biological activity due to the small volume of composting reactors in laboratory.

Mots clés : Compost, rapport C/N, fermentation, phase thermophile, modélisation