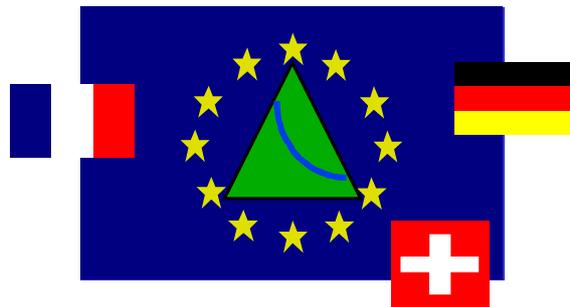


ITADA

*Institut Transfrontalier
d'Application et de Développement Agronomique
Grenzüberschreitendes Institut
zur rentablen umweltgerechten Landwirtschaft*



***Disponibilité de l'azote des composts utilisés
en agriculture biologique***

RAPPORT FINAL DU PROJET 1.2.1 (1999-2001)

**ÉTUDE COFINANÇÉE PAR L'INITIATIVE COMMUNAUTAIRE
INTERREG II "RHIN SUPÉRIEUR CENTRE-SUD"**

ITADA

Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique
Grenzüberschreitendes Institut zur rentablen umweltgerechten Landwirtschaft

LE PROGRAMME D' ACTIONS DE L'ITADA ETAIT PLACE SOUS LA MAITRISE D'OUVRAGE DU CONSEIL REGIONAL D'ALSACE ET CO-FINANCE PAR :

- LE FONDS EUROPEEN POUR LE DEVELOPPEMENT REGIONAL (PROGRAMME INTERREG),
- LE MINISTERE DE L'AGRICULTURE DU LAND DE BADE-WURTEMBERG,
- LE CONSEIL REGIONAL D'ALSACE,
- L'AGENCE DE L'EAU RHIN MEUSE,
- LES ORGANISATIONS PROFESSIONNELLES AGRICOLES ALSACIENNES
- LES CANTONS SUISSES DE BALE VILLE, BALE-CAMPAGNE, ARGOVIE

LE PROJET 1.2.1 :

« Disponibilité de l'azote des composts utilisés en agriculture biologique »

a été réalisé par :

Chef de projet : J. WEISSBART et B. LAMMERT (OPABA)
Partenaire : Dr. VETTER et C. GROSCHUPP (IfuL)

Organismes associés : A. BERNER (FiBL) ; B. LECLERC de L'ITAB-GRAB
C. SCHAUB (C.A. 67)

Organisation professionnelle de l'Agriculture Biologique en Alsace, Schiltigheim (OPABA)
Institut für umweltgerechte Landwirtschaft, Müllheim-D (IfuL)
Forschungsinstitut für Biologischen Landbau, Frick-CH (FiBL)
Institut Technique de l'Agriculture Biologique, Paris (ITAB)
Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin, Schiltigheim (CA 67)

SOMMAIRE

<u>AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS</u>	6
<u>1. STRUCTURE DU PROJET</u>	10
<u>1.1. PARTENAIRES INSTITUTIONNELS</u>	10
<u>1.2. MISE EN ŒUVRE DU PROJET ET RÉDACTION DU RAPPORT FINAL</u>	10
<u>1.3. DURÉE DU PROJET :</u>	10
<u>1.4. OBJECTIFS GÉNÉRAUX</u>	10
<u>2. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS</u>	11
<u>2.1. POSITION DU PROBLÈME</u>	11
<u>2.2. OBJECTIFS</u>	11
<u>2.3. RÉSULTATS ATTENDUS</u>	11
<u>2.4. DIFFUSION DES RÉSULTATS</u>	12
<u>2.5. LES ACQUIS SCIENTIFIQUES, TECHNIQUES ET PRATIQUES</u>	12
<u>3. MATÉRIEL ET MÉTHODES</u>	13
<u>3.1. COMMUNICATION</u>	13
<u>3.2. SOURCES</u>	13
<u>3.3. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE ET CONCEPTUELLE</u>	13
<u>3.4. INTÉRÊTS DE LA COLLABORATION TRANSFRONTALIÈRE</u>	15
<u>4. RÉSULTATS ET DISCUSSION</u>	16
<u>4.1. LE COMPOSTAGE : RAPPELS SUR LE FONCTIONNEMENT ET LES OBJECTIFS DU PROCESSUS</u>	16
<u>4.1.1. DÉFINITION DU PROCESSUS DE COMPOSTAGE ET CARACTÉRISATION GÉNÉRALE DES TRANSFORMATIONS DE LA MATIÈRE ORGANIQUE AU COURS DU COMPOSTAGE</u>	16
<u>4.1.2. PARAMÈTRES DE SUIVI ET DE COMPRÉHENSION DU PROCESSUS DE COMPOSTAGE</u>	18
<u>4.1.3. QU'EST-CE QUE « L'HUMUS » ?</u>	32
<u>4.1.4. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU COMPOSTAGE</u>	45
<u>4.1.5. COMMENT ORIENTER LES TRANSFORMATIONS DE LA MATIÈRE ORGANIQUE AU COURS DU COMPOSTAGE ?</u>	61
<u>4.2. LES COMPOSTS DE DÉCHETS VERTS : TYPOLOGIE ET POTENTIEL DE LIBÉRATION D'AZOTE</u>	81
<u>4.2.1. COMMENT CONSTRUIRE UNE TYPOLOGIE DE COMPOSTS ?</u>	81
<u>4.2.2. ETUDE DES MATÉRIAUX DE BASE</u>	82
<u>4.2.3. LES ANDAINS TRIANGULAIRES : LE TYPE TRI</u>	85
<u>4.2.4. LES ANDAINS TABULAIRES : LE TYPE TAB</u>	89
<u>4.2.5. LES ANDAINS TABULAIRES AVEC AÉRATION FORCÉE : LE TYPE TAB-AF</u>	99
<u>4.2.6. LIMITES DE CETTE TYPOLOGIE : DÉFAUT DE CONNAISSANCES ET INCERTITUDES</u>	100

<u>4.2.7. CONCLUSIONS : ÉVALUATION A <i>PRIORI</i> DES QUALITÉS AGRONOMIQUES DES COMPOSTS DE DÉCHETS VERTS</u>	102
<u>4.3. LES COMPOSTS DE FUMIERS : TYPOLOGIE ET POTENTIEL DE LIBÉRATION DE L'AZOTE</u>	107
<u>4.3.1. ESSAI DE CONSTRUCTION D'UNE TYPOLOGIE DES COMPOSTS FERMIERS</u>	107
<u>4.3.2. DES MATÉRIAUX DE DÉPART TRÈS VARIÉS</u>	107
<u>4.3.3. UN FACTEUR DISCRIMINANT À L'INTÉRIEUR DE CHAQUE TYPE : LE DEGRÉ DE MATURITÉ</u>	108
<u>4.3.4. LE COMPOST RETOURNÉ PEU DE FOIS : LES TYPES RET ET RET-BD</u>	109
<u>4.3.5. LE COMPOSTAGE AVEC RETOURNEMENTS INTENSIFS : LES TYPES INT ET INT-BD</u>	111
<u>4.3.6. LE COMPOSTAGE SANS RETOURNEMENT : LES TYPES COMP ET COMP-BD</u>	113
<u>4.3.7. LE FUMIER DE DÉPÔT : LES TYPES FD ET FD-BD</u>	114
<u>4.3.8. PARAMÈTRES AYANT UNE INFLUENCE SUR LA MINÉRALISATION DES COMPOSTS</u>	116
<u>4.3.9. QUESTIONS ET DOUTES À LEVER EN PRIORITÉ</u>	117
<u>4.3.10. EN CONCLUSION : COMPARAISON DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES COMPOSTS DE FUMIERS</u>	118
<u>5. DIFFUSION DES RÉSULTATS DU PROJET</u>	120
<u>5.1. QUELS LEVIERS POUR QUE CES RÉSULTATS SOIENT PRIS EN COMPTE DANS LES PRATIQUES ?</u>	120
<u>5.2. LA STRATÉGIE DE COMMUNICATION</u>	120
<u>5.3. LES PROLONGEMENTS DU PROJET</u>	122
<u>6. PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS</u>	123
<u>PROPOSITION D'UNE CLÉ DE DÉTERMINATION POUR PRÉDIRE LE POTENTIEL DE MINÉRALISATION DE L'AZOTE DES COMPOSTS</u>	123
<u>1^{ER} ÉTAPE : DÉTERMINATION DE LA STABILITÉ DU PRODUIT</u>	123
<u>2^{ÈME} ÉTAPE : DÉTERMINATION DU DEGRÉ DE MATURITÉ</u>	123
<u>3^{ÈME} ÉTAPE : QUALITÉ DES COMPOSÉS HUMIQUES ET VITESSE DE MINÉRALISATION DU CARBONE ET DE L'AZOTE</u>	124
<u>7. BIBLIOGRAPHIE</u>	125
<u>8. RESUME</u>	132
<u>9. ANNEXES</u>	146
ANNEXE 1 plaquette de présentation du projet	147
ANNEXE 2 liste des analyses effectuées sur les composts prélevés par le projet	150
ANNEXE 3 questionnaire plate-formes de compostage de déchets verts	151
ANNEXE 4 questionnaire compostage à la ferme	153
ANNEXE 5 modèle de fonctionnement du compostage	158
ANNEXE 6 modèle de fonctionnement d'une parcelle cultivée recevant du compost	159

ANNEXE 7	fiche technique de fabrication artisanale d'un thermomètre pour tas de compost	160
ANNEXE 8	correspondance entre pourcentage de pertes en potassium pendant le compostage en fonction du rapport C/N du fumier au départ	161
ANNEXE 9	Protocole, matériel et méthode, résultats et discussion pour l'essai de plein champ avec un compost de déchets verts issu d'andain tabulaire	162
ANNEXE 10	Représentation graphique des résultats d'analyses menées par le projet sur un compost de type RET	170
ANNEXE 11	Représentation graphique des résultats d'analyses menées par le projet sur un compost de type RET-BD	171
ANNEXE 12	Représentation graphique des résultats d'analyses menées par le projet sur un compost de type INT	172
ANNEXE 13	Représentation graphique des résultats d'analyses menées par le projet sur un compost de type INT-BD	173

Avant-Propos et Remerciements

La question posée par ce projet – *quelle est la disponibilité de l'azote des composts ?* – est plutôt hétérodoxe : selon HARTZ *et al.* (2000), la minéralisation de l'azote des composts est relativement modeste par rapport aux besoins des plantes. Pour la majorité des agriculteurs, l'intérêt principal du compostage et de l'utilisation du compost réside ailleurs que dans sa participation au bilan azoté. En agriculture biologique, ce dernier est essentiellement alimenté par les rotations incluant des légumineuses, l'implantation d'engrais verts et l'épandage de sources plus labiles de matière organique (lisier, voire fumier).

De plus, la gestion de l'azote, élément pouvant devenir chroniquement un facteur limitant en culture biologique, est très difficile à réaliser avec des matières organiques stabilisées, à minéralisation lente et très dépendante des conditions pédologiques et des variations climatiques.

Nonobstant, face à la variété de pratiques constatées dans la fabrication des composts, il est apparu intéressant de distinguer ces derniers sur la base de leur comportement une fois qu'ils sont épandus. Le choix du critère « potentiel de minéralisation de l'azote » pour caractériser le comportement d'un compost est judicieux pour au moins trois bonnes raisons :

- pour ce type de produit, la minéralisation de l'azote est fortement dépendante de la minéralisation du carbone (CASTELLANOS et PRATT, 1981) et donc à l'évolution de la matière organique dans le sol ;
- les agriculteurs enquêtés attribuent au compost avant tout un rôle d'amendement, tout en reconnaissant qu'un effet fertilisant plus ou moins fort peut être obtenu en fonction du mode de fabrication (en particulier de la durée de compostage) ;
- la production de nitrates par un compost, si elle est réputée faible, n'en mérite pas moins d'être bien évaluée et différenciée selon le type de compost.

L'option méthodologique retenue par le projet a alors été d'identifier des facteurs discriminants, simples à reconnaître et ayant une assise théorique et pratique reconnue,

pour qualifier différents types de composts. Des corrélations ont ensuite pu être établies entre cette classification et les réponses à la question initiale.

Après une rapide présentation du contexte institutionnel dans lequel s'est développé le projet (§ 1.), les raisons du choix de la thématique du projet sont présentées dans le détail (§ 2.).

Une troisième partie (§ 3.) rend compte des concepts développés pour l'occasion et de l'itinéraire méthodologique emprunté par le projet.

Une définition générale du processus de compostage (§ 4.1.1.) ouvre la voie à des précisions sur les principaux paramètres évoluant au cours de ces transformations biochimiques (§ 4.1.2.) et sur une tentative de caractérisation des principaux produits recherchés au fil de ces transformations : les composés humiques (§ 4.1.3.). Les avantages et inconvénients pour l'agriculture et pour l'environnement de cette technique sont regroupés dans le paragraphe 4.1.4.. Muni d'une bonne compréhension du processus, et convaincu de l'intérêt de cette pratique, le lecteur pourra aborder les aspects concrets du contrôle des transformations de la matière organique pendant le compostage (§ 4.1.5.).

Les chapitres 4.2. et 4.3. détaillent les typologies concernant respectivement les composts de déchets verts et les composts de fumiers.

La cinquième partie (§ 5.) informe sur la stratégie envisagée pour faire connaître ces résultats et la sixième partie (§ 6.) récapitule les principaux acquis du projet tout en proposant quelques pistes d'investigations complémentaires prioritaires.

Des éléments subsidiaires sont consignés dans les parties 7. (Bibliographie) et 8. (Annexes).

Un certain nombre de personnes ont collaboré ou contribué à la réalisation de ce projet. Nous tenons à leur exprimer nos remerciements les plus chaleureux

Les débuts du projet ont été très fortement soutenus par le secrétariat ITADA à Colmar qui a fourni toutes conditions logistiques indispensables à un bon démarrage. Les discussions et les conseils d'Hervé CLINKSPOOR, Jürgen RECKNAGEL et Florence Clairet ont permis de bien cadrer le contenu et l'organisation du projet

La sympathique et dynamique équipe de la MVAD-68 dirigée par Nathalie VALENTIN nous a facilité la réalisation d'une première revue bibliographique et nous a mis en contact avec nombre des personnes ressources dans le domaine des matières organiques et des composts. Les échanges avec les différents membres de la Mission ont contribué à affermir le cadrage du projet

La très bonne connaissance du milieu par Rémi KOLLER, Directeur de l'ARAA, nous a fait gagner un temps précieux et nous a permis rentrer en contact avec des chercheurs et techniciens pointus dans le domaine des composts. Les conseils de méthodologie qu'il nous a prodigué pour la structuration de l'ensemble du projet et plus particulièrement pour les enquêtes auprès des agriculteurs ont enrichi notre approche d'un point de vue extérieur synthétique et précis.

La critique méthodologique très détaillée réalisée par André BLOUET de l'INRA de Mirecourt, l'appui pour la mise au point des enquêtes auprès des agriculteurs ainsi que les nombreux échanges que nous avons eus ont à chaque fois produit des bons en avant.

L'importante bibliographie de ce travail a été très largement alimentée par les références colossales réunies par Joséphine PEIGNE d'ECOCERT / INRA de Colmar (Département Agronomie et Environnement). La précision et la richesse de ses travaux sur la fabrication et la minéralisation des composts a constitué une source d'amélioration perpétuelle pour notre travail.

La mise en œuvre du projet a bénéficié d'un suivi permanent par Joseph WEISSBART, et d'une supervision régulière par les agriculteurs, éleveurs, maraîchers et viticulteurs du groupe de pilotage du projet. Simone KRIESEMER, Yves PERRON de l'OPABA, et plus intensément Christiane SCHAUB du SUAD de la Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin, ont apporté leur point de vue à ces débats.

Les agents de l'IfuL, et plus particulièrement Martin NAWRATH, ont porté un regard attentif au déroulement du projet.

L'appui ponctuel et pertinent d'Alfred BERNER du FIBL de Frick (CH) et de Blaise LECLERC de l'ITAB-GRAB a toujours été très apprécié pour prendre un recul nécessaire à la bonne conduite du projet.

Nous tenons à remercier vivement les exploitants de plate-forme de compostage qui nous ont toujours très bien accueilli sur leur site de transformation des déchets verts et qui ont mis à notre disposition un maximum de données et d'informations sur leur travail quotidien.

Notre reconnaissance va également tout droit vers les agriculteurs biologiques et bio-dynamiques alsaciens et badois qui ont bien voulu nous recevoir et accorder du temps pour répondre à nos nombreuses questions sur leur façon de fabriquer et d'utiliser les composts. Nos entretiens avec eux nous ont permis de mieux cerner leurs attentes pour bien répondre à leurs questions.

Une mention spéciale est adressée à M. MAYER qui a mis à disposition et réalisé une partie des travaux sur la parcelle d'essai à Schliengen.

L'expérience et les connaissances du Dr KLUGE de la LUFA-Augustenberg ont été un soutien précieux pour l'exploitation et l'interprétation de cet essai.

La disponibilité et la vivacité de Laure METZGER et de Corinne BITAUD de la SADEF ont été d'un précieux secours lorsqu'il s'agissait de préciser et d'interpréter des résultats d'analyses complexes et approfondies.

Nous avons trouvé avec bonheur dans l'association Vignes Vivantes un vivier de débats concrets et d'actions d'avant-garde pour le développement de la fabrication et de l'utilisation des composts dans la région. Nous avons été très content d'avoir pu apporter un appui ponctuel à cette association et à ses membres dans leur démarche.

Jean-Michel FLORIN, Pierre MASSON, Patrick RIEHL et Laurent DREYFUS ont enrichi notre approche avec les apports, les connaissances et les savoirs-faire de la méthode d'agriculture bio-dynamique.

Le SUAD Montagne de la Chambre d'Agriculture du Haut-Rhin a permis et permettra sans doute encore de développer des synergies pour une gestion plus fine et plus respectueuse de l'environnement des effluents d'élevage en montagne Vosgienne.

Merci à tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur(s) pierre(s) à cette construction !

1. Structure du projet

1.1. Partenaires institutionnels

Chef de Projet

OPABA

(Organisation Professionnelle de l'Agriculture Biologique en Alsace)
Maison de l'Agriculture
2, rue de Rome
F - 67 309 SCHILTIGHEIM

Partenaire

IFUL

(Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung)
D - MÜLLHEIM

Autres participants

FIBL

(Forschungsinstitut für biologischen Landbau)
CH - FRICK

Coordination, traduction

Secrétariat ITADA

F - COLMAR

1.2. Mise en œuvre du projet et rédaction du rapport final

Joseph WEISSBART (OPABA) : formulation, démarrage et suivi du projet, relecture du rapport final

Benjamin LAMMERT (OPABA) : coordination et mise en œuvre du projet, rédaction du rapport final, traduction

Christine GROSCHUPP (IfUL) : mise en œuvre du projet, conduite de l'essai, participation à la rédaction du rapport final, traduction

1.3. Durée du Projet :

du 01.09.1999 au 31.12.2001

1.4. Objectifs généraux

Extrait de la Déclaration Commune valant convention de création de l'Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique (ITADA) :

"...Compte tenu de l'importance de la nappe phréatique dont bénéficie la région du Rhin supérieur, le Land du Bade Wurtemberg, tout comme ses partenaires français, recherchent la meilleure compatibilité entre agriculture et protection de l'environnement, en particulier en ce qui concerne la préservation de la qualité de la nappe phréatique. Considérant l'existence dans nos régions frontalières de conditions de production comparables et de demandes écologiques croissantes à l'encontre de la production agricole, il est souhaitable d'étudier, de développer, d'expérimenter et d'optimiser en commun des méthodes de production économiquement viables et respectueuses de l'environnement..."

2. Problématique et objectifs

2.1. Position du problème

En agriculture biologique, la base de la fertilisation repose sur l'utilisation des « engrais de ferme ». Ces derniers subissent, dans la plupart des cas, une préparation avant leur utilisation, compostage pour les fumiers et les déchets organiques, ou brassage et aération pour les lisiers. Cette préparation conduit à une restructuration de l'azote sous forme organique.

La disponibilité de l'azote est moins importante et plus progressive pour des produits compostés que pour des produits bruts.

Les fournitures et dynamiques de minéralisation des amendements organiques compostés sont mal connues, et souvent évaluées dans la pratique de manière empirique sur les valeurs fertilisantes de leurs matières premières. Ceci peut conduire à des sur-fertilisations ou à l'inadéquation entre disponibilité de l'azote et besoins des cultures, avec des risques éventuels de lixiviation de l'azote vers la nappe phréatique.

Plusieurs études montrent qu'il n'existe pas de corrélation entre la disponibilité de l'azote d'un produit organique et sa valeur C/N. Par contre, il semble qu'une corrélation existe entre la transformation du carbone organique en CO₂ au cours d'une incubation et la disponibilité de l'azote.

Sur le Rhin Supérieur, les sources organiques qui seraient concernées sont les fumiers de fermes compostés (compostage en biodynamie ou grâce à des procédés mécaniques) et les composts de déchets verts.

2.2. Objectifs

Les objectifs initiaux du projet sont :

- de mieux cerner la dynamique de libération de l'azote des principaux engrais de ferme et déchets verts compostés disponibles en agriculture biologique dans le bassin rhénan
- d'établir une corrélation entre les mesures et tests possibles en laboratoire avec la disponibilité des éléments fertilisants.

2.3. Résultats attendus

Les buts initialement poursuivis par le projet sont :

- l'amélioration des conseils de fertilisation tant sur le plan de la préparation des engrais de ferme que sur leur utilisation
- l'amélioration de l'adéquation entre les apports et les besoins des cultures, sans risques de pertes par lessivage
- l'évaluation des coûts économiques des pratiques actuelles des producteurs et l'identification de solutions de préparation et d'apport d'amendements qui présentent le meilleur intérêt économique en fonction de chaque situation

2.4. Diffusion des résultats

L'ensemble de ces investigations doit déboucher sur la rédaction et la publication commune aux deux partenaires de fiches techniques sur la fabrication et l'utilisation des composts de fumiers et de déchets verts. Une attention particulière sera donnée aux risques de lessivage de l'azote lors de l'utilisation de ces produits. La publication sera bilingue.

Dans le prolongement du projet sont prévues des actions de communication : organisation d'un colloque, animation, formations, visites techniques avec des groupes constitués et dynamiques.

2.5. Les acquis scientifiques, techniques et pratiques

La pratique du compostage avec retournement d'andains s'est développée en Agriculture Biologique en Alsace sous l'impulsion de l'OPABA à partir de 1992/1993. La technique est bien maîtrisée par des agriculteurs utilisant des équipements collectifs (en CUMA). Les agriculteurs biologiques d'Alsace ont formulé le souhait d'améliorer leurs connaissances sur la dynamique de libération de l'azote des composts, afin de mieux utiliser ces amendements organiques. Cette question a trouvé un écho outre-Rhin où la pratique du compostage est plus largement développée et où de nombreuses recherches ont été faites dans les Universités (München, Darmstadt, Stuttgart...). La littérature française est quant à elle peu prolixe sur le sujet et il a fallu se tourner vers la communauté anglo-saxonne qui a étudié le procédé plus à fond, en particulier pour le traitement des boues de station d'épuration.

Il existe néanmoins quelques références locales, notamment celles du projet ITADA A.1.5. 'Dynamique et gestion de l'azote dans les rotations culturales d'exploitations biologiques sans ou pauvres en élevage'.

Ceci étant, les connaissances sont très éparpillées et le lien entre différentes étapes ou différentes échelles de la fabrication et de l'utilisation des composts est rarement établi. La principale contribution de ce travail est de proposer une structuration de la définition des composts et de leurs qualités, à partir d'un itinéraire méthodologique particulier.

3. Matériel et méthodes

3.1. Communication

Pour éviter de refaire ce que d'autres ont déjà fait, le projet a cherché à identifier du niveau local aux niveaux nationaux les chercheurs et techniciens ayant réfléchi et travaillé sur les composts. Pour faciliter la communication, une plaquette de présentation du projet (voir Annexe 1) a été rédigée et envoyée aux personnes contactées. La communication avec les organismes de développement a également permis d'identifier le public d'agriculteurs qui serait intéressé par la question du compost et du compostage. Des synergies ont pu être développées pour appuyer des dynamiques en cours, bien cadrer les limites du projet et commencer la valorisation des résultats (colloque et formations d'automne).

3.2. Sources

Le relevé complet de la littérature consultée par le projet est disponible auprès de l'OPABA. On y trouve des publications scientifiques et techniques, des articles de vulgarisation, quelques ouvrages spécialisés sur le compostage.

Afin de bien caractériser les composts, le projet a décidé de faire un certain nombre d'analyses poussées (voir en Annexe 2 la liste des analyses effectuées ; ces données sont disponibles à l'OPABA).

Autant que possible, le projet a cherché à recueillir des données d'analyses auprès des fabricants de compost (en particulier pour les déchets verts qui en réalisent périodiquement).

Face à la carence relative d'informations scientifiques et surtout face à leur discontinuité, il nous est apparu judicieux d'entretenir des discussions contradictoires avec les fabricants et les utilisateurs de compost. Deux questionnaires ont constitué la base de ces entretiens différenciés selon que la personne rencontrée était exploitant d'une plate-forme de compostage de déchets verts, ou agriculteur fabricant et/ou utilisateur de compost. Les Annexes 3 & 4 présentent ces formulaires d'enquêtes de type semi-directif. L'objectif de ces enquêtes était de recueillir au mieux l'expérience, les constatations et les observations des praticiens, ainsi que de cerner les préoccupations concrètes de ces acteurs (cadrage du contenu du projet).

Enfin, un essai a été réalisé pour essayer de mieux appréhender le comportement d'un certain type de compost de déchets verts. On a cherché à savoir si un tel compost avec un rapport C/N élevé (correspondant à un produit pas entièrement décomposé) était capable de réduire la quantité de reliquats azotés au cours de l'hiver sous une culture de blé (rôle de piège à nitrates du compost).

3.3. Approche méthodologique et conceptuelle

En utilisant ces sources de nature et de contenu informatif variés, le projet a construit des modèles de connaissance qui n'ont pas nécessairement d'existence ou de retentissement réels auprès des acteurs mais qui présentent l'avantage d'établir des

interrelations entre des éléments connus ou étudiés de manière plus ou moins isolée.

Pour construire un modèle de connaissances sur le compostage (voir Annexe 5), on a examiné les interrelations entre des paramètres comme : la composition du substrat, sa structure, son humidité, l'influence du climat, des retournements, des additifs, de la forme des andains, de l'activité biologique du tas de compost en phase active, en phase de maturation et pendant le stockage.

Ceci nous a permis de hiérarchiser trois niveaux d'analyse :

- le premier, au cœur du compostage, est l'activité biologique des microorganismes que l'on cherche à contrôler,
- le second, correspond aux domaines d'intervention de l'agriculteur ; ceux-ci concernent le choix des matériaux de base (dans la mesure du possible), le choix des forme et dimension du tas, l'éventualité de retourner le tas de compost ou d'y ajouter des additifs, la possibilité de recouvrir le tas et enfin de le laisser mûrir ou de le stocker plus ou moins longtemps avant épandage,
- le troisième est l'incidence du climat sur le compostage, dont il convient parfois de se prémunir.

Pour construire le modèle de connaissance sur la valorisation des composts au champ, les interrelations entre le climat, les besoins des cultures, les façons culturales, la date d'apport, les qualités du compost (maturité et matières premières), les autres apports de matière organique, le type de sol (son fonctionnement) et la vie du sol ont été examinées, en s'inspirant des dires des utilisateurs de compost.

Cette analyse nous a permis de construire un modèle de fonctionnement d'une parcelle recevant du compost (voir Annexe 6). Au centre de ce système se trouve l'agriculteur qui avec son expérience cherche à obtenir un certain niveau de rendement sur ses parcelles en adaptant ses pratiques au climat et à l'impact de celui-ci sur la vie du sol et les besoins des plantes. Les moyens d'intervention de l'agriculteur sont limités : il ne peut influencer que sur le travail du sol, la date d'apport de son compost, le choix de son type de compost et sur les apports complémentaires en matière organique. Les contraintes organisationnelles le forcent à mettre au point un système relativement robuste, c'est-à-dire qui n'exige pas de grands changements d'une année sur l'autre. Le compostage présente alors des contraintes à intégrer dans ce système d'organisation : il faut que le chantier de compostage produise un compost de la qualité voulue et au bon moment. La qualité est déterminée par les agriculteurs essentiellement en fonction de l'âge du compost, de l'origine de ses matières premières et de la réussite du compostage.

La construction et l'utilisation de ces modèles n'est pas normative. On ne prétend pas que les choses se passent nécessairement de la façon décrite, ni que tous les praticiens se réfèrent d'une quelconque façon à tout ou partie d'un de ces modèles.

Ces modèles ne sont que des propositions pour structurer la réflexion et pour tenter de comprendre les phénomènes, à l'occasion pour proposer une explication de mesures ou d'observations.

Ils constituent donc le socle de ce travail, car ils ont largement inspiré la construction des typologies de composts.

Dans notre démarche, nous avons d'abord appliqué le schéma de fonctionnement du compostage aux composts de déchets verts pour lesquels nous pouvions disposer

d'un nombre intéressant d'analyses assorties de caractérisations précises sur la façon de fabriquer ces composts. Les premières conclusions pour ces composts nous ont conforté dans notre approche, ce qui nous a conduit à la développer pour d'autres types de substrats : les fumiers. La tâche était plus ardue, puisque l'on disposait de références et d'analyses moins nombreuses, d'une très grande variété de substrats, de corrélations mal établies entre comportement des composts et leurs procédés de fabrication, ces derniers étant de surcroît très divers. Néanmoins, nous avons pu établir quelques différences notables pour discriminer ces différents types de composts.

Ce travail a enfin été l'occasion de proposer quelques pistes à suivre pour renforcer la thèse selon laquelle le procédé de fabrication et les caractéristiques du substrat conditionnent le comportement agronomique d'un compost. Une façon simple et efficace de le montrer serait d'arriver à une caractérisation rapide des composés humiques et de leur voie de fabrication, ce qui semble possible en routine de laboratoire.

3.4. Intérêts de la collaboration transfrontalière

Cette collaboration a revêtu différents aspects. Elle a permis d'avoir plus facilement accès aux sources allemandes et suisses plus avancées sur le sujet. Les contacts avec les personnes ressources ont pu être facilités. Les quelques rencontres transfrontalières qui ont pu être organisées pour un public d'agriculteurs et de techniciens ont été riches en échanges entre praticiens des deux côtés du Rhin.

4. Résultats et discussion

4.1. Le compostage : rappels sur le fonctionnement et les objectifs du processus

4.1.1. Définition du processus de compostage et caractérisation générale des transformations de la matière organique au cours du compostage

Il existe différentes manières de définir le compostage selon l'approche que l'on en a (fabricant, utilisateur, maître d'ouvrage...). On ne peut pas donner de définition universelle. La définition générale que nous pourrions retenir dans ce travail est reprise de MUSTIN (1987) :

'le compostage est un procédé biologique contrôlé assurant la décomposition (vue comme une conversion-valorisation) des constituants organiques de sous-produits et de déchets en un produit organique stabilisé, hygiénisé, semblable à un terreau, riche en composés humiques : le compost'

Cette définition présente toutes les caractéristiques d'une « boîte noire » : on met des matières organiques à l'entrée et on récupère du compost à la sortie. Une définition plus fine du compostage décrit en détail les principaux paramètres physico-chimiques et biologiques évoluant au cours du processus. Cette description est proposée par LECLERC (2001) :

'le compostage est un processus de décomposition et de transformation « contrôlées » de déchets organiques biodégradables, d'origine végétale et/ou animale, sous l'action de populations microbiennes diversifiées évoluant en milieu aérobic. Il est caractérisé par :

- *une production de chaleur au début du processus (températures couramment observées comprises entre 40 et 70°C) consécutive à la forte activité des micro-organismes aérobies décomposeurs (oxydations thermiques),*
- *une perte de masse et de volume, due à la perte de matière (CO₂ et H₂O produits à partir des molécules de matières organiques), à l'évaporation de l'eau sous l'effet de la chaleur et au tassement (perte de structure),*
- *une transformation des matières premières organiques par voies chimique, biochimique (microbienne) et physique (changement de couleur, d'aspect, de granulométrie), notamment avec la production de composés humiques stabilisés.*

Le compost, produit résultant du compostage, se différencie des matières premières par :

- *une structure homogène (dans un compost de fumier par exemple, on ne distingue plus les débris végétaux ni les débris animaux facilement dégradables),*
- *la stabilité des matières organiques qui le composent, d'autant plus importante que le compost est évolué (richesse en composés humiques),*
- *un assainissement partiel par destruction des germes pathogènes, des parasites animaux, des graines et des organes de propagation des végétaux,*
- *l'absence d'odeurs désagréables.'*

D'un point de vue réglementaire, le processus de compostage est défini (Annexe II partie A du règlement CEE/2092/91 modifié) comme « *une transformation contrôlée en tas, qui consiste en une décomposition aérobie de matières organiques d'origine végétale et/ou animale, hors matières relevant des déchets animaux au sens de l'arrêté du 30 décembre 1991 (JORF du 12/02/92, modifié par l'arrêté du 12/03/93, JORF du 23/03/93, modifié par l'arrêté du 28/06/96, JORF du 29/06/96, modifié par l'arrêté du 06/02/92, JORF du 10/02/98). L'opération de compostage vise à améliorer le taux d'humus. Elle est caractérisée à la fois par :*

- *une élévation de température,*
- *une réduction de volume,*
- *une modification de la composition chimique et biochimique,*
- *un assainissement au niveau des pathogènes, des graines d'adventices et de certains résidus.*

Elle doit comporter un ajout de matière carbonée et un ajustement de la teneur en eau, si nécessaire. Ni le dépôt de fumier stocké par simple bennage, ni le compostage dit de surface (épandage de fumier sur le sol plus incorporation superficielle) ne peuvent être assimilés à un compostage. »

Dans la pratique, on peut parler de compostage si les transformations de matières organiques se réalisent à la fois en *présence d'oxygène* et avec une *élévation de la température* suite à la mise en andain.

Ces deux facteurs sont primordiaux pour que le compostage *stricto sensu* puisse se réaliser. En influant dessus, on peut orienter les transformations réalisées par les microorganismes :

- en régulant la température, on sélectionne les communautés microbiennes les plus actives,
- en régulant le taux d'oxygène, on pèse sur l'intensité de l'activité microbienne, voire sur sa nature (qui peut devenir anaérobie en mauvaises conditions de compostage).

Nous verrons dans le **§ 4.1.5.** comment les procédés de compostage permettent de modifier les conditions de température et d'aération des tas, mais seulement après nous être penchés plus en détail sur les paramètres-clés qu'il faut avoir à l'esprit pour bien comprendre l'évolution d'un tas de compost (**§ 4.1.2.**), après avoir donné une définition de ce qu'on appelle humus et composés humiques (**§ 4.1.3**) et enfin après avoir passé en revue les avantages et les inconvénients apportés par le compostage (**§ 4.1.4.**).

4.1.2. Paramètres de suivi et de compréhension du processus de compostage

Le tas de compost est un milieu vivant qui évolue et se transforme. Pour bien comprendre ce qu'il se passe au cours du compostage, nous présentons les principaux paramètres physico-chimiques de caractérisation de ce milieu pour aborder ensuite les paramètres plus directement liés à la biologie. Ceci nous permettra également de souligner quels sont les paramètres qui méritent le plus d'attention d'un point de vue pratique.

4.1.2.1. Paramètres physiques et chimiques

Les principaux paramètres physiques et chimiques ayant une influence sur le processus et/ou évoluant au cours du compostage sont le taux d'oxygène, l'humidité, la température, la structure du tas de compost, le rapport C/N, le pH et la teneur en éléments majeurs.

• le taux d'oxygène (O_2)

Pour que le compostage se maintienne en aérobiose, il faut avoir un taux minimum de 5% en O_2 dans l'atmosphère du tas de compost (CITTERIO *et al.*, 1987 ; COOPERBAND, 2000 ; MUSTIN, 1987), bien que la limite réelle d'anaérobiose soit inférieure à 1% (MUSTIN, 1987). Il peut aussi arriver que des poches anaérobies ou en hypoxie apparaissent au cours du compostage (FINSTEIN *et al.*, 1999).

Certaines méthodes de compostage proposent de mesurer le taux d'oxygène ou le taux de CO_2 dans le tas de compost comme indicateur de suivi du processus de compostage. En conditions aérobies, le taux de CO_2 est complémentaire de celui de l' O_2 . Cependant, le CO_2 est produit aussi bien par la respiration que par la fermentation (en anaérobiose). Sa présence et ses variations dans l'atmosphère du compost ne sont donc pas un indicateur fiable pour suivre le processus de compostage. (CITTERIO *et al.*, 1987 ; MUSTIN, 1987), contrairement au suivi de la consommation de l'oxygène (MUSTIN, 1987).

Le taux d'oxygène dépend de la porosité du tas de compost, donc à la fois (MUSTIN, 1987) :

- de la granulométrie et de la forme des particules organiques
- et de la quantité d'eau présente dans les pores (donc de l'humidité du tas)

Le taux d'oxygène évolue au cours du temps : les microorganismes aérobies utilisent de l'oxygène et rejettent du CO_2 , ce qui a tendance à appauvrir le milieu en O_2 et la circulation de l'air dans le tas de compost renouvelle l'atmosphère et enrichit le milieu en O_2 .

Les besoins en O_2 varient selon la phase de compostage ; d'après MUSTIN (1987), ils sont forts en phase thermophile (équivalent à 0,5 à 1 m^3 d'air/minute/tonne de MS), moyens en phase de refroidissement (0,1 à 0,5) et faibles en phase de maturation (< 0,1).

L'air circule dans le tas de compost grâce à un effet de cheminée : l'air monte sous l'effet de la chaleur et aspire ainsi de l'air par le bas et les côtés (voir Figure 1). La

circulation de l'air est donc en principe d'autant plus forte que la température du tas est élevée. Les vents dominants peuvent avoir une influence sur cette circulation. La quantité d'air apportée par le mécanisme de cheminée dépend de la taille, de la forme et de l'orientation du tas de compost (MICHEL, 1999).

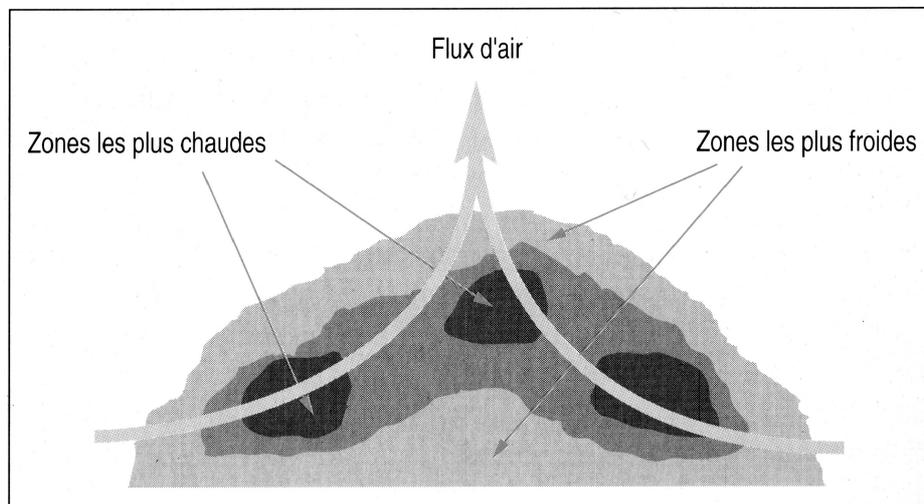


Figure 1 : circulation de l'air dans le tas de compost : répartition de la chaleur et effet de cheminée (d'après Gobat et al., 1998)

Conséquences pratiques :

- la taille d'andain recommandée pour assurer une bonne circulation de l'air est de 1,5 à 1,8 m de haut. Les tas plus petits présentent une meilleure circulation, mais plus de pertes de température (COOPERBAND, 2000). Certains praticiens recommandent parfois de protéger le compost des vents asséchants en installant les andains à proximité de haies ou de brises vents.
- plus la porosité est élevée, plus la circulation de l'air est aisée. L'humidité intervient en sens inverse. Le compostage optimal serait obtenu pour des valeurs de 30 à 36% de porosité dans la masse (MUSTIN, 1987).

En résumé, les conditions aérobies indispensables au compostage sont obtenues en faisant attention à la fois à la structure des matériaux de départ, à la taille et à la forme de l'andain, à son orientation par rapport aux vents dominants et à son taux d'humidité. Ces paramètres (en particulier la structure et l'humidité) peuvent évoluer dans le temps et créer des conditions anaérobies. Une intervention (par exemple un retournement) peut alors s'avérer nécessaire pour rétablir les conditions aérobies du compostage (voir § 4.1.5.). Le suivi du taux d'O₂ semble être un indicateur scientifiquement plus fiable que le suivi du taux de CO₂ pour caractériser l'évolution aérobie d'un tas de compost.

• l'humidité

L'humidité (ou la teneur en eau) du tas de compost a une influence sur la porosité, la température, l'aération et sur la sélection et l'activité des micro-organismes de l'andain.

Il n'y a pas de relation proportionnelle stricte entre l'augmentation de l'humidité et la diminution de la porosité du tas de compost. La relation est différente pour chaque type de substrat et est fonction de sa granulométrie et de sa capacité de rétention en eau (MUSTIN, 1987). La porosité du tas de compost est influencée par l'humidité et la quantité d'air devient limitante pour le compostage au-dessus de 60% d'humidité : on passe en conditions anaérobies et le compostage s'arrête (COOPERBAND, 2000 ; GODDEN, 19??). De plus, si l'humidité augmente, les risque de compaction et de perte de structure sont plus forts. Le fumier de vache pailleux semble se soustraire à cette règle. Du fait de sa forte capacité de rétention en eau, des variations d'humidité de 57 à 73% ne semblent pas avoir d'influence sur sa compaction ni sur sa porosité (DAS et KEENER, 1997).

Une humidité trop faible peut éventuellement conduire à des risques de combustion spontanée ; l'humidité permet de réguler la température par effet tampon et grâce à l'inertie thermique de l'eau qui est plus forte que celle de l'air (COOPERBAND, 2000).

Il faut également un minimum d'eau pour permettre le développement microbien. En-dessous de 40% d'humidité, les matières organiques ne compostent pas rapidement (HONG *et al.*, 1984), l'activité des microorganismes étant très réduite.

Dans le détail, on s'aperçoit que les conditions d'humidité ont une influence sur les populations microbiennes. Les bactéries ainsi que les actinomycètes sont en croissance et en activité à des taux d'humidité supérieurs à ceux des champignons, bien que les actinomycètes soient parfois plus résistants à la siccité que les bactéries. Ainsi, quand l'humidité d'un tas de compost décroît, seuls les champignons maintiennent leur activité et les températures s'abaissent vers 40-50°C. Un feutrage gris-blanc dû au mycélium des champignons apparaît autour des particules solides. Ces zones apparaissent souvent sèches au toucher et le compost s'effrite sous les doigts en une poussière grisâtre (MUSTIN, 1987).

Tout au long du compostage, l'humidité peut varier dans des directions opposées pour deux raisons (MUSTIN, 1987) :

- tendance à l'augmentation car il y a production d'eau par les microorganismes qui dégradent les matières organiques en présence d'O₂. On appelle cette eau '*eau métabolique*',
- tendance à la diminution sous l'action conjuguée de la montée en température et de la circulation de l'air qui entraînent des pertes sous forme de vapeur d'eau.

Conséquence pratique :

l'assèchement d'un tas de compost sera d'autant plus rapide que l'aération sera forte (aération forcée ou retournements), et que la température sera haute (MUSTIN, 1987).

L'humidité optimale varie en fonction du substrat ; on trouve dans la littérature des valeurs allant de 45 à 70% en poids. Certains auteurs recommandent en règle générale des valeurs de 55 à 65% d'humidité en poids (DAS et KEENER, 1997).

Les praticiens préconisent de mesurer le taux d'humidité optimal grâce à un test empirique simple appelé 'test à la main' (voir Figure 2). Lorsque l'on prend une boule de matériau à composter et qu'on la presse dans la main, si de l'eau s'écoule, le matériau est trop humide, si après avoir ouvert la main, le matériau ne conserve pas sa structure et s'effrite, il est trop sec et si le matériau garde la forme qu'on lui a donné, l'humidité est optimale (DUNST, 1991).

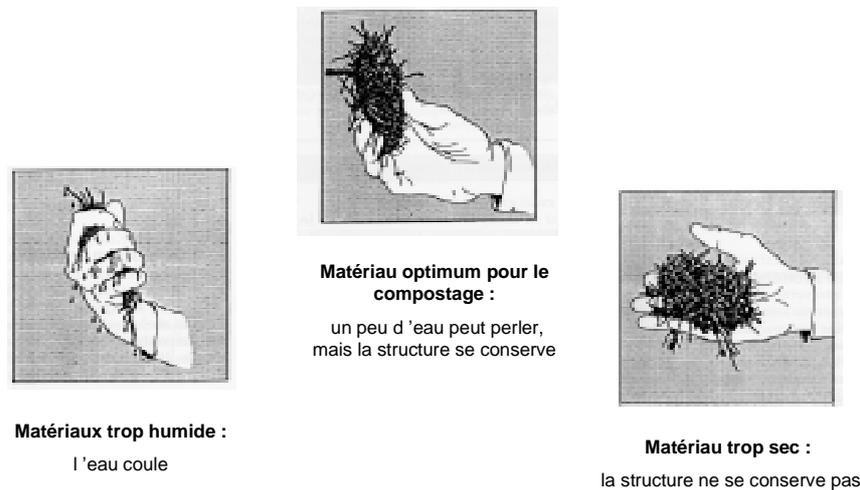


Figure 2 : le 'test à la main', une estimation simple et pratique du taux d'humidité d'un compost (d'après Dunst, 1991)

• la température¹

L'élévation de température est un des principaux effets recherchés lors du compostage. Cet échauffement est à l'origine de la destruction de certains germes pathogènes et de divers parasites, de l'évaporation de l'eau et de la dégradation accélérée des matières organiques. Les températures sont considérées comme optimales dès que l'effet d'hygiénisation souhaité est atteint (~ 65°C) ou que les processus biologiques (KISLIG, 1989) se déroulent bien à l'intérieur du tas de compost (55-60°C). Il vaut mieux éviter les trop fortes températures (ralentissement de l'activité de la plupart des micro-organismes et effet de « cuisson » du compost), de même que les températures trop faibles (moins de 40°C) pour lesquelles l'effet thermique ne permet pas de remplir les objectifs assignés au compostage (hygiénisation des substrats, vitesse de dégradation rapide).

L'élévation de la température provient de l'activité des microorganismes du tas de compost qui réalisent des réactions d'oxydation exothermiques.

Il est indispensable de préciser que la température n'est pas une mesure directe de l'activité des micro-organismes : elle n'en est qu'une conséquence partielle. Si les microbes produisent de la chaleur, cette dernière est plus ou moins bien conservée par le tas de compost. La température de l'andain résulte donc à la fois de l'activité de la flore microbienne et des propriétés thermiques des matériaux constituant le tas.

¹ les éléments de ce paragraphe sont tirés, sauf précision, de MUSTIN (1987)

La chaleur produite par les micro-organismes dépend de la vitesse de dégradation des composés (les produits animaux et les produits végétaux riches en sucres sont plus fermentescibles que les végétaux ligno-cellulosiques) et du pouvoir calorifique des substrats (la dégradation d'un gramme de glucides libère moins de d'énergie qu'un gramme de protéide ou de lipide).

Les mécanismes de transfert de chaleur (classés par ordre de pertes décroissantes) dans un tas de compost sont de trois natures : la radiation (infra-rouge), la conduction et la convection (pertes plus fortes lors de retournements ou avec une aération forcée). Le comportement thermique d'un tas de compost dépend de la chaleur spécifique et de la conductivité thermique des matériaux qui elles-mêmes varient en fonction de l'humidité du tas (augmentation des pertes avec augmentation de l'humidité) et avec la maturation du substrat (diminution des pertes avec la polymérisation des matières organiques et l'augmentation du taux de matières minérales au cours du compostage).

Conséquences pratiques :

- la conductivité thermique est relativement faible dans la gamme des taux d'humidité optima du compostage ; dans ces conditions, un tas important est donc auto-isolant et garde beaucoup mieux sa chaleur qu'un petit tas.
- un tas de compost qui monte mal en température par excès d'humidité (fort pourcentage d'eau et faible porosité) est avant tout un tas qui perd vite sa chaleur (conductivité thermique élevée).

La présence de couches isolantes (par exemple un « manteau » de paille) a pour effet une augmentation de la température interne et une stabilisation à une température d'équilibre (compensation des déperditions par la production de chaleur). Attention toutefois : si l'isolation est trop forte, on peut craindre des risques d'autocombustion.

En conclusion, la température est un indicateur à manier avec précaution pour le suivi des transformations et de l'activité des microbes dans le tas de compost :

- une faible montée en température ou une chute brusque de la température au début du compostage constituent des indicateurs fiables d'un mauvais fonctionnement,
- le maintien d'une température jugée optimale pour une phase de compostage donnée ne signifie pas forcément que le rendement optimal de l'activité aérobie soit atteint au cours de cette période (par exemple : la température reste assez élevée par isolation ou par inertie thermique alors que les micro-organismes ne travaillent plus).

On développe sur l'activité des microorganismes et l'évolution de la température du tas de compost dans le § 4.1.2.2.

• structure et densité

Le volume et la masse du tas de compost ne font que diminuer au cours du compostage sous l'influence de deux phénomènes (MUSTIN, 1987) :

- l'effondrement (dû à la décomposition du substrat) et le tassement du tas,
- la diminution de la masse de matière organique par dégagement de CO₂ et de composés volatiles et la perte d'eau par dégagement de vapeur d'eau. On estime que pour un rapport C/N de départ optimal, il y a en moyenne une perte en matière organique de 35 à 50%. La réduction sera plus forte dans le cas de déchets très fermentescibles (par exemple plus de 50% pour des boues de stations d'épuration) et moins forte pour des déchets peu fermentescibles (25 à 40% pour des matériaux riches en fibres ligno-cellulosiques).

Les diminutions de masse et de volume se compensent en partie : la densité finale est proche de la densité initiale.

En revanche, ce qui évolue, c'est la structure du tas de compost. En fonction du type de substrat mis à composter et de la vitesse de la dégradation de la matière organique, l'effondrement et le tassement du tas de compost seront plus ou moins rapide et important. Cette situation réduit la porosité et donc la circulation de l'air et risque de bloquer le processus de compostage. Une intervention peut alors être nécessaire pour rétablir les conditions aérobies (voir § 4.1.5.).

• le rapport C/N

Le rapport du carbone organique sur l'azote total (rapport C/N) baisse au cours du compostage (MUSTIN, 1987) : le carbone est perdu plus rapidement (surtout sous forme de CO₂) que l'azote (pertes par volatilisation essentiellement).

Les besoins azotés du compostage sont fonction de la teneur en matériaux carbonés facilement biodégradables. Plus le substrat est difficile à dégrader, plus la teneur optimale en azote doit être faible (MUSTIN, 1987). En effet, lorsque le carbone se dégrade lentement, un pool d'azote minéral disproportionné par rapport aux besoins des microorganismes (pour la fabrication des enzymes et autres protéines) peut conduire à de fortes pertes d'azote par volatilisation (HAMMOUDA et ADAMS, 1987).

Dans les conditions expérimentales relatées par MUSTIN (1987), on a pu mettre en évidence que pour des rapports C/N compris entre 70 et 20, les transformations aérobies se déroulent le mieux. Pour des substrats moyennement fermentescibles, on considère que le rapport C/N optimal au départ est compris entre 30 et 35. Ce chiffre est confirmé et nuancé par d'autres auteurs. GOLUEKE (1992) affirme que le C/N idéal pour le compostage est de 30. S'il y a de forts pourcentages de matériaux ligneux (bois), ce rapport idéal s'élève à 35 voire 40, car une part importante du carbone n'est pas facilement disponible pour les micro-organismes. Le C/N initial a également une influence sur les pertes en éléments fertilisants (GODDEN, 1995a) : d'après SOMMER et DAHL (1999), l'élévation du C/N au-dessus de 20 conduit à réduire les pertes en azote et GODDEN (1995) affirme que les pertes en azote et en potassium sont pratiquement nulles pour des C/N de 35. Pour PARE *et al.* (1998), le C/N n'est pas suffisant pour prédire le bon déroulement du compostage ni pour assurer le minimum de pertes, en azote en particulier. Il vaudrait mieux établir ce C/N non pas en calculant le rapport C_{org}/N_{total} , mais plutôt $C_{facilement\ bio-disponible}/N_{facilement\ bio-disponible}$, ce que confirme GODDEN (communication personnelle).

Depuis une dizaine d'années, de nouvelles méthodes d'analyse et de caractérisation des matières organiques sont développées et affinées aussi bien par la recherche publique que par le secteur privé (laboratoires d'analyse). Ces méthodes sont de type non destructives ou à destruction progressive et permettent de qualifier de façon plus précise et différenciée les matières organiques (BALESDENT *et al.*, 2000 ; ROBIN, 1997a).

Si de telles méthodes présentent un intérêt certain pour qualifier un produit commercialisé en grande quantité avant son épandage ou pour obtenir son autorisation de mise sur le marché, elles ne sont que d'un intérêt limité pour un agriculteur qui souhaite composter son fumier.

Dans une approche très pratique, on préconise un rapport C/N de 25 à 35 (GODDEN, 1995a), à condition que les proportions de carbone facilement dégradable soient compatibles avec les quantités d'azotes rapidement disponibles. Dans la pratique, on arrive à distinguer les matériaux qui sont compostables de ceux qui ne le sont pas, et le paramètre C/N n'est alors qu'un critère parmi d'autres pour qualifier la « compostabilité » d'un substrat.

• le pH

La gamme optimale des pH pour le compostage est celle des conditions optimales de vie des microorganismes : elle est située autour de la neutralité.

Les bactéries trouvent leur optimum de pH selon les auteurs entre 6 et 8 (COOPERBAND, 2000 ; MUSTIN, 1987).

Les champignons sont plus tolérants : de 5 à 8,5 environ (COOPERBAND, 2000 ; MUSTIN, 1987) ; pour ces derniers, les inhibitions dues au pH semblent être indirectes, dues à une diminution et une modification de la disponibilité des nutriments dans le milieu (MUSTIN, 1987). Les champignons ont des préférences pour les pH acides. Les Basidiomycètes ont la particularité de ne pas supporter des pH supérieurs à 7,5 (TUOMELA *et al.*, 2000).

En résumé, un pH acide favorise les bactéries et les champignons, alors qu'un pH basique est plus propice aux actinomycètes et aux bactéries alcalines (LECLERC, 2001).

Outre les effets sur la microbiologie du compostage, un pH élevé risque d'augmenter les pertes d'azote sous forme ammoniacale. Les valeurs de seuil à risque varient beaucoup dans la littérature : COOPERBAND (2000) donne une valeur générale de 7,5 alors que MICHEL *et al.* (1996) parle de 8,2 pour des déchets verts. A pH 9,24 (qui correspond au $pK_a[NH_4^+/NH_3]$), il y a en principe autant d'ammonium que d'ammoniac dans le tas de compost (DRIEUX, 1993).

Au cours du compostage, plusieurs processus (MUSTIN, 1987 ; HELLMANN *et al.*, 1997 ; TUOMELA *et al.*, 2000) sont susceptibles de faire varier le pH. L'acidification peut faire chuter le pH jusqu'à 4.

Le pH évolue beaucoup lors du compostage, on distingue en général 4 phases (voir Figure 3) :

- phase d'acidogénèse (I) : le pH diminue. La flore produit beaucoup de CO_2 et d'acides organiques en début de phase thermophile,
- phase d'alcalinisation (II) : le pH augmente. Il y a une hydrolyse bactérienne de l'azote protéique et organique, ce qui produit de l'ammoniac,

- phase de stabilisation du pH (III) : le rapport C/N diminue, les réactions deviennent plus lentes. De l'ammoniac a été perdu par volatilisation (surtout avec un pH > 8) et l'azote est utilisé par les microbes pour la néosynthèse de composés humiques
- phase stable (IV), proche de la neutralité : le compost est en voie de maturation. Cette stabilité est due aux réactions lentes et au pouvoir tampon de l'humus.

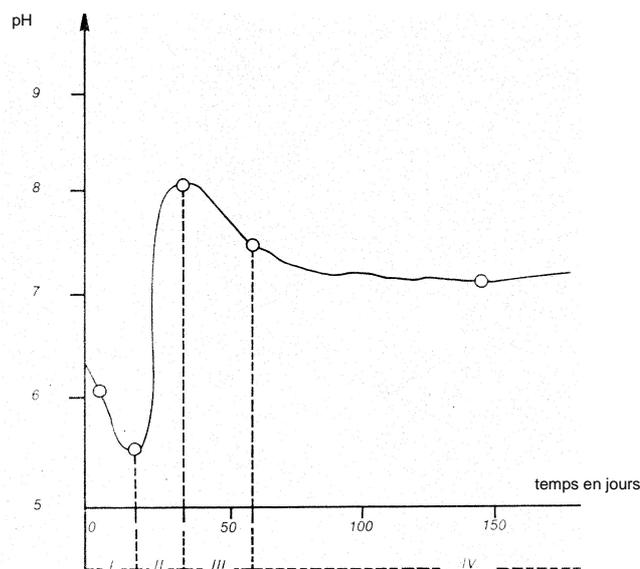


Figure 3 : courbe d'évolution du pH pendant le compostage (d'après Poincelot, 1974)

Dans la pratique, on se préoccupe peu du pH lors du compostage, ce paramètre étant difficile à réguler et variant généralement dans des plages de valeurs acceptables pour le développement des microorganismes.

• la teneur en autres éléments majeurs

Pour l'ensemble des substrats que l'on composte habituellement, on est au-dessus des teneurs limitantes en éléments majeurs, comme le montre le Tableau 1.

Tableau 1 : teneurs limitantes en éléments majeurs pour le compostage et teneur en ces mêmes éléments pour le fumier de bovin (production laitière, stabulation libre) et pour un broyat de déchets verts

ELEMENT (% MS)	TENEURS LIMITANTES POUR LE COMPOSTAGE MUSTIN (1987)	FUMIER DE BOVIN LAIT EN STABULATION LIBRE (ZIEGLER et HEDUIT, 1991)	BROYAT DE DECHETS VERTS (RYSSEL, comm. pers.)
P	0,2-0,3 (0,5-0,6 pour fumiers)	1,4	0,3
K	0,2-0,5	3,2	0,6
Mg	0,1-0,2	0,8	0,8
Ca	0,1-0,2	2,0	3,8

On voit ainsi que le fonctionnement microbologique du tas de compost dépend avant tout des sources de carbone et d'azote disponibles pour la croissance, le dévelop-

pement et l'activité des microorganismes. Le cas du phosphore est à mettre à part, car cet élément existe sous différentes formes pas toutes assimilables par les microbes.

Ces éléments confirment l'utilité du rapport C/N décrit précédemment comme rendant compte pour partie de la compostabilité du matériau de départ.

Au cours du compostage, la teneur en éléments fertilisants majeurs évolue, sauf pertes exceptionnelles, dans le sens d'une concentration.

4.1.2.2. Paramètres biologiques

Les bactéries, actinomycètes et champignons sont responsables à eux seuls de plus de 95% des transformations qui ont lieu au cours du compostage. Les bactéries sont toujours dominantes par rapport aux actinomycètes et aux champignons et seraient responsables de 80 à 90 % de l'activité microbiologique des tas de compost (MUSTIN, 1987, GODDEN *et al.*, 1983), en particulier pour des raisons de taille, de forme, de rapport surface/volume (TUOMELA *et al.*, 2000), en somme d'opportunité spatiale.

Pour comprendre et agir sur le compostage, il faut toujours garder à l'esprit que la grande majorité des transformations qui ont lieu au cours de ce processus sont le résultat de l'activité des microbes (KAISER, 1996).

Ce constat appelle deux remarques :

- les transformations de la matière organique dans le tas de compost font intervenir des relations trophiques et d'interdépendance très complexes au sein d'une société microbienne active et diversifiée,
- il est très difficile de contrôler avec certitude un tel processus complexe, on peut pour le moins éviter de le bloquer et tout au plus l'orienter sans pour autant pouvoir le contrôler totalement.

• approche biochimique et microbiologique du compostage

Une description du processus au niveau biochimique et moléculaire permet de comprendre ce qui se passe, plus difficilement de faire des prédictions. Les études biochimiques précises sont donc d'un intérêt limité pour notre propos, mais il est bon d'en connaître quelques traits saillants. La majeure partie des transformations biochimiques sont réalisées (MUSTIN, 1987) par des enzymes extracellulaires (exo-enzymes produites et excrétées dans le milieu par les microbes en activité) et intracellulaires (endo-enzymes, qui peuvent aussi être libérées dans le milieu à la mort des microorganismes et persister plus ou moins longtemps avant d'être dénaturées). La notion de couple enzyme-substrat dans un milieu donné permet d'avoir une approche de l'évolution des transformations et des populations microbiennes dans un tas de compost. Sous l'effet de l'activité enzymatique, le substrat s'épuise et les conditions de milieu changent, ce qui crée des conditions de limitation et de destruction d'une population et ouvre la voie à d'autres communautés. Ainsi, les microbiologistes (HELLMANN *et al.*, 1997) ont étudié les successions de populations microbiennes dans le tas de compost et se sont servis de cet indicateur pour décrire la progression du processus de compostage.

• classification opérationnelle des communautés microbiennes

Les microorganismes intervenant dans le compostage sont d'origine tellurique (MUSTIN, 1987) ; ils sont déjà présents en grande quantité dans tous les substrats destinés à être compostés ou épandus sur le sol.

On distingue différentes classes de microorganismes en fonction des plages optimales de températures (voir Tableau 2) dans lesquelles ils peuvent se développer

Tableau 2 : classes de microorganismes en fonction des plages des températures optimales pour leur croissance et développement

	MUSTIN (1987)	FINSTEIN <i>et al.</i> (1999)
PSYCHROPHILES (absents du compost)	0-30°C	< 15°C
MESOPHILES (les plus nombreux)	30-45°C	25-40°C
THERMOPHILES (peu nombreux)	> 45°C, 50-60°C, maxi 90°C	45-80°C

Les seuils de températures sont relativement flous et non homogènes entre les différents auteurs. La question de la température maximale à laquelle on trouve encore une activité enzymatique et microbienne se pose également, sans que l'on puisse avoir de réponse claire. L'élévation de la température accélère les vitesses de réaction enzyme-substrat jusqu'à une température critique (dénaturation de l'enzyme). La dénaturation peut être irréversible, et elle peut survenir à des températures relativement basses (40-50°C) et ceci d'autant plus que les enzymes ont un poids moléculaire élevé et que leur structure est complexe. Pour MUSTIN (1987), les températures critiques les plus hautes sont rarement supérieures à 80-85°C.

• description microbiologique du compostage

A la lueur de ces données, on décompose classiquement le compostage en 4 phases (LECLERC, 2001 ; HELLMANN *et al.*, 1997) qui sont en relation avec l'évolution de plusieurs autres paramètres. L'indicateur le plus manifeste des changements qui ont lieu dans un andain est la température (HELLMANN *et al.*, 1997), considérée comme le reflet de l'activité des micro-organismes et des conditions du milieu (substrat nutritif, atmosphère, pH...). Ces 4 phases sont (voir Figure 4) :

- la phase mésophile (A)
- la phase thermophile (B)
- la phase de refroidissement (C)
- la phase de maturation (D), *cette dernière phase pouvant être très courte, voire inexistante.*

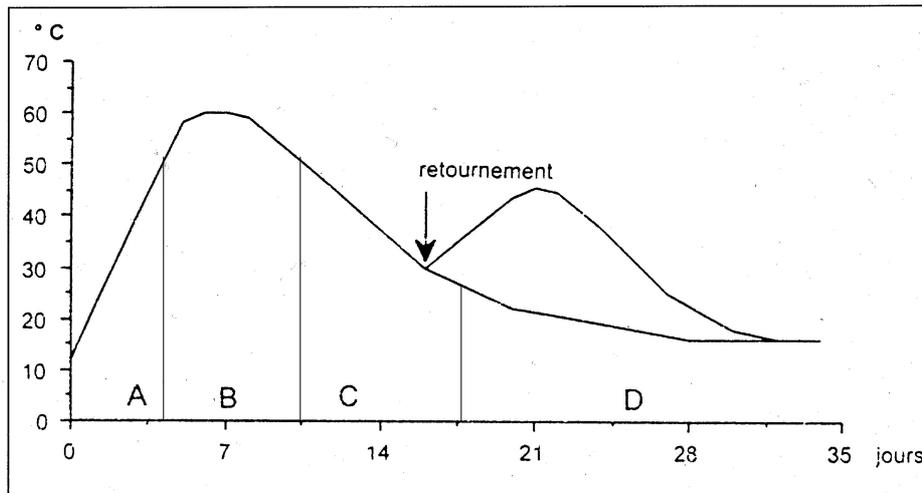


Figure 4 : Évolution de la température durant les 4 phases du compostage et influence d'un retournement (d'après Godden, 1995b)

Nous verrons dans le § 4.1.5. que pour favoriser un type de transformation plutôt qu'un autre, on se réfère à ce qui se passe dans ces différentes phases. Les relations trophiques entre les différentes communautés microbiennes sont très complexes à établir. L'étude de ces relations trophiques aux niveaux intermédiaires est simplifiée et on ne s'intéressa (KAISER, 1996) qu'aux processus de dégradation primaires et à l'humification. On peut en particulier suivre l'évolution de la matière organique au cours du compostage selon trois grandes fractions (VEEKEN *et al.*, 2000) : les hydrogénocarbonates (polymères de type cellulosique et sucres simples), la lignine et les composés azotés. Au début du compostage, les hydrogénocarbonates sont transformés en CO_2 et H_2O . Les composés azotés sont transformés en NH_3 . Dans les phases plus avancées, la cellulose et l'hémicellulose sont utilisées par les microbes et finalement, la lignine peut également être dégradée. À côté de la minéralisation, la matière organique peut être transformée en substances humiques (VEEKEN *et al.*, 2000). Les résidus de la dégradation de la lignine servent de précurseurs d'humus (TUOMELA *et al.*, 2000).

• la phase mésophile

C'est la phase de lancement du compostage. Suite à la mise en andain dans de bonnes conditions (porosité, humidité, C/N...), les microorganismes mésophiles (bactéries et champignons essentiellement) non spécifiques présents dans le substrat se développent et dégradent des composés simples (sucres simples, alcools, lipides, acides aminés...) et une partie des polymères (protéines, acides nucléiques, amidon, pectines, héli-cellulose, cellulose...). Cette activité intense entraîne une montée en température (jusqu'à 30-40°C en quelques heures, au maximum en quelques jours), un dégagement important de CO_2 et une acidification (LECLERC, 2001 ; HELLMANN *et al.*, 1997 ; TUOMELA *et al.*, 2000). À mesure que le tas s'échauffe, la quantité de microbes présents décroît et la proportion de champignons se réduit au profit des bactéries, apparemment à cause de l'épuisement des substrats facilement dégradables et pour des raisons de compétition.

• la phase thermophile

Les bactéries prédominent au début de la phase thermophile (HELLMANN *et al.*, 1997) puis avec l'augmentation de la température au centre du tas (jusqu'à 60 à 70°C pour des composts agricoles), seules les bactéries thermophiles et les actinomycètes subsistent (LECLERC, 2001 ; HELLMANN *et al.*, 1997). Au début de cette phase, parfois décrite comme un « pic de chaleur », l'activité microbienne est encore forte et conduit à des forts dégagements de CO₂ et de vapeur d'eau. Sous l'effet de la chaleur et de la remontée du pH, il peut y avoir des pertes importantes en azote par volatilisation d'ammoniac pendant cette phase (DEWES, 1995 ; MORVAN et DACH, 1998).

Quand on atteint ces hautes températures, certains microorganismes quittent leur forme végétative pour prendre leur forme de résistance. Ces microorganismes, essentiellement des bactéries (MUSTIN, 1987 ; TUOMELA *et al.*, 2000), sporulent vers les 65°C. La phase thermophile exerce donc une forte pression de sélection sur les microorganismes qui seront présents dans le tas de compost après le « pic de chaleur ». Cette phase thermophile permet d'obtenir une hygiénisation du tas de compost, à condition toutefois que les germes pathogènes ne soient pas capables de sporuler.

Dans les communautés limitées par des conditions physiques extrêmes (par exemple la température), la diversité des espèces est habituellement faible. Cette dernière chute brusquement dès que l'on dépasse un seuil de 60-65°C. Que ce soit à 49, 50 ou 55°C, la diversité des espèces (mesurée selon un indice particulier, l'indice de Shannon) est à peu près la même. Il vaut donc mieux ne pas dépasser les 60°C pour avoir une diversité d'espèces et des adaptations métaboliques satisfaisantes. La diversité des espèces est importante dans la mesure où les substrats peuvent être très variés (STROM, 1985).

• la phase de refroidissement

A force d'épuiser le substrat et de réduire, sous l'effet de la chaleur, le nombre de communautés actives, l'activité microbienne finit par diminuer et le tas de compost se refroidit, plus ou moins vite, pour atteindre la température ambiante (LECLERC, 2001). Dans la pratique, on considère que l'on quitte la phase thermophile lorsque la température au cœur de l'andain passe sous la barre des 50°C. Après le « pic de chaleur », la biomasse microbienne a diminué de 95% par rapport à la biomasse initiale (HELLMANN *et al.*, 1997). Le milieu peut à nouveau être colonisé par des microorganismes mésophiles (LECLERC, 2001 ; HELLMANN *et al.*, 1997 ; TUOMELA *et al.*, 2000), mais on ne retrouve pas les mêmes communautés que celles qui étaient présentes dans la première phase. Les souches présentes sont capables de dégrader la cellulose, l'hémi-cellulose et la lignine par des processus lents. **C'est aussi pendant cette phase que débute l'humification et l'incorporation de l'azote dans des molécules complexes.** On suppose que les champignons jouent un rôle non négligeable au cours de cette phase. En effet, on observe que leur croissance est réduite quand les sources de carbone et d'azote facilement dégradables diminuent ; l'activité lignolytique apparaît alors comme une forme de métabolisme secondaire ou de survie (TUOMELA *et al.*, 2000). Les champignons ne résistent cependant pas à des températures dépassant les 55-60°C.

• la phase de maturation

Cette dernière phase est le témoin d'un accroissement de la biomasse microbienne où l'on retrouve aussi bien des bactéries que des champignons (HELLMANN *et al.*, 1997). Cette phase est également adaptée à la colonisation par la macro-faune, en particulier les lombrics quand ils sont présents dans l'environnement du tas (contact direct du compost avec la terre). Les matières organiques sont stabilisées et humifiées par rapport aux matières premières mises à composter et le pH s'équilibre vers la neutralité (LECLERC, 2001). La phase de maturation dure jusqu'à l'épandage, à condition toutefois que le compost ne soit pas engorgé par de l'eau météorique ; dans la pratique, il convient de mettre le tas sous bâche pendant cette phase.

• est-il possible d'ensemencer les tas de compost avec des microbes sélectionnés ?

C'est une question très controversée.

La quasi totalité des microbiologistes démontrent qu'il n'y a pas d'effet nettement significatif de l'inoculation du tas de compost par des microorganismes de cultures pures ou de préparations commerciales lors d'opérations de compostage réalisées en vraie grandeur. Les observations des praticiens lors d'essais confirment cette affirmation. Par le jeu des compétitions entre espèces, certains auteurs signalent que des apports massifs d'espèces non présentes au départ ont déjà disparu après seulement quelques jours (MUSTIN, 1987). Si des ensemencements microbiens peuvent fonctionner en conditions de laboratoire, il est très improbable d'obtenir un succès en conditions réelles (Laure METZGER, communication personnelle).

En revanche, d'après MUSTIN (1987) et HERODY (communication personnelle), la pratique du réensemencement avec du vieux compost ou de la terre apparaît plus justifiée.

En effet, lorsque l'on composte régulièrement un même substrat, il se produit une sorte d'autosélection dans la masse des espèces les mieux adaptées à la nature et au type d'évolution du compost. Ce qui conduit à penser qu'*a priori*, les microorganismes les mieux armés dans la compétition nutritive sont aussi les plus actifs. Ces mêmes microbes subsistent sans doute dans les phases finales du compostage et leur réensemencement massif (1 à 10% et plus de la masse à composter) les amène à se développer rapidement. Ceci fonctionne sur le même modèle que la technique du pied de cuve en vinification et il est démontré dans la pratique que le recyclage de compost régularise la qualité et la composition finale du compost.

De plus, si certaines niches microbiologiques sont inoccupées, la terre et le vieux compost, vu leur richesse en microorganismes et la composition de ces substrats, permettent d'apporter de façon très sûre les souches manquantes (FINSTEIN *et al.*, 1999). Enfin, on rapporte des ensemencements réussis en milieu naturel à condition d'apporter les microorganismes dans un support refuge (en particulier, le compost a été utilisé comme une niche efficace d'après Thierry LEBEAU, communication personnelle).

Nonobstant, il semble que les inoculations qui ont le plus de chances de succès sont celles que l'on réalise une fois que le « pic de chaleur » est passé (THAKUR et SHARMA, 1998), quand le nombre de microorganismes a été fortement réduit. Il faut cependant apporter une population d'inoculum importante. Par exemple, il paraît intéressant d'inoculer des champignons cellulolytiques mésophiles pour le compostage

de déchets verts (MUSTIN, 1987) ; la vitesse de dégradation serait accrue d'environ 20%, le rapport C/N final serait significativement plus bas après 4 semaines (ce qui indique une meilleure dégradation), la perte de carbone est de 54% après 8 semaines (contre 45% pour un témoin non ensemencé).

En tout état de cause, pour que le compostage se déroule bien, il faut réunir tout un ensemble de conditions bien plus importantes que l'addition d'une souche de microorganisme spécifique, dont on ne connaît que très mal les chances de survie ni les gains de qualité ou de productivité qu'elle pourrait éventuellement procurer. Cette question de l'efficacité de l'ensemencement ne nous apparaît en définitive que très secondaire hors l'ensemencement par du vieux compost ou de la terre.

On abordera dans le § 4.1.5. les substances susceptibles d'agir favorablement, directement ou indirectement, sur l'activité des microbes du compost ou sur la transformation de la matière organique. Ces substances sont le plus souvent des sels minéraux, des hormones, des vitamines, des enzymes... On les regroupera sous l'appellation commune d'additifs ou d'adjuvants.

4.1.2.3. Conclusion : quels sont les paramètres dont il faut tenir compte pour réussir le compostage ?

Ce qu'on peut retenir, c'est que le compostage est avant tout un processus biologique, aérobie et très actif. Dans la pratique, pour avoir des chances de réussite quand on composte, il faut apporter un soin extrême au choix des matériaux de départ. Si le compostage démarre mal, si les matériaux ne sont pas vraiment compostables ou qu'ils réclament une correction du rapport C/N, de structure, d'humidité... il est très difficile d'intervenir efficacement pour rétablir de bonnes conditions une fois que le processus est lancé. **Les recommandations générales que l'on peut faire touchent au choix des matériaux de départ et au suivi de la température et des conditions aérobies.**

Choisir un matériau de départ équilibré (C/N de 25 à 35), suffisamment humide (test à la main), ayant une bonne structure et étant capable de la garder.

Au cours du compostage, vérifier que l'élévation de température a bien lieu. La mesurer si possible de façon objective (voir la fiche technique de fabrication artisanale d'un thermomètre pour tas de compost en Annexe 7). Le mieux serait d'enregistrer les mesures de température les premières années (courbe) et d'associer ces mesures à des observations générales, d'essayer de faire des corrélations avec l'activité du tas, la vitesse de décomposition et d'effondrement, le climat (pluie, température de l'air, vents...). Tous ces éléments ensemble constituent l'expérience, et demandent un certain apprentissage pour être suffisamment fiable.

Il faut également s'assurer que le tas reste en conditions aérobies. On peut constater ces conditions en ouvrant régulièrement le tas (un aspect gras et luisant, associé à de mauvaises odeurs et des couleurs noires ou vertes sont le témoin de conditions anaérobies).

Enfin, on peut éventuellement s'assurer d'une meilleure inoculation du tas de compost en microorganismes en y **ajoutant de la terre ou du vieux compost** au départ.

4.1.3. Qu'est-ce que « l'humus » ?

Quand on parle de compost ou de compostage, on parle souvent de stabilisation de la matière organique et de fabrication d'humus ou de composés humiques. Ces composés sont très nombreux et variés et obtenus dans des conditions très diverses. Ce paragraphe se propose de faire le point des connaissances sur l'humus et les substances humiques.

4.1.3.1. Caractérisation des composés humiques

Ce qu'on désigne sous le terme générique d'humus désigne une réalité biochimique complexe et très diversifiée. Il est plus juste de parler de composés humiques ou de substances humiques.

L'humus est une substance colloïdale noirâtre résultant de la décomposition partielle, par les microbes du sol, de déchets végétaux et animaux (Dictionnaire encyclopédique Larousse, 1979). La décomposition et la stabilisation peuvent être plus ou moins poussées ; c'est pour cette raison que l'on distingue différents types de composés humiques en fonction de leur degré d'humification.

D'un point de vue biochimique, les composés humiques sont constitués de cycles organiques aromatiques et de chaînes carbonées latérales dites aliphatiques (MUSTIN, 1987). Ils se distinguent par :

- le poids moléculaire
- le pourcentage des différents groupements chimiques fonctionnels
- la viscosité et la tension superficielle

Selon cette classification, les différents composés humiques qui existent sont :

- les acides fulviques
- les acides humiques
- l'humine

• les acides fulviques

Ils ont un poids moléculaire (p.m.) plus faible que les autres composés humiques ; celui-ci peut varier de l'ordre de 100 à plus de 100.000 (MUSTIN, 1987). SOLTNER (1996) ne donne pas les mêmes limites de poids moléculaire et découpe cette classe des acides fulviques en trois sous-classes distinctes :

- les acides créniques, solubles dans l'eau, avec un poids moléculaire faible variant de 100 à 500,
- les hématomélaniques, solubles dans l'alcool, d'un poids moléculaire intermédiaire de 500 à 900,
- les acides fulviques, solubles dans l'acide chlorhydrique, de 900 à 2.000 de poids moléculaire.

Les acides fulviques ont des noyaux aromatiques peu condensés (voir Figure 5), avec une trame extérieure lâche et désorganisée de chaînes aliphatiques et acycliques, et avec divers composés organiques (MUSTIN, 1987).

Ils sont solubles dans l'eau dans toutes les conditions de pH (TUOMELA *et al.*, 2000). Les acides fulviques semblent jouer un grand rôle dans les capacités de rétention en eau et dans la mouillabilité des sols.

• les acides humiques

Leur poids moléculaire peut aller de l'ordre de 1.000 à plus de 1.000.000. pour MUSTIN (1987), de 1.000 à 100.000 pour SOLTNER (1996), qui distingue en outre les acides humiques bruns (d'un poids moléculaire variant de 1.000 à 10.000) des acides humiques gris (50.000 à 100.000 de p.m.).

Ils ne sont pas solubles dans l'eau en conditions acides (SOLTNER, 1996 ; TUOMELA *et al.*, 2000).

Ils comprennent des noyaux aromatiques (voir Figure 5) qui semblent être organisés en couches, noyaux sur lesquels se fixent des chaînes aliphatiques et certainement divers composés organiques (glucides, protéines ou polypeptides, acides organiques...) (MUSTIN, 1987).

• l'humine

Son poids moléculaire est de l'ordre de 500.000 (SOLTNER, 1996) et peut atteindre l'ordre du 1.000.000 (MUSTIN, 1987).

Elle n'est pas soluble quelles que soient les conditions de pH et les solvants. (SOLTNER, 1996 ; TUOMELA *et al.*, 2000)

Elle a une structure similaire (MUSTIN, 1987) à celle des acides humiques (voir Figure 5 : noyaux aromatiques en couches sur lesquels se fixent des chaînes latérales et des composés organiques).

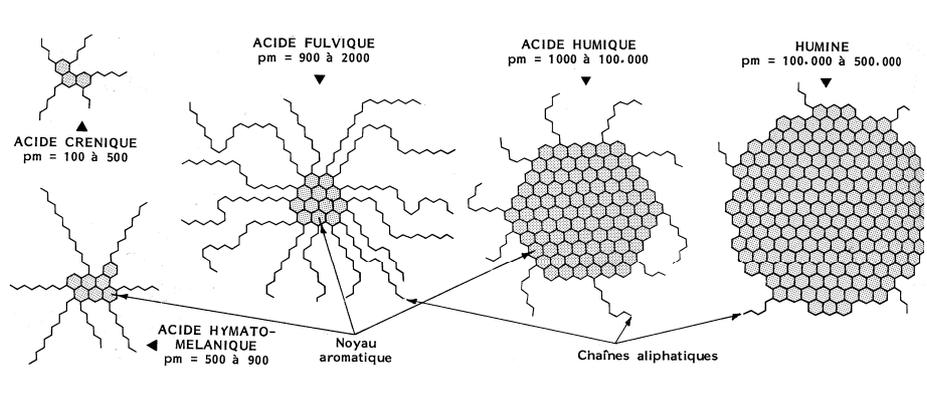


Figure 5 : nature biochimique des composés humiques (d'après Soltner, 1996)

4.1.3.2. Intérêt de l'étude de l'humus pour étudier la minéralisation de l'azote des composts

• humus et stabilisation de l'azote

L'azote organique représente la quasi-totalité de l'azote du sol. Les protéines, les polypeptides et les acides aminés libérés par leur hydrolyse ne représentent que 20 à 50% de l'azote total du sol (MUSTIN, 1987), les 50 à 80% restant proviendraient donc des composés humiques.

Au niveau moléculaire, au cours de l'humification, l'azote est stocké dans des composés organiques complexes et en particuliers dans des substances humiques (LECLERC, 1995 ; VEEKEN *et al.*, 2000). Cet azote se trouve d'abord dans les chaînes latérales sous forme aminée (voir Figure 6) et s'incorpore au fil de l'humification dans le noyau aromatique sous forme aminée ou sous forme hétérocyclique, la seconde forme étant plus difficile à libérer que la première.

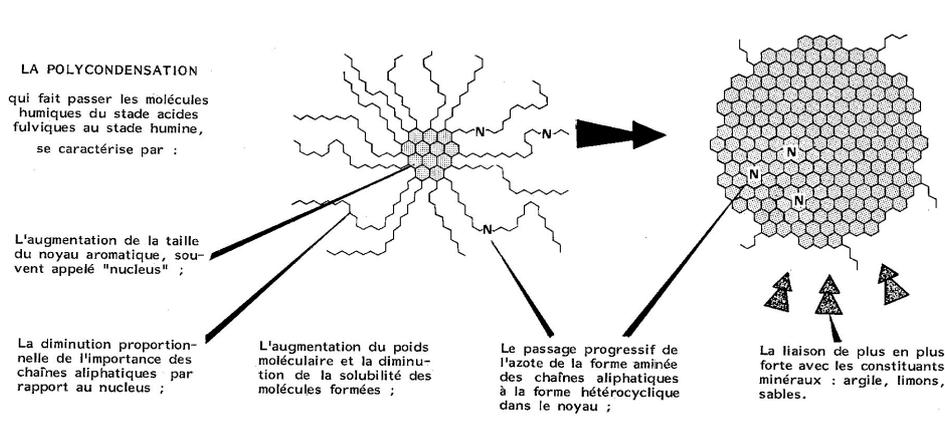


Figure 6 : incorporation de l'azote dans les composés humiques au cours de l'humification (d'après Soltner, 1996)

L'azote est ainsi un composé structurant de l'humus, au même titre que l'oxygène. C'est grâce à ces deux atomes que des « ponts chimiques » (voir Figure 7) sont réalisés entre les noyaux aromatiques (phénols, quinone). La formation de ces ponts permet l'agrégation des cycles aromatiques et la condensation des composés humiques évolués (SOLTNER, 1996).

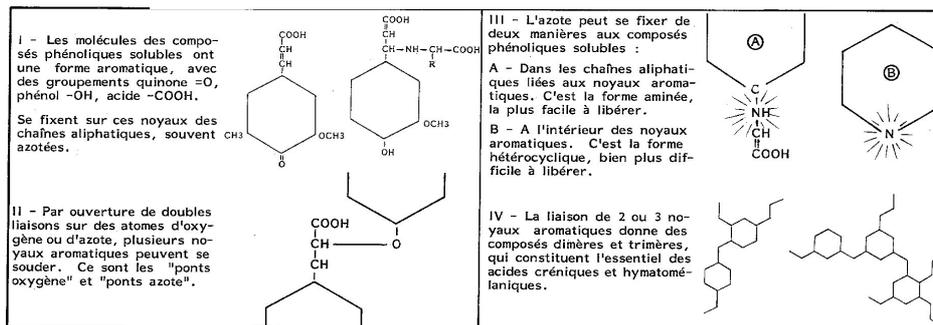


Figure 7 : rôle particulier de l'azote dans l'architecture des composés humiques et influence de l'architecture sur la stabilité de l'azote (d'après Soltner, 1996)

Il est important de savoir comment sont fabriquées ces substances humiques, puisque la minéralisation potentielle de l'azote des composts – au cœur de notre travail – sera liée à la nature biochimique de ces composés.

En effet, l'azote incorporé aux fractions résistantes de l'humine (groupes aromatiques) se révèle stable, donc peu disponible pour les plantes.

A contrario, l'azote des polypeptides dans les chaînes latérales est plus labile, avec une période moyenne de renouvellement de 25 ans, ce qui est court dans la vie d'un sol. Ces chaînes latérales ont un faible rapport C/N (~5), et peuvent contenir 10% du carbone du sol. Elles assureraient à elles seules la fourniture d'environ 80% de l'azote minéralisé annuellement (MUSTIN, 1987), ce qui est loin d'être négligeable.

Les composés humiques peuvent être classés selon leur richesse en azote (MUSTIN, 1987) :

- les acides humiques sont les plus riches en azote (5%, variant de 3,5 à 6%),
- viennent ensuite les acides fulviques (2 à 3,5%),
- et enfin l'humine avec environ 1%, voire moins.

Selon Yves HERODY (communication personnelle), la fabrication d'humus par les microorganismes et l'incorporation de l'azote dans cet humus résulterait d'un mécanisme adaptatif en climats tempérés à saison froide. Pour éviter la perte de l'azote des sols quand il n'y a plus d'activité biologique et que les pluies menacent de lixivier les nitrates, les microbes ont développé une fonction de stockage de cet azote dans des composés stables qu'ils sont capables de dégrader quand la saison chaude reprend.

Cette information demande à être confirmée et étayée. Elle pourrait constituer le centre d'une approche qualitative des composts.

• humus et autres éléments et composés chimiques

Le phosphore, les composés phosphorés inorganiques et le soufre n'ont pas de rôle structurant dans l'humification, ce qui ne les empêche pas de créer des liaisons solides avec les humus pour créer des humophosphates, avec l'intervention du calcium, du fer et de l'aluminium. Ces humophosphates jouent ainsi un rôle important (quoique encore mal éclairci) dans la nutrition phosphatée des plantes. Les éléments soufrés jouent un grand rôle dans la fertilité des sols (MUSTIN, 1987), en particulier dans le développement des microorganismes.

En outre, de nombreux composés sont présents et/ou accompagnent les composés humiques. On peut noter en particulier les glucides (simples et complexes) et les composés organiques azotés, phosphorés et soufrés (MUSTIN, 1987).

4.1.3.3. L'humification dans les sols et les différents types d'humus

Les connaissances sur l'humification dans le tas de compost sont très limitées. On se sert des acquis relatifs à l'humification dans les sols pour proposer une analogie.

L'humification n'est pas un processus isolé et indépendant de la vie du sol, mais est en interaction avec le milieu. L'humification commencerait avec la production de composés macromoléculaires comme les acides humiques, qui seraient ensuite réorganisés, redégradés en acides fulviques ou en humine (MUSTIN, 1987).

Le pH est un facteur important dans la formation de l'humus : l'activité des bactéries, notamment des bactéries cellulolytiques, est pratiquement arrêtée en-dessous de pH 6 et, bien que d'autres organismes prennent le relais (actinomycètes jusqu'à 5,5, champignons jusqu'à 3,0), l'humification est très sérieusement gênée dans les sols acides (LECLERC, 1995).

Ce sont essentiellement des composés transitoires de nature aromatique qui sont les précurseurs des substances humiques. On peut dire que pratiquement toute la matière organique fraîche passera par les êtres vivants du sol avant d'aboutir à une molécule organique humique. (MUSTIN, 1987)

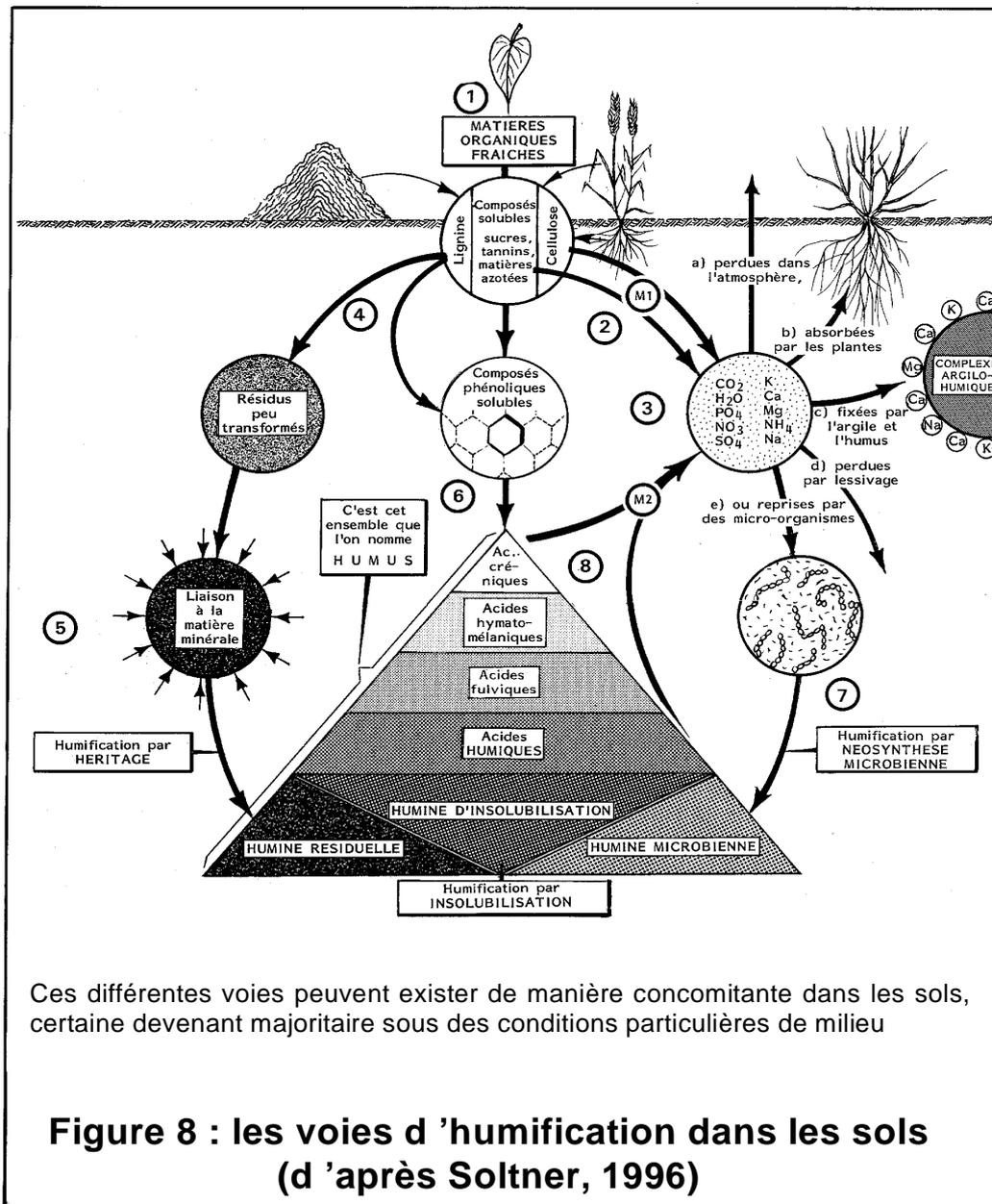
Dans le sol, l'humus est pratiquement entièrement contenu dans la matière organique liée aux constituants minéraux du sol. (MUSTIN, 1987), le complexe argilo-humique.

Les sols asphyxiants, mal drainés donc réducteurs ou à pH élevé contiendront des substances humiques avec une plus forte proportion de radicaux libres ; de même, les sols de surface où les substances humiques sont exposées aux radiations solaires contiendront aussi plus de radicaux libres. Ces radicaux libres jouent un grand rôle dans les processus de polymérisation (humification), de dépolymérisation (minéralisation secondaire), de réactions avec d'autres composés organiques (pesticides, polluants organiques) au cours de réactions redox (MUSTIN, 1987).

Plusieurs auteurs ont présenté des synthèses des différentes théories de formation des composés humiques (voir en particulier la Figure 8).

On peut retenir 4 grandes voies de formation de ces composés ² :

- l'humification par héritage
- l'humification par insolubilisation
- l'humification par néo-formation
- l'humification hydromorphe



La classification des humus peut aussi se faire en abordant les conditions naturelles ou cultivées dans lesquelles on trouve majoritairement un type particulier de formation (voir aussi le Tableau 3). Dans un milieu aéré, quand l'activité biologique se ré-

² la description de ces processus d'humification dans les sols est inspirée, sauf référence particulière, d'HERODY (1992), de MUSTIN (1987) et de SOLTNER (1996).

duit et le mélange entre les matières organiques et la fraction minérale se fait de plus en plus mal, on passe progressivement à un humus de type Mull à un Moder puis à un Mor. Si le milieu est saturé en eau de façon temporaire, on a alors à faire à un Anmoor, puis à une Tourbe dans un milieu saturé en permanence.

Tableau 3 : conditions de formation des différents types d'humus et vitesse de minéralisation (d'après SOLTNER, 1996 et BRUN, 1997)

	<i>humus incorporé</i>	<i>mélange incomplet</i>	<i>humus superposé</i>
<i>milieu aéré</i>	MULL minéralisation lente pour Mull calcique et rapide pour Mull forestier	MODER minéralisation assez lente	MOR minéralisation très difficile
<i>milieu saturé temporairement</i>	-	ANMOOR minéralisation lente	-
<i>milieu saturé en permanence</i>	-	-	TOURBE minéralisation très difficile

Les humus des sols cultivés s'apparentent aux Mull (calcique ou forestiers) par les conditions convergentes des pratiques agricoles : aération du sol et homogénéisation des horizons superficiels, apports d'amendements calcaires en sols acides, apports d'amendements organiques et restitutions végétales. L'agriculture a donc une action uniformisatrice dans la formation des humus.

• les humus d'héritage

On parle d'humus archaïques ou encore d'humus d'héritage lorsque les fractions végétales les plus résistantes à la dégradation par les micro-organismes ne seraient que très partiellement dégradés et constitueraient les précurseurs de l'humus, qui se formerait progressivement sur ces structures.

La nature physico-chimique du végétal de départ influence considérablement la nature de l'humus formé. On trouve dans ces plantes divers types de produits résistants à la biodégradation, ou qui sont capables de stabiliser l'activité microbienne (terpènes et polyalcools aromatiques aux propriétés bactériostatiques, présents chez les résineux).

Les micro-organismes agiraient secondairement au niveau des pré-dégradations, des composés néo-formés et de la réorganisation de l'humus.

Les humus de type **Moder** et **Mor** se forment essentiellement par héritage. On ne les trouve pas en général en conditions agricoles, car ils caractérisent des sols primitifs (sables, landes et podzols, sols acides, pauvres en argiles et filtrants) ou des zones climatiques primitives (humides, froides), avec une végétation surtout constituée de résineux. Cependant, l'utilisation d'écorces de résineux pourrait amener ce type d'humus dans les terres agricoles.

• les humus géochimiques

On parle d'humus géochimique ou encore d'humus d'insolubilisation quand ces humus proviennent de la réaction géochimique d'un constituant dominant des sols sur la matière organique ; parmi ces constituants, on peut retenir :

- le calcaire. Il donne un **Mull calcique** ou carbonaté peu évolué, relativement fragile, avec un fort taux de chaînes latérales instables. Même si le taux de matière organique est relativement élevé,
- le fer (sous forme d'oxyde ou d'hydroxyde, parfois conjointement avec de l'aluminium). Il donne un **humus ferrique**, offrant une protection relativement limitée, avec un taux de matière organique en général bas, ce qui donne des minéralisations rapides et précoces au printemps,
- l'argile. Il donne un **humus argileux** qui enrobe la matière organique, sans toutefois bloquer l'humification : la polymérisation continue car l'activité des champignons est assez forte dans ces sols plutôt froids. On trouve dans cette catégorie les **Mull vertiques**,
- l'alumine et la silice. Ces humus aussi appelés **Mull andiques** sont caractéristiques des sols sur roches volcaniques. La minéralisation peut être très intense en saison.

• les humus évolués ou de néo-formation

On regroupe en général deux théories sous cette appellation : la synthèse microbienne et la polymérisation biochimique (TUOMELA *et al.*, 2000). C'est cette voie d'humification qui nous intéressent le plus dans le cas du compostage.

Dans le cas de la synthèse microbienne, certains types de microorganismes synthétiseraient les substances humiques à partir des petites molécules organiques et minérales présentes. Ces substances humiques seraient excrétées dans le milieu ou libérées après la mort des microorganismes.

Dans le cas de la polymérisation biochimique, les débris organiques seraient décomposés en petites molécules organiques et minérales qui servent de substrat aux microorganismes. Ceux-ci sécrètent et excrètent des produits de leur métabolisme comme des acides aminés, des acides organiques, des phénols et divers composés simples qui dans la masse se polymériseraient en molécules humiques. La nature de la matière organique de départ n'influencerait pas ou très peu la nature des humus ainsi formés.

On évoque également l'élaboration par les microbes du sol de chaînes de plus en plus longues pour ralentir la minéralisation (forme de stockage). Ces chaînes peuvent alors donner naissance à des composés complexes. On ne sait pas à l'heure actuelle si le processus est exclusivement microbien ou s'il fait appel à une réaction chimique de maturation ou de transformation ; il semble combiner les deux théories (synthèse microbienne et polymérisation biochimique).

Les auteurs distinguent 4 types d'humus évolués :

- l'**humus actif ou biologique**, ou encore **Mull forestier** ou acide, qui présente une bonne activité microbienne, une structure grumeleuse, une fertilité très bonne. C'est l'humus des sols productifs,
- l'**humus microbien**, sur les sols agricoles trop fertilisées et bien actifs ; les matières organiques commencent à être enrobées par un mucus microbien. Ce type d'humus est souvent caractéristique des sols de jardins et de maraîchage,

- **l'humus faiblement actif** ; à une diminution de l'activité biologique correspond une accumulation des matières organiques, plutôt de type stable et lentes à se dégrader,
- **l'humus fibreux** ; c'est un humus caractéristique des climats froids et des sols peu évolués ou dégradés. La matière organique s'accumule sous forme de fibres peu transformées. On rencontre également ce type d'humus dans les sols de vieilles prairies d'altitude.

• les humus hydromorphes

Les sols hydromorphes sont caractérisés par la présence d'eau durant une certaine période de l'année.

Cette présence entraîne le développement d'une flore microbienne particulière. La dégradation anaérobie de la cellulose ne conduit pas à la formation d'humus mais de sucres solubles. La lignine, par hydrolyse, donne une couleur noire caractéristique. On peut distinguer entre :

- le pré tourbeux cultivable (ou **Anmoor**), qui même s'il est engorgé d'eau une partie de l'année, permet une activité microbienne pendant la période exondée. La matière organique est cependant tannée et pose un problème de minéralisation en début de printemps. Cet obstacle est levé avec des températures suffisantes.
- l'humus engorgé ou **Tourbe**. Cet humus caractérise les sols à forte rétention d'eau, mais non marécageux. Ces sols sont peu fertiles.

4.1.3.4. La fabrication de composés humiques pendant le compostage

• peut-on parler d'humus dans un compost ?

Non, on ne peut parler d'humification au sens strict dans un milieu comme le compost. En effet, les conditions d'humification dans le sol se déroulent à des températures en général plus basses que celles du tas de compost, sous l'effet d'une flore microbienne ayant une composition et une dynamique différentes et dans le cadre d'une interaction avec les différents compartiments du sol (particules minérales colloïdales, racines des plantes, rhizosphère). Dans ces conditions, on peut tout au plus parler de pré-humification ou de fabrication de précurseurs d'humus : les composés humiques obtenus au cours du compostage vont encore évoluer une fois qu'ils seront apportés au sol et cette évolution dépendra du type de sol et de son fonctionnement. Cette évolution recouvre en particulier la formation du complexe argilo-humique.

• les voies de l'humification³ pendant le compostage

Dans un milieu vivant tel qu'un tas de compost, les voies de l'humification peuvent être très variées et on a du mal à déterminer quelle est la voie majoritaire. Cela est dû au fait que le nombre des précurseurs de composés humiques ainsi que des réactions possibles sont considérables (MOREL, 1989). A la lueur de quelques élé-

³ on conserve le terme impropre d'humification pour des commodités de langage et parce qu'il est très largement utilisé pour qualifier l'évolution de la matière organique dans le compost.

ments de bibliographie, on peut s'autoriser à des conjectures sur les voies d'humification suivies pendant le compostage.

On peut penser que grâce à la forte activité biologique des tas de compost, la voie principale d'obtention des composés humiques est similaire à celle de la synthèse microbienne et de la polymérisation biochimique. Selon certains auteurs (HAMMOUDA et ADAMS, 1987 ; VEEKEN *et al.*, 2000 ; TUOMELA *et al.*, 2000), cette voie joue un rôle non négligeable.

La néoformation en condition d'excès de matière organique pourrait conduire à la fabrication d'humus fibreux.

Pour une partie des composés résistants à la dégradation comme la lignine, l'hémicellulose et la cellulose, la voie de l'héritage pourrait également se développer : on considère dans ce cas qu'il existe une inhibition empêchant la dégradation de ces composés (par exemple, une destruction des microorganismes à cause de températures trop élevées).

Si les conditions de compostage se déroulent mal et que l'humidité du tas de compost devient trop forte pour autoriser un développement aérobie en phase de maturation, on peut supposer que l'humification produirait plutôt des composés en conditions hydromorphes et de faibles qualités agronomiques (peu de chaînes latérales), ou encore des humus faiblement actifs.

Une humification avec blocage de type géochimique pourrait éventuellement se produire, en incorporant par exemple de fortes quantités de terre très argileuse dans le tas de compost ou en enrichissant le milieu en calcaire (lithothamne).

• les transformations d'origine microbiennes

On peut essayer d'être plus précis dans la compréhension des types d'humification qui peuvent avoir lieu au fil du compostage en s'intéressant au devenir des molécules coriaces (lignine, hémicelluloses et cellulose) et à leurs transformateurs (bactéries, actinomycètes, champignons).

- La lignine est un polymère construit (LYNCH, 1987) à partir de 3 acides phénoliques. On connaît trois types de lignine (de résineux, de feuillus et d'herbe). Elle sert de constituant de la paroi cellulaire et est associée aux fibres cellulosiques pour donner leur port aux végétaux et les protéger des attaques microbiennes (TUOMELA *et al.*, 2000 ; GODDEN et PENNINGKX, 1987), en empêchant sur certaines portions la dégradation des hémicellulose et cellulose (LYNCH, 1987). C'est donc un composé très difficile à dégrader.

i) Les bactéries⁴ seraient très mal équipées pour dégrader la lignine. Les seules bactéries qui y parviennent sont anaérobies et opèrent dans des conditions extrêmes (bois saturé en eau, hypoxie...), avec un rendement très faible et une vitesse de dégradation très lente. Cependant, certains genres de bactéries pourraient être impli-

⁴ ces informations sur les décomposeurs de la lignine dans un tas de compost proviennent d'une synthèse bibliographique rédigée par TUOMELA *et al.* (2000)

quées dans la dégradation finale de la lignine : ces genres sont capables de dégrader des composés aromatiques à un seul cycle.

ii) Les actinomycètes dégradent la lignine grâce à leur activité métabolique primaire, dans des milieux à forte teneur en azote et sous des conditions de températures élevées. Ils sont mieux équipés pour dégrader la lignine de l'herbe que pour dégrader celle du bois. Ils ont cependant une efficacité moindre que celle des champignons sur ce type de substrat.

iii) Bien qu'ils soient en nombre restreint, les champignons thermophiles (actifs de 40 à 50°C, maximum 55°C, température limite 60-61,5°C) jouent un rôle non négligeable dans la dégradation de la cellulose et de la lignine. Le problème des températures limites de ces champignons est très discuté. Des observations indiquent que les champignons pourraient être actifs à des températures supérieures à 65°C. Cependant, la croissance des champignons en conditions de fortes températures est très réduite par rapport à celle observée à l'optimum thermique. Les champignons les plus efficaces pour dégrader la lignine sont les pourritures blanches (essentiellement mésophiles avec quelques thermophiles). Viennent ensuite les pourritures molles, qui ont un rendement de dégradation bien plus faible, mais qui sont capables de fonctionner dans des conditions sèches.

Les acides phénoliques libérés par la décomposition de la lignine peuvent être phytotoxiques. Vu la faible concentration de lignine dans les pailles, on a peu de risque de rencontrer de tels problèmes avec des composts de fumiers. En revanche, le risque est plus grand avec des composts de déchets verts (LYNCH, 1987).

- L'hémicellulose est un polymère hétérogène d'hexoses et de pentoses, avec des chaînes latérales, et la cellulose est un polymère de glucose pur (LYNCH, 1987).

i) Une très grande partie des bactéries anaérobies sont cellulolytiques (TUOMELA *et al.*, 2000). En conditions anaérobies, la dégradation des hémicelluloses et de la cellulose peuvent produire des acides organiques comme le pyruvate et ses métabolites (méthane, acétate, butyrate et propionate) qui peuvent être phytotoxiques (LYNCH, 1987).

ii) Les actinomycètes sont capables de dégrader la cellulose sous de fortes températures, mais ils restent moins compétitifs que les champignons pour attaquer ces composés (TUOMELA *et al.*, 2000).

iii) Les champignons sont également capables de dégrader les hémicelluloses et la cellulose et ils sont en général mieux équipés pour dégrader les premières que la seconde (TUOMELA *et al.*, 2000). Les pourritures brunes sont spécialisées dans la dégradation de ces substrats. Ces champignons peuvent également attaquer la lignine, mais de façon très limitée. Ils colonisent surtout les bois tendres (résineux en particulier) qui acquièrent alors une couleur brune.

Après ces quelques éclairages sur les relations microorganismes-substrat, on peut proposer un lien entre l'évolution des populations microbiennes au cours des différentes phases de compostage et les transformations des lignine, hémicelluloses et cellulose.

Les composés résistants de type lignine disparaissent pour une faible part (15%) et uniquement pendant les premières phases du compostage (mésophile et début de thermophile). Cette faible disparition conduit à penser qu'il y a une transformation de

la nature des composés stables. Des études (GODDEN et PENNINGCKX, 1987) prouvent qu'on assiste en fait à une séquence de dépolymérisation-repolymérisation. La dépolymérisation semble avoir lieu juste après la phase thermophile du compostage. D'un point de vue biochimique, la teneur en acides humiques augmente avec le temps de compostage. Ces derniers sont surtout produits (VEEKEN *et al.*, 2000) dans la dernière phase de compostage (maturation) qui dure de quelques semaines à plusieurs mois. Une étude sur du compost de fumier de cheval (TUOMELA *et al.*, 2000) montre que la température a une action sur le taux de dégradation de la lignine : quand on passe de 28 à 50°C, 26% puis 43% de la lignine sont dégradés. A des températures plus fortes, on assiste à un décrochement : plus que 33% à 65°C et 12% à 75°C (voir paragraphe suivant).

Ce qu'on peut retenir, c'est que la lignine peut être dégradée par une flore de champignons mésophiles et thermophiles (donc pendant les 3 premières phases du compostage, et surtout pendant celle de refroidissement) et que la réorganisation des produits de dégradation de cette lignine se fait essentiellement en phase de maturation.

Dans le cas d'un compost de fumier, la cellulose est dégradée plus rapidement pendant la phase mésophile, et la moitié de la cellulose est dégradée au cours du compostage (GODDEN et PENNINGCKX, 1987).

On peut penser que les produits de la dégradation de la cellulose vont servir pour partie à alimenter les microorganismes en énergie (ce sont des oses) et qu'une autre partie sera incorporée dans les composés humiques.

• les transformations non microbiennes ?

Peu d'auteurs se sont penchés sur cette possibilité. On suppose cependant qu'une dégradation oxydative non spécifique puisse avoir lieu (LYNCH, 1987), en particulier une solubilisation sous haute température et pH élevé (réaction alcaline), qui permettrait de dégrader 12% de la lignine à 75°C (TUOMELA *et al.*, 2000), température à laquelle l'activité des microorganismes est en principe extrêmement réduite.

En laboratoire, pour pouvoir opérer une dégradation oxydative de la lignine ou de la cellulose on se sert de permanganate de potassium en présence de CuO-NaOH utilisé comme catalyseur (Claude BOURGUIGNON, communication personnelle ; les concentrations ne sont pas précisées).

Quelles que soient les réactions chimiques possibles dans un tas de compost, il ne semble pas crédible *a priori* que celles-ci dépassent en efficacité les transformations opérées par la catalyse enzymatique dans les conditions de température et de pression que l'on rencontre en général dans ce type de milieu. La prudence nous pousse cependant à ne pas nier l'éventualité de réactions abiotiques, tout en étant sceptique sur leur rendement.

4.1.3.5. Conclusions : est-ce que le compost produit à coup sûr de l'humus ?

On est tenté de répondre oui à cette question, mais des composés humiques qui peuvent être de qualité très différentes suivant les conditions dans lesquelles se déroule le compostage. Dans le paragraphe suivant, on essaiera de donner quelques indications, commentaires et hypothèses, avec toute la prudence nécessaire, sur les voies d'humification favorisées par l'une ou l'autre méthode de compostage.

Il semble d'ores et déjà que les conditions d'aération, les niveaux de température et le développement des champignons aient un grand rôle à jouer dans le processus de dégradation des composés stables. Par contre, on est moins renseigné quant aux déterminants de la fabrication des composés humiques et de leur maturation.

Maintenant que l'on a étudié les principes du fonctionnement du compostage on peut se poser deux grandes questions :

- des points de vue agricole et environnemental, quels sont les avantages et les inconvénients de ces transformations ?
- est-il possible d'orienter ces transformations et dans quelle mesure ?

C'est dans les deux paragraphes suivants que nous allons apporter des éléments de réponse à ces questions.

4.1.4. Avantages et inconvénients du compostage

Dans ce paragraphe, on aborde d'abord les avantages et inconvénients du compostage du point de vue de l'exploitation agricole puis on ouvrira la perspective sur les éventuelles pressions sur l'environnement que peut engendrer cette technique et son application pratique.

4.1.4.1. les pertes en carbone et en matière organique

• pertes pendant le compostage et facteurs déterminants

Au cours du compostage, la respiration des microorganismes conduit à de forts dégagements de CO₂. Ce gaz provient de la dégradation de composés carbonés, utilisés comme source d'énergie. On assiste ainsi à des pertes importantes de matière organique. Ces pertes en carbone ou en matière organique varient entre 26 et 62% selon les auteurs (voir Tableau 4).

Tableau 4 : pourcentage de pertes en carbone (C) et en matière organique (MO), classé par conditions et par durée de compostage

% DE PERTE EN C OU EN MO	CONDITIONS DE COMPOSTAGE	DUREE EN JOURS	SOURCE
SANS RETOURNEMENTS			
47% C	compostage en laboratoire, fumier de bovin	35	CHÈNEBY <i>et al.</i> , 1994
53% C	compostage en laboratoire fumier d'ovin	86	THOMSEN, 2000
46% C	bonnes conditions	197	SOMMER <i>et al.</i> , 19??
RETOURNEMENTS PEU FREQUENTS			
47% MO	1 seul retournement au bout d'un mois	90 été 120 hiver	BERNER <i>et al.</i> , 1997
44% C	1 retournement après 30 jours	197	SOMMER <i>et al.</i> , 19??
RETOURNEMENTS INTENSIFS			
26% C	un retournement par semaine	90	ATALLAH <i>et al.</i> , 1995
57% MO	4 retournements le premier mois	90 été 120 hiver	BERNER <i>et al.</i> , 1997
STOCKAGE, DEPOT, ANAEROBIOSE			
24% C	anaérobiose au laboratoire fumier d'ovin	86	THOMSEN, 2000
17% C	fumier de dépôt pailleux	90	ATALLAH <i>et al.</i> , 1995
43% C	pas d'échauffement	197	SOMMER <i>et al.</i> , 19??
29% MO	fumier stocké en anaérobiose	?	BERNER <i>et al.</i> , 1997
31% MO	fumier stocké	?	DRIEUX, 1993
DIVERS			
46 à 62% C	-	-	EGHBALL <i>et al.</i> , 1997

Ces résultats sont très variables et on n'observe pas *a priori* de tendances ni de corrélations. Cette hétérogénéité peut tenir aussi bien à la diversité des matériaux de départ qu'aux techniques de compostage ou à l'influence du climat. Pour pouvoir tirer des conclusions valables, il vaut mieux observer les comparaisons que les auteurs ont pu faire au sein de leurs propres essais.

Les pertes en carbone et en matière organique augmentent avec la durée de compostage, et ces pertes sont plus rapides sous l'effet des retournements. De plus, les pertes sont très fortes au début du compostage (phase active : mésophile + thermo-

phile ; SOMMER *et al.*, 19??). A durée égale, les conditions aérobies favorisent plus les pertes que les conditions anaérobies (ATALLAH *et al.*, 1995 ; THOMSEN, 2000). Sur une longue période (197 jours : SOMMER *et al.*, 19??), les pertes sont à peu près équivalentes quel que soit le traitement du fumier (compostage avec ou sans retournement, stockage en anaérobiose). Les pertes sont également sous l'influence du climat : plus rapides en été, plus lentes en hiver (BERNER *et al.*, 1997), ce qui est confirmé par COOPERBAND (2000) : le compostage d'été est plus facile pour maintenir la température et donc l'activité biologique que le compostage d'hiver.

En moyenne, on peut retenir des pertes de 45% de carbone ou de matière organique au cours du compostage pour obtenir un produit bien décomposé.

Les pertes au cours du stockage en anaérobiose varient en fonction de la durée et elles peuvent atteindre les mêmes valeurs que celles observées au cours du compostage.

• comparaison des pertes globales en carbone et matière organique : doit-on composter ?

Pour un agriculteur, une question intéressante est de savoir si en compostant le fumier, on perd plus de carbone qu'en apportant celui-ci sous forme fraîche, directement à la sortie de l'étable ou après un stockage plus ou moins long. Pour comparer ces différentes opportunités, il faut comparer les pertes globales depuis le stockage jusqu'à la stabilisation du carbone dans le sol.

Plus la durée de stockage est courte et plus l'atmosphère du tas est confinée, moins il y aura d'activité biologique et par conséquent de pertes en carbone et matière organique.

Pendant le compostage, les pertes peuvent être importantes. Cependant le carbone restant est stabilisé par rapport à celui du fumier frais, lui-même étant plus stable que celui du fumier stocké en anaérobiose (KIRCHMANN et BERNAL, 1997).

Ainsi, une fois incorporé au sol, la matière organique compostée reste plus longtemps (THOMSEN, 2000).

Selon KIRCHMANN et BERNAL (1997), à partir du même fumier de départ les pertes en carbone (tenant compte des pertes au compostage et des pertes au champ) sont hiérarchisées de la façon suivante (ordre croissant) :

fumier composté < fumier frais < fumier stocké en anaérobiose

Selon Claude BOURGUIGNON (communication personnelle), une fois incorporé au sol et humifié, le fumier en frais a un rendement en humus de 10%, alors que le même fumier composté puis incorporé au sol a un rendement de 17 à 20%, soit quasiment le double.

Malgré de fortes pertes au cours des transformations, le compost permet, en comparaison avec le fumier frais, une meilleure conservation des apports en carbone dans les sols cultivés.

Du point de vue du carbone, l'intérêt du compostage est de réaliser des transformations « hors sol » pour stabiliser la matière organique en s'affranchissant au mieux des facteurs de variation liés au fonctionnement du sol sous l'influence du climat. Nous verrons néanmoins par la suite que le climat a encore une influence technique (pluie, vent, température) et pratique (praticabilité, temps de travail) sur le compostage.

4.1.4.2. Les pertes en azote

Cette question est très vaste. Nous traiterons successivement les pertes pendant le stockage, pendant le compostage et au champ, en examinant les mécanismes conduisant à ces pertes ainsi que les possibilités de les limiter.

• pertes au stockage

Les pertes en azote pendant le stockage varient beaucoup selon les auteurs et les conditions d'expérimentation : de 0 à 62% (BERNER *et al.*, 1997 ; DRIEUX, 1993)

La majorité des auteurs s'accorde néanmoins sur le fait que ces pertes sont en étroite relation avec les conditions de stockage du fumier (ATALLAH, 1993 ; BERNER *et al.*, 1997 ; CREPAZ *et al.*, 1997 ; KIRCHMANN et LUNDVALL, 1998) :

- en conditions anaérobies, les pertes s'échelonnent entre 10% (en fosse), 15% (en moyenne) et 20-30% (en tas)
- en conditions aérobies, les pertes sont plus fortes : 20-25% jusqu'à 40-45%
- une succession de conditions aérobie puis anaérobie augmente encore ces pertes : de 22 à 50%

Les pertes pendant le stockage se font essentiellement par volatilisation de l'ammoniac (KIRCHMANN et WITTER, 1989; SHEPHERD *et al.*, 2000 ; SOMMER et DAHL, 1999).

L'ajout de paille dans la litière peut jouer en sens opposés dans la régulation de ces pertes : vers une augmentation (DEWES, 1995) si la paille donne de la structure au fumier et favorise l'aérobiose et vers une diminution (KIRCHMANN et WITTER, 1989) si le rapport C/N est amélioré (davantage de carbone pour alimenter les microbes qui vont ainsi utiliser plus d'azote).

En tout état de cause, il faut retenir que le maintien du fumier en atmosphère confinée permet de limiter les pertes pendant le stockage. Ces pertes augmentant avec le temps (DEWES, 1995), plus le temps de stockage sera court, moins elles seront préjudiciables.

Il y a évidemment moins de pertes d'azote pendant le stockage du fumier que pendant sa transformation aérobie : le compostage (BERNER *et al.*, 1997).

• pertes au compostage

Les pertes en azote peuvent être pratiquement nulles (GODDEN, 1995a ; SOMMER et DAHL, 1999) et varier jusqu'à plus de 50% (BERNER *et al.*, 1997) de l'azote total initialement présent dans le fumier mis à composter. On constate cependant qu'elles sont presque toujours supérieures à 20% et atteignent en moyenne les 30% (voir Tableau 5). On l'a déjà signalé, ces pertes sont relativement moins importantes que celles en carbone (le rapport C/N augmente) et on assiste à une concentration de l'azote (ATALLAH, 1993 ; OTT, 1991) au cours du compostage.

Les pertes en azote dépendent du mode de compostage (WILLSON et HUMMEL, 19??) et elles peuvent se produire selon différents phénomènes (MORVAN et DACH, 1998) : volatilisation partielle de l'ammoniac sous l'effet de fortes température et d'un pH élevé, lessivage (de nitrates, d'ammonium, d'azote organique), par dénitrification (dégagement de N₂O et/ou de N₂), ou encore par dénitrification (N₂O également).

Ces pertes sont plus fortes au début du compostage, pendant le pic de chaleur (THOMSEN, 2000), sauf pour N₂O où elles sont de faibles intensité mais peuvent représenter de fortes pertes pendant le temps long de la phase de maturation.

Comme pendant le stockage, la plus grande partie des pertes d'azote observées au cours du compostage se fait sous forme gazeuse (jusqu'à 92% pour EGHBALL *et al.*, 1997) et en particulier par volatilisation de l'ammoniac (ATALLAH, 1993 ; KIRCHMANN et LUNDVALL, 1998 ; KÖRNER *et al.*, 1997 ; MARTINS et DEWES, 1992 ; MORVAN et DACH, 1998 ; THOMSEN, 2000). On ne retrouve pratiquement pas d'azote dans les jus d'écoulement (EGHBALL *et al.*, 1997 ; GODDEN, 19??).

Tableau 5 : Pertes d'azote au cours du compostage, en fonction des conditions de compostage (en pourcentage de l'azote total présent dans le matériau de départ)

CONDITIONS DE COMPOSTAGE ET/OU MATERIAUX DE DEPART	PERTES TOTALES D'AZOTE	PERTES PAR NH ₃	PERTES PAR LESSIVAGE	REFERENCE
DIVERS				
valeurs extrêmes	6-53			BERNER <i>et al.</i> , 1997
-	10-40			MORVAN et DACH, 1998
-	16-29			EGHBALL <i>et al.</i> , 1997
valeur moyenne	18-21			BERNER <i>et al.</i> , 1997
-	> 25		4	OTT, 1991
-	30-40			VUORINEN et SAHARINEN, 1997
bonnes conditions		3		SOMMER <i>et al.</i> , 19??
-		5-70	< 5	SHEPHERD <i>et al.</i> , 2000
-		>20		SHEPHERD <i>et al.</i> , 2000
98 à 114 jours de compostage		47-77	10-20	MARTINS et DEWES, 1992
INFLUENCE RETOURNEMENTS				
retournement après 30 jours		3		SOMMER <i>et al.</i> , 19??
bonnes conditions, avec et sans retournement		25-44	3	DEWES, 1995
3 mois de compostage ; 1 retournement après 1 mois	30			BERNER <i>et al.</i> , 1997
3 mois de compostage ; 4 retournements le 1 ^{er} mois	33			BERNER <i>et al.</i> , 1997
7 semaines avec retournements	50			ATALLAH, 1993
INFLUENCE COUVERTURE				
sans bâche (177 j)	28			DEWES, 1995
avec bâche plastique (177 j)	43			DEWES, 1995
INFLUENCE C/N				
C/N=22	~0	~0	~0	SOMMER et DAHL, 1999
C/N=35	~0	~0	~0	GODDEN, 1995a
fonction de la teneur en N au dé- part	19-42	17-39	0,1-0,2	EGHBALL <i>et al.</i> , 1997
INFLUENCE DUREE				
au bout de 7 jours (C/N=14)	18			THOMSEN, 2000
au bout de 86 jours (C/N=14)	46			THOMSEN, 2000
INFLUENCE PH				
pH 8 à 8,5	20-30			DRIEUX, 1993
REFERENCE EN CONDITIONS CONTROLEES				
laboratoire, aération forcée	20	4	3	OTT, 1991
laboratoire (35 jours)	21			CHENEBY <i>et al.</i> , 1994
laboratoire	20-30			ATALLAH, 1993
laboratoire : fumier + terre	40-45			ATALLAH, 1993

• pertes par volatilisation et facteurs aggravants

De façon générale, les pertes par volatilisation augmentent avec la durée du compostage (DEWES, 1995), mais la plus forte partie des émissions d'ammoniac a lieu au début, pendant la phase thermophile (KÖRNER et STEGMANN, 1997 ; KÖRNER *et al.*, 1997 ; SOMMER *et al.*, 19??; MORVAN et DACH, 1998).

Ces pertes sont d'autant plus élevées que le pH (DEWES, 1995 ; KIRCHMANN et WITTER, 1989) et la température (MARTINS et DEWES, 1992 ; SHEPHERD *et al.*, 2000) sont élevés. En plus de ces éléments, il faut tenir compte du « pool » d'azote qui peut être volatilisé. Ce pool dépend de la teneur totale en azote du fumier, donc du type de fumier (MORVAN et DACH, 1998), de la dégradation des composés azotés (MARTINS et DEWES, 1992), de la concentration en ions ammonium (qui diminue avec le temps), et du rapport C/N. C'est en définitive le rapport $C_{\text{facile à dégrader}} / N_{\text{facile à dégrader}}$ qui va déterminer l'intensité des pertes en azote.

Tout ce qui peut favoriser la circulation de l'air dans le tas de compost augmente les pertes par volatilisation. Une bonne structure qui permet de réaliser un bon compostage est plus préjudiciable pour la conservation de l'azote (SHEPHERD *et al.*, 2000) qu'un tas qui s'étouffe et évolue en anaérobiose (KIRCHMANN et WITTER, 1989).

Le retournement des andains serait un facteur aggravant la volatilisation de l'ammoniac, car il libère d'un seul coup de grandes quantités de gaz dans l'atmosphère (DEWES, 1995 ; MORVAN et DACH, 1998). De plus, en relançant l'activité des microorganismes, le retournement favorise la remontée en température du tas (SOMMER *et al.*, 19??).

Le Tableau 6 donne quelques mesures de quantités d'azote volatilisé pour différents types de composts.

Tableau 6 : mesures des pertes d'azote par volatilisation au cours du compostage de différents fumiers

TYPE DE COMPOST	VOLATILISATION (% DU N TOTAL)	REMARQUES	AUTEURS
bovins	5-9	expé labo < 7 jours	SHEPHERD <i>et al.</i> , 2000
bovins	18-41		EGHBALL <i>et al.</i> , 1997
bovins	47-55		MARTINS et DEWES, 1992
bovins	42-54	nu	SHEPHERD <i>et al.</i> , 2000
bovins	25-50	couverture paille	SHEPHERD <i>et al.</i> , 2000
bovins	34-64	couverture toile goudronnée	SHEPHERD <i>et al.</i> , 2000
bovins	4-9	2 fois plus de paille que les précédents	SHEPHERD <i>et al.</i> , 2000
bovins	28	nu	DEWES <i>et al.</i> , 1991
bovins	43	bâche polyéthylène	DEWES <i>et al.</i> , 1991
bovins	43	bâche Geotex (polypropylène)	DEWES <i>et al.</i> , 1991
porcs	18-31	expé labo < 7 jours	SHEPHERD <i>et al.</i> , 2000
porcs	29	fumier frais, ICC 70 j à 25°C	BERNAL et KIRCHMANN, 1992
porcs	28	fumier traité en anaérobiose, ICC 70 j à 25°C	BERNAL et KIRCHMANN, 1992
porcs	103	fumier traité en aérobie, ICC 70 j à 25°C	BERNAL et KIRCHMANN, 1992
porcs	49-51	compostage actif sous couverture	MARTINS et DEWES, 1992
volailles	6-40	expé labo < 7 jours	SHEPHERD <i>et al.</i> , 2000
volailles	9-44	labo avec différents C/N (ajout de paille)	KIRCHMANN et WITTER, 1989
volailles	62-77	retournements fréquents	MARTINS et DEWES, 1992
volailles	34-37%	labo	LARNEY <i>et al.</i> , 2000

• lessivage de l'azote à travers le tas de compost

Les pertes par lessivage sont faibles, en général inférieures à 5% de l'azote total initialement présent (DEWES, 1995 ; MARTINS et DEWES, 1992). Elles sont normalement négligeables en fin de compostage (il y a de moins en moins d'azote minéral présent du fait de l'activité réorganisatrice des microorganismes) ; elles se produisent donc essentiellement au début du compostage (SHEPHERD *et al.*, 2000) : 70% des jus recueillis sur une période de 98 à 114 jours se sont déjà écoulés au bout des 10 premiers jours (MARTINS et DEWES, 1992). L'eau de lixiviation provient d'abord de l'eau métabolique produite par les microorganismes durant la phase thermophile (DEWES, 1995). Les précipitations ont donc peu d'influence sur le lessivage en début de compostage.

Les composés azotés lessivés le sont sous différentes formes (MARTINS et DEWES, 1992) : essentiellement ammonium (76,5 à 97,8% de l'azote lessivé), azote organique et enfin nitrate (seulement 0,1 à 2,2%). Les risques de contamination des eaux souterraines par les nitrates sous les tas de compost sont donc faibles si l'on admet que ce lessivage ne se produit en général que dans des conditions par ailleurs défavorables pour le processus de compostage (KÖRNER *et al.*, 1997).

Cependant, en cas de précipitations importantes, il peut y avoir de fortes pertes d'azote par lessivage, surtout en fin de compostage (DEWES, 1995). La couverture du tas de compost peut permettre d'éviter ce lessivage tardif dû aux précipitations. Nous verrons qu'elle est à utiliser avec précaution.

• autres formes de perte d'azote

Les pertes par dénitrification sont normalement très faibles (inférieures à 1% ; SHEPHERD *et al.*, 2000). Elles se réalisent en majorité sous la forme N_2 que N_2O (gaz préjudiciable pour l'environnement). Cependant, en conditions anaérobies prolongées, la proportion de N_2O pourrait augmenter.

Les pertes par dénitrification apparaissent ponctuellement ou partiellement s'il y a de fortes quantités de nitrates présentes en conditions anaérobies, donc sur des substrats riches en azote et à forte activité microbienne, comme par exemple le fumier de volailles (MAHIMAIRAJA *et al.*, 1995).

• pertes à l'épandage et à l'enfouissement

Les pertes après épandage sont influencées par le taux d'ammonium présent, ce dernier étant également la conséquence du mode de préparation. Les pertes après épandages sont supérieures pour les déjections restées en anaérobiose que pour celles qui ont été compostées (KIRCHMANN et LUNDVALL, 1998).

Un fumier brut non enfoui après épandage peut perdre 25% de sa valeur fertilisante azotée en 24 heures et plus de 40% après 4 jours (volatilisation de l'ammoniac, favorisée par un temps chaud et sec, ralentie par un temps froid et pluvieux) (KISLIG, 1989). Ces pertes sont réduites si le fumier a été composté ; il y a moins d'ammonium dans un compost que dans un fumier frais.

L'enfouissement est une pratique qui permettrait de limiter les pertes au champ. Avec un enfouissement à 1 cm on peut réduire les pertes de moitié et un enfouissement à 5 cm réduit ces pertes par volatilisation de 80%. Un enfouissement plus profond ne permet pas de réduire davantage les pertes (KIRCHMANN et LUNDVALL, 1998) et peut même conduire à une évolution anaérobie du compost voire à des problèmes de phytotoxicité.

Il faut signaler encore l'existence de deux formes de pertes, qui tiennent plus aux pratiques agricoles qu'à la nature du produit : les pertes par dénitrification (en milieu asphyxiant) et les pertes par lessivage (résultant plus d'une mauvaise coïncidence entre minéralisation du produit et besoins des cultures que de l'abondance relative des nitrates dans le produit, à cette nuance près que l'azote est mieux stabilisé dans le compost que dans le fumier frais).

• premier bilan : le compostage permet-il une moindre perte en azote ?

Par rapport au fumier frais :

- le compostage peut s'accompagner de fortes « fuites d'azote »,
- toutefois, lors de l'épandage du compost, les pertes en azote sont moindres.

Lequel de ces deux effets contradictoires l'emporte ? Quelle serait alors la technique la plus légitime pour conserver le maximum d'azote ?

Plus le matériau de départ est riche en azote, plus les pertes par volatilisation pendant le compostage sont importantes (DEWES, 1995 ; GOLUEKE, 1992). Dans ce cas, la diminution des pertes réalisée en enfouissant l'apport après épandage est insignifiante par rapports aux pertes occasionnées lors du compostage (KIRCHMANN et LUNDVALL, 1998). Ceci est illustré par le Tableau 7.

Tableau 7 : pertes par volatilisation (mesurées en pourcentage de l'azote total initialement présent) de différents fumiers en cumulant les pertes à la préparation et à l'utilisation, avec ou sans enfouissement, d'après KIRCHMANN et LUNDVALL (1998)

<i>enfouis 5 cm</i>	FUMIER FRAIS		FUMIER COMPOSTE		FUMIER MAL COMPOSTE	
	non	oui	non	oui	non	oui
BOVIN	3,0	0,6	2,9	0,7	18,6	3,7
PORCIN	3,1	0,6	24,6	23,6	9,6	1,9
VOLAILLES	50,7	9,0	77,3	76,6	37,3	13,3

D'après ces résultats, il semblerait que :

- pour le fumier de bovins, le compostage n'a pas d'influence sur les pertes d'azote par volatilisation, mais qu'il faut absolument que le compostage soit réussi pour ne pas perdre trop d'azote. On peut cependant limiter les pertes en azote d'un fumier de bovin mal composté en l'incorporant rapidement. Attention, même si l'on limite les dégâts par cette pratique, on prend des risques par la suite, l'azote étant moins bien stabilisé dans le fumier mal composté. Les fuites sont toujours possibles, en particulier par lessivage des nitrates dans le sol,
- pour le fumier de porcs, apparemment, il vaudrait mieux le faire évoluer en anaérobie ou l'épandre en frais afin de conserver au maximum l'azote, et de

toute manière l'incorporer rapidement au sol. Du fait de la moindre stabilisation de l'azote, les risques de pertes sont sans doute plus forts sans compostage (THOMSEN, 2000). En effet, on trouve dans le compost beaucoup plus de formes d'azote organique (96 à 99%) que de forme ammoniacale (ATALLAH, 1993). Au contraire, dans les fumiers qui ont évolué en anaérobiose, l'ammonium représente les deux tiers de l'azote total (KIRCHMANN et WITTER, 1989),

- pour le fumier de volaille, on peut faire le même constat que pour le fumier de porcs. Le risque le plus important de pertes se déplace et est fonction de la date d'épandage. Pour que le fumier frais puisse évoluer avant d'implanter des cultures, on préfère en général un épandage d'automne. Hors ce dernier expose davantage l'azote soluble au lessivage d'hiver. Un apport au printemps pourrait être préjudiciable pour les cultures et le développement racinaire (faim d'azote, sols creux, phytotoxicité).

Les auteurs affirment que pour les fumiers riches en azote (porcs et volailles) le compostage devrait être réservé aux déjections qui nécessitent une hygiénisation avant épandage. SHEPHERD *et al.* (2000) considèrent également que la pratique la plus économe en azote est le stockage anaérobie du fumier et son enfouissement dès l'épandage.

Nous restons plus prudent que ces auteurs, pour deux raisons :

- il existe dans le tas de compost des formes d'azote différentes de celles présentes dans le fumier. Ce fait a une incidence sur les pertes potentielles mais aussi sur la valorisation de l'azote au champ en agriculture biologique,
- il existe des techniques permettant de limiter les pertes d'azote pendant le compostage.

• pour aller plus loin : comment limiter les pertes en azote ?

Comme on l'a déjà signalé (*cf. supra*), la volatilisation représente les pertes d'azote les plus importantes en quantité. En bonne conditions de compostage, ni le lessivage, ni la dénitrification ne correspondent à des pertes significatives. Si les conditions optimales de compostage sont réunies, il n'y a pratiquement plus que la volatilisation qui est susceptible d'occasionner des pertes.

Ces pertes gazeuses sont sous l'influence de la température et du pH (KÖRNER et STEGMANN, 1997). Le pH est un paramètre difficile à contrôler pendant le compostage. La température peut être orientée, et on peut tenter de limiter les pratiques qui visent à la maintenir élevée pendant de trop longues périodes.

Ceci étant, on peut encore essayer de jouer sur la source du problème de ces pertes en azote : si pertes il y a, c'est qu'il existe de l'azote sous forme soluble et en particulier sous forme d'ammonium qui n'est pas utilisé par les microorganismes. Les techniques qui conduisent à la réduction de la quantité d'azote minéral dans le tas de compost réduisent aussi les risques de volatilisation. Parmi ces techniques, on peut citer l'ajout de paille, qui en apportant du carbone aux microorganismes, permet d'utiliser le pool d'azote en excès.

L'augmentation (par ajout de paille, voire de sciure qui semble avoir un bien meilleur effet : TEXIER *et al.*, 2000) du rapport C/N dans le fumier au départ permet d'avoir plus de carbone disponible pour les microorganismes qui vont ainsi mieux valoriser l'azote (KIRCHMANN et WITTER, 1989). Le choix des espèces de paille peut avoir une

influence non négligeable sur le C/N. De plus, l'alimentation des animaux et la digestibilité des aliments revêt une influence très déterminante dans l'ajustement du rapport C/N (BONGIRAUD, communication personnelle). C'est le même phénomène qui est utilisé pour limiter les pertes par volatilisation pendant le stockage du fumier. Ici aussi, on constate deux effets opposés de l'augmentation du rapport C/N : dans un sens, il apporte plus de carbone pour les microbes, dans l'autre sens, il améliore la structure, donc la circulation de l'air, et augmente ainsi la volatilisation. Il y aurait ainsi une valeur limite à ne pas dépasser. La valeur idéale, pour laquelle les pertes en azote sous toutes ses formes sont négligeables au cours du compostage, varie en fonction des auteurs : 22 pour SOMMER et DAHL (1999), de 25 à 35 pour SHEPHERD *et al.* (2000), 30 pour THOMSEN (2000) et 35 pour GODDEN (1995). A chaque praticien d'établir le meilleur rapport C/N selon son expérience en humant l'atmosphère qui s'échappe du tas de compost pour détecter les odeurs d'ammoniac.

L'addition de matériaux naturels avec de grande surfaces d'absorption (comme la bentonite ou la zéolite) permettant de fixer les ions positifs ammonium serait également très utile (MARTINS et DEWES, 1992). Nous aborderons plus en détail l'intérêt et les effets des additifs et adjuvants dans le § 4.1.5.

Selon les mêmes auteurs, une réduction raisonnable des aliments riches en protéines dans la ration des animaux pourrait conduire à une réduction des quantités d'ammoniac émises.

Des essais (SHEPHERD *et al.*, 2000) ont été conduits pour juger de l'opportunité de couvrir les andains avec des bâches de différente nature pour limiter la volatilisation. Ni la paille, ni une toile goudronnée, n'ont permis d'atteindre cet objectif ; la couverture serait même contre-productive : elle peut conduire à un assèchement de l'andain et donc à plus de volatilisation (DEWES, 1995).

LARNEY *et al.*, (2000) proposent de mettre une couche de 15 cm de vieux compost sur le tas pour filtrer biologiquement les émanations d'ammoniac (sans toutefois attester de l'effet de cette technique).

Enfin, quelques travaux de recherche semblent indiquer que l'emploi des préparations bio-dynamiques permettrait une meilleure conservation de l'azote dans les tas de compost.

4.1.4.3. Autres pertes possibles

• le potassium : des pertes potentiellement importantes

D'après DRIEUX (1993), jusqu'à 62,8% du potassium peut être perdu pendant le stockage. Au vu du Tableau 8, on considère que c'est une valeur extrême, ces pertes pouvant varier selon les auteurs de 7 à 67%.

Tableau 8 : différentes valeurs de pertes de potassium (en pourcentage du potassium total présent dans le fumier avant compostage) au cours du compostage

PERTES DE K ⁺	SOURCE	PERTES DE K ⁺	SOURCE
> 7	EGHBALL <i>et al.</i> , 1997	35	GODDEN, 1995a
18-67	GODDEN, 1995a	35-38	OTT, 1991
20-37	GODDEN, 1995a	39-54	DEWES <i>et al.</i> , 1991
28	EGHBALL <i>et al.</i> , 1997	43-51	GODDEN, 1995a
28-60	GODDEN, 1995a		

Le potassium est l'élément qui est le plus facilement lessivé (OTT, 1991) ; les pertes en potassium (et également en sodium) se font essentiellement par les jus de lixiviation (GODDEN, 19??). Le potassium est surtout contenu dans les urines animales (85% du total du K⁺ du fumier vient de là ; DRIEUX, 1993).

Les pertes de potassium sont plus fortes quand :

- le fumier est très humide au départ, (trop de déjection et/ou pas assez de paille ; DRIEUX, 1993),
- le fumier est tassé et a une mauvaise structure (GODDEN, 19??),
- la pluviométrie est importante pendant la durée du compostage et que l'andain n'est pas couvert (DRIEUX, 1993 ; EGBALL *et al.*, 1997),
- il n'y a pas de récupération des jus et que toutes les mauvaises conditions citées plus haut sont réunies (DRIEUX, 1993).

D'après GODDEN (1995), l'augmentation du rapport C/N permettrait de diminuer les pertes en potassium. En pratique, le rapport C/N peut rendre compte à la fois de l'humidité, de la quantité de paille et de la structure du fumier. Quand il augmente, les conditions propices au lessivage du potassium sont amoindries. Le même auteur rapporte plusieurs valeurs de pertes de potassium en fonction du rapport C/N (voir Tableau 9) et constate qu'avec un rapport C/N de 35, les pertes de potassium sont négligeables.

Tableau 9 : pourcentage de pertes en potassium en fonction de la teneur initiale du fumier en fonction du rapport C/N du fumier au départ (différents auteurs cités par GODDEN, 1995a)

RAPPORT C/N DU FUMIER AU DEPART	PERTES DE K ⁺	RAPPORT C/N DU FUMIER AU DEPART	PERTES DE K ⁺
14	67	20	28
14	63	35	18
14	51	35	~0
18	60	36	8
18	59	52	28

On constate que pour des rapports C/N très élevés (52), les pertes en potassium augmentent sans qu'on puisse proposer d'explication.

Le taux de corrélation entre le rapport C/N (pour une plage de valeurs allant de 14 à 36) et le taux de perte de potassium est de -93%. On peut se risquer à établir une régression linéaire entre ces deux variables (voir Figure 9). On obtient une équation du type :

$$\text{taux de perte en K}^+ \text{ au cours du compostage (\%)} = - 2,5 \times \text{C/N} + 95$$

Pour cette régression (dont on a arrondi les coefficients), r² vaut 0,86. Ce résultat n'a pas grande valeur statistique (petit échantillon, pas de test ni de contrôle de validité du modèle). On proposera néanmoins cette équation⁵ ou une abaque simple (voir Annexe 8) construite à partir de cette équation aux agriculteurs comme outil pour évaluer les pertes en potassium et donner des informations utiles pour une prise de

⁵ qui n'est applicable que pour des valeurs de rapport C/N s'échelonnant de 15 à 35 environ

décision (par exemple : limitation des pertes par augmentation du niveau de paillage).

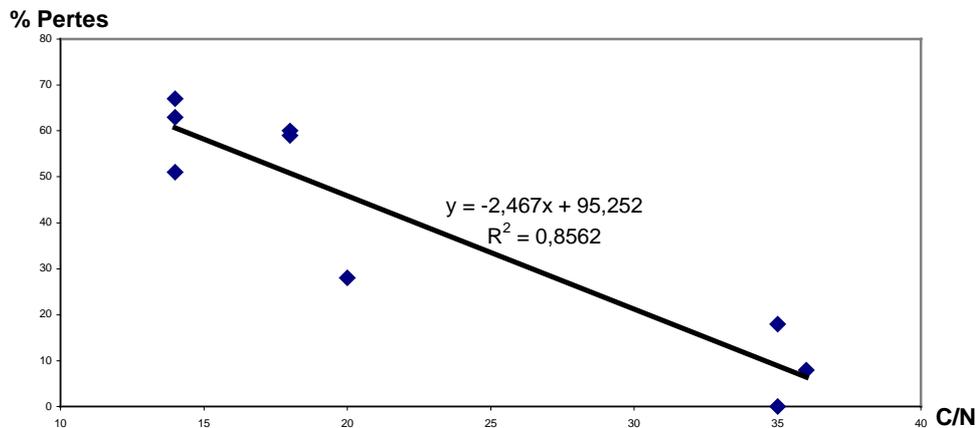


Figure 9 : Pertes de Potassium (%) en fonction du C/N

• autres pertes : phosphore, calcium, magnésium

Ces pertes semblent peu préoccuper les chercheurs d'une part parce qu'elles représentent une faible menace pour l'environnement et d'autre part parce qu'elles sont relativement restreintes.

Selon DRIEUX (1993), les pertes en phosphore pendant le stockage peuvent atteindre 16%. L'auteur ne propose cependant aucun mécanisme pour expliquer ces pertes. Les pertes en phosphore pendant le compostage sont faibles : de l'ordre de 2 % par effet de ruissellement (EGHBALL *et al.*, 1997), elles sont négligeables pour un fumier suffisamment paillieux (rapport C/N = 22 ; SOMMER et DAHL, 1999)

Les pertes en calcium ainsi qu'en magnésium sont inférieures à 6% (EGHBALL *et al.*, 1997) au cours du compostage.

4.1.4.4. Autres avantages du compostage

Ces avantages sont relativement connus, on ne fera que les énumérer. Le lecteur trouvera des compléments dans LECLERC (2001).

- la réduction des volumes (de l'ordre de la moitié) ; le temps et les coûts liés au compostage sont compensés par la diminution des quantités à épandre,
- une plus grande souplesse dans les chantiers d'épandage : le compost peut être épandu quasiment à tout moment de l'année,
- la concentration en matière sèche et en éléments minéraux, qui permet d'apporter des doses plus petites à l'hectare, ou encore d'épandre sur de plus grandes surfaces,

- une structure plus grumeleuse et plus homogène qui permet un épandage plus régulier, sans mottes,
- l'assainissement par rapport aux graines d'adventices : elle se ferait selon 2 processus : une levée de dormance (la température et l'humidité du tas de compost sont propices à la germination des plantules qui ne survivent cependant pas) et une production d'antibiotiques par certains microbes du tas de compost qui inhibe la germination des graines. En particulier, les graines de rumex sont totalement détruites par le compostage. Lorsque le tas atteint les 55-60°C au centre, il faut plus de 24 jours pour détruire les graines en surface, 24 jours en moyenne pour celles qui sont à 30 cm de profondeur et 3 jours seulement au centre du tas. Attention toutefois, le vent peut ramener de nouvelles graines à la surface,
- l'hygiénisation par rapport aux pathogènes et parasites des animaux. Strongles et douves sont détruits rapidement. Tous les types de salmonelles sont éliminées à condition que le compostage se déroule correctement et que la température du tas soit maintenue à plus de 50°C pendant 3 à 4 semaines (1 heure à 67°C suffit, mais il faut 40 jours à 41°C). Sur les fumiers d'ovins, le compostage permet de faire disparaître totalement les populations d'*Escherichia coli*, d'entérocoque, de coccidies et de salmonelles et partiellement les populations de *Clostridium* et d'helminthes. On peut retenir que pour le fumier de bovin, il faut 6 semaines à 40-50°C pour détruire les vers parasites, mais que pour détruire les virus, les bactéries et les parasites, il faut dépasser les 50°C sur la même durée,
- la destruction totale ou partielle des résidus de produits phytosanitaires (WIART, 1997),
- l'absence d'odeur désagréable aussi bien pendant le compostage que pendant l'épandage. L'existence de mauvaises odeurs peut témoigner d'un processus de compostage qui serait mal orienté,
- la lutte contre les pathogènes du sol et contre les maladies des plantes : un effet bénéfique (BERNER *et al.*, 2000) sur les maladies de racine comme *Pythium ultimum*. D'autres exemples d'amélioration de la résistance du sol par apport de compost ont pu être observés : résistance aux rhizoctones, fusariose, fonte de semis, pourritures provoquées par *Rhizoctonia sp.*, *Fusarium sp.*, *Sclerotinia sp.*, *Phytophthora sp.*, *Pythium sp.* Cet effet serait dû à l'activité biologique (résistance générale ou résistance spécifique) et/ou à une modification du milieu physique.

4.1.4.5. Inconvénients et limites du compostage

- tous les parasites ne sont pas détruits : coccidies et cryptosporidies se maintiennent, le botulisme (*Clostridium botulinum*) n'est pas détruit par la chaleur,
- les éléments trace métallique ne sont pas éliminés au cours du compostage, au contraire, ils se concentrent.
- l'organisation d'un chantier de compostage présente quelques contraintes, d'espace, de temps, de suivi, d'équipement et de disponibilité des équipements,

- l'azote est stabilisé dans un compost, ce qui rend la disponibilité de cet élément fertilisant plus tributaire du fonctionnement du sol sous l'influence du climat

4.1.4.6. Et les pressions sur l'environnement ?

• quels sont les risques et les opportunités ?

Les esprits pessimistes verront avant tout dans le compostage un certain nombre de menaces et de pressions potentielles sur l'environnement. Les optimistes voient dans le développement de cette pratique des opportunités pour réduire des pressions résultants pour partie de l'activité agricole. Si la fabrication du compost peut occasionner quelques nuisances supplémentaires par rapport à d'autres techniques de préparation des effluents d'élevage, l'utilisation des composts présente de nombreux avantages par rapport à celle des produits issus de ces techniques différentes. Le bilan global de l'opération sera en général positif, pour peu que les conditions de réussite du compostage soient respectées.

La fabrication du compost peut induire des pressions sur la qualité de l'air par l'émission de certains gaz et sur la qualité de l'eau par le chargement des eaux de lixiviation et de ruissellement en certaines molécules.

L'utilisation du compost offre des opportunités pour réduire les pressions sur l'eau et sur l'air, en fixant voire en transformant les molécules indésirables, ce qui limite le volume des flux de ces polluants dans le milieu.

• compostage et pression sur l'eau

Les eaux de lixiviation du tas de compost peuvent contenir certaines molécules préjudiciables pour l'environnement. La première qui vient à l'esprit est le nitrate.

On a déjà signalé que les pertes d'azote par lessivage sont faibles au cours du compostage. Qui plus est, les pertes sous formes de nitrates sont infimes. En considérant que les nitrates représentent au maximum 2% des 20% (maximum selon MARTINS et DEWES, 1992) d'azote perdus par lessivage au cours du compostage, on peut estimer à environ 8,5 grammes/m² (soit l'équivalent d'1 unité d'azote sous un tas de 50 mètres de long) la quantité de nitrates quittant un tas de compost de fumier⁶ de bovin lait en stabulation libre. Pour du fumier de cheval, cette valeur passerait à 12,3 g/m² (~1,5 unités N) et pour du fumier de volailles pur à 43,5 g/m² (~5,4 unités N). On note que pour les substrats très riches en azote, la charge en nitrates sous le tas de compost peut être plus élevée. Cependant, ce type de substrat est en général mélangé à d'autres matériaux pour équilibrer son rapport C/N et diminuer ainsi la concentration en azote. Par ailleurs, les valeurs utilisées pour ce calcul sont des valeurs extrêmes. En conditions normales de compostage, le lessivage est réduit (KÖRNER et STEGMANN, 1997). On a également décrit les techniques permettant de réduire les risques de lessivage (ajout de paille, utilisation d'une couverture temporaire en cas de forts événements pluvieux). On retiendra que les périodes où le risque de lessivage est le plus fort concernent le début du processus (phase active) et

⁶ tas de 1,5 m de haut et de 2,5 m à la base, densité du fumier estimée à 0,5 ; pour les concentrations en azote total du fumier, voir Tableau 24

la phase de maturation, où les nitrates sont de plus en plus nombreux et peuvent représenter jusqu'à 2% de l'azote total contenu dans le compost.

En définitive, les impressionnants tas de compost ne sont susceptibles de perdre qu'une quantité limitée d'azote sous forme de nitrates par lessivage : un andain de 50 mètres de longs contient l'équivalent de 270 unités d'azote. Les pertes de nitrates sont donc négligeables.

Outre les nitrates, il existe d'autres éléments susceptibles d'être entraînés par la lixiviation vers les eaux souterraines. Le potassium est très mobile mais présente peu de risques pour l'environnement : il est fixé par les colloïdes du sol et n'est pas toxique. Le phosphore est relativement peu mobile et est également récupéré par les particules du sol.

• compostage et pression sur l'air

La volatilisation de l'ammoniac à partir des déjections animales constitue 81% (voire plus selon certaines études citées par MARTINS et DEWES, 1992) du total des émissions de ce gaz en Europe. Ce gaz est impliqué dans les pluies acides, dans l'acidification et l'eutrophisation (charge en azote) des écosystèmes naturels ainsi que dans la production de mauvaises odeurs au cours du compostage (KIRCHMANN et WITTER, 1989 ; DEWES, 1995 ; HLBS, 1991 ; TAMURA *et al.*, 1999). La décomposition anaérobie conduit à moins de pertes par volatilisation que la décomposition aérobie. La pratique du compostage peut donc constituer une source de nuisance supplémentaire en ce qui concerne ce gaz.

A contrario, le compostage permet de réduire les émissions de méthane, gaz qui participerait à hauteur de 20% au réchauffement du climat par effet de serre, arrivant ainsi en seconde position derrière le dioxyde de carbone. De plus, environ 85% des émissions de méthane qui atteignent la troposphère conduisent à la formation d'ozone. L'ozone troposphérique contribue à l'effet de serre et est nuisible pour les écosystèmes forestiers et la santé humaine. Enfin, le méthane est impliqué dans des processus de diminution de la quantité d'ozone stratosphérique, ce qui a pour conséquence d'augmenter la quantité de rayonnements UV qui atteignent la surface de la terre.

La réduction des émissions de méthane pourrait être de 20 à 60 fois plus efficace (à quantité équivalentes) pour lutter contre le réchauffement du climat que la réduction du dioxyde de carbone. Ces émissions peuvent être réduites par deux voies : la fermentation anaérobie où l'on récupère ce méthane pour s'en servir comme source d'énergie, ou le compostage qui ne produit pas de méthane en conditions normales (LOPEZ-REAL et BAPTISTA, 1996).

D'autres gaz, en particulier des gaz azotés comme le protoxyde d'azote (N₂O, gaz hilarant) sont produits en conditions anaérobies, aussi bien dans le tas de compost que dans les sols asphyxiants. La pratique du compostage permet d'éviter la production de ce type de composés (BANK, 2000), à condition toutefois que la phase de maturation ne soit pas trop longue.

• utilisation du compost et pression sur l'eau

S'il présente quelques avantages en terme de stabilisation de l'azote, le compost n'en doit pas moins être utilisé à bon escient pour éviter de créer ou d'augmenter les pressions sur les eaux, en particulier à travers le lessivage des nitrates. Le plus important est bien entendu de faire coïncider les périodes de fourniture par le compost avec leur période d'utilisation par les plantes.

Au moment de l'épandage, le compost libère moins de nitrates que le fumier frais (OTT, 1991). Les différences de quantités de nitrates lessivés après épandage de compost ou de fumier frais ne sont cependant pas significatives.

De façon générale, la fertilisation à base d'engrais de ferme (compostés ou non), présente un risque de lessivage deux fois inférieur à celui lié à la fertilisation avec des engrais minéraux.

Ce sont avant tous les conditions locales (température, précipitations et type de sol) qui conditionnent la quantité de nitrates lessivés. Le degré de maturité du compost est de peu d'influence par rapport aux conditions du milieu qui sont très déterminantes (GERKE *et al.*, 1999).

• utilisation du compost et pression sur l'air

Si l'on compare l'épandage de compost à l'épandage de fumier frais (voir aussi § 4.1.4.2), on constate qu'il y a moins d'émissions d'ammoniac quand les fumiers ont été préparés. Du point de vue de l'épandage, le compost exerce donc moins de pressions sur l'environnement par rapport à ce gaz.

De plus, le bilan en carbone de la fabrication et de l'utilisation du compost (*cf.* § 4.1.4.1.) montre que la pratique du compostage permet une meilleure conservation de cet élément que l'épandage du fumier frais ou encore du fumier traité en anaérobiose (fumier de dépôt). Le compostage serait donc une pratique intéressante pour séquestrer du carbone sur des cycles plus long, ce qui permettrait de réduire la quantité de CO₂ dans l'atmosphère, gaz responsable, au même titre que le méthane, de l'effet de serre.

• utilisation du compost et pression sur les sols

En fin, le fait d'incorporer de la matière organique stabilisée et déjà transformée en composés humiques joue un grand rôle sur la stabilité structurale des sols et sur leur capacité à résister à l'érosion. Cet effet est d'autant plus appréciable sur les sols en pentes.

• bilan environnemental du compostage

Traiter de l'augmentation ou de la diminution de pressions sur l'environnement au cours de la fabrication ou de l'utilisation du compost n'a pas beaucoup de sens et le bilan reste mitigé si l'on se tient à cette approche. En faisant la somme de ces avantages et inconvénients et en les comparant aux alternatives envisageables ou en vigueur, on peut attribuer une valeur environnementale à cette technique. Le Tableau 10 récapitule ces éléments d'ordre écologique.

Tableau 10 : bilan environnemental de la fabrication et de l'utilisation du compost (en comparaison⁷ avec la technique de l'épandage de fumier frais et de l'épandage de fumier de dépôt)

	COMPOST	FUMIER FRAIS	FUMIER DE DEPOT
PRESSIONS SUR L'AIR			
émission de CH ₄	+	+	-
émission de CO ₂	+	~	-
émission de NH ₃	-	~	~
émission de N ₂ O	~	~	-
PRESSIONS SUR L'EAU			
lessivage de nitrates*	+	+	~
PRESSIONS SUR LES SOLS			
résistance à l'érosion	+	~	-

* risques variables en fonctions du type de sol, du climat et de la date d'apport

LEGENDE : + signifie diminution des pressions (effet positif) et – augmentation des pressions (effet négatif)

⁷ une comparaison plus globale pourrait ajouter les techniques de fermentation et d'incinération

4.1.5. Comment orienter les transformations de la matière organique au cours du compostage ?

Cette partie est celle qui apporte les réponses les plus opérationnelles sur la question du compostage. Elle vise à répondre à deux attentes :

- aider les agriculteurs à avoir un jugement affiné de leurs pratiques,
- donner quelques indications permettant d'orienter le compostage vers la fabrication d'un compost 'sur mesure'.

Les différents paramètres sur lesquels on peut jouer pour orienter le processus de compostage sont décrits et interprétés à partir d'expériences spécifiquement menées. A cet effet nous apporterons également quelques précisions, illustrations et hypothèses diverses sur les mécanismes mis en œuvre pour « contrôler » le compostage. Ces trois derniers éléments sont tirés de l'expérience des praticiens et de l'interprétation des connaissances présentées par le projet jusqu'ici.

D'ores et déjà, nous tenons pour acquis qu'il existe des paramètres majeurs dont l'action résultante, pour une aération et une humidité optimales, détermine l'évolution des substrats en fonction du temps (MUSTIN, 1987). Ces paramètres sont la composition du substrat de départ, l'activité microbologique et la disponibilité de l'oxygène, la température, et le pH, ce dernier ne pouvant être que plus difficilement « contrôlé ».

4.1.5.1. Choix des matériaux de départ

• quels sont les fumiers qui sont bien compostables ?

Dans la pratique, c'est le **fumier de bovin** de litière accumulée qui est le matériau qui se rapproche le plus de l'optimum technique. La quantité de paille idéale est de 5 à 7 kg/UGB/jour (LECLERC, 2001).

Les systèmes d'élevage en aire paillée ou en stabulation entravée très paillée sont donc ceux qui produisent le fumier le mieux adapté au compostage. Le niveau de paillage est également fonction de l'alimentation (plus ou moins azotée) des animaux, donc de leur âge et de leur niveau de production.

Des fumiers plus mous pourraient être utilisés, mais il est difficile et compliqué d'ajouter de la paille et de bien la mélanger, sauf peut-être dans des fumiers de raclage avant de les évacuer.

Le **fumier de porc** provenant de raclage périodique ou de vidange d'une litière accumulée présente une humidité de 65 à 75% qui rend ce substrat très actif. Il existe cependant deux types de risques au cours de son compostage :

- la paille mâchonnée par les animaux s'est fortement imprégnée d'eau et a perdu une grande partie de ses capacités à donner de la structure au tas, ce qui risque de conduire à l'asphyxie
- ce fumier est riche en azote et peut conduire à de fortes pertes d'azote par volatilisation (25 à 50% de l'azote total peut ainsi partir dans les airs ; TEXIER, 1998)

Le **fumier de cheval** est plus riche en azote et en phosphore que le fumier de bovin (LECLERC, 2001), mais il est aussi plus pailleux (en général, les centres équestres tiennent à la propreté de leurs animaux) et donc plus sec (46% d'humidité, contre 75% pour le fumier de bovin ; ZIEGLER et HEDUIT, 1991).

C'est un matériau qui est donc plutôt difficile à composter tout seul, en particulier parce que l'humidification est difficile à réaliser. En général, on le composte en le mélangeant avec d'autres substrats, comme par exemple du fumier de porc, ou encore en l'humectant avec du lisier de porcs ou de bovins. D'après les témoins, cette pratique conduit à faire fondre littéralement l'andain, dont la hauteur initiale de 1,5 m est réduite à quelques dizaines de centimètres du sol seulement.

Le **fumier de volailles** est lui aussi riche en azote et il est très sec : seulement 25 à 40% d'humidité. Il faut donc bien l'humecter au départ (500 litres d'eau par tonne pour faire passer l'humidité de 25 à 50%). Du fait de la forte quantité d'azote présente au départ, les pertes en azote sont importantes : en moyenne 40%, ces pertes sont plus fortes pour du fumier de dindes (46%) que pour du fumier de poulets (26%). Malgré les pertes au cours du compostage, le compost de fumier de volailles est celui qui est le plus riche en azote (AUBERT, 1998).

Le **fumier de moutons** est comme le fumier de cheval relativement sec. Il convient donc de l'humidifier, le mieux étant de réaliser cette opération dans la bergerie, l'humectation étant plus homogène que si elle était faite une fois l'andain érigé. Ces fumiers sont plus riches en potassium que ceux des bovins. Attention donc au lessivage du K^+ .

• indications particulières pour les déchets verts

Le compostage des déchets verts fonctionne en général sans problème, les substrats mélangés étant complémentaires (certains riches en azote, d'autres riches en carbone, comme le bois).

Les tontes de gazons sont riches en azote (2,7% MS) ainsi qu'en phosphore, potassium et calcium. Des proportions allant jusqu'à 30% de tontes en masse dans un compost de déchets verts ne nuirait pas apparemment au compostage (MICHEL *et al.*, 1996) sauf :

- sur les quantités de carbone et de matière organique perdues (il y a plus d'activité donc plus de pertes)
- sur le pH qui peut dépasser la valeur de 8 en fin de compostage
- peut-être au niveau des odeurs

Les feuilles sont plus pauvres en azote (1,0% MS) mais jouent un rôle structurant non négligeable, à moins d'être complètement imbibées d'eau. Des proportions croissantes de feuilles ont un effet dépressif sur l'activité microbienne et risquent donc d'allonger la durée du compostage.

• quid des mélanges ?

Dans la pratique, nombreux sont les agriculteurs qui réalisent des mélanges de fumiers qu'ils mettent à composter. D'aucuns justifient cette pratique en rappelant que le terme 'compost' vient de l'ancien français et signifie composer.

L'essentiel est que le mélange obtenu soit compostable. Les mélanges ont été très peu étudiés, mais on peut émettre quelques hypothèses sur leur intérêt :

- du fait de la diversité des substrats et des flores associées (en particulier les flores des tubes digestifs des animaux), ces mélanges permettent sans doute le développement d'une diversité biologique plus importante,
- les mélanges pourraient permettre de corriger des rapports C/N, des taux d'humidité ou encore des structures incompatibles avec un bon compostage. En effet, la correction du rapport C/N par ajout de paille est plutôt malaisée à réaliser. La correction du taux d'humidité est plus facilement envisageable dans la pratique, mais l'humectation par des purin ou lisier semble être plus progressive et mieux adaptée à la vitesse d'absorption des liquides par les fumiers et leurs pailles,
- enfin, le fait de mélanger des fumiers, l'un plus riche en azote, l'autre plus riche en potassium ou encore en phosphore, permettrait de faire varier la composition du produit final en fonction d'utilisations plus ou moins différenciées.

Ces dernières suppositions sont confirmées par MICHEL *et al.* (1996), pour qui les proportions des matériaux de base ont peu d'incidence sur un nombre élevé de paramètres importants du compostage, sauf sur la composition finale en certains éléments fertilisants. Ainsi, très peu de paramètres du compostage peuvent être contrôlés par les proportions de matériaux de base. Le choix des matériaux de base détermine essentiellement la « compostabilité » du substrat et dans une moindre mesure l'évolution du tas de compost. D'autres paramètres et facteurs ont plus de poids sur le déroulement du compostage.

En d'autres termes, il faut bien choisir les matériaux de base pour que le compostage se fasse dans de bonnes conditions. A partir de là, il existe une série d'interventions qui permettent d'orienter l'évolution du processus.

A l'inverse, des matériaux de mauvaise qualité ne composteront pas bien, quelque soient les interventions (retournements, humectation...) que l'on fera au cours du processus. Pour faire court, on pourrait dire qu'un compost qui est mal parti est difficile à rattraper.

4.1.5.2. Stockage avant compostage

On l'a déjà signalé, il faut que les matériaux de base évoluent le moins possible pendant le stockage avant compostage.

Certains praticiens relatent que des matériaux de base ayant trop évolué ne peuvent plus être compostés, alors qu'ils auraient pu l'être avant leur stockage. C'est le cas par exemple des tontes de gazons qui peuvent rapidement se mettre à fermenter si l'on ne les composte pas tout de suite. Cela a également été observé avec des fumiers, stockés plusieurs mois avant de les mettre à composter, qui ne sont pas montés en température, malgré plusieurs passages au retourneur d'andain.

La moins bonne compostabilité des matériaux suite à un stockage pourrait provenir de deux causes essentielles, qui peuvent se combiner :

- des pertes en azote importantes : les microbes ne trouveraient plus alors l'azote nécessaire pour se développer ; l'activité microbienne serait ainsi réduite et on n'assisterait pas à une montée en température,
- des pertes en carbone facilement dégradable : c'est l'attaque de cette source carbonée en peu de temps au début du compostage qui permet une montée

en température rapide (phase thermophile) ; s'il ne subsiste que des composés difficilement dégradables, la décomposition est lente et fait appel à des microorganismes relativement spécialisés.

Certains auteurs comme MICHEL *et al.* (1996) soulignent en outre que le stockage peut conduire à une augmentation de l'humidité du tas de compost, ce qui empêche le lancement de la décomposition aérobie.

Pour éviter ce genre de déconvenues, il est conseillé de mettre le fumier à composer dès la sortie de l'étable ou de broyer les déchets verts et de les mettre en andains le plus tôt possible après broyage.

Si l'on est dans l'incapacité de procéder de cette façon, il vaut mieux alors stocker les substrats en atmosphère confinée, avec le moins d'oxygène possible, pour qu'ils évoluent le moins possible (il y a moins de pertes de carbone et d'azote en anaérobiose qu'en aérobiose).

A noter également que certains praticiens préfèrent stocker au moins 2 semaines les fumiers dont les pailles ont été traitées (raccourcisseur), cette première évolution permettant d'attaquer un peu des pailles moins facile à dégrader qui présentent un aspect plus lustré.

4.1.5.3. Broyage

Le broyage est une technique qui est systématiquement employée dans le compostage des déchets verts. Le broyage peut également avoir un intérêt pour l'agriculteur qui mélange des déchets verts à d'autres substrats.

L'exploitant de plate-forme peut intervenir à ce niveau en choisissant la taille des particules qui sortent du broyeur. Cette taille des particules a une double influence sur le compostage (MUSTIN, 1987 ; COOPERBAND, 2000) :

- d'un côté, des particules de petite taille stimulent l'activité des microorganismes par augmentation de la surface d'attaque,
- de l'autre côté, des particules trop petites réduisent la porosité et risquent d'asphyxier le tas de compost.

Il faut donc trouver un juste milieu. En outre, des particules de grande taille ne seront que très partiellement décomposées par les microorganismes. Elles seront récupérées à la fin du compostage lors du criblage et réintroduites au début du cycle. L'intérêt de cette pratique est de réaliser des économies sur l'usure des marteaux des broyeurs : plus les particules sont grandes, moins les marteaux s'usent. Sachant que ces pièces d'usure sont en alliage et coûtent très cher, l'économie n'est pas négligeable. En revanche, vu que ces particules rentrent plusieurs fois dans le cycle, cette pratique demande plus d'espace pour composter. En fonction des situations particulières on peut rencontrer sur le terrain aussi bien les adeptes des grosses particules que ceux du broyage plus fin (nous reparlerons de ces différentes pratiques dans le § 4.2.4.).

WIART (1997) signale enfin que l'usure des marteaux de broyeur peut être à la source de contamination des matériaux de base en éléments traces métalliques. Ce problème est en général relativement secondaire, mais il vaut tout de même mieux surveiller les taux de chrome (Cr), nickel (Ni) et plomb (Pb).

4.1.5.4. Taille et forme de l'andain

Ce paramètre a selon nous une incidence très forte sur l'orientation générale qui est donnée au compostage. Cette influence se répercute ensuite sur la durée du compostage, les pertes en matière organique, l'indice d'humification et la granulométrie du compost (MICHEL *et al.*, 1996), ces quatre paramètres étant la conséquence de l'activité biologique sélectionnée par les conditions de température et d'aération.

L'établissement et le maintien de conditions aérobies dépendent :

- de la circulation de l'air : dans un tas de forme triangulaire, l'air se déplace essentiellement par convection (effet cheminée), tandis que dans des tas de volume plus important, les chemins de circulation doivent être plus complexes qu'une simple montée verticale (en particulier diffusion latérale) ; de plus, l'air peut circuler plus ou moins bien en fonction de la taille des particules (granulométrie). Au total, plus la surface d'échange d'un tas est grande pour un volume donné, mieux les échanges se feront. On peut mesurer ce facteur par le rapport [Surface d'échange avec l'air] / [Volume de matières mises à composter] ; plus il est grand, plus l'échange gazeux entre l'intérieur et l'extérieur sera intense,
- de l'approvisionnement en oxygène du cœur de l'andain : plus un tas est important en hauteur ou en largeur, plus l'air s'épuise en oxygène quand cet air arrive au centre de l'andain, ce qui peut créer un noyau en anaérobiose ; tout dépend alors de la vitesse de circulation de l'air : s'il circule rapidement, l'anaérobiose risque moins de se produire,
- de la stabilité de la structure de l'andain : plus les andains sont hauts, plus leur résistance à l'affaissement sous l'effet de leur propre poids est faible, et ils risquent de perdre plus rapidement leur structure et limiter la circulation de l'air (HONG *et al.*, 1984). Les risques d'effondrements sont plus importants à la base des andains (présence d'une couche noire, humide et nauséabonde).

La température du tas varie en fonction de :

- la vitesse de circulation de l'air qui elle-même dépend de la taille et de la forme de l'andain et de la taille des particules,
- la conservation de la chaleur et l'inertie thermique du tas : les tas qui ont une plus faible surface d'échange pour un volume donné (grands tas à faible rapport Surface / Volume) perdent moins vite leur chaleur que les petits tas (moins de dissipation). Ainsi, les grands tas ont une inertie thermique plus importante que les petits tas (MICHEL *et al.*, 1996).

En conséquence, pour assurer des conditions aérobies dans un tas de compost, il faut bien associer les 2 éléments taille de l'andain et taille des particules.

Le Tableau 11 donne une image des influences croisées de ces deux paramètres sur l'aération naturelle et la température des andains.

Tableau 11 : Conditions primordiales de compostage (température et oxygène) en fonction de la taille des andains et de la granulométrie des matériaux de base, d'après HONG *et al.* (1984), MICHEL *et al.* (1996), MICHEL (1999) & MUSTIN (1987)

	PETITS TAS	GRANDS TAS
GRANULO TROP FINE	<ul style="list-style-type: none"> • risque d'étouffement • risque de surchauffe (moindre) 	<ul style="list-style-type: none"> • risque d'étouffement (anaérobiose) • garde trop la chaleur (température trop élevée, limite l'activité microbienne)
GRANULO OPTIMALE	bonnes conditions de température et d'aération	<ul style="list-style-type: none"> • conditions de circulation plutôt bonnes, mais forte hétérogénéité • température parfois trop chaude
GRANULO GROSSIERE	<ul style="list-style-type: none"> • risque d'assèchement • risque de refroidissement 	<ul style="list-style-type: none"> • risque d'assèchement • risque d'autocombustion

Les limites entre petit tas et grand tas et entre classes de granulométrie sont volontairement floues ; ce qu'il faut retenir avant tout, c'est qu'il existe des domaines dans lesquels le compostage se passe mieux que dans d'autres.

Le Tableau 12 donne quelques ordres de grandeur les rapports Surface d'échange / Volume en fonction des dimensions des andains.

Tableau 12 : rapport Surface d'échange / Volume des andains en fonction de leur forme et/ou dimension (d'après MICHEL *et al.*, 1996)

FORME	DIMENSION (LARGEUR X HAUTEUR, EN METRE)	S_{ECH} / V (EN M^2/M^3)
andain triangulaire	4 x 1,2 à 1,5	1,6 à 1,9
tas en forme de cône	3,5 à 4,3 (rayon) x 3	1,0 à 1,1
andain tabulaire	7 à 8 x 3	0,2 à 0,3

Les variations de ce rapport sont très fortes et l'on comprend que la taille et la forme de l'andain vont jouer une grosse influence sur le déroulement du processus. On verra de façon concrète dans la typologie des composts de déchets verts (voir § 4.2.), dans quelle mesure les dimensions de l'andain peuvent avoir une influence sur l'orientation du processus de compostage et sur les qualités du produit fini.

Dans le paragraphe suivant, nous nous intéressons aux effets provoqués par le retournement des andains et par les différents processus d'aération.

4.1.5.5. Retournements et processus d'aération

• retournement et oxygénation du tas de compost

Autant dissiper les confusions tout de suite, le retournement n'apporte pas directement de l'oxygène dans le tas de compost. L'oxygène qui se trouve dans le tas de compost suite au renouvellement de l'atmosphère par le retournement disparaît au bout de quelques heures (MICHEL, 1999).

Le but primordial du retournement est de redonner une structure qui permette la circulation de l'air (MICHEL, 1999). En effet, il peut arriver, avec certains matériaux peu

résistants ou sous l'effet de la décomposition, que le tas s'effondre plus ou moins légèrement ce qui risque de l'étouffer.

GODDEN (19??) signale qu'un fumier qui sort de l'épandeur pour être mis à composter voit son volume multiplié par 2,5 à 3.

• autres effets du retournement sur le processus de compostage

Le retournement joue un grand rôle dans l'homogénéisation du substrat : il permet de mélanger la matière organique plus ou moins bien décomposée et de répartir l'humidité (FINSTEIN *et al.*, 1999 ; HONG *et al.*, 1984). De plus, le fait de retourner réduit un peu la taille des particules (léger effet de broyage dû à l'usure et à l'éclatement selon MICHEL, 1999 et FINSTEIN *et al.*, 1999).

Juste après un retournement, on constate que la température remonte (CREPAZ *et al.*, 1997) ; suite à un retournement intervenant 2 semaines et demi après la mise en andain, elle se maintient à un niveau élevé pendant 3 semaines (GODDEN, 19??). En exposant des surfaces encore peu attaquées aux micro-organismes (attention, l'effet d'« éclatement » occasionne en même temps la mort de nombreux microbes), en mélangeant le substrat (ce qui doit également redistribuer les microbes dans l'espace, ceux-ci ne pouvant se déplacer) et surtout en remontant brusquement le taux d'oxygène dans le tas de compost (il passe de 1-5% en moyenne à 20%, soit le taux d'oxygène de l'air), on relance très fortement l'activité des microorganismes (SOMMER *et al.*, 19??). D'après GODDEN (19??), l'activité enzymatique double pendant un retournement et se maintient pendant 3 mois. Le retournement prolonge la phase thermophile et permet de réduire la durée du compostage (GODDEN, 19??; HONG *et al.*, 1984).

On comprend ainsi qu'un tas retourné plus fréquemment va être plus actif et donc perdre plus de matière organique qu'un tas peu retourné ou même laissé sans retournement (INSAM *et al.*, 1996). Des retournements intensifs (par exemple 1 par semaine pendant 2 mois) conduisent en effet à un refroidissement plus rapide, à une décomposition plus complète et à une stabilisation plus précoce du compost (CREPAZ *et al.*, 1997 ; INSAM *et al.*, 1996 ; SHI *et al.*, 1999).

La réduction de la taille des particules peut si elle est exagérée, conduire à une diminution de la porosité et à une réduction de la circulation de l'air (MICHEL, 1999).

Selon différents auteurs (INSAM *et al.*, 1996 ; LARNEY *et al.*, 2000), le retournement permet en outre de supprimer le cœur qui ressemble à du beurre noir (aspect gras et luisant) qui composte mal au centre de l'andain (conditions anaérobies en cas de mauvaise structure). Ce fait est également observé par les agriculteurs qui ont adopté le retournement : ils sont très satisfaits de l'homogénéité du produit obtenu.

Le fait de retourner peut permettre d'évacuer de l'humidité en excès (il se forme un nuage de vapeur d'eau là où passe le retourneur), et LARNEY *et al.* (2000) signale que 10 retournement effectués en 4 mois et demi de compostage font passer les pertes en eau de 23 (témoin sans retournement) à 36%, soit plus de 50% de pertes en plus. MICHEL *et al.* (1996) ont montré qu'en retournant un andain 7 fois en 4 semaines, l'humidité du produit fini est d'environ 43%, alors qu'elle est de 54% pour les andains retournés seulement une fois dans la même période.

Ramener le substrat de l'extérieur vers le centre permet enfin de faire passer l'ensemble des matériaux de base par de hautes températures ; tout le substrat est alors hygiénisé et les graines de mauvaises herbes sont détruites (CREPAZ *et al.*, 1997 ; LECLERC, 2001, MICHEL, 1999).

• opportunité et intérêt des retournements

Selon GOLUEKE (1992), augmenter la sophistication technologique du compostage (par réacteur ou par action mécanique) ne permet pas aux micro-organismes de dépasser leurs facultés et capacités génétiques. Il convient donc de rester très prudent dans l'utilisation de machines et de se focaliser avant tout sur l'effet de l'action de ces machines sur l'activité biologique des tas mis à composter.

Selon GODDEN (19??), les retournements ne sont pas indispensables dans des conditions de compostage normales. Ils ne sont intéressants qu'en cas de mauvais compostage (anaérobiose, tassement excessif...).

CREPAZ *et al.* (1997) affirment par ailleurs que les retournements se justifient surtout pendant les 5 premières semaines ; après ce délai, on n'observe pas de différences significatives entre les tas retournés et ceux laissés intacts.

On l'a signalé, les retournements permettent en outre d'homogénéiser le produit et de bien l'hygiéniser.

En conditions climatiques froides, le retournement permet de relancer l'activité du tas de compost dans une phase thermophile ; cette relance est cependant de courte durée (LARNEY *et al.*, 2000).

Le retournement peut également être intéressant pour accélérer le processus de décomposition et faire ainsi séjourner le moins longtemps possible le compost sur une aire de compostage. Cette option est séduisante pour ceux qui ont des flux importants de matière organique à traiter (plate-forme de compostage de déchets verts, élevage de taille importante...).

Si l'intérêt sur le plan de l'organisation et de la gestion des flux est évident quand on évoque les retournements intensifs, on peut se poser alors la question de l'intérêt agronomique de cette pratique. On ne donne ici que quelques éléments de réflexion et on présentera dans la typologie (§ 4.2. et 4.3.) des exemples plus précis s'inspirant de pratiques observées et validées sur le terrain.

Concernant l'azote, l'estimation des pertes dans un compost fréquemment retourné varie de 20-30% (CREPAZ *et al.*, 1997), valeur proche de la moyenne des pertes au cours du compostage, à 50% (ATALLAH, 1993), ce qui se rapproche du maximum. Les conclusions des auteurs divergent quant à l'incidence des retournements sur la libération d'azote dans l'air sous forme d'ammoniac. Pour DEWES (1995) et MORVAN et DACH (1998, voir § 4.1.4.2.), une grande quantité d'azote est libérée en une seule fois en ouvrant brutalement l'atmosphère du tas de compost lors du retournement alors que pour CREPAZ *et al.* (1997), les pertes par volatilisation restent faibles car l'azote serait piégé sous forme organique et les quantités présentes sous forme NH_4^+ seraient faibles par rapport au total. L'effet des retournements sur la volatilisation de l'azote dépendra du moment auquel ils ont lieu. Les risques sont les plus élevés pendant la phase thermophile et surtout à son point le plus chaud. Or, en général, on ne retourne le tas que quand sa température commence à baisser (en-dessous de 50°C usuellement).

D'après MICHEL *et al.* (1996), des retournements intensifs (7 en 4 semaines) semblent avoir un effet négatif sur l'indice d'humification, ce qui voudrait dire une moins

bonne stabilisation du carbone après apport dans le sol. Si l'on rapproche cette observation de celle qui montre que les pertes en matière organique sont plus fortes avec des retournements intensifs (CREPAZ *et al.*, 1997), on peut se demander si, du point de vue de la conservation du carbone, cette pratique est intéressante, par rapport à un nombre plus réduit de retournements et même par rapport à l'épandage de fumier frais, *cf.* § 4.1.4.1.)

Une idée qui est quelque fois émise par les auteurs est que les retournements intensifs permettent d'obtenir très vite un compost bien mûr. Il se basent en fait plus sur des critères de stabilité de l'activité des microbes dans le tas que sur de réels critères de maturité du compost.

• outils et équipements pour le retournement mécanique

Le retournement à la main à l'aide d'une fourche est en général réservé au compost du fond du jardin qui est produit en petites quantités. On peut parfois assister à des chantiers qui mobilisent tout un groupe de travailleurs de force pour déplacer un tas de compost : on y retrouve alors toute la convivialité qui se cristallise autour des travaux pénibles. La difficulté aidant, cet acte prend une dimension sociale.

Une pratique moins pénible, quoique astreignante, est le retournement au tracteur à l'aide d'une fourche hydraulique. Le retournement peut être réalisé par une seule personne. Cette pratique demande du temps et de l'espace pour manœuvrer. En outre, le sol, s'il n'est pas stable, doit être ressuyé sans quoi les aller et venues de l'engin risquent de causer des dégâts (ornières, tassement) en bordure du tas ce qui handicapera sa reprise et son chargement.

On peut procéder de façon plus méthodique en chargeant le fumier en phase de compostage à l'aide d'une fourche hydraulique pour le charger dans un épandeur. Dans la pratique, on observe au moins 2 façons d'utiliser cet épandeur : avec ou sans hérisson. L'utilisation du hérisson nécessite en général la mise en place de déflecteurs à la sortie de l'épandeur. Malgré cela, il peut arriver que le fumier soit trop éparpillé et projeté de façon trop violente et se tasse ou encore il peut se former une sorte de gouttière (petit bourrelet concave) au sommet du tas. C'est pourquoi certains agriculteurs retirent le hérisson de l'épandeur. En général, on veille alors à bien déstructurer les amas, car seul l'avancée sur le tapis de fond ou le mouvement des chaînes permet d'éclater le substrat avant sa remise en tas. Ce chantier nécessite deux personnes. Une fois l'opération réalisée, on remonte le tas à la fourche hydraulique pour lui donner bonne forme. On peut éventuellement le finir à la fourche. En terme de temps et de coût, cette pratique n'est pas vraiment rentable (HABIB et GREGOIRE, 1998) : un retournement effectué de cette façon prend plus de temps que l'économie réalisée avec la réduction du nombre de charrois (due à la baisse de volume du fumier qui se transforme en compost et à la concentration en éléments fertilisants).

On peut enfin avoir recours à un matériel spécialisé : le retourneur d'andain. Il en existe différents modèles, adaptés aux tailles et formes d'andains que l'on peut trouver. Les plus connus sont les retourneurs d'andain à section triangulaire. Il s'agit en fait d'un hérisson mû par un rotor que l'on avance dans la masse de l'andain. L'axe du rotor est perpendiculaire au sens d'avancement. La force du rotor permet de pro-

jeter vers l'arrière l'ensemble de la masse de l'andain au fur et à mesure de l'avancement. Après le passage du retourneur, on s'aperçoit que l'andain a été rehaussé ; il a gagné une meilleure structure. Avec un matériel adéquat, une seule personne est nécessaire. Certains de ces retourneurs nécessitent un système de boîte de vitesse rampante sur le tracteur, d'autres sont mus par un système d'avancement hydraulique qui fait avancer l'ensemble (le tracteur, qui fournit l'énergie, est mis au point mort et le retourneur pousse le tracteur). En fonction du tassement du substrat, le passage du retourneur est plus ou moins aisé. Des passages répétés peuvent être nécessaires (2 à 3 fois) pour obtenir une structure acceptable.

L'utilisation du retourneur est raisonnable d'un point de vue économique si l'on ne dépasse pas les 2 à 3 retournements : au-delà, le temps passé et les coûts de carburant en particulier sont plus élevés que les économies réalisées par la réduction du temps passé à l'épandage.

Concernant les composts de déchets verts, il existe un matériel spécifique pour le retournement des andains tabulaires (2 à 3 mètres de haut, jusqu'à 30 mètres de large). Il s'agit d'une fraise verticale à oblique qui prend une couche verticale de dix à quinze centimètres sur l'andain pour la projeter sur une bande transporteuse qui rejette le substrat pour reconstituer l'andain.

• un autre procédé pour alimenter le tas en O_2 : les systèmes d'aération forcée

Il s'agit d'un apport d'air par des conduits déposés au sol ou encastrés dans la plateforme et relié à une pompe aspirante ou refoulante. Les pompes envoient des courants d'air de faible intensité de façon à limiter les chemins préférentiels de circulation de l'air. Dans certains cas, les andains sous aération forcée peuvent être recouverts d'une bâche.

La mise en place de sondes de mesure dans ces composts permet une mise en route intermittente de l'aération forcée en fonction de paramètres physiques du processus de compostage (taux d'oxygène, température).

Les auteurs ne sont pas tous d'accord pour savoir quel est le paramètre le plus pertinent pour piloter un compostage par aération forcée. Pour CITTERIO *et al.* (1987), la mesure de l' O_2 est le meilleur paramètre. Selon FINSTEIN *et al.* (1999), le compostage par aération forcée devrait être contrôlé par la température seule ou par la température combinée au taux d' O_2 . Le contrôle par le taux d' O_2 seul ne suffirait pas à bien orienter le compostage.

Ce procédé encore peu développé dans le Rhin Supérieur ne concerne que le compostage de déchets verts, de la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) et des boues de stations d'épuration.

Nous développerons cependant le débat contradictoire sur le pilotage de l'aération forcée dans la typologie en examinant les avantages et les inconvénients de ce mode de conduite des andains.

4.1.5.6. Protection et couverture des andains

Composter, c'est, on l'a déjà souligné, opérer des transformations de la matière organique hors sol. Les transformations qui peuvent s'opérer dans le sol sont très diverses et on a du mal à les orienter, en particulier à cause de l'effet indirect du climat sur la vie du sol (température et précipitations). Le fait d'opérer ces transformations hors sol ne signifie cependant pas pour autant que le climat ne vas pas interférer.

• sensibilité au climat des petits et des grands andains

Le climat peut avoir une influence sur le compostage et en particulier sur 2 facteurs primordiaux : la circulation de l'air et les conditions d'aération du tas.

- un temps chaud (ou froid) réchauffe (ou refroidit) les andains d'autant plus vite que ceux-ci sont petits ; les grands andains sont moins sensibles aux variations de température extérieure,
- un temps sec (ou pluvieux) assèchera (ou humidifiera) plus vite un petit andain qu'un grand ; cette humidification a une répercussion sur la porosité (donc la circulation de l'air), l'activité microbienne (moins d'air, moins d'activité) et sur la température du tas (l'eau froide rafraîchit le tas).

En résumé, les grands andains seront en général moins sensibles à l'action du climat que les petits andains.

• protection thermique...

Selon CREPAZ *et al.* (1997), la couverture d'un tas de compost permet de conserver un peu mieux la chaleur.

• ... et protection hydrique

La couverture permet de réguler un tant soit peu l'humidité du tas de compost ; elle limite l'assèchement de l'andain en période sèche et protège le tas en période de forte pluviométrie (THOMSEN, 2000).

• du bon usage de la couverture

Le climat évolue dans le temps, et on peut parcourir tout le spectre des configurations possibles entre les pôles chaud/froid et sec/humide pendant la durée du compostage. C'est pourquoi, il convient d'adapter l'utilisation de la couverture à ces variations climatiques.

Différents auteurs se sont penchés sur la question de savoir si la couverture d'un tas de compost permettait de prévenir et de limiter le lessivage des tas de compost. Ce lessivage peut conduire à des pertes d'azote et surtout de potassium (voir **§ 4.1.4.2. et suivant**).

Il apparaît qu'en climat sec, la couverture d'un andain pendant tout le compostage conduit à de plus fortes pertes par lessivage (CREPAZ *et al.*, 1997 ; LE HOUEROU DECLERCQ, 1992). Ce résultat surprenant serait dû au fait que l'eau libérée par la décomposition de la matière organique (l'eau métabolique) ne peut pas quitter l'andain sous forme de vapeur d'eau : elle se condense et lessive le tas. *A contrario*, on note qu'en climat plutôt humide, la couverture permet de limiter le lessivage (en comparaison avec un témoin non couvert).

On sait d'ores et déjà que le lessivage est le plus fort au début du compostage. Les risques engendrés par une pluviométrie excessive concernant le lessivage sont donc à éviter au début du compostage. C'est ce qui a conduit certains auteurs à préconiser que la phase active du compostage (les 2 premiers mois, pendant lesquels l'andain a une température nettement plus élevée que celle de l'air) se fasse à l'air libre, à moins que la pluviométrie dépasse 200 mm (HACALA *et al.*, 1999).

En phase de maturation, il est conseillé de couvrir le tas de compost pour éviter l'engorgement par l'eau de pluie et la contamination par des graines d'adventices transportées par le vent (Yves HERODY, communication personnelle, WIART, 1997).

Une remarque enfin à l'attention de ceux qui sont amenés à commercialiser du compost sous la norme NF U 44-051 '*Amendements organiques*' : l'humectation excessive peut entraîner un déclassement du produit et entraîner son élimination (WIART, 1997).

• les protections existantes

Jusqu'ici on n'a parlé de couverture sans faire de distinction sur la nature de cette couverture, or on peut recouvrir un tas de compost avec différents matériaux.

Sur le terrain, on peut observer des tas recouverts d'une couche de paille (une balle déroulée puis répartie sur l'andain). On n'a pas trouvé dans la littérature d'indications sur l'efficacité de ce type de couverture (limitation des quantités de jus ou au contraire augmentation de ceux-ci...). Les observations faites *in situ* montrent néanmoins que la paille a tendance à former lassis, plus ou moins épais en fonction de la quantité de paille et de son état de compression (la laisse-t-on pressée ou éclate-t-on la couche installée à l'aide d'une fourche ?). Ce lassis pourrait imperméabiliser le tas, de façon relative en tout cas : la paille peut absorber l'eau et la trame de paille pourrait faire ruisseler l'eau jusqu'à la base du tas. Vu l'état du compost juste en-dessous de cette couche de paille (il ressemble plus au compost situé plus en profondeur selon les agriculteurs qui ont comparé les variantes avec et sans paille), on peut penser que cette couverture joue bien son rôle de protection thermique. Il subsiste néanmoins quelques zones d'ombres : est-ce que l'air passe bien au travers de cette couche ? est-ce que la vapeur d'eau peut bien s'échapper du tas (pour éviter les risques de lessivage) ? est-ce que cette couche est vraiment imperméable ? dans quelle mesure l'efficacité de ce type de couverture dépend de l'intensité des pluies et du régime climatique ? si l'on est amené à retourner le tas, comment se mélange la paille et comment évolue-t-elle ? comment évoluent les caractéristiques de cette couverture avec le temps (décomposition, déstructuration sous l'effet du soleil et des pluies ?

Des essais ont été menés avec des bâches plastiques et avec des toiles et des toiles goudronnées. Ces matériaux, dans la mesure où ils sont peu poreux, risquent de conduire à l'asphyxie du tas et donc à l'arrêt du compostage. Ils présentent un plus grand danger vis-à-vis des lessivages en retenant la vapeur d'eau, surtout en début de compostage. On peut à la rigueur utiliser ces matériaux pour couvrir le tas de compost en phase de maturation ou pendant le stockage. Il peut être bon de prévoir des haubans (petites poutres, pneus ?) pour éviter de mettre cet type de bâche au contact direct du tas et laisser ainsi mieux circuler l'air.

On trouve des bâches spécialement adaptées au compostage dans le commerce. Ce sont des bâches en polypropylène non tissées qui seraient hémi-perméables (à la façon du Gore-Tex). Elles laisseraient passer l'air mais pas l'eau et dans un seul sens de surcroît. Il faut qu'elles soient installées sur une pente de 45° pour pouvoir fonctionner correctement : ainsi, l'eau de pluie est captée par la bâche et ruisselle à l'intérieur jusqu'à la base du tas sans pénétrer dans l'andain. On peut se demander si la vapeur d'eau arrive à quitter le tas de compost à travers la bâche, selon le système de ruissellement. On observe sur le terrain que les andains recouverts par ce type de bâche en phase thermophile fument, ce qui signifierait que de l'eau peut passer au travers. On ne sait cependant rien sur les quantités relatives qui peuvent traverser la bâche ou être retenues et évacuées par celle-ci. Des études ont montré (DEWES *et al.*, 1991) que sous des climats relativement cléments, les bâches en polypropylène (laissée en place toute la durée de l'expérimentation) ne permettent pas de limiter significativement les pertes d'azote par lessivage en comparaison avec une bâche en plastique (laissée également tout le temps) ou même un tas nu. Le gain existe mais il est faible.

Enfin, une possibilité évoquée épisodiquement dans la littérature mais peu rencontrée sur le terrain du fait de son coût est le compostage sous hangar. On s'affranchit ainsi entièrement des problèmes liés à l'eau de pluie. Les principales pertes en azote se faisant par volatilisation, et avec une humidité et un rapport C/N de départ corrects, les pertes en potassium étant limitées, un tel investissement se justifie-t-il ? Le compostage sous un hangar permet en outre de pouvoir accéder aux andains et d'intervenir dessus à tout moment (retournement, enlèvement).

• quels conseils pour la protection des tas ?

Tout dépend des matériaux de départ : s'ils sont bien compostables, ils ne poseront en principe pas de grands problèmes. On peut alors conseiller de ne pas couvrir les tas avant le début de la phase de maturation, à moins qu'il ne soit exposé à de fortes pluies (en quantité ou en intensité) pendant la phase active.

En conditions non optimales, la bâche devrait être utilisée pour réguler l'humidité de la façon décrite dans le Tableau 13.

Tableau 13 : utilisation de la bâche pour réguler l'humidité des tas de compost en fonction de la météo

	TEMPS CHAUD	TEMPS A LA PLUIE
COMPOST SEC	couvrir	découvrir
COMPOST HUMIDE	découvrir	couvrir

Dans des situations plus marquées où l'effet de la bâche est négligeable pour contrôler l'humidité, les retournements auront une action plus marquée :

- si le tas est trop humide, le fait de retourner libère de la vapeur d'eau ; il est parfois nécessaire de faire plusieurs passages l'un à la suite de l'autre,
- si le tas est trop sec, l'humidifier en le retournant, de manière à bien répartir l'eau et à être sûr de la quantité d'eau à apporter.

Il est évident qu'en situation non optimale, la régulation de l'humidité demande un surcroît de travail. Il semblerait que les bâches en polypropylène soient alors plus ef-

ficaces pour réguler l'humidité, mais elles peuvent demander plus d'efforts pour leur manutention : elles s'alourdissent en absorbant un peu d'eau.

Nous abordons maintenant un paramètre de contrôle très largement mis en pratique, puisqu'il suffit de laisser faire le temps.

4.1.5.7. Maturation

Parler de l'influence de la maturation sur les qualités du compost nous autorise à insister sur la distinction qu'il faut absolument faire entre :

- stabilité de l'activité des microorganismes
qui équivaut à une faible activité du tas de compost = maturation

- et maturité du compost
qui équivaut à une stabilité du carbone du compost

La stabilité d'un tas de compost peut ainsi correspondre à différents degrés de maturité : un compost de 6 mois et un compost de 2 ans sont tous deux stables, mais n'ont pas la même maturité.

• comment reconnaître la stabilité d'un tas de compost ?

La stabilité peut être mesurée par le taux de respiration, la production de CO₂ et l'évolution de la température (VEEKEN *et al.*, 2000). Dans la pratique, un compost est stable quand il ne s'échauffe plus après retournement et qu'il n'entre pas en anaérobiose s'il est stocké en grands tas (WIART, 1997), ou encore quand son rapport C/N vaut de 12 à 15.

• les différents degrés de maturité d'un compost

La maturité peut être définie de plusieurs manières : un compost en phase de maturation n'immobilise pas d'azote quand il est incorporé au sol (WIART, 1997). On remarque également que dans un compost mûr, tout l'azote minéral est présent sous forme de nitrates (attention toutefois : en cas de lessivage (ATALLAH, 1993), ce critère n'est plus fiable). Le test du cresson permet également de dire si le compost est en phase de maturation. Le degré de maturité ne peut être appréhendé en principe que par une analyse biochimique des composés humiques. Dans un compost mûr, on a plus d'acides humiques que d'acides fulviques ; la relation s'inverse dans un compost jeune (TUOMELA *et al.*, 2000). Quand le degré de maturité augmente, on va vers une aromatisation des composés humiques : il y a plus de cycles que de chaînes aliphatiques et les molécules grossissent et se condensent.

Il n'existe pas d'indice de mesure précis et facile d'utilisation pour juger la maturité du compost, à part peut-être l'aspect visuel et la durée de la phase de maturation : plus le temps avance, plus la structure est grumeleuse, le produit foncé, et l'apparence proche de celle de la terre végétale.

Parmi les méthodes analytiques⁸ permettant de quantifier le degré de maturité et surtout de qualifier la qualité des composés humiques produits (voir § 4.1.3.), on a retenu celle combinant la CEC (capacité d'échange cationique) et un indice d'humification (par exemple [acides humiques + acides fulviques] / taux de matière organique). Un indice d'humification élevé témoigne en principe d'un degré de maturité avancé ; on doit alors examiner la CEC pour savoir à quel type de composés humiques (quelle voie d'humification) on a à faire. Le Tableau 14 récapitule les principaux acquis de cette méthode analytique.

Tableau 14 : degré de maturité et qualité des composé humiques des composts en fonction de l'indice d'humification et de la CEC

	CEC FAIBLE (100 à 200 méq/100g)	CEC ELEVEE (200 à 600 méq/100g)
INDICE D'HUMIFICATION FAIBLE	compost jeune, évolution normale	-
INDICE D'HUMIFICATION ELEVE	compost mûr, composés humiques de qualité moyenne (type mor ou tourbe)	compost mûr, composés humiques de bonne qualité (type mull)

En principe, si la phase de maturation se passe dans de bonnes conditions d'aération et d'humidité (ni trop humide ni trop sec), plus la durée de compostage est longue, plus l'indice d'humification augmente. Cela signifie que plus on attend avant d'épandre le compost, plus le carbone et l'azote seront stabilisés. Si les conditions d'humification sont mauvaises, on construit des composés humiques de moins bonnes qualités, ayant une capacité d'échange moins élevée. Ils ont donc un pouvoir amendant moins élevé (moins bonne régulation de la teneur en eau, moins bonne fixation des cations, moins bonne liaison avec l'argile, structure moins bonne ...) et qui risquent d'avoir du mal à rentrer dans les cycles de la matière organique dans le sol, en particulier pour le carbone et l'azote, ce qui se traduit par de moins bonnes qualités fertilisantes.

Il faut nuancer ce propos en rappelant que les composés humiques et les voies de l'humification sont encore mal connus dans un tas de compost (on s'inspire de la théorie de l'humification dans les sols pour approcher ces phénomènes), et que ces composés peuvent encore évoluer une fois incorporés au sol.

Un indicateur⁹ moins fiable mais plus rapide du degré de maturité du tas de compost est la lecture combinée du taux de matière organique et du rapport C/N :

- un taux de matière organique (MO) bas et un rapport C/N inférieur à 12-15 serait le signe d'un compost très dégradé et peu humifié,
- un taux de MO normal et un rapport C/N de l'ordre de 12-15 correspondrait à un compost bien dégradé et bien humifié,
- un fort taux de MO et un rapport C/N supérieur à 12-15 indiquerait un compost peu ou mal dégradé.

⁸ cette réflexion s'inspire de DRIEUX (1993) et d'une campagne d'analyse de composts réalisée en 1992/1993 par le LAMS-21 à la demande de l'OPABA

⁹ indicateur proposé d'après les résultats de la campagne d'analyse de composts réalisée par le LAMS-21 en 1992/1993 et d'après les résultats des analyses réalisées dans le présent projet (voir les typologies § 4.2 et 4.3.)

• degré de maturité et utilisation agricole

Les résultats de l'enquête auprès des agriculteurs font ressortir que le degré de maturité est le premier critère discriminant pour qualifier les composts. Ce critère croise de façon très claire les effets que doit produire le compost dans les champs : selon les agriculteurs entendus, un compost jeune aura un rôle plutôt fertilisant, alors qu'un compost mûr (ou vieux) sera surtout amendant et stimulera la vie du sol, bien qu'on lui attribue également, à un moindre degré il est vrai, un effet fertilisant.

D'un point de vue pratique et opérationnel, le degré de maturité est sans doute le paramètre le plus facile à contrôler. Si c'est effectivement celui qui conditionne le plus le comportement (fertilisant ou amendant) du compost au champ, cela voudrait dire que l'agriculteur a une emprise importante sur la détermination de la qualité générale de son compost.

4.1.5.8. Additifs

On ne revient pas ici sur les ferments bactériens et le vieux compost (voir § 4.1.2.2.). On reparle de la terre et on aborde d'autres additifs, dont les préparations biodynamiques.

• la poudre d'argile

L'ajout de poudre d'argile dans le compost ne semble pas avoir de grande influence sur le processus en tant que tel.

Il existe une controverse sur la formation du complexe argilo-humique dans le tas de composts grâce à cet argile. GRUNDMANN (1990) ainsi que de nombreux praticiens affirment que cette formation existe alors qu'HERODY (communication personnelle) la conteste.

Le principal effet de l'argile serait une plus grande absorption de l'eau (ce qui n'est pas absolument nécessaire dans le cas de fumiers, cf. § 4.1.2.1. « l'humidité »), et une meilleure rétention des cations (GRUNDMANN, 1990). HERODY (communication personnelle) signale que des quantités d'argile trop importantes risquent de retenir trop d'eau dans l'andain et de l'asphyxier.

GRUNDMANN (1990) cite de nombreuses références contradictoires à propos de l'influence de l'argile sur l'activité microbienne (effet stimulant ou dépressif).

L'ajout d'argile tend à augmenter le taux de matière minérale du compost et réduit donc le taux de matière organique. Par exemple, les quantités de terre ajoutées par les exploitants de plate-forme de déchets verts varient de 5 à 30% en masse, ce qui a une incidence sur le produit fini.

• la poudre de roche

La poudre de roche basaltique semble avoir les mêmes effets que la poudre d'argile (GRUNDMANN, 1990), à savoir :

- peu ou pas d'effet sur le processus de compostage (OTT, 1991),
- meilleure rétention en eau (quoique que plus faible que celle de l'argile),
- effet (discuté) sur la préparation de la formation du complexe-argilo-humique,

En outre, on observerait un effet positif sur l'activité minéralisante des microorganismes (GRUNDMANN, 1990).

• le lithothamane¹⁰

Le lithothamne peut avoir une influence sur l'humidité du tas de compost, car il peut absorber de 200 à 300 fois son poids en eau.

Le lithothamne contient et apporte de nombreux oligo-éléments ainsi que des substances actives (hormones, vitamines) qui exercent une influence positive sur la vie microbienne.

Cet additif semble accélérer le compostage. Les praticiens qui l'incorpore dans le fumier dès la litière notent un dégagement d'ammoniac moindre (moins d'odeur caractéristique, voire non décelable). Serait-ce dû à une baisse du pH (peu probable car le calcium du lithothamne est apporté sous forme carbonatée, donc basique), à une absorption-fixation des liquides dans les cavités du lithothamne... ?

• les préparations biodynamiques

Les 6 préparations biodynamiques utilisées pour le compostage en bio-dynamie sont réputées avoir un impact régulateur sur le processus de compostage. Elles sont fabriquées à partir de plantes médicinales fermentées dans des organes d'animaux et utilisées à des doses homéopathiques. Elles sont numérotées de 502 à 507. Le Tableau 15 donne leur composant principal ainsi que leur effet décrit par les biodynamistes :

Tableau 15 : les préparations biodynamiques et leurs effets selon l'approche biodynamique

N°	COMPOSANT PRINCIPAL	ROLE (D'APRES MASSON, 2001)
502	sommités fleuries d'achillée millefeuille	mobilité du soufre et de la potasse
503	sommités fleuries de camomille matricaire	liée au métabolisme du calcium, régularise les processus de l'azote
504	ortie dioïque, partie aérienne en début de floraison	en rapport avec azote et fer, renforce l'action de 502 et 503 ; favorise l'humification
505	écorce de chêne	en rapport avec le calcium et évite les maladies des plantes
506	fleurs de pissenlit	action sur le silicium
507	jus de fleur de valériane	mobilité du phosphore et « manteau de chaleur »

Il est difficile de constater l'effet des préparations bio-dynamiques (GRUNDMANN, 1990). Des études de différentes natures (avec ou sans répétitions, conduites par des instituts de recherche biodynamique privée ou par des universités publiques) donnent des résultats contradictoires qui permettent de mieux cerner les possibles effets de ces adjuvants (voir Tableau 16).

¹⁰ informations tirées de GRUNDMANN (1990)

Tableau 16 : effet de l'utilisation des préparations bio-dynamiques sur le déroulement du compostage (d'après CARPENTER-BOGGS *et al.*, 2000 & SVENSSON, 1994)

TEMPERATURE	- sensiblement abaissée (phase thermophile) - effet disparaît au bout d'un mois - températures en moyenne plus élevées (également en phase de maturation)
PH	baisse du pH à la fin du compostage (~neutralité)
ACTIVITE MICROBIENNE	- plus intense - plus élevé (surtout à la fin : pH ~ neutre) - plus de bactéries que de champignons en maturation
DUREE DU COMPOSTAGE	- plus courte - plus rapide
STABILITE DU COMPOST	rapport C/N plus bas
MATURITE DU COMPOST	- beaucoup de nitrates peu d'ammonium - 65% de nitrates en plus / témoin
CEC	- plus importante - pas d'effet
ODEURS NAUSEABONDES	absentes
TENEUR EN AZOTE	- 10% d'azote perdu en plus - moins de pertes d'azote
STRUCTURE DU PRODUIT FINI	plus grumeleuse

Les bio-dynamistes affirment que les préparations ont un effet régulateur de la température : refroidissement des tas trop chauds et réchauffement des substrats trop tièdes. La méthode biodynamique conseille d'ériger des andains triangulaires de petite dimension (2-2,5 m de large et 1,2-1,5 m de haut), ce qui a un effet certain sur les flux de chaleur.

L'activité microbienne paraît plus intense, le produit semble atteindre plus rapidement la stabilité et avoir une bonne maturité.

L'effet sur la qualité des composés humiques (CEC) et sur les pertes en azote doit dépendre du substrat et du déroulement du compostage, on ne peut tirer de conclusions générales sur ces deux éléments.

Les préparations bio-dynamiques sont apportées à des concentrations très faibles (l'équivalent de 1,1 mg/kg de compost). Cependant, il existe de nombreuses substances actives qui favorisent ou inhibent la croissance des plantes.

Avant de vouloir approfondir l'effet des préparations bio-dynamiques sur un tas de compost, il nous semblerait plus judicieux de mieux caractériser ces préparations. Leurs conditions de fabrication qui suivent des recettes empiriques mais complexes sont extrêmement dépendantes du lieu de fabrication (les enveloppes qui les contiennent sont enterrées). On se questionne donc sur leur composition et sur la représentativité de ce qu'on regroupe sous le terme générique de préparations bio-dynamiques, sans pour autant préjuger de leur effet.

• les phosphates naturels ou phosphates de roches

C'est l'additif qui semble avoir le plus d'influence sur le processus de compostage :

- réduction du taux de matière organique et augmentation des pertes en carbone (GODDEN, 1995a ; OTT, 1991 ; THAKUR et SHARMA, 1998),
- augmentation des pertes en azote (GODDEN, 1995a),
- augmentation des pertes en potassium (OTT, 1991),
- augmentation de la température (OTT, 1991),

par rapport au témoin sans phosphates de roche.

Le phosphore semble ainsi être un facteur limitant pour le compostage (OTT, 1991 ; THAKUR et SHARMA, 1998). Il se peut que ce soit la forme tricalcique peu disponible qui présente un intérêt remarquable pour le compostage : la modification de substrat induirait des changements de population microbienne. Selon THAKUR et SHARMA (1998), les phosphates de roches favorisent le développement d'*Azotobacter* (bactérie libre fixatrice d'azote ; sa présence peut augmenter le pool d'azote disponible).

Le phosphore de roche n'est pas disponible pour les plantes : c'est une forme qui résiste à la dégradation dans le sol (DRIEUX, 1993). En revanche, certains champignons du tas de compost (du genre *Aspergillus*) sont capables de le solubiliser (THAKUR et SHARMA, 1998). Il semblerait que le phosphore est ensuite réorganisé ou complexé. Il n'est plus soluble à la fin du compostage, mais il est plus facilement disponible que dans les phosphates naturels (OTT, 1991 ; THAKUR et SHARMA, 1998). Le compostage est donc une technique qui permet de rendre disponible rapidement cette forme de phosphates.

Les trois additifs suivants ne sont pas autorisés en agriculture biologique. On les cite tout de même pour mémoire.

• les superphosphates

L'apport de phosphates dans la litière semble avoir un effet intéressant, il y aurait formation de phosphate d'ammoniaque, association stable qui permet de fixer l'azote : la diminution des pertes irait jusqu'à 60% (DRIEUX, 1993), ce chiffre est impressionnant.

• les sels de calcium et de magnésium

L'ajout de sel de calcium (sous forme CaCl_2) dans un rapport $\text{Ca/N} = 1$ ou 2 , ou de sels de magnésium (sous forme MgCl_2 et de MgSO_4) dans les mêmes proportions ($\text{Mg/N} = 1$ ou 2) conduit à une réduction des pertes de carbone et d'ammoniac (grâce à des réaction chimiques acide/base) variant de 23 à 52% pour l'ammoniac. Les pertes sont plus importantes avec un rapport de 2. Le magnésium aurait un meilleur pouvoir de rétention que le calcium. MgSO_4 a un très mauvais pouvoir de rétention de l'azote comparé à MgCl_2 et CaCl_2 (WITTER et KIRCHMANN, 1989).

La précipitation du calcaire (CaCO_3) et de la dolomie (MgCO_3) fixe une partie des carbonates présents et réduit ainsi le pH. Cet effet de rétention de l'ammoniac est 100 fois supérieur à celui de l'addition, dans les mêmes proportions, de paille comme source de carbone pour mieux utiliser l'azote ou encore de l'addition de tourbe ou de zéolite utilisés comme absorbants de l'azote ammoniacal (WITTER et KIRCHMANN, 1989).

Cette action sur le pH et son effet sur la volatilisation sont spectaculaires, mais on peut se questionner sur l'évolution des communautés microbiennes et de leur activité dans les nouvelles conditions de pH.

4.1.5.9. Criblage

Cette opération est effectuée surtout sur les plate-formes de compostage de déchets verts. Une étude (WIART, 1997) a montré que la maille du crible joue à plusieurs niveaux, en filtrants des éléments de taille et surtout de nature différente :

- sur la teneur en matière organique : elle diminue avec la granulométrie ; de 65% MO sur sec (maille 40 mm) on passe à 52% MO sur sec (maille 5 mm) ;
- sur la teneur en éléments fertilisants : elle augmente quand la granulométrie diminue ; augmentation de 59% pour N_{total} , 65% pour P_2O_5 , 55% pour K_2O , 64 % pour CaO , 68% pour MgO ;
- sur le rapport C/N : il diminue avec le criblage (baisse du taux de matière organique et concentration de l'azote) ; 17,2 (maille 40) à 12,6 (maille 5) ;
- sur la teneur en éléments trace métalliques qui se concentre avec la finesse du compost ; en passant d'une maille de 40 à une maille de 5 mm, on a une augmentation de 29% pour le Cd, 26% pour le Cr, 19% pour le Cu, 18% pour le Hg, 20% pour le Ni, 34% pour le Pb et 29% pour le Zn.

4.2. Les composts de déchets verts : typologie et potentiel de libération d'azote

4.2.1. Comment construire une typologie de composts ?

Selon SHAW *et al.* (1999), bien qu'il existe de nombreux facteurs qui peuvent influencer un processus de compostage, il y a deux éléments prédominants :

- les caractéristiques des matériaux de base,
- la méthode de compostage.

D'après ATALLAH (1993), la méthode de compostage détermine l'efficacité avec laquelle l'azote est conservé, les formes chimiques de l'azote restant et donc sa stabilité. Pour KÖRNER et STEGMANN (1997) la quantité d'azote total et la quantité d'azote disponible pour la plante sont une conséquence de la composition du substrat de départ et des conditions de compostage. Ces mêmes auteurs vont jusqu'à dire que l'on pourrait produire des composts ayant une valeur fertilisante plus facilement prévisible en contrôlant bien les conditions de production.

Nous nous appuyons sur ces acquis scientifiques pour construire une typologie des composts de déchets verts produits sur le Rhin supérieur. En croisant l'analyse des matières premières avec l'étude des procédés de compostage existant dans la zone du projet, nous tenterons de présenter des types de composts au comportement différencié. D'un point de vue théorique, le croisement de ces entrées produit un certain nombre d'interférences.

A la lecture de la première partie de ce rapport (§ 4.1.), on peut émettre des hypothèses relativement bien assurées sur les interactions entre matériaux de base, procédés de compostage et qualités du produit fini. On propose de hiérarchiser ces interrelations de la façon suivante :

- à un premier niveau d'analyse, relativement rapide :
 - les matériaux de base ont une influence sur la teneur en éléments fertilisants et sur la composition du produit final,
 - le procédé de compostage joue sur le degré de stabilisation du carbone et de l'azote.
- à un second niveau d'analyse, plus affiné :
 - le choix des matériaux de base a une influence sur le déroulement du compostage et donc sur les formes de stabilisation du carbone et de l'azote,
 - le procédé de compostage joue sur les pertes en matière organique, carbone, azote et potassium, sur la concentration des éléments trace métallique, donc sur la composition du produit final.

Nous considérons ces relations comme étant suffisamment déterminantes sur les qualités agronomiques du produit –dans la perspective du projet– pour utiliser les entrées « matériaux de base » et « procédé de compostage » comme éléments de base de notre typologie.

4.2.2. Etude des matériaux de base

• l'avis des exploitants de plate-formes

On ne dispose pas de suffisamment de données d'analyse pour avoir un avis sur la composition physique, chimique ou biologique des matériaux de base. Par ailleurs, étant donné l'hétérogénéité des broyats et la taille de leurs éléments (centimétrique à décimétrique), il serait difficile de collecter des échantillons représentatifs.

On sait néanmoins (grâce à l'enquête et de l'avis général des intéressés) que les déchets verts entrant sur les plates-formes de compostage connaissent des variations saisonnières de composition : plus de tontes au printemps et en été, plus de feuilles en automne, plus de ligneux en automne et en hiver.

De plus, et toujours selon l'avis général, les déchets verts sont considérés, aux variations saisonnières près, comme un gisement de nature homogène à la nuance que les végétaux provenant des villes ou bordant les grands axes de circulation concentrent de plus fortes quantités en certains éléments trace métalliques.

D'après les exploitants des plates-formes de compostage, les variations saisonnières de la composition des matériaux de base ne se ressentent pas sur le produit fini, dans la mesure où :

- les exploitants disposent de stocks de matériaux pouvant tamponner les variations saisonnières (refus de criblage et souche accumulés tout au long de l'hiver pour être incorporés au printemps et en été, incorporation de terre)
- les exploitants ajustent leur procédé (en particulier l'humectation) en fonction des matériaux de base

Certains des exploitants reconnaissent cependant que le rendement pondéral de transformation des déchets verts en compost varie au cours des saisons (de 30% au printemps à 50% en hiver, avec une moyenne de 40% sur l'année).

On ne dispose pas de moyens formels pour vérifier ces dires. Par contre, on peut se demander quelle est la sensibilité du procédé de compostage et/ou du produit fini aux variations de composition des matériaux de base.

• ce que les analyses permettent de dire

Pour un procédé de compostage donné, on peut comparer les analyses chimiques et physico-chimiques de produit fini :

- sur différents lots provenant d'une même plate-forme
- sur des lots provenant de plate-formes différentes.

Pour pouvoir faire ces comparaisons, il faut admettre l'hypothèse qu'un même procédé de compostage mis en œuvre par des exploitants différents sur des plates-formes différentes est conduit *grosso modo* de la même manière. Ceci implique en particulier que les exploitants utilisent tous le même référentiel technique pour la gestion de leurs tas de compost. Cette hypothèse est difficile à vérifier. De l'avis de l'ADEME, le niveau technique des exploitants est assez inégal. Néanmoins, le concessionnaire qui vend le procédé expose également la façon de le conduire, ainsi, l'information de base est à peu près similaire pour tous les exploitants.

Ces comparaisons ont été faites sur le procédé le plus répandu sur le Rhin Supérieur¹¹, pour lequel on a récolté le plus de données d'analyses. On a réalisé une analyse statistique rapide sur un petit échantillon (taille maximale : 14 individus) et qui repose sur deux indicateurs :

- le coefficient de variation CV (estimé par le rapport de l'écart-type sur la moyenne de l'échantillon),
- l'appartenance ou non de toutes les valeurs de l'échantillon à un intervalle de confiance de 95% de forme supposée normal¹² (les bornes de cet intervalle sont estimées par la moyenne +/- 2 fois l'écart-type).

Le Tableau 17 présente les principaux paramètres d'analyse chimique et physico-chimique assortis de leur critique statistique. Les moyennes calculées peuvent être critiquées selon deux angles :

- quelle est la représentativité de l'échantillon analysé par rapport à l'hétérogénéité du tas de compost ?
- les données présentées ne distinguent pas les différentes mailles de criblage, faute de données suffisantes en nombre. Or le criblage a une influence sur la concentration en différents éléments (WIART, 1997).

Ce biais ne peut pas être quantifié et il faut malgré tout l'accepter, faute de données de meilleure qualité.

Tableau 17 : coefficient de variation et représentativité statistique de paramètres d'analyses recueillis auprès des exploitants de plate-formes de compostage de déchets verts (type andain tabulaire)

PARAMETRE D'ANALYSE	TAILLE DE L'ECHANTILLON	CV	PERTINENCE STATISTIQUE (A 95%)
% matière sèche dans le produit brut	14	11%	oui
% matière organique	14	15%	oui
% N total	14	12%	« non »
% P total	14	20%	« non »
% K total	14	21%	« non »
% Ca total	14	10%	oui
% Mg total	14	19%	« non »
rapport C/N	13	17%	oui
pH eau	11	6%	oui
ppm Cd	7	92%	« non »
ppm Cr	7	41%	oui
ppm Cu	7	15%	oui
ppm Hg	7	44%	oui
ppm Ni	7	31%	« non »
ppm Zn	7	11%	oui
ppm Pb	7	26%	oui
% C organique	5	15%	oui
ppm NH ₄ ⁺	2	120%	oui
ppm NO ₃ ⁻	2	125%	oui
estimation du K ₁	2	4%	oui

¹¹ voir § 4.2.4. Compostage de déchets verts en andains tabulaires

¹² la normalité de l'échantillon n'est pas acquise ; on pourrait proposer, puisqu'il s'agit d'un processus biologique de transformation, pouvant donc être modélisé par des flux de matière et d'énergie, que la fonction de répartition des résultats serait plutôt conforme à celle d'une loi de Poisson. L'estimation des bornes de l'intervalle de confiance s'avérerait alors plus problématique.

Légende : • *oui* signifie que toutes les valeurs de l'échantillon sont comprises dans l'intervalle de confiance de 95%,
• « non » signifie qu'une seule valeur se trouve en dehors de l'intervalle,
• pour les échantillons de taille inférieure à 10, la validité statistique est plus incertaine, on classe donc ces paramètres à part (bas du tableau),
• le CV n'est apparemment pas corrélé à la pertinence statistique ; il ne rend compte que de la dispersion des données, pas de leur représentativité.

Le taux de siccité, de matière organique, de calcium total, le rapport C/N et le pH sont comparables pour l'ensemble des plate-formes de compostage et des lots de composts de déchets verts, pour le moins d'après les données que le projet a pu collecter sur la zone d'étude. En revanche, le taux d'azote total, de phosphore total, de potassium total et de magnésium total semblent différer légèrement (un seul individu sortant de l'intervalle de confiance).

On pourrait en conclure qu'il y a des variations quantitatives, voire qualitatives entre les différentes plates-formes et les différents lots. La littérature peut apporter quelques éléments pour étayer ces propositions.

• les acquis scientifiques

Nous rappelons que KAISER (1996) affirme que le compostage fonctionne dans de grandes plages de concentration des différents substrats (sucres et amidons, hémicellulose, cellulose et lignine).

MICHEL *et al.* (1996) soulignent que les proportions des matériaux de base pour un compost de déchets verts (tontes, feuilles fraîches et ligneux) ont peu d'incidence sur un nombre élevé de paramètres importants du compostage, sauf peut-être sur la composition finale en certains éléments fertilisants. Des proportions de tontes jusqu'à 30% de la masse totale à composter ne font que produire quelques odeurs. Il faut néanmoins préciser que les conclusions de Michel *et al.* ne sont valables que dans les conditions de l'expérimentation qui a été menée de façon idéale : bon rapport C/N et bon taux d'humidité de départ.

Quelques nuances sont apportées par SHAW *et al.* (1999) qui précisent que même si l'ajout d'une quantité maximum de tontes de 30% en masse du compost ne nuit apparemment pas à l'activité ni à la qualité du compost, de grandes quantités d'herbe sont responsables de niveaux de respiration plus élevés dans le tas de compost et de plus grandes pertes en carbone et en MO. Les mêmes auteurs attirent l'attention sur le fait qu'une variation de composition des matériaux de base entraîne une variation de l'humidité du mélange et du produit final, s'il n'y a pas d'ajustements.

Dans la mesure où le Tableau 17 ne présente pas de grandes variations pour des critères qualitatifs (témoins de la conduite du procédé) comme le taux de matière organique, le taux de siccité, le rapport C/N et le pH, on est tenté de dire que le procédé se déroule à peu près de la même façon, quels que soient les matériaux de base. En revanche, sur des paramètres purement quantitatifs comme le taux en éléments fertilisants, on est plus mitigé. Les différences plus ou moins manifestes de composition finale (N, P, K, Mg) reflètent sans doute des différences de composition initiale, ce qui voudrait dire que les matériaux de départ ne sont pas exactement les mêmes sur toutes les plates-formes ni tout au long de l'année, mais que ces différences n'affectent pas grandement le processus.

• ce qu'on peut retenir sur les déchets verts

En résumé, le compostage des déchets verts (avec une bonne décomposition en aérobiose) semble être peu sensible aux variations de composition de départ, pour peu que l'on se trouve dans des conditions acceptables (taux d'humidité et C/N corrects).

Le produit final semble être plus sensible aux variations de compositions des matériaux de base, en particulier pour les éléments fertilisants. C'est pour cette raison qu'il conviendrait de préconiser aux utilisateurs de composts de déchets verts de demander une analyse à leur fournisseur pour tenir compte, avec la plus grande précision possible, des apports réalisés grâce aux composts. Une moyenne sur l'année ne serait pas suffisamment représentative, il faudrait pouvoir disposer de l'analyse du lot.

Concernant la concentration en éléments trace métalliques (ETM), le nombre de données ne nous permet pas de conclure. Cependant, d'après l'avis général, certains métaux comme le plomb et le cadmium se concentreraient dans les végétaux en bordure des axes à forte circulation : le plomb viendrait des gaz d'échappement (les risques diminuent actuellement avec les carburants sans plomb) et le cadmium de l'usure des pneumatiques. Tout ceci demande vérification avec plus de précision : quelle est la dynamique d'absorption de ces ETM dans les végétaux, dans quel type d'organes sont-ils stockés (végétation jeune ou bois vieux ?)...

4.2.3. Les andains triangulaires : le type TRI

D'après notre recensement, il y a seulement deux plates-formes qui mettent en œuvre ce type de procédé sur la zone du Rhin supérieur. La méthode développée s'appelle CMC pour Compostage Microbien Contrôlé et vient d'Autriche. Si le procédé est globalement le même pour les deux plates-formes en question, on observe dans le détail de nombreuses variantes et adaptations de la part des exploitants.

4.2.3.1. Description du procédé

RECEPTION, CONTROLE ET BROYAGE DES MATERIAUX DE BASE	<ul style="list-style-type: none"> • contrôle visuel (absence d'indésirables) • pesée sur pont bascule • pré-stockage (2 à 15 jours) • mélange des tontes, feuilles et branches dans le broyeur (à l'aide d'un chargeur) • défibrage dans le broyeur (augmentation de la surface d'attaque) • ajustement éventuel de l'humidité à la sortie du broyeur
MISE EN ANDAIN	<ul style="list-style-type: none"> • 1,5 m de haut et 2,5 à 3 m à la base • constitué à l'épandeur plutôt qu'à la benne • ajout de 5 à 15% de terre • ajout de jusqu'à 5% de vieux compost • 1 à 3 passages de retourneur pour donner forme et structure • ajustement éventuel de l'humidité lors des retournements • plate-forme en béton ou en enrobé avec une légère pente pour recueillir les jus • utilisation des jus pour l'humectation des andains (recyclage, économie d'eau) • éventuellement épuration naturelle des jus par lagunage pour éviter les nuisances olfactives
CONDUITE DU COMPOSTAGE : PHASE ACTIVE	<ul style="list-style-type: none"> • durée : 1,5-2 mois à 3-3,5 mois • température maxi : 65 à 77°C, maintenue > 50°C pendant 2 semaines minimum • nombreux retournements au début (1 par jour) • réduction de la fréquence : 1 pour 2 jours à 1 par semaine • 20 à 30 retournements en phase active

	<ul style="list-style-type: none"> • suivi de la température, de l'humidité, du CO₂...sur fiches • couverture avec bâche polypropylène (régulation humidité)
MATURATION	<ul style="list-style-type: none"> • durée : 0 à 3 mois • maximum un retournement par semaine, voire aucun • andains recouverts • parfois, contact avec le sol (colonisation par macrofaune) • andains parfois plus grands (3-4 m à la base, 1,8 m de haut) • parfois criblage avant maturation (qualité particulière)
STOCKAGE	<ul style="list-style-type: none"> • stockage à l'état brut • criblage et stockage (maille fine 0-10 mm, moyenne 0-20 et grossière 0-40) • stockage des refus de criblage pour tamponner variations saisonnières ou commercialisé comme mulch • stockage sous bâche ou sous hangar

4.2.3.2. Hypothèses sur les transformations de la matière organique

La majorité des conclusions de ce paragraphe sont présentées dans le Tableau comparatif 20.

Les petits andains triangulaires formés à partir de déchets verts présentent deux contraintes majeures : ils risquent de se refroidir rapidement (rapport Surface d'échange / Volume élevé) et ils consomment beaucoup d'espace (rapport Surface au sol / Volume également élevé). Ces deux contraintes entraînent deux conséquences :

- pour éviter de consommer trop d'espace, il faut réduire le temps de séjour sur la plate-forme et accélérer le processus de transformation biologique,
- pour accélérer le processus biologique malgré les pertes de chaleur il faut entretenir des conditions optimales de compostage : température et oxygénation.

Ces conditions sont obtenues grâce à des retournements intensifs qui permettent de mélanger le substrat, de réduire un peu sa granulométrie, d'apporter de façon ponctuelle une grande quantité d'oxygène (« coup de fouet » aux microorganismes), de redonner de la structure au tas, le tout en contrôlant et en ajustant le taux d'humidité.

Un certain nombre de questions se posent sur les conséquences de cette pratique sur les qualités du produit final.

On peut supposer que, vue la forte dégradation de la matière organique qu'un compostage intensif de ce type engendre, les pertes en matière organique seraient elles aussi relativement importantes.

Nous avons déjà exposé les discussions sur les pertes en ammoniac que pourraient occasionner des retournements en phase active du compostage. Si ces pertes étaient avérées (il faudrait faire des bilans de matière pour les évaluer), il faudrait ré-évaluer les pratiques pour minimiser l'effet sur l'environnement et sur les qualités azotées du produit fini.

D'un point de vue plus qualitatif, quelles peuvent être les voies et le degré de stabilisation du carbone et de l'azote dans un compost obtenu selon cette méthode ?

On peut supposer que l'intensité du processus qui maintient pendant au moins deux semaines les températures au-dessus de 50°C, qui fonctionne a priori dans les conditions optimales de compostage, qui mélange fréquemment le substrat et qui augmente en même temps la surface d'attaque pour les microorganismes produit une

forte décomposition de la matière organique. On peut penser que les molécules simples sont amplement dégradées et que des molécules plus complexes du type cellulose et lignine sont plus ou moins bien dégradées, en particulier par des populations d'actinomycètes thermophiles. Une partie de ces composés de structure des végétaux peut également être conservée et moins affectée par l'activité microbienne (on ne saurait donner de proportion).

De notre point de vue, il semblerait que les voies d'humification développées au cours de ce procédé de compostage suivent plutôt la néoformation (synthèse microbienne et polymérisation biochimique) que la voie de l'humus fibreux (néoformation de moindre qualité) ou que la voie de l'héritage, même si les trois peuvent coexister. Il semble que certains champignons mésophiles soient les plus efficaces dans les processus d'humification. Pour que ces champignons puissent se développer, il ne faut pas « remuer » trop souvent le substrat. Le degré d'humification dépendra en dernier ressort de la durée de la phase de maturation.

4.2.3.3. Qualités du produit fini

On peut confronter ces suppositions aux résultats d'analyses recueillies ou effectuées par le projet (voir Tableau 18) sur ce type de composts.

Tableau 18 : moyennes (données en % MS) des analyses de composts de déchets verts en andains triangulaires et indication sur la valeur statistique de ces moyennes

PARAMETRE D'ANALYSE	VALEUR MOYENNE	TAILLE DE L'ECHANTILLON	CV
% matière sèche dans le produit brut	68	6	27%
pH eau	8,6	2	2%
% matière organique	24,1	6	42%
% C organique	11,5	5	54%
% N total	0,86	5	35%
rapport C/N	12,5	5	30%
ppm NH ₄ ⁺	51	3	67%
ppm NO ₃ ⁻	706	3	91%
rapport NO ₃ ⁻ / NH ₄ ⁺	19,0	3	83%
% P total	0,74	5	32%
% K total	1,11	5	26%
% Ca total	6,24	5	41%
% Mg total	1,18	5	37%
ppm Cd	0,3	4	31%
ppm Cr	45	4	51%
ppm Cu	28	4	16%
ppm Hg	0,1	4	35%
ppm Ni	30	4	33%
ppm Pb	110	4	37%
ppm Zn	25	4	17%
estimation du K ₁	13,2	3	25%

L'analyse indique un taux de matière organique assez faible, de l'ordre de 25%, assorti d'un rapport C/N indiquant que le produit est bien stabilisé. Le rapport NO₃⁻ / NH₄⁺ est relativement élevé, ce qui correspond à un compost plutôt mûr. Le pourcentage d'azote total quant à lui est plutôt faible.

Enfin, le coefficient isohumique K₁ est faible pour un produit qui se veut être un amendement organique ; selon SOLTNER (1996), les composts de boues de stations

d'épuration ont un K_1 de 20%, les composts urbains de 25% et l'humus industriel de 50%. On trouve même dans le commerce des amendements organiques avec un K_1 de 60%.

Selon le laboratoire SADEF, un amendement organique est un produit qui possède une fraction type lignine + cellulose au moins supérieure à 39% de la matière sèche (ROBIN, 1997b). Or, après analyse, on s'aperçoit que la fraction en question titre de 19 à 23%. Le même laboratoire classe ces produits dans la catégorie « riche en matière minérales », qui regroupe les produits possédant une teneur en matière minérale supérieur à 40%.

On peut s'interroger sur la composition totale d'un tel produit. Si l'on fait la somme des teneurs en matière organique et en éléments fertilisants (N, P, K, Ca, Mg) pour le compost que le projet a donné à analyser, on regroupe 34% de la matière sèche en masse. Quelle est la nature et la composition des 66% restant ? La terre mélangée au broyat mis à composter se conserve évidemment au cours du compostage. Si l'on considère une quantité de 10 et de 20% en masse d'adjuvants minéraux (terre + poudre de roche par exemple) et un rendement en masse du compostage de l'ordre de 40% (forte dégradation), ces ajouts représentent respectivement 25 et 50% de la masse finale. Si la dégradation du compost est plus faible (60% de rendement), les additifs représentent finalement 17 et 33%. La richesse en matières minérales du compost analysé s'explique en partie par l'ajout de terre.

On comprend alors que l'estimation du coefficient isohumique soit faible. Tout dépend de la quantité de terre apportée au début et du taux de dégradation du compost. La moyenne de 3 analyses suggère que pour une tonne de matière sèche de ce type de compost, on pourra obtenir environ 130 kg d'humus stable dans les sols.

Concernant la dynamique de l'azote des composts de déchets verts fabriqués en andains triangulaires, on constate qu'environ 5% de l'azote total contenu dans le compost est présent sous forme de nitrates, ce qui représente malgré tout très peu d'azote : 0,23 kg de N par tonne de compost (en brut).

On remarque que 35 jours¹³ après qu'on a mis le produit en terre (voir Figure 10), la biomasse microbienne chute et le taux d'azote minéral reste à peu près constant. Puis, à partir de 100 jours (soit environ 3 mois), la biomasse microbienne et le taux d'azote sous forme nitrate croissent régulièrement jusqu'à 525 jours. La quantité d'azote qui minéralise dans le sol est de 0,6 kg N / t PB (~13% de l'azote total contenu dans le compost) au bout de 245 jours (soit environ 8 mois).

Le coefficient apparent d'utilisation de l'azote est de 20% au bout de 49 jours, ce qui donne une fourniture en azote plus forte en présence de la plante. On peut alors compter sur 0,93 kg d'azote par tonne de produit brut (au lieu de 0,6 kg avec le compost seul).

¹³ l'ICC-N est réalisée à 28°C. Un jour à 28°C correspond à 5 jours à 14°C au champ. Les durées données dans ce rapport correspondent à cette équivalence au champ.

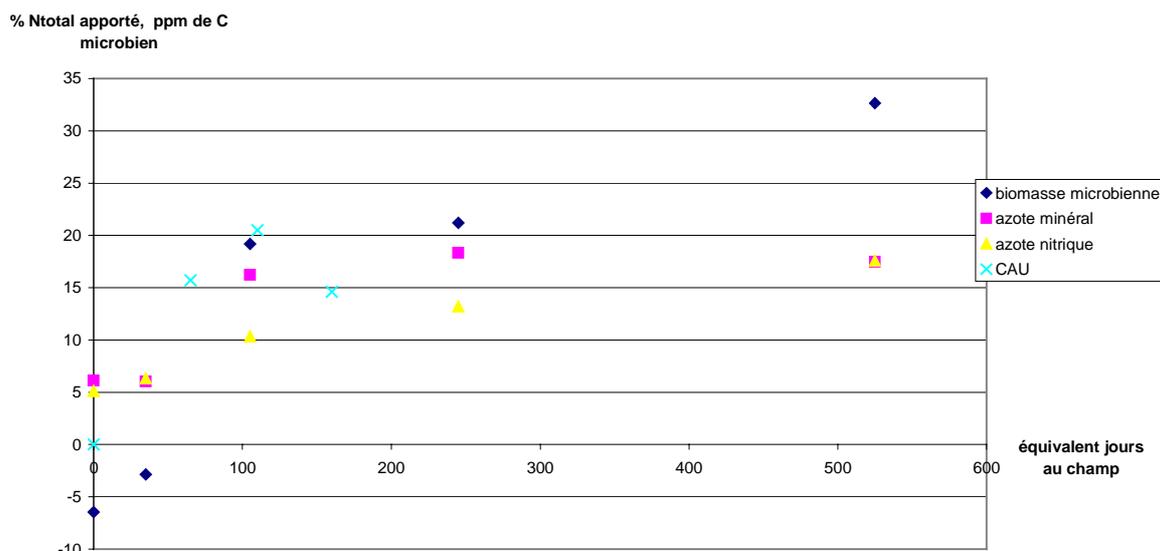


Figure 10 : ICC-N, biomasse microbienne et CAU du compost TRI

On récapitule les qualités agronomiques de ce type de compost dans le §. 4.2.7. en les comparant à celles d'autres types de composts.

4.2.4. Les andains tabulaires : le type TAB

4.2.4.1. Description du procédé

RECEPTION, CONTROLE ET BROYAGE DES MATERIAUX DE BASE	<ul style="list-style-type: none"> • idem que pour le type TRI • certains exploitants broient plus finement que d'autres
MISE EN ANDAIN	<ul style="list-style-type: none"> • forme trapézoïdale, 2,5-3 m de haut, jusqu'à 30 m de large • constitué au chargeur • lots mensuels à trimestriels • plate-forme en béton ou en enrobé avec une légère pente pour recueillir les jus • utilisation des jus pour l'humectation des andains (recyclage, économie d'eau)
CONDUITE DU COM-POSTAGE : PHASE ACTIVE	<ul style="list-style-type: none"> • durée : 6 mois • température maxi : 75-80°C, voire 82-85°C, maintenue assez longtemps • retournements toutes les 3 à 4 semaines • en moyenne 7 retournements • suivi de la température, de l'humidité (ajustement si nécessaire, plutôt lors des retournements)
STOCKAGE ET MATURATION	<ul style="list-style-type: none"> • stockage à l'état brut • ou criblage et stockage (maille fine 0-10 mm, moyenne 0-20 et grossière 0-40) • stockage des refus de criblage pour tamponner variations saisonnières ou commercialisé comme mulch • andains parfois mis sous hangar ou protégés par bâche • durée : indéterminée

4.2.4.2. Hypothèses sur les transformations de la matière organique

On renvoie au Tableau 20 pour une présentation synthétique et comparative des conclusions de ce paragraphe.

• possibilités de contrôle du procédé

On constate parfois que lorsque le retournement intervient sur ce type d'andains, quelques zones se sont fortement asséchées et que les transformations sont arrêtées (présence de « blanc », forme de résistance à la chaleur des champignons et actinomycètes). Au cours de l'enquête, ces inconvénients ont pu être soulignés par le projet. Il est ressorti qu'il est difficile d'augmenter la cadence des retournements (c'est un chantier qui prend du temps et qui coûte en carburant et en usure du matériel) et que l'arrosage des tas pour refroidir et humidifier l'andain et pour favoriser le développement des microbes est d'une part coûteux et d'autre part hasardeux : certains endroits seront déjà trop humectés et le compostage bloqué alors que d'autres seront encore trop secs.

Le contrôle des transformations biologiques sur ce type d'andain est donc de très faible intensité, même si la faible sensibilité de ce type de tas aux phénomènes météorologiques les dispense d'interventions fréquentes et variées.

• transformations biologiques probables dans les andains tabulaires

Vues les hautes températures et la difficulté relative (raisonnable puisqu'il s'agit d'un substrat grossier, mais plus ou moins affirmée en fonction de la finesse du broyage) de circulation de l'air dans ce type d'andains, on peut s'interroger sur le degré et la nature de l'activité microbienne qui devrait s'y développer. On l'a déjà souligné, seules quelques bactéries et actinomycètes thermophiles seraient capables de travailler à des températures élevées, de 70 à 75°C. Les différents auteurs supposent que même s'il y a une activité au-delà de ces températures, elle serait très peu efficace par rapport à celle se développant à des températures inférieures.

De plus, la faible teneur en oxygène qui est observée par endroit conduirait à stopper le compostage. Néanmoins, on sait qu'il existe un nombre de bactéries anaérobies capables de dégrader la cellulose. Ainsi, même si l'oxygène fait défaut, la dégradation de molécules complexes de matière organique se poursuit. On peut tout de même être assez réservé sur l'efficacité et l'ampleur de ces transformations et on a quelques raisons de penser que les substrats de type lignine sont peu dégradés au cours du compostage en andain tabulaire.

Ces éléments nous donnent à penser que la fabrication de composés humiques dans ce type de compost suit avant tout une voie de type héritage ou encore humus fibreux, une voie de néo-formation pouvant, dans une moindre mesure, l'accompagner (essentiellement polymérisation biochimique).

A l'issue du compostage en andains tabulaires, on a un produit avec un rapport C/N encore relativement élevé et qui est encore capable de s'échauffer. Ce compost ne serait pas encore stabilisé, on se doit donc de rester prudent sur les transformations qui peuvent avoir lieu pendant son stockage. S'agit-il de la fin de la phase de refroidissement ou bien la phase de maturation a-t-elle déjà débuté ? Si le compost n'est pas protégé des intempéries pendant son stockage, ne risque-t-on pas de voir se développer une phase de maturation qui emprunte plus la formation de composés

humiques en conditions hydromorphes et aboutir à un produit de faibles qualités agronomiques (type anmoor ou tourbe) ?

Quid de la volatilisation de l'azote ? Avec de fortes températures, les risques de volatilisation sont élevés, cependant, si l'activité biologique est faible comme on le suppose et vu le faible nombre de retournements, on pourrait avancer que les pertes en azote sous forme NH_3 seraient assez limitées. Par contre, on n'oserait se prononcer sur le cas de gaz comme CH_4 et N_2O .

Le criblage permet de rendre le produit fini uniforme et de soustraire les parties les plus grossières, qui sont en général les moins bien décomposées. On arrive ainsi à produire une qualité de compost relativement constante.

4.2.4.3. Qualités du produit fini

Les moyennes des résultats d'analyses recueillies chez les exploitants ou effectuées par le projet sont présentées dans le Tableau 19 :

Tableau 19 : moyennes (données en % MS) des analyses de composts de déchets verts en andain tabulaire et indication sur la valeur statistique de ces moyennes

PARAMETRE D'ANALYSE	VALEUR MOYENNE	TAILLE DE L'ECHANTILLON	CV
% matière sèche dans le produit brut	54	14	11%
pH eau	7,9	11	6%
% matière organique	47,3	14	15%
% C organique	24,1	5	15%
% N total	1,44	14	12%
rapport C/N	18,4	13	17%
ppm NH_4^+	66	2	120%
ppm NO_3^-	142	2	125%
rapport $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$	1,9	2	18%
% P total	0,61	14	20%
% K total	1,15	14	21%
% Ca total	5,52	14	10%
% Mg total	0,81	14	19%
ppm Cd	0,3	7	92%
ppm Cr	20	7	41%
ppm Cu	38	7	15%
ppm Hg	0,12	7	44%
ppm Ni	16	7	31%
ppm Pb	50	7	26%
ppm Zn	147	7	11%
estimation du K_1	18,5	2	4%

Le rapport C/N de ce type de compost semble être relativement élevé. Le taux de matière organique paraît correct mais le rapport $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$ est plus faible que dans le cas des andains triangulaires (2,2 au lieu de 13,8). Ces éléments mis ensemble indiqueraient un produit encore insuffisamment stabilisé.

Le coefficient iso-humique est un peu plus fort que dans l'autre type de compost de déchets verts décrit, mais il reste encore faible : 18,5%.

D'après l'analyse du laboratoire, le compost testé titre 28% de cellulose + lignine (sur sec). Ce produit est classé dans la catégorie « riche en matières minérales ».

La somme des teneurs en matière organique et en éléments fertilisants (N, P, K, Ca, Mg) donne 58% de la matière sèche. 42% de ce produit est donc de composition inconnue. On peut faire l'hypothèse raisonnable qu'il y a un peu de terre mélangée aux déchets verts qui sont traités. Une quantité de 5% en masse de terre au départ expliquerait de 8 (rendement de dégradation de 60%) à 13% (rendement de dégradation de 40%) de ces 42%. Le mystère reste partiel.

L'azote présent sous forme de nitrates à l'incorporation du compost dans le sol représente moins que dans le cas du compost d'andains triangulaires : environ 2,4%, mais la teneur en azote de ce compost étant plus forte, cela représente une quantité similaire de 0,19 kg de N par tonne de compost (sur produit brut ; valeur à rapprocher des 0,23 kg de N pour le type TRI).

La courbe de minéralisation de l'azote de ce compost est relativement surprenante (voir Figure 11).

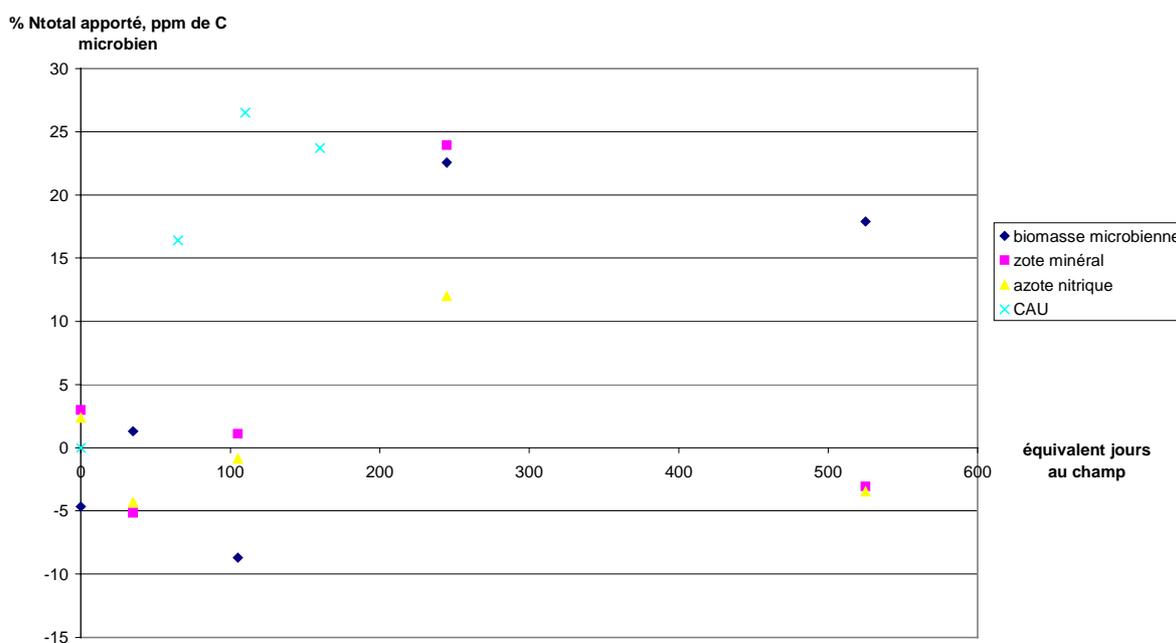


Figure 11 : ICC-N, biomasse microbienne et CAU du compost TAB

L'incorporation du compost au sol produit une sorte de choc sur les microorganismes : leur nombre diminue par rapport au témoin. Est-ce l'effet d'un déplacement des équilibres microbiens à cause d'un apport de nouvelles communautés, la conséquence du mélange du compost avec le sol et des perturbations du biotope des microbes, ou encore l'impact de l'apport d'un nouveau substrat qui réorganise les compétitions nutritives ?

Au bout de 35 jours, on constate que le mélange sol + compost piège de l'azote. Ce solde négatif est accompagné d'une croissance apparente de la population microbienne du sol. Il se pourrait que les microbes utilisent l'azote pour accroître leur nombre.

On observe à 100 jours une chute de la biomasse microbienne concomitante à un retour du taux d'azote dans le sol au niveau existant avant incorporation du produit. Est-ce qu'on assiste à une hécatombe de microbes et au relargage de l'azote qu'ils contiennent ? Cela signifierait une nouvelle modification de composition des communautés microbiennes.

A 245 jours, la population microbienne s'est développée et la minéralisation de l'azote a bien repris : l'équivalent de 24% de l'azote du compost est présent sous forme minérale (NO_3^- et NH_4^+), ce qui représente environ 1 kg de N par tonne de produit brut. La moitié de cet azote est présent sous forme d'ammonium, ce qui serait le témoin de conditions anaérobies : les bactéries nitrifiantes sont aérobies strictes et les seules capables de transformer NH_4^+ en NO_2^- puis NO_3^- . Le laboratoire affirme que les conditions de l'expérimentation se sont bien déroulées en aérobiose. Il s'agirait alors selon nous d'une anaérobiose liée à une forte demande biologique en oxygène (DBO) due à une activité de dégradation intense qui se poursuit : le renouvellement de l'oxygène est trop lent par rapport à la consommation qu'en font les microorganismes. Cette hypothèse est probable (HEBERT *et al.*, 1991) dans la mesure où les doses de composts testées au laboratoire correspondent à des doses de l'ordre de 22 tonnes de matière sèche, soit environ 40 tonnes de produit brut / ha. Une autre explication possible serait un pH du mélange sol + compost faible qui favorise le développement des champignons ammonificateurs au détriment des bactéries nitrificatrices. Cette explication est moins probable, les composts ont en général un pH basique voire neutre et le sol utilisé pendant l'expérience a un pH de l'ordre de 6,5.

Ce qui pourrait arriver, c'est une dégradation en conditions anaérobie du fait d'une forte DBO, ce qui aboutirait à la dégradation incomplète de la matière organique et la production d'acides organiques (comme le pyruvate par exemple) qui acidifierait alors le milieu. On entre alors dans une sorte de cercle vicieux jusqu'au blocage de l'activité biologique par le développement de conditions trop limitantes et/ou suite à l'épuisement du substrat.

Au bout de 525 jours, on constate que la population microbienne a légèrement décrû et surtout que de l'azote minéral est piégé : il y a moins d'azote sous forme de nitrates ou d'ammonium dans le mélange sol + compost que dans le sol tout seul. La forte décroissance de l'azote minéral n'est pas proportionnée à la relative réduction de la biomasse microbienne. L'hypothèse la plus vraisemblable pour expliquer ce fait serait une humification qui débiterait après la fin de la phase de dégradation du compost : les microbes travaillent avec une moindre intensité mais stockent de l'azote dans des composés humiques stables. Il est peu probable qu'il s'agisse d'une fin d'azote liée à la dégradation de matière organique : la biomasse microbienne augmenterait.

L'ensemble de ces constatations nous confortent dans l'hypothèse que ce type de compost n'a pas terminé sa phase active, que sa dégradation n'est que partielle et qu'il n'est pas encore stabilisé. Après une perturbation initiale due à son incorporation au sol, on assisterait à l'équivalent de la fin de la phase active du compostage puis à l'équivalent de la maturation : la formation de composés humiques.

Après la phase de minéralisation, ce type de compost risque de piéger de l'azote. On ne peut déterminer avec précision l'ampleur de ce risque. Il faut remarquer en préalable que les conditions de laboratoire sont volontairement extrêmes pour faire ressortir les caractéristiques majeures des produits : les doses apportées sont fortes, le produit est finement broyé (ce qui augmente la surface d'attaque et catalyse les réactions enzymatiques), la température est constante et les teneurs en éléments

majeurs (N, P, K, Mg, Ca) ne sont pas limitantes. On ne saurait donc prédire l'ampleur de la séquestration de l'azote en conditions de plein champ à partir de nos résultats de laboratoire. HADAS et PORTNOY, (1994) notent que les ICC perturbent la vie microbienne du sol. Il se peut donc que des données plutôt exagérées sur l'immobilisation de l'azote dans la matière organique soient produites par les tests en laboratoire. Au champ, la libération de l'azote peut donc être plus forte et le rendement azoté des composts plus élevé.

L'estimation du K_1 sur deux échantillons donne un potentiel d'humus stable d'environ 185 kg par tonne de matière sèche, ce qui est supérieur à ce qu'on trouve dans le cas des andains triangulaires. On peut toutefois émettre un doute sur la validité de ce chiffre qui n'est après tout qu'une estimation au laboratoire. En considérant que la dégradation des substances lignocellulosiques est assez mauvaise, les transformations que l'on peut attendre du compostage ne se sont pas réalisées hors sol. L'humification aura lieu en terre et elle risque de se dérouler avec un rendement plus faible qu'en conditions semi-controlées.

• essai avec compost d'andain tabulaire

Un essai sur un compost pas encore mûr (rapport C/N élevé de 26) de déchets verts issu d'andain tabulaire a été réalisé pour tenter de répondre à deux questions :

1. peut-on réduire le lessivage des nitrates après soja si l'on épand un tel produit en automne ?

2. quelle influence a ce compost sur le rendement et le taux de protéines du blé d'hiver qui suit le soja ?

Les trois variantes testées étaient : témoin (pas de compost), 18 t MS/ha et 36 t MS/ha de compost. Une fertilisation minérale complémentaire a été apportée en deux fractions. Les trois variantes précédentes ont bénéficié de deux variantes pour la fertilisation minérale : N_2 , la fertilisation minérale préconisée par l'agriculteur et $N_1 = N_2 / 2$.

Des mesures de teneur en azote minéral ont été effectuées tous les 14 jours selon trois horizons : 0-30, 30-60 et 60-9 cm.

Le détail du protocole, des matériels et méthodes utilisés se trouve en Annexe 9.

Les principales observations et conclusions sont les suivantes :

a. qu'à partir du 14 mars, on assiste à une brusque chute du taux de nitrates dans la couche 0-90 cm (voir Figures E1, E2 et E3). L'utilisation d'un modèle de lessivage (modèle de Rohmann) suggère que c'est à partir de cette date que le sol est saturé et que l'on assiste à l'effet chasse d'eau de sortie d'hiver. Une autre explication de la chute du taux d'azote nitrique serait la reprise de végétation et l'utilisation des nitrates par le blé.

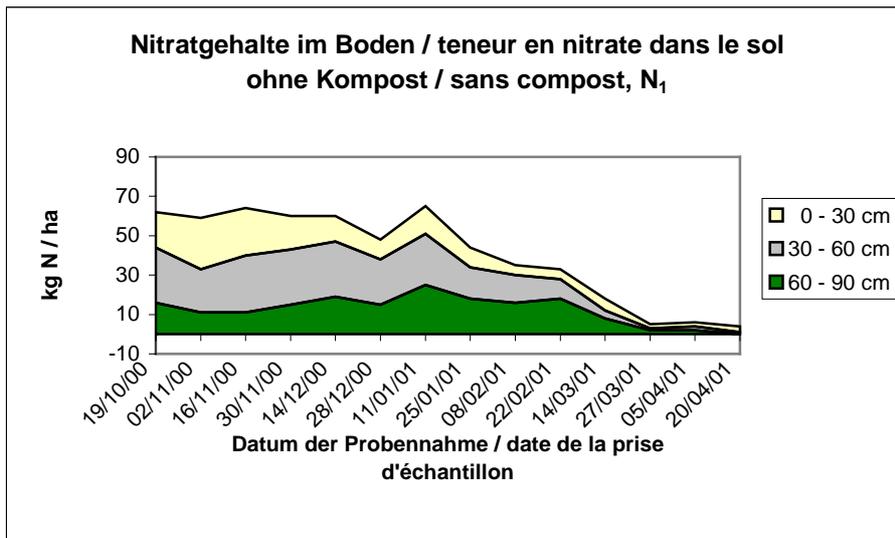


Figure E1: Teneur en nitrate dans le sol, témoin sans compost

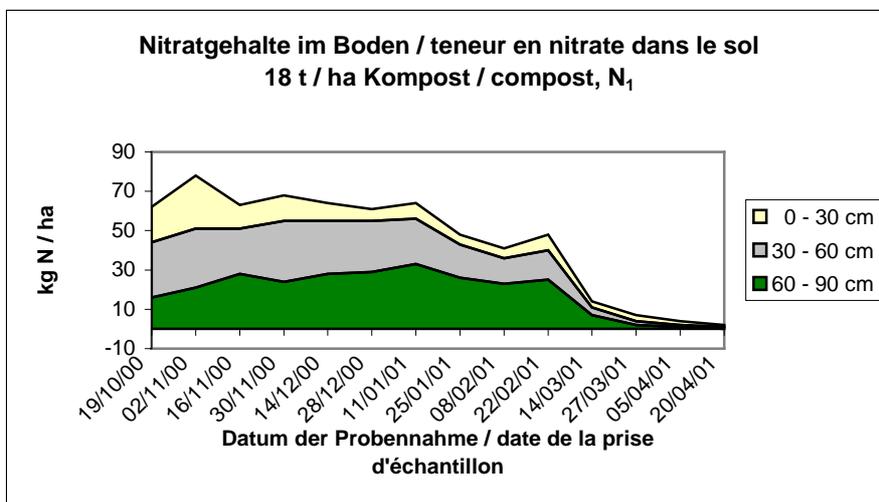


Figure E2: Teneur en nitrate dans le sol, variante 18 t de compost

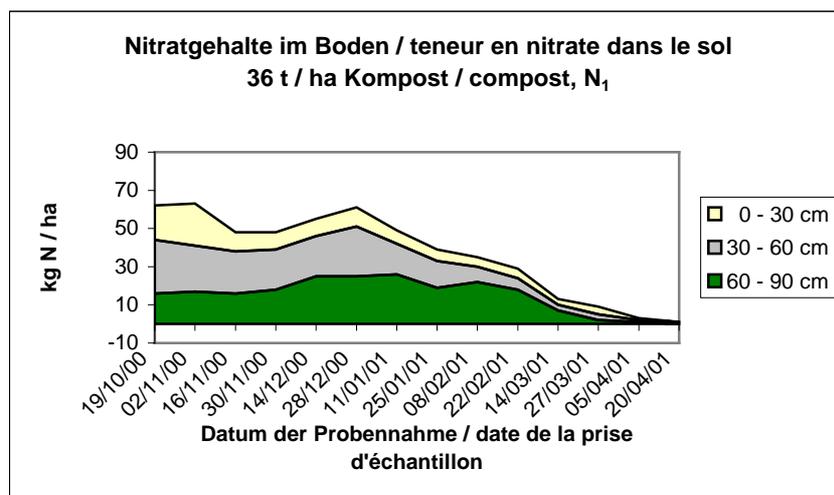


Figure E3 : Teneur en nitrate dans le sol, variante 36 t de compost

b. que dans l'horizon supérieur (0-30 cm), le taux de nitrates est un peu plus important dans la variante sans compost, ce qui tend à faire penser qu'il y a effectivement immobilisation de l'azote par le compost en cours d'évolution dans le sol (voir Figure E4)

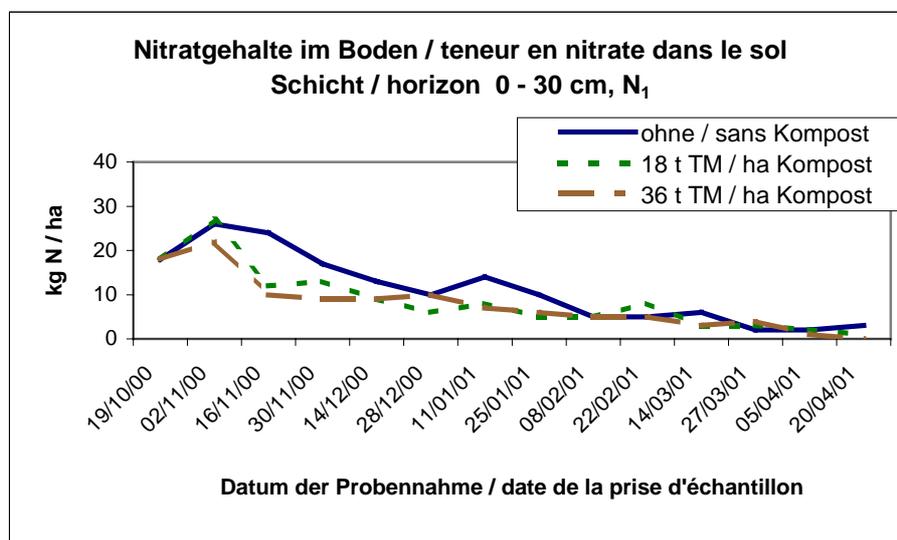


Figure E4 : Teneur en nitrate dans le sol, horizon 0-30 cm

c. que dans l'horizon médian (30-60 cm), on ne peut faire de grande distinction entre les trois variantes (voir Figure 5)

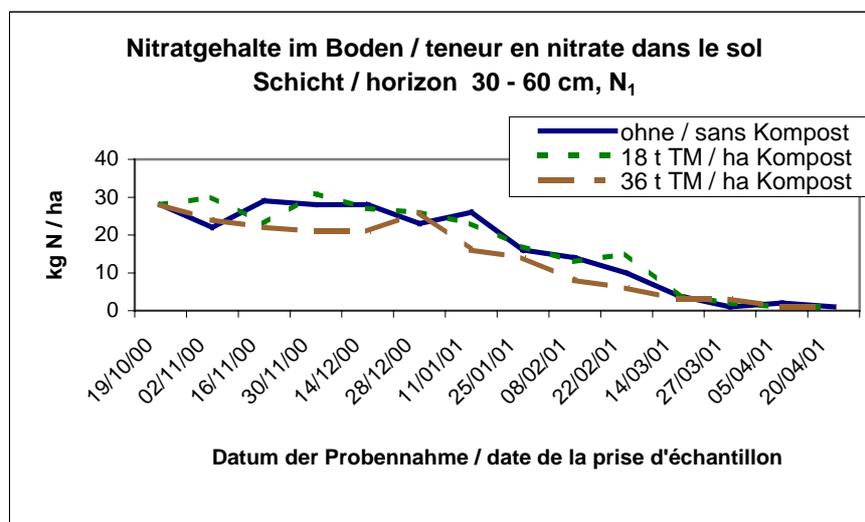


Figure E5 : Teneur en nitrate dans le sol, horizon 30-60 cm

d. que dans l'horizon inférieur (60-90 cm), on assiste à un phénomène surprenant (voir Figure E6) : la variante à 18 t de compost produit plus de lessivage de nitrate que le témoin, tout comme la variante 36 t de compost qui produit cependant moins de lessivage que les 18 t de compost...

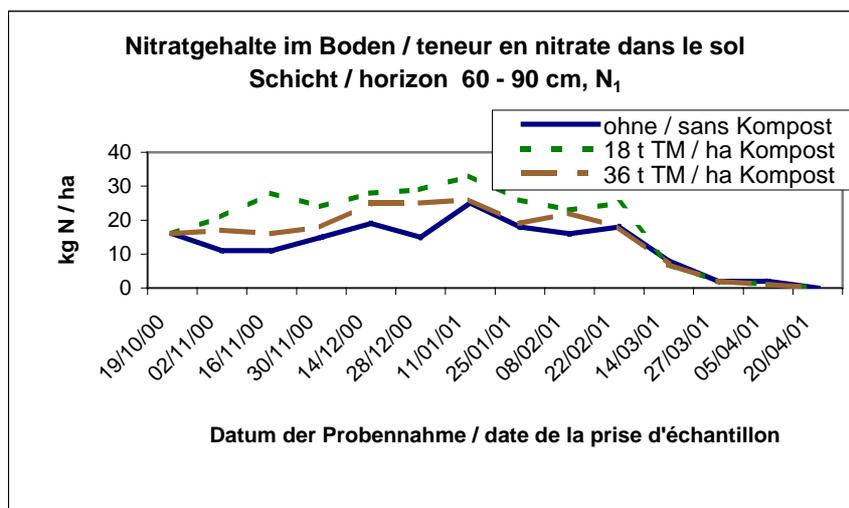


Figure E6 : Teneur en nitrate dans le sol, horizon 60-90 cm

e. concernant les rendements, il n'y a pas de différences significatives entre les variantes, sauf entre les variantes 18 et 36 t ce compost : pour les forts apports (voir Figure E7), les rendements sont sensiblement inférieurs (de 12%), quelque soit la quantité d'azote minéral apportée en complément.

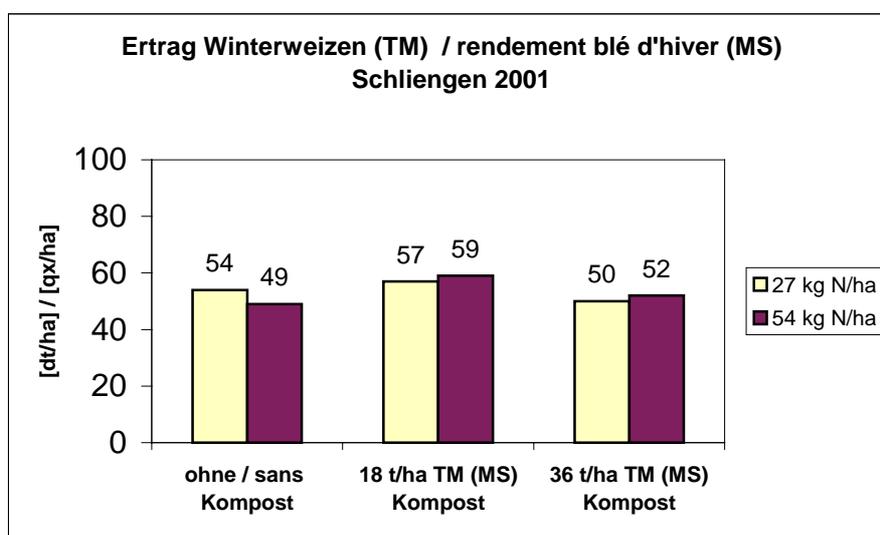


Figure E7 : rendement du blé d'hiver, Schliengen 2001

f. pour les teneurs en protéines, on constate une augmentation de 13% du taux de protéines pour la variante 18 t par rapport au témoin, alors que la variante 36 t n'entraîne qu'une augmentation de 4% du taux de protéines par rapport au témoin.

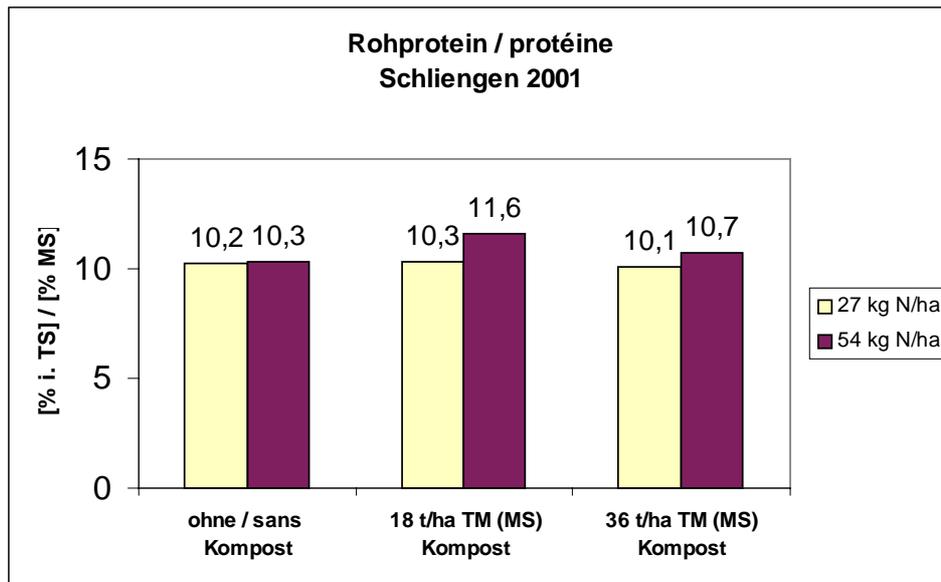


Figure E8 : teneur en protéines du blé d'hiver, Schliengen 2001

Les conclusions que l'on peut en tirer permettent d'apporter un éclairage sur les résultats d'analyse du projet et sur la typologie, sans toutefois les affermir de façon définitive.

Le point d. est le plus problématique à interpréter. Si les deux premiers horizons présentent des caractéristiques conformes à ce que l'on peut en attendre compte tenu de l'hypothèse de départ (le compost piège de l'azote), on est surpris de retrouver un excédent d'azote dans la couche inférieure avec la variante compost à 18 t et encore plus perplexe de constater que de plus fortes doses de compost n'accroissent pas la tendance, au contraire.

L'explication que l'on peut avancer est la suivante, compte tenu des résultats d'analyse effectués sur un compost de la même origine :

- le compost a un rapport C/N élevé, cela ne signifie pas d'après nous qu'il s'agisse d'un compost jeune ou très peu mature qui peut piéger de l'azote, mais plutôt d'un compost qui n'a pas encore fini d'évoluer ni de se décomposer. Il n'est pas encore entré en phase de réorganisation. Il est donc probable que ce produit soit capable d'induire une libération nette de l'azote dans le sol.

- une plus forte dose de compost devrait donc entraîner une plus forte libération nette d'azote minéral dans le sol, or ce n'est pas le cas. Les analyses effectuées en laboratoire montrent qu'avec l'équivalent d'une dose de 22 t MS/ha, la moitié de la production d'azote minéral se fait sous forme de NH_4^+ , ce qui serait le signe de conditions anaérobies. Une dose de 36 t MS/ha pourrait à plus forte raison créer des conditions anaérobies partielles et/ou temporaires, par excès de DBO par exemple. Cette hypothèse expliquerait le fait qu'avec un fort apport de compost, le lessivage de nitrates est moindre qu'avec des doses plus faibles. Le sol fonctionnerait également moins bien ce qui pourrait expliquer l'incidence dépressive des fortes doses sur les rendements et les teneurs en protéines par rapport à une dose raisonnable (de 18 t MS/ha).

En tout état de cause, on peut retenir les conclusions suivantes :

- **ce type de compost ne permet apparemment pas de piégeage de l'azote, au contraire**, il semble qu'il induit une libération nette de nitrates. Il vaut donc mieux réserver ce type de compost pour un épandage au printemps. On rejoint en cela les premières conclusions énoncées à la lecture des analyses poussées en laboratoire
- **il vaut mieux éviter les trop fortes de dose pour ce type de produit** qui semble être encore actif et moyennement stabilisé.

4.2.5. Les andains tabulaires avec aération forcée : le type TAB-AF

4.2.5.1. Description du procédé

RECEPTION, CONTROLE ET BROYAGE DES MATERIAUX DE BASE	<ul style="list-style-type: none"> • <i>idem</i> que pour le type TAB
MISE EN ANDAIN	<ul style="list-style-type: none"> • <i>idem</i> que pour le type TAB • installation de l'andain sur le système d'aération forcée • la hauteur peut dépasser les 3 mètres • des sondes sont installées à différentes profondeurs • les andains peuvent être bâchés (pour limiter l'évaporation)
PHASE DE « PRE-COMPOSTAGE »	<ul style="list-style-type: none"> • durée : 3 à 4 semaines • mesure et enregistrement de la température et du taux d'O₂ • pilotage de l'aération par ordinateur • déclenchement de la soufflerie en fonction du taux d'O₂ (quand inférieur à 16%) • température utilisée comme paramètre de sécurité (fixé à 90°C) • température maximale : 85°C pouvant se maintenir 15 jours
PHASE DE « MATURATION »	<ul style="list-style-type: none"> • durées : 2,5 à 3 mois • mise en andain tabulaires • retournements toutes les 2 semaines • 6 à 8 retournements • pas de couverture • mesure périodique de la température
STOCKAGE	<ul style="list-style-type: none"> • <i>idem</i> que pour le type TAB

Ce procédé est présenté comme une solution technique pour éviter les mauvaises odeurs, supprimer la couche grasse et nauséabonde au pied des andains tabulaires et réduire la place dédiée au compostage (en réduisant le rapport Surface au sol / Volume et surtout en accélérant le transit des matières organiques sur une plateforme).

Ce qu'on cherche avant tout avec ce procédé, c'est une bonne oxygénation du tas de compost. Or, la littérature affirme que le contrôle de ce système par le seul paramètre taux d'O₂ n'est pas efficace ; il faudrait prendre en considération la température ou combiner température et taux d'O₂. D'un point de vue pratique, connaissant l'inertie thermique des grands andains, il faudrait faire fonctionner plus fréquemment les pompes pour faire baisser la température, ce qui n'est pas sans présenter des inconvénients. Cette option est coûteuse en énergie. Elle risque d'injecter un air froid produisant un choc thermique sur les microbes du tas de compost. Elle peut conduire à l'assèchement du tas et à l'arrêt du compostage ; il faut alors humidifier en retour-

nant, sans quoi le mélange ne se fait pas bien, et retourner inopinément coûte cher. Enfin, les défenseurs de ce type de procédé s'interrogent sur le gain de temps (accélération de la dégradation du substrat) que produirait un compostage à 70°C. Selon le procédé par aération forcée, l'oxygénation du tas est perçue comme le principal facteur limitant à la dégradation de la matière organique. Puisque les microorganismes qui réalisent le compostage sont aérobies, il faut leur donner de l'oxygène.

4.2.5.2. Hypothèses sur les transformations de la matière organique

Les fortes températures similaires à celles observées dans le cas des andains tabulaires nous font redouter que l'activité biologique soit relativement faible dans ce type d'andains, elle ne se limiterait qu'à quelques espèces d'actinomycètes et de bactéries thermophiles. Le fait d'avoir un taux d'oxygène à peu près constant de 16% (au lieu du seul 1% observé par endroit dans les andains tabulaires) nous incline à penser que l'activité est malgré tout meilleure avec le système de ventilation. Est-ce que cette ventilation est homogène et ne risque-t-on pas de créer des chemins de circulation préférentiels pour l'air ? Il paraît que vu la faible intensité de la soufflerie, on n'observe pas ce phénomène.

Le fait de retourner les andains deux fois par mois en phase de « maturation » permet sans doute un meilleur contrôle des conditions de compostage et tamponnerait ainsi les aléas liés à l'hétérogénéité du substrat.

Une interrogation demeure sur les voies possibles de fabrication des composés humiques. Aurait-on plus de néo-formation avec ce procédé qu'avec les andains tabulaires classiques ?

4.2.5.3. Qualités du produit fini

Selon les dires des praticiens de cette méthode, on aurait un produit fini qui titrerait dans les 35 à 40% de matière organique (sur sec). Le rapport C/N est inconnu, mais pourrait être encore assez fort. On aurait ainsi un produit qui se situerait entre les deux types de compost que nous avons décrits mais qui serait plus proche des produits issus des andains tabulaires ; il est un peu plus dégradé, mais il n'est pas sûr qu'il soit stabilisé.

Des analyses complémentaires permettraient d'affiner le jugement. L'utilisation de ce procédé est relativement nouveau dans la zone d'étude du projet. On ne dispose pas de références suffisamment précises pour qualifier l'effet amendant de ces matières organiques ni pour estimer leurs potentialités fertilisantes.

4.2.6. Limites de cette typologie : défaut de connaissances et incertitudes

Cette typologie n'est pas construite de façon rigoureusement scientifique. Les analyses recueillies et compilées ne proviennent pas d'échantillons prélevés selon un protocole normalisé, les agrégats réalisés ne sont donc pas nécessairement représentatifs de conditions de compostage similaires. Les analyses sont effectuées par des laboratoires différents (français et allemand), qui n'utilisent pas nécessairement les mêmes routines. Sur les analyses pointues (CBM, ICC-N, biomasse microbienne, biodisponibilité), on n'a que peu de mesures (1 à 3 dans le meilleur des cas, avec 3 répétitions toutefois). Les chiffres donnés ne peuvent prétendre avoir une quelconque valeur statistique.

Ce qui compte davantage, c'est de prendre cette typologie comme une première proposition pour structurer la qualification des composts. On se situe ainsi au début d'un processus itératif. Les propositions mises en avant dans ce rapport devraient être confrontées au point de vue des praticiens fabricant et utilisateurs des composts pour être commentées, questionnées, affinées, amendées... Par quel moyen ? L'intérêt pour les questions soulevées dans ce rapport le dira. Les partenaires de la filière de valorisation des compost de déchets verts pourraient avoir intérêt à réaliser des essais et des tests de comportement de leurs produits dans le cadre d'une politique d'amélioration et de certification de la qualité. Ces tests pourraient prendre en compte quelques uns des éléments décrits dans les lignes qui suivent pour renforcer ou infirmer nos hypothèses.

Il nous paraît judicieux de tester les composts au laboratoire, mais à des doses inférieures. Maintenant que nous avons une idée de leur comportement, nous souhaiterions savoir s'il ne pourrait pas exister un effet de masse comme on le suppose dans le cas du compost fabriqué en andains tabulaires. De plus, il serait bon d'être rassuré sur les risques d'immobilisation de l'azote par ce type de compost. Des tests en plein champs permettraient aussi de répondre à cette question, mais les protocoles à mettre en place risquent d'être lourds, c'est pourquoi nous penchons plus vers l'étude en laboratoire.

Une interrogation assez peu commune concerne la composition de la fraction minérale du compost. Est-ce de la terre ou d'autres substances ? Dans cette dernière hypothèse, quelle serait l'influence de ces éléments sur les conditions de milieu et sur les qualités du produit fini ? Il serait bon d'obtenir une analyse exhaustive (mais coûteuse) d'un compost de chaque type, ou pour le moins de trouver des références dans la littérature sur la composition totale des composts.

Il faudrait aussi compléter cette typologie en étudiant plus précisément les composts issus d'andains tabulaires avec aération forcée en commençant par réunir des analyses pour au minimum connaître le taux de matière organique, le rapport C/N, le taux d'azote, le rapport $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$. Des analyses complémentaires pour caractériser la matière organique et son comportement (minéralisation de l'azote en particulier) seraient les bienvenues pour affiner les hypothèses et soulever les questions pertinentes à poser lors d'un essai en plein champ.

Nous avons avancés quelques hypothèses sur la qualité des composés humiques et sur les voies de leur formation en nous basant sur une analogie avec les voies d'humification dans les sols. D'un point de vue scientifique, la démarche est mal assurée. Rien ne nous dit que les transformations dans un tas de compost soient similaires : on ne connaît pas avec suffisamment de précision les communautés microbiennes à l'œuvre, ni les conditions de milieu dans lesquelles elles évoluent. Les propositions formulées dans ce rapport sur la formation des composés humiques sont le seul fruit d'une intuition. Les preuves expérimentales qui pourraient confirmer ou infirmer cette intuition seraient la mesure combinée d'un indice d'humification et de la capacité d'échange cationique (CEC), en s'assurant du degré de stabilisation du compost (rapport C/N en particulier).

Resterait ensuite à déterminer l'efficacité des types d'humus une fois qu'ils sont incorporés au sol. En effet, on peut se demander comment se transforment, et avec

quel rendement, des composés humiques qui ont pris la voie de l'héritage dans le tas de compost et qui évoluent selon les voies de la néo-formation une fois qu'ils sont dans un sol cultivé. A l'inverse, que donnent des composés issus de néo-formation dans le tas de compost et qui se retrouvent dans un sol hydromorphe ?

4.2.7. Conclusions : évaluation *a priori* des qualités agronomiques des composts de déchets verts

La typologie que nous venons de présenter se base sur les procédés de compostage mis en œuvre. Le compostage des déchets verts est soumis à des contraintes d'ordre pratique et organisationnel et les procédés mis en œuvre présentent chacun ses avantages et ses inconvénients en réponse à ces contraintes.

• comparatif des procédés de compostage des déchets verts

Le Tableau 20 récapitule ces avantages et inconvénients.

Tableau 20 : points forts (+) et points faibles (-) de deux méthodes de compostage de déchets verts

	COMPOSTAGE PAR ANDAINS TRIANGULAIRES	COMPOSTAGE PAR ANDAINS TABULAIRES
mélange des différents matériaux de base	++ ajuster le C/N, l'homogénéité et l'humidité	++ ajuster le C/N, l'homogénéité et l'humidité
températures extrêmes : (forme et dimension de l'andain)	++ températures raisonnables -maxi 70-75°C- hygiénisation correcte	-- températures trop fortes -maxi 80-85°C- hygiénisation assurée
circulation de l'air (forme et dimension de l'andain)	++ bonne et homogène	-- hétérogène voire limitante : < 1% d'O ₂
sensibilité au climat : (rapport Surface d'échange / Volume)	-- sensibilité plus forte (~ 1,95 m ² /m ³)	+ peu sensible au climat (~ 0,42 m ² /m ³)
consommation d'espace : (rapport Surface au sol / Volume)	- plus forte (~ 1,1 m ² /m ³)	+ plus faible (~ 0,37 m ² /m ³)
durée de séjour sur la plate-forme -phase active-	+ plus court : ~ 3 mois	- plus long : ~ 6 mois
investissement en béton (rapport Volume traité annuellement / Surface plate-forme)	?? estimé un peu plus élevé	?? estimé un peu plus faible
constance du produit fini (intérêt commercial)	-- variations plus fortes (CV souvent plus élevés)	+ variations plus faibles (CV souvent plus faibles)
contrôle du procédé	++ intervention et correction possible à tout moment (demande grande technicité)	-- interventions difficiles et sporadiques
retournements	?? rapides mais fréquents	?? lents mais épisodiques

Des températures raisonnables et une bonne circulation de l'air sont les conditions indispensables au bon déroulement du compostage *stricto sensu*. L'argument d'une bonne hygiénisation n'est pas suffisant pour garantir la qualité d'un produit comme le compost. S'il est louable d'appliquer les précautions maximales à cet aspect, il ne faut pas perdre de vue que les risques sur ce type de substrat restent faibles et que les qualités agronomiques d'un produit englobent de nombreux autres paramètres. De plus, les résidus de pesticides sont largement éliminés par les microorganismes. Une bonne activité microbienne peut ainsi constituer un gage d'hygiénisation.

De par sa sensibilité accrue au climat et sa forte activité, le procédé de compostage par andain triangulaire semble réclamer une plus grande technicité : les interventions sont plus fréquentes et elles doivent être faites à bon escient.

Les fortes variations de composition des composts issus d'andains triangulaires peuvent venir des quantités de terre ajoutées et/ou de problèmes ponctuels de maîtrise de la technique.

Les gains sur la consommation de l'espace sont en général perdus sur la durée de séjour, et vice-versa. On arrive ainsi à un investissement en béton pour recouvrir une plate-forme qui doit être sensiblement le même (à confirmer par des quantifications précises). L'opportunité du choix d'un procédé dépendra en dernier ressort du montage financier.

Il faudrait mesurer les temps de travail pour déterminer les avantages et inconvénients de chaque type de retournement. On pense *a priori* que les différences sont minimales.

Le procédé de compostage en andains tabulaires avec aération forcée cherche à réduire davantage les contraintes de consommation d'espace ainsi que celles liées à la circulation de l'air. Malheureusement, le problème des fortes températures n'est pas résolu. Or, il nous semble que celui-ci devrait être placé au premier plan des préoccupations pour que le compostage se déroule bien.

• valeur agronomique des composts de déchets verts

La valeur agronomique d'un compost est relativement difficile à définir. Usuellement on regroupe sous ce terme la valeur amendante (potentiel humique) et la valeur fertilisante (teneur N, en phosphore, potassium, Ca, magnésium et vitesse de libération), sans préjuger d'effets bénéfiques supplémentaires et autres avantages comparatifs.

On s'efforce de donner ici (voir Tableau 21) quelques ordres de grandeur sur le potentiel amendant et fertilisant des composts de déchets verts étudiés dans la typologie. Les chiffres annoncés sont à prendre avec une extrême précaution. Ils servent tout au plus à aider à la prise de décision dans le choix et l'utilisation de ces composts. L'utilisation de ces chiffres doit donc faire appel au sens critique et à l'observation agricole des effets occasionnés par l'épandage de ces produits. Il est conseillé de demander une analyse auprès des vendeurs de compost.

Ces chiffres sont des moyennes de résultats d'analyses exprimés en proportion du produit brut (PB). Ces moyennes sont calculées sur un nombre restreint d'individus (de 2 à 14). On donne entre parenthèse les valeurs minimum et maximum mesurées.

Tableau 21 : ordres de grandeurs des valeurs amendantes et fertilisantes des composts de déchets verts étudiés par le projet (pour une tonne de produit brut)

	COMPOST DECHETS VERTS ANDAINS TRIANGULAIRES	COMPOSTS DECHETS VERTS ANDAINS TABULAIRES
VALEUR AMENDANTE		
FORMATION D'HUMUS STABLE	79 kg (de 35 à 160)	97 kg (de 90 à 100)
TENEUR EN MATIERE ORGANIQUE	167 kg (de 100 à 390)	253 kg (de 174 à 288)
DEGRE DE STABILISATION DE LA MO (HUMUS STABLE/ MO)	47%	38%
VOIES D'HUMIFICATION SUPPOSEES (INTUITION)	plutôt néo-formation ? (un peu d'humus fibreux et d'héritage ?)	plutôt humus fibreux ? plutôt héritage ? (un peu de néo-formation ?)
VALEUR FERTILISANTE POUR L'AZOTE		
COMPORTEMENT LA PREMIERE ANNEE	minéralisation lente et appa- remment régulière	minéralisation forte
ARRIERE EFFET	à peu près nul ?	immobilisation d'azote (ampleur ?)
TENEUR EN AZOTE TOTAL *	5,85 kg (de 3,8 à 6,8)	7,77 kg (de 6,4 à 10,3)
AZOTE MINERAL PRESENT DES L'ENFOUISSEMENT**	0,51 kg soit ~ 9% du N _{total} (de 0,19 à 1,12)	0,10 kg soit ~ 1% du N _{total} (de 0,01 à 0,19)
MINERALISATION SUR UNE SAISON DE CULTURE (8 MOIS) (EN % DE L'AZOTE TOTAL)	18%	24%
AZOTE DISPONIBLE SUR UNE SAISON DE CULTURE ~ 8 MOIS*	5,85 kg x 18% = 1,05 kg	7,77 x 24% = 1,86 kg
CAU AZOTE A 3,5 MOIS	20,5%	26,5%
AUTRE VALEUR FERTILISANTE*		
P***	~ 5 kg (de 2 à 8)	~ 3 kg (de 2 à 5)
K*	~ 7 kg (de 4 à 14)	~ 6 kg (de 4 à 9)
CA*	~ 40 kg (de 15 à 90)	~ 30 kg (de 22 à 40)
MG*	~ 8 kg (de 4 à 16)	~ 4 kg (de 2 à 7)

* il vaut mieux demander l'analyse du lot pour mieux estimer ces apports

** l'azote minéral regroupe les nitrates et les ammoniums

*** on considère que tout le phosphore est facilement disponible suite à un compostage qui s'est bien déroulé (en particulier avec une bonne phase de maturation)

Les composts de déchets verts semblent être une source moyennement intéressante pour la fertilisation azotée. Pour le calcul de cette fertilisation, il faut tenir compte de deux éléments :

- la teneur en azote minéral à l'enfouissement,
- la taux de minéralisation de l'azote en fonction de la teneur en azote totale du produit.

Pour les composts d'andains triangulaires, l'azote minéral présent au début peut représenter jusqu'à la moitié de l'azote minéralisé en une saison.

A l'inverse, pour les composts d'andains tabulaires, cette part est négligeable (1%).

Les vitesses de minéralisation peuvent donc être estimées de la façon suivante :

andains triangulaires : ~ 10% en 245 jours

andains tabulaires : 23% en 245 jours

Au-delà de la saison de culture, on a du mal à définir un taux de minéralisation.

Pour les andains triangulaires, il semblerait que l'arrière effet soit négligeable ; le compost se mêle à la matière organique du sol et est minéralisé lentement
 Pour les andains tabulaires, il pourrait y avoir une immobilisation d'azote, mais de quelle ampleur ?

• préconisation d'emploi

Le Tableau 22 donne quelques ordres de grandeur – à prendre avec les mêmes précautions – des apports en matière organique, humus et éléments fertilisants correspondant à l'épandage de 20 tonnes de compost.

Tableau 22 : estimation (ordre de grandeur) des valeurs fertilisante et amendante d'un apport de 20 tonnes (en produit brut) de compost de déchets verts

	COMPOST DECHETS VERTS ANDAINS TRIANGULAIRES	COMPOSTS DECHETS VERTS ANDAINS TABULAIRES
VALEUR AMENDANTE	+	++
matière organique	3,4 tonnes (2 à 7,8)	5 tonnes (3,5 à 5,8)
humus stable	1,6 tonnes (0,7 à 3,2)	2 tonnes (1,8 à 2)
VALEUR FERTILISANTE	++	+
azote minéralisé en saison	21 unités (13 à 25)	37 unités (30 à 50)
phosphore libéré	100 unités (40 à 160)	60 unités (40 à 100)
potassium libéré	140 unités (80 à 280)	120 unités (80 à 180)
calcium libéré	800 unités ! (300 à 1800)	600 unités ! (440 à 800)
magnésium libéré	160 unités (80 à 320)	80 unités (40 à 140)

La valeur fertilisante semble plus forte pour le compost issu d'andains triangulaires que pour ceux issus d'andains tabulaires, hormis ce qui concerne l'azote. Pour la valeur amendante, c'est l'inverse.

On peut noter que le compost de déchets verts apporte de 2 à 3 tonnes de matière organique qui ne constituera pas d'humus stable, mais qui doit avoir un effet positif sur la biologie et sur la stabilité structurale du sol.

De plus, l'effet amendement calcaire n'est pas négligeable pour ce type de compost. Il peut éventuellement faire office de chaulage d'entretien.

Concernant la dynamique de libération de l'azote, le Tableau 23 récapitule les conclusions auxquelles les analyses permettent d'aboutir.

Tableau 23 : dynamique de libération de l'azote des composts de déchets verts

	COMPOST DECHETS VERTS ANDAINS TRIANGULAIRES	COMPOSTS DECHETS VERTS ANDAINS TABULAIRES
quantité d'azote minéralisable l'année de l'apport	~ 18%	10 à 25%
quantité d'azote minéralisable les années suivantes (arrière-effet supposé)	~ 0 ?	??? (libération ou immobilisation ?)

En définitive, nous conseillerions d'épandre les composts issus d'andains triangulaires de préférence au printemps et avant la préparation du lit de semence, afin de profiter au maximum de l'azote déjà présent sous forme minérale et de l'azote libéré par la minéralisation régulière pour ce type de compost.

Pour les composts issus d'andains tabulaires, il convient d'anticiper le risque d'immobilisation de l'azote après la saison de culture. On pourrait essayer de profiter de ce phénomène pour retenir les reliquats d'azote après culture à un moment où il ne peut plus y avoir de compétition entre le sol et la plante pour l'utilisation de l'azote. Il serait donc judicieux d'épandre ce type de compost au plus tard 8 à 9 mois avant la récolte (pour piéger les reliquats sans concurrencer les cultures), et au moins 3 à 4 mois avant le semis (le temps de laisser les perturbations initiales s'estomper).

Compte tenu des faibles températures et de la faible activité biologique pendant l'hiver, on pourrait épandre ce type de compost à la fin de l'automne, dans les derniers jours de novembre, mais sans l'enfouir trop profondément, pour lui permettre d'évoluer rapidement au printemps. Il convient également de ne pas utiliser des doses trop élevées (20 à 30 t de PB / ha serait une limite à ne pas dépasser).

Dans tous les cas de figure, le compost ne devrait pas être enfoui à plus de 10 cm de profondeur, sans quoi il risque d'évoluer mal et en anaérobiose, ce qui pourrait occasionner des problèmes de « sols creux » et la formation d'acides organiques.

De façon générale, il faut à tout prix éviter d'enfouir ou de mettre à proximité de la racine un produit dont on ne connaît pas suffisamment la nature ni le comportement.

4.3. Les composts de fumiers : typologie et potentiel de libération de l'azote

4.3.1. Essai de construction d'une typologie des composts fermiers

Comme dans le cas des déchets verts, on considère que les matériaux de base et les procédés de compostage conditionnent les qualités des composts. Les matériaux de base sont les fumiers issus de différents types d'élevage (espèces d'animaux, classe d'âge, alimentation, type de bâtiment et niveaux de paillage). Il existe cependant peu de références concernant tous ces éléments ensemble (on trouve plus fréquemment les types de bâtiments associés aux niveaux de paillage).

L'enquête auprès des agriculteurs a permis de trouver quelques facteurs discriminants pour les méthodes de compostage :

- la fréquence (ou l'intensité) des retournements,
- le matériel utilisé pour la mise en andain,
- l'utilisation des préparations biodynamiques

Ces facteurs sont plutôt des éléments distinguant des stratégies de compostage. L'agriculteur érige les andains d'une certaine façon, et il s'engage à retourner fréquemment, à utiliser ou non les préparations... Ce sont des options prises au départ qui ne varient normalement pas au cours du compostage. La taille des andains n'est pas apparue comme facteur discriminant, les andains ayant tous à peu près des dimensions similaires.

La conduite du compostage réclame par la suite des adaptations et un certain niveau technique ; on parle alors de tactique pendant le compostage. Les possibilités d'adaptations techniques ont été développés dans la première partie (§ 4.1.) et nous ne les rappellerons pas dans cette typologie. On se place ici dans le cas où le compostage se déroule le mieux possible et se rapproche de l'optimum technique (un minimum de pertes, un maximum d'efficacité).

Le Tableau 24 présente les différents types de composts identifiés par le projet.

Tableau 24 : types de composts et facteurs discriminants

PAS DE RETOURNEMENT MISE EN ANDAIN : BENNE	PAS DE RETOURNEMENT MISE EN ANDAIN : EPANDEUR	RETOURNEMENTS EPISODIQUES	RETOURNEMENTS INTENSIFS
FD	COMP	RET	INT

Le matériel utilisé pour la mise en andain a une influence sur la structure, la porosité et la circulation de l'air dans le tas. Ce critère n'est discriminant que dans les cas des composts non retournés

4.3.2. Des matériaux de départ très variés

Dans notre typologie, on considère que les praticiens savent adapter leur technique de compostage aux matériaux de base (cf. § 4.1.5.1. **choix des matériaux de base**). En première approximation, on considère donc que ces matériaux auront essentiellement une influence sur la composition finale du compost, ainsi que sur les pertes potentielles au cours du compostage, en particulier en azote. Le Tableau 25 donne une image de la diversité des matériaux de base.

Tableau 25 : comparatif des caractéristiques de différents fumiers (exprimées en kg / tonne de produit brut et de matière sèche)

	MS	MO	N _{TOTAL}	P ₂ O ₅	K ₂ O	SOURCE
BOVINS LAIT STABULATION LIBRE	221	180 814	5,7 26	2,2 10	9,5 43	HACALA (1998)
BOVINS LAIT STABULATION ENTRAVEE	185	152 822	5,3 29	1,7 9	7,1 38	BODET <i>et al.</i> (2001)
EQUINS	540	410 759	8,2 15	3,2 6	9 17	ZIEGLER et HEDUIT (1991)
PORCINS LITIERE ACCUMULEE	329	246 748	7,2 22	7 21	10,2 31	BODET <i>et al.</i> (2001)
POULETS DE CHAIR	750	465 620	29 22	25 19	20 15	BODET <i>et al.</i> (2001)
CAPRINS	450	360 800	6,1 14	5,2 12	7,0 16	BODET <i>et al.</i> (2001)
OVINS	300	230 767	6,7 22	4,0 13	12,0 40	BODET <i>et al.</i> (2001)

4.3.3. Un facteur discriminant à l'intérieur de chaque type : le degré de maturité

On rappelle la distinction fondamentale que le projet opère entre :

- la stabilité d'un compost : un compost est stable ou instable, ce qui veut dire qu'il a terminé sa phase active ou non. Le terme 'activité' peut être pris comme synonyme de stabilité,
- le degré de maturité d'un compost : un compost stable peut avoir différents degrés de maturité ; ce degré de maturité augmente avec le temps.

En résumé, la stabilité correspond à une différence de nature et la maturité à une différence de degré.

De façon générale, on peut retenir :

- qu'un compost encore actif ou instable provoque une immobilisation plus ou moins forte dans les sols (BERNAL *et al.*, 1998),
- qu'un compost stabilisé et ayant un degré de maturité faible a un potentiel de minéralisation de l'azote relativement important (GAGNON et SIMARD, 1999 ; CHENEY *et al.*, 1994),
- qu'un compost stabilisé et ayant un degré de maturité élevé a un potentiel de minéralisation de l'azote relativement faible (GAGNON et SIMARD, 1999).

Les agriculteurs opèrent usuellement cette distinction pour qualifier leurs composts : un produit fini (stable, inactif) aura plutôt un effet fertilisant (compost jeune) ou amendement avec un impact sur la vie du sol (compost vieux, très mûr). Ces différences seront rappelées à l'intérieur de chaque type et on essaiera de quantifier les variations. Il faut toutefois bien noter que le compostage conduit à des vitesses de minéralisation moins importantes que celles observées dans le cas des fumiers bruts (TYSON et CABRERA, 1993).

Pour les fumiers de dépôt, l'approche est un peu différente, puisqu'il ne s'agit pas de compostage mais de fermentation. La fermentation est un processus de transformations biochimiques et biologiques très lentes : pour arriver à stabiliser un produit, il faut un temps très long (ATALLAH *et al.*, 1995) : un fumier de dépôt d'un an présente à peu près les mêmes caractéristiques en terme de dégradation du carbone et de la matière organique qu'un compost d'un mois de type INT (retourné 7 fois). Un fumier de dépôt de 4 mois ½ semble avoir encore peu évolué par rapport à un fumier frais (KISLIG, 1989) ; un fumier de dépôt de 3 mois contient encore beaucoup de carbone facilement dégradé et provoque une immobilisation d'azote s'il est incorporé au sol (THOMSEN, 2000).

Pour le type FD, on peut donc retenir que l'influence de la durée de fermentation (on ne peut pas parler dans ce cas de maturation puisqu'il n'y a pas ou très peu de fabrication de composés humiques) joue de façon dichotomique :

- si le fumier de dépôt est encore en activité, il va immobiliser de l'azote dans le sol,
- si le fumier de dépôt est stabilisé (pas d'activité), il contient de fortes concentrations d'azote minéral (jusqu'à 2/3 de l'azote total : KIRCHMANN et WITTER, 1989).

La limite de la phase de fermentation se situerait entre 1 an et 1 an ½ après la mise en dépôt. On obtient alors un produit de type beurre noir, collant et relativement mal-aisé à épandre. En le laissant évoluer une année supplémentaire, on obtient un produit qui a l'aspect du terreau, mais dont la composition exacte nous est inconnue. Il s'agit selon nous d'un produit très dégradé, mélangé à de la terre grâce à l'action des vers de terre, très présents dans les tas âgés.

4.3.4. Le compost retourné peu de fois : les types RET et RET-BD

Ce procédé de compostage est le plus diffusé. Il a été développé en système de grands élevages pour répondre à des préoccupations de gestion des effluents. Il doit permettre une économie de temps, un assouplissement des calendriers d'épandage, une hygiénisation du fumier pour pouvoir épandre le produit sur prairie, et enfin augmenter les surfaces qui reçoivent des déjections en concentrant les éléments fertilisants et en diminuant les quantités à transporter.

Après une mise en andain à l'aide de l'épandeur ou de la benne, le fumier est retourné une fois (voire deux à trois fois s'il est vraiment très tassé et compact) si la structure est mauvaise. Un second retournement doit être fait 15 jours à 3 semaines pour homogénéiser le fumier, redonner de la structure et relancer le compostage sur le substrat qui était au bord et qui a moins chauffé. Un troisième retournement peut avoir lieu si l'on juge que le compost manque d'homogénéité, n'est pas encore stabilisé ou si le tas s'est trop effondré. On arrive ainsi à un maximum de 5 retournements en deux mois de phase active. Un retournement qui interviendrait 1,5 à 2 mois après la mise en andain n'a pas de réel effet sur l'activité biologique, il sert surtout à homogénéiser le tas qui évolue pour partie en anaérobiose. De plus, le retournement ef-

fectué dans ces conditions, ne permet pas de relancer correctement une phase thermophile, l'activité des microorganismes étant déjà très réduite et le tas refroidi.

Le compost peut ensuite être laissé à mûrir plus ou moins longtemps en fonction des besoins et des calendriers de travaux. Il faudrait alors le couvrir, ce qui est malheureusement rarement le cas.

Le projet a identifié 4 agriculteurs pratiquant ce type de compostage et 5 qui réalisent une variante avec ajout de préparations biodynamiques soit dans le fumier à l'étable, soit à la mise en andain, soit encore après les 15 à 20 premiers jours de la phase active.

Le projet a analysé un compost de fumier de cheval de type RET et un compost de fumier de bovins lait en stabulation libre de type RET-BD¹⁴. Le Tableau 26 donne quelques caractéristiques de ces composts.

Tableau 26 : comparaison des caractéristiques de différents composts de type RET et RET-BD

	FUMIER DE CHEVAL* RET ²	FUMIER DE BOVINS LAIT STABULATION LIBRE* RET-BD	REFERENCE : FUMIER DE BOVINS STA- BULATION LIBRE TYPE RET**
durée du compostage	7 mois	4 mois	2 mois
nombre de retournements	5	3	2
MS	215	520	330
MO	115	187	210
	533	359	636
C _{org}	64,1	90,4	-
	298	174	
N _{total}	5,07	5,25	8
	23,6	10,1	24
rapport C/N	12,7	17,3	-
NO ₃ ⁻	0,082	0,004	-
	0,38	0,007	
NH ₄ ⁺	0,077	0,01	-
	0,36	0,02	
rapport NO ₃ ⁻ / NH ₄ ⁺	1,06	0,38	-
P ₂ O ₅	2,6	2,27	5
	12,1	4,37	15
K ₂ O	6,47	4,05	14
	30,1	7,8	42
CaO	9,59	20,3	-
	44,6	39	
MgO	1,7	3,1	-
	7,89	5,97	
produit organique-type (selon référence labo)	riche en matières minérales	riche en matières miné- rales	-
estimation du K ₁	25%	13%	50%***
% N _{total} minéralisable sur la saison de culture (8 mois)	22%	- 3%	20%
Quantité d'azote minérali- sée dans l'année (estimée, sur PB)	1,13 kg/tonne	-0,17 kg/tonne	1,6 kg/tonne
CAU à 23 semaines	17%	3%	-

* résultats de la campagne d'analyse menée dans le cadre du projet

** moyenne de 18 composts de 2 mois, tirée de BODET et al. (2001)

*** d'après SOLTNER (1996)

¹⁴ Pour plus de détail sur les résultats de ces analyses, se reporter aux représentations graphiques des ICC-N, Biomasse microbienne et CAU en Annexe 9 & 10

Les conditions de fabrication des composts testés par le projet ne sont pas optimales. Pour le fumier de cheval, l'andain est constitué progressivement (bennage tous les 15 jours). Quand l'andain présente une certaine longueur, le retourneur est passé. Le substrat étant très sec, l'andain est laissé sous la pluie. Le substrat est donc très hétérogène et les conditions de compostage très variables. Concernant le compost fumier de bovin lait (type RET-BD), il semble que le produit ne soit pas bien stabilisé (rapport C/N > 15, immobilisation de l'azote : -3% de N_{total}) au bout de 4 mois de compostage. Cela semble indiquer de mauvaises conditions de compostage (pour quelles raisons ?). Les deux composts pour lesquels nous avons des résultats ne sont donc pas représentatifs du type RET identifié pendant les enquêtes. On se fiera donc plus à la littérature pour estimer la valeur agronomique de ces composts.

Le type RET semble avoir un bon coefficient isohumique, même si les 50% annoncés nous paraissent un peu élevés. On peut tabler sur une disponibilité de 15 à 20% de l'azote l'année de l'apport (BERNER *et al.*, 1997 ; BODET *et al.*, 2001) pour ce type de compost, si les conditions de compostage sont optimales. Un compost qui n'a pas terminé sa phase active ou qui est passé en anaérobiose risque d'immobiliser de l'azote.

Le degré de maturité jouera ensuite un rôle sur la disponibilité de l'azote : plus disponible pour un compost stabilisé mais jeune, moins disponible pour un compost stabilisé mais mûr.

L'analyse de la composition du compost est indispensable pour connaître la quantité exacte d'éléments fertilisants présents et pour calculer la quantité d'azote disponible l'année de l'apport. La mesure de la CEC combinée à un indice d'humification permettrait de cerner la nature des composés humiques et donc d'avoir un avis au moins qualitatif sur leur vitesse de minéralisation et leur richesse en azote.

4.3.5. Le compostage avec retournements intensifs : les types INT et INT-BD

Le type INT a été observé chez 3 agriculteurs et le type INT-BD chez un seul, parmi les 14 fermes visitées.

Ce procédé s'est développé avec l'utilisation des retourneurs d'andains. Une des firmes commercialisant ce type de matériel a été très active sur la mise au point de procédés de compostage. Il en résulte un certain nombre de recommandations techniques pour l'utilisation fréquente du retourneur, de la bâche, pour la mesure de la température et du taux de CO_2 et pour l'ajout de ferments bactériens. Dans la pratique, les agriculteurs ne font pas de mesures et jugent l'ajout de ferments bactériens peu efficace.

L'intérêt de nombreux retournements (1 par jour au début à 1 par semaine au bout de 1,5 à 2 mois) est d'accélérer la décomposition du fumier et de le stabiliser rapidement pour pouvoir le stocker (sans qu'il ne perde trop des qualités acquise pendant la transformation) et l'utiliser à tout moment.

Il nous semble que la vitesse de minéralisation de ces produits va fortement dépendre de la durée de la maturation (en général courte) et qu'on obtient par ce procédé des produits pouvant libérer potentiel d'azote plus fort que pour le type RET. Les résultats d'analyse reportés dans le tableau 27 confirment cette hypothèse¹⁵.

¹⁵ Pour plus de détail sur les résultats de ces analyses, se reporter aux représentations graphiques des ICC-N, Biomasse microbienne et CAU en Annexe 11 & 12

Tableau 27 : comparaison des caractéristiques de différents composts de type INT et INT-BD

	MELANGE DE FUMIER DE BOVINS LAIT STABILISATION LIBRE (67%), FUMIER DE PORCS (17%), FUMIER DE CHEVAL (17%) INT	MELANGE DE FUMIER DE CHEVAL, DE RESTES DE LEGUMES ET DE FUMIER DE BOVIN INT-BD	MOYENNE DES COMPOSTS DE BOVINS LAIT EN STABILISATION LIBRE SUPPOSES DE TYPE INT*
MS	342 (plutôt humide)	701 (plutôt sec)	451 (correct)
MO	187 546	295 421	437
C _{org}	93,8 274	162 231	256
N _{total}	6,37 18,6	12 17,1	19,2
rapport C/N	14,8	13,5	12,7
NO ₃ ⁻	0,002 0,006	0,31 0,44	0,727
NH ₄ ⁺	0,086 0,25	0,031 0,044	2,141
rapport NO ₃ ⁻ / NH ₄ ⁺	0,02	10,00	
P ₂ O ₅	5,2 15,2	5,62 8,01	17,8
K ₂ O	12,7 37,2	12,8 18,2	40,3
CaO	18,5 54	22,7 32,4	36,5
MgO	3,53 10,3	4,96 7,08	8,8
durée de compostage	1,5 mois	5 mois	1 à 2 mois
nombre de retournements	9	~ 30	nombreux
degré de maturité	jeune	en train de mûrir	plutôt jeune
voie d'humification	surtout dégradation ; géochimique (blocage)	surtout dégradation ; néo-formation	
produit organique-type (selon référence labo)	riche en matières minérales	riche en matières minérales	-
estimation du K ₁ (labo)	18%	11%	(50%) ZZ
% N _{total} minéralisable sur la saison de culture (8 mois)	4,6%	23%	
Quantité d'azote minéralisée dans l'année (estimée, sur PB)	0,29 kg/tonne	2,75 kg/tonne	
CAU à 23 semaines	39%	33%	

* données tirées d'une campagne d'analyse réalisée sur des composts par l'OPABA en 1992/1993.

Le compost est à peu près stabilisé (rapport C/N moyen pour un produit composté) et le degré de maturité (rapport NO₃⁻/NH₄⁺) est variable en fonction de la durée de maturation.

Ce compost est classé dans la catégorie des produits riches en matières minérales et possède un coefficient isohumique relativement faible de 10 à 20 % pour les échantillons testés, mais qui reste honorable pour un produit fortement dégradé.

On constate que les quantités d'azote libérées en ICC-N sont faibles pour le compost de type INT, mais que le CAU est très élevé (39%, résultat le plus proche du témoin ammonitrate, soit un coefficient d'équivalent engrais (CEE) azoté de 60%). Le laboratoire suggère que le lithothamne (amendement calcaire) mélangé à la litière (à la dose de 0,6% en masse du fumier) jouerait un rôle de protection physico-chimique sur la matière organique et que la gangue calcaire serait solubilisée par l'acidification du sol due aux racines. On peut ainsi penser que la voie d'humification correspond plutôt à la formation de composés humiques dans des conditions type Mull calcique. Le blocage géochimique disparaîtrait une fois le produit mis en terre, à condition toutefois que le sol n'aie pas un pH trop élevé (supérieur à 8).

On pense également avoir affaire à des composés humiques de faible taille, avec beaucoup de chaînes latérales et rapidement minéralisables (à confirmer par une mesure d'un indice d'humification combinée à celle de la CEC).

Ce type de compost présenterait ainsi l'avantage d'entretenir le stock de carbone du sol tout en ayant un effet azoté assez important. Il serait bien adapté à des sols ayant une capacité de minéralisation lente du fait de l'abondance de matière organique stable ou à cause de températures limitantes ou d'un démarrage tardif.

Les estimations économiques classiques affirment qu'un compostage intensif de ce type n'est pas rentable en comparaison à l'épandage du fumier frais. On peut objecter que ce produit correspond à des objectifs spécifiques auxquels un fumier non transformé et non stabilisé ne peut pas répondre. De plus, au dire des praticiens de cette méthode, le temps passé est marginal si l'organisation du chantier est bien réglée et les dépenses en carburant ne sont pas importantes, le tas conservant toujours une bonne structure, ce qui facilite le passage de la machine.

4.3.6. Le compostage sans retournement : les types COMP et COMP-BD

Ce compostage est le plus difficile à réussir et le projet n'a pas réussi à l'observer sur le terrain, sauf peut-être chez un voire deux exploitants qui donnent un soin tout particulier à leur compost, mais qui n'arrivent pas à obtenir une qualité constante pour autant. Il s'agit d'un compostage en andain triangulaire qui reprend toutes les caractéristiques habituelles du compostage, sans qu'aucun retournement ne soit fait. Pour réussir un tel compost il faut disposer de matières premières impeccables, ayant une très bonne structure au départ, et surtout étant capable de la conserver, avec un mélange équilibré en carbone et en azote et une humidité optimale. Il faut pouvoir réguler le taux d'humidité d'un tel compost sans le retourner, ce qui demande de nombreuses séquences de couverture-découverte du tas (travail relativement pénible et astreignant). Un agriculteur enquêté réalise des composts du type COMP-BD quand les matériaux de départ sont de bonne qualité, mais il n'hésite pas à passer le retourneur si le compostage se déroule mal. La durée du compostage est également rallongée : de 4 à 9 mois.

Le projet n'a pas réalisé d'analyse sur ce type de compost plutôt rare qui réclame un niveau technique assez élevé et un soin constant. On aurait tendance à dire que ce compost a, dans les grandes lignes, le même comportement que le compost de type RET, mais qu'une qualité similaire n'est obtenue qu'après une durée de compostage plus longue. On attire aussi l'attention sur le fait que

la limite entre le type COMP et le type présenté dans le paragraphe suivant (FD) est ténue et que l'on peut facilement basculer du premier vers le second. On rappelle qu'une succession de conditions aérobies et anaérobies produit les pertes les plus importantes qu'on puisse observer en terme de carbone.

On peut toutefois proposer une nuance entre les types COMP et RET. Si le compostage selon le procédé COMP est réussi, on peut penser que l'évolution de la température entre les deux méthodes n'est pas tout à fait la même : on aura un seul pic de température avec COMP, alors qu'on en aura plusieurs avec RET (autant que de retournements pendant la phase active). Ceci a donc une incidence sur la flore et sur les transformations biochimiques. Ces dernières seront donc sensiblement différentes entre les deux types de composts, sans que l'on puisse préciser dans quelle mesure ni selon quel critère.

Dans la pratique, ce type de compost est très rare, et les agriculteurs préfèrent avoir recours au retourneur d'andains, sans quoi ils fabriquent du fumier de dépôt.

4.3.7. Le fumier de dépôt : les types FD et FD-BD

Lors de nos enquêtes, il nous est arrivé de rencontrer à 3 reprises des andains non retournés que les exploitants appelaient 'compost', alors que ceux-ci présentaient toutes les caractéristiques de la fermentation (aspect de beurre noir), sauf peut-être la présence de mauvaises odeurs. Il semble en effet que l'application des préparations bio-dynamiques permette de limiter l'émission d'ammoniac (moins d'odeur). De ces observations, on retire l'impression qu'il suffit d'ajouter les préparations à un fumier de dépôt pour en faire du compost.

Nous militons pour qu'une distinction claire soit établie entre fumier de dépôt et compost. L'obstacle essentiel à opérer cette distinction est que le compost est perçu comme un élément central, presque fondateur, de l'agriculture biologique, *a fortiori* de la méthode bio-dynamique. Traiter un andain de fumier de dépôt, c'est le faire sortir des catégories classiques de pensée de la méthode biologique. Or ces fumiers de dépôt existent à foison dans les campagnes et nombre d'agriculteurs expliquent même avec force détail tout le soin qu'ils apportent à leur fabrication. Ces fumiers de dépôt présentent un certain nombre d'avantages et d'inconvénients et leur utilisation peut être adaptée à des contextes particuliers. Le projet propose une comparaison des qualités agronomiques de ces fumiers de dépôt afin de remettre en cause les pratiques actuelles pour, au choix, les faire évoluer ou, les conforter.

L'attention donnée à la mise en andain de ces fumiers de dépôt est très variable : cela va du simple bennage pour former un andain très irrégulier en zigzag à la formation d'un andain bien régulier. Les préparations bio-dynamiques peuvent être apportées juste après la mise en andain. Les tas peuvent être recouverts de paille et sont laissés à fermenter (au sens propre du mot) pendant des durées plus ou moins longues (de 9 mois à 2 ans ½).

Les pertes en carbone et en azote sont plus faibles dans ces conditions anaérobies que pendant le compostage. Néanmoins, la stabilisation du carbone est moindre (pas ou très peu de formation de composés humiques en conditions anaérobies) et après une longue durée, une très grande quantité de l'azote est présente sous forme minérale (jusqu'à 65% de l'azote totale sous forme ammonium). De plus, pour une longue durée de dépôt (1 an ½ à plus de 2 ans), les pertes en carbone pendant

le dépôt sont comparables à celles d'un compostage type RET ou INT de 2 à 4 mois. Enfin, le produit ayant évolué en anaérobiose, il contient selon GOLUEKE (1992) un certain nombre de composés phytotoxiques (en particulier des acides organiques issus de la décomposition de la cellulose en conditions anaérobies, ainsi que l'ammoniac qui peut nuire aux racines par contact). On conseille de laisser ces composés évoluer à l'air libre pendant un certain temps (15 jours minimum) pour éviter les problèmes. Ainsi, de fortes pertes par volatilisation peuvent être observées entre l'épandage et l'enfouissement, d'autant plus fortes que la quantité d'ammonium est importante.

En définitive, le bilan azoté et carboné de ce type de compost est moins intéressant que celui du compost et même moins intéressant que dans le cas du fumier frais. De plus, les températures extrêmes sont plus basses en anaérobiose (40-45°C) que lors du compostage. L'effet d'hygiénisation n'est donc pas le même (certains parasites comme les helminthes peuvent être éliminés si les 40°C sont maintenus pendant 6 semaines, mais les virus et autres pathogènes ne sont pas du tout supprimés).

Ceci étant, on peut limiter les pertes en azote à condition d'enfouir ce fumier fermenté à faible profondeur (5 cm à 10 cm maximum) en l'absence de culture. Il est absolument déconseillé d'épandre ce type de compost à l'automne : vue la grande quantité d'ammonium qu'il contient et qui vont être transformés en nitrates en conditions aérobies, le risque de lessivage et de perte de l'azote est énorme. Nous conseillons donc d'épandre ce type de produit au printemps, au minimum 3 à 4 semaines avant le semis.

Ces éléments valent pour le fumier de bovin. Nous avons déjà évoqué l'intérêt que peut présenter la pratique du fumier de dépôt pour la conservation de l'azote dans des fumiers riches en cet élément (porcs et volailles). Pour ce type de fumier, les pertes en azote peuvent être plus importantes en compostant, mais le compostage permet de limiter les pertes en carbone. Le choix de la pratique est donc à adapter en fonction des objectifs poursuivis.

En résumé, le fumier de dépôt, s'il est utilisé à bon escient, peut jouer un rôle fertilisant supérieur à celui du compost et même à celui du fumier. En revanche, son effet amendant est moins intéressant. Ce type de produit peut être très utile sur des sols ayant une faible activité biologique (c'est-à-dire ayant de fortes teneurs en matière organique stable et/ou une saison végétative courte). Ce peut être le cas des prairies de montagne. Attention toutefois à la mauvaise hygiénisation qui peut être source de problème en élevage.

Concernant les pressions sur l'environnement, les percolations d'azote sous les fumiers de dépôts sont très inférieures (de 8 à 10 fois) à celles mesurées ou estimées dans les champs qui reçoivent du fumier frais (LE HOUEROU DECLERCQ, 1992). Ces impressionnants tas de fumiers ne sont pas source de pollution. La seule pression qui peut exister (elle-même représentant une perte pour l'agriculteur), est l'émission d'ammoniac entre l'épandage et l'enfouissement. Des essais sont à mener pour vérifier l'absence de phytotoxicité lors d'un épandage rapproché du semis.

4.3.8. Paramètres ayant une influence sur la minéralisation des composts

Parmi ces paramètres, on distingue deux niveaux :

- un premier niveau maîtrisable par l'agriculteur au travers du choix de ses pratiques,
- un second niveau non maîtrisable avec lequel l'agriculteur doit composer : le climat et le type de sol.

• climat et sol : l'influence de la nature

D'après Rémy CHAUSSOD (communication personnelle), le climat et le type de sol interviennent avec un facteur d'influence 100 sur l'activité microbologique des sols. Pour CHENEBY *et al.* (1994) comme pour HELLER (1999), ces éléments ont une influence déterminante sur le comportement des composts.

On retient en général que plus les températures sont élevées (optimum à 30°C, SOLTNER, 1996), plus l'activité biologique minéralisante est intense (INSAM, 1990), à conditions toutefois que les conditions d'humidité soient acceptables dans le sol (ni trop sèches, ni asphyxiantes). Sous nos climats et en l'absence de système d'irrigation, l'activité microbienne la plus forte a lieu au printemps et à l'automne (si cette saison n'est pas trop pluvieuse ; MOREL, 1989 ; SOLTNER 1996).

Concernant le fonctionnement des sols (MOREL, 1989 ; SIEBERT, 19??; WALTHER, 2001), ceux de type sableux sont en général bien aérés et entraînent une minéralisation plus élevée (25%, CHENEBY *et al.*, 1994) que celle des sols argileux (8%, *ibid.*, 1994).

• pratiques culturales : l'influence de l'agriculteur

Toujours selon Rémy CHAUSSOD, les pratiques culturales représentent un facteur d'influence variant de 2 à 10 sur l'activité microbologique des sols.

Parmi les pratiques qui ont une influence sur la minéralisation des composts¹⁶, on distingue les façons culturales (travail du sol, profondeur d'enfouissement) de la gestion des matières organiques (implantation des engrais verts, successions culturales, fabrication du compost –matériaux, procédé et maturité).

Le travail superficiel du sol¹⁷, en cassant physiquement les agrégats du sol (combinant matière organiques, particules minérales et microorganismes), aèrent le sol et libèrent des quantités intéressantes de matière organique non humifiée, ce qui a un effet positif sur la minéralisation.

Un labour, en diluant la matière organique qui se trouve en principe à la surface du sol, tend à appauvrir relativement les couches superficielles et aérées du sol, ce qui a un impact négatif sur la minéralisation et les quantités minéralisées.

¹⁶ d'après HEBERT *et al.* (1991) l'exploitation des résultats de l'enquête, voir le modèle de fonctionnement d'une parcelle recevant du compost en Annexe 6

¹⁷ ces éléments sur le travail superficiel, sur le labour et sur la couverture du sol sont tirés de CHENU *et al.* (2000)

Les sols laissés nus perdent également de la matière organique, car cette dernière se dégrade très rapidement en surface (sous l'effet des pluies, dessèchements et ré-humectations brutales) sans qu'elle profite aux racines plus en profondeur. La réduction du travail du sol et la couverture permanente seraient alors des stratégies pertinentes pour conserver la matière organique du sol.

Les matières organiques fraîches et plutôt riches en azote (résidus végétaux, engrais verts jeunes broyés et enfouis, lisiers...) stimulent la minéralisation alors que les matières organiques plus stabilisées (comme les fumiers, les composts, les engrais verts vieux ayant fait des fibres) sont moins propices à augmenter l'activité microbienne. Ainsi, en réalisant un épandage de compost avant l'enfouissement d'un engrais vert, on peut stimuler la minéralisation du compost.

Le Tableau 28 récapitule les principaux facteurs ayant une influence sur la minéralisation des composts

Tableau 28 : Effet positif (+) et négatif (-) de facteurs pédo-climatiques et agricoles sur la minéralisation des composts

PARAMETRE D'INFLUENCE	EFFET SUR LA MINERALISATION
<i>PARAMETRES PEU OU NON MAITRISABLES</i>	
climat chaud et humide	++
sol léger, sableux, caillouteux, chaud	++
climat froid et sec	--
sol lourd, argileux, froid	--
<i>PARAMETRES SOUS LE CONTROLE DE L'AGRICULTEUR</i>	
travail superficiel du sol	+
association compost / engrais vert jeune	+
compost jeune, peu mûr	+
labour	-
compost âgé, bien mûr	-
engrais vert âgé	-

4.3.9. Questions et doutes à lever en priorité

Le projet a permis de délimiter quelques procédés de compostage et de préparation des fumiers observés sur le Rhin supérieur, en donnant les grandes caractéristiques de comportement de ces produits. Il sera intéressant de confronter cette approche au couple [stratégie de compostage / effet attendu] tel qu'il est perçu par les agriculteurs.

Le projet aurait souhaité aller plus loin en qualifiant de façon plus fine les différences de comportement au sein d'un même type et en fonction des adaptations techniques au cours du compostage. Or aucune des références scientifiques ou techniques n'a apporté d'éléments pour abonder dans ce sens. Les analyses effectuées dans le cadre du projet ont été faites sur des échantillons prélevés avant que la typologie ne soit construite. De plus, la typologie s'appuie sur des critères de degré de maturité et de qualité des composés humiques qui n'ont pas été abordés par l'étude en laboratoire.

Il nous semble donc très important de mieux qualifier les processus d'humification du compostage. Ceux-ci sont à la base de la minéralisation du carbone et de l'azote une fois que les composts sont épandus. Nous proposons dans la conclusion de ce rap-

port (cf. § 6.) un récapitulatif des liens que l'on a pu établir entre stabilité (= inactivité) d'un compost, degré de maturité, type de composés humiques et taux de minéralisation de l'azote l'année de l'apport. Nous proposons quelques références issues de la bibliographie et d'études au laboratoire, tout en demandant expressément que ces références soient contrôlées, renforcées et affinées, en particulier pour améliorer le conseil aux agriculteurs. L'utilité de ces références sera alors de pouvoir quantifier les pertes de valeur agronomique d'un compost en fonction des écarts par rapport à un optimum technique, ce que le projet n'a pas réussi à chiffrer avec certitude et précision.

L'effet présumé des préparations biodynamiques semblent apporter quelques pistes intéressantes sur la conduite du processus de compostage (régulation de la température, sélections de communautés microbiennes, éventuellement limitation des pertes en azote, contrôle des voies d'humification). Des essais devraient être menés pour mieux cerner les effets de ces préparations, en particulier par rapport aux processus d'humification.

L'arrière-effet des compost n'a pu être estimé que très grossièrement, la littérature faisant défaut et les techniques d'investigation sur cette problématique étant très lourde. En première approximation, on considère que l'arrière-effet est le même quel que soit le type de compost de fumier décrit. Toute nouvelle information pour affiner ce premier jugement sera bien évidemment la bienvenue.

4.3.10. En conclusion : comparaison des principales caractéristiques des composts de fumiers

Le Tableau 29 présente une comparaison des différents types de composts de fumier

Tableau 29 : comparatif des différents types de composts de fumier

	FD ET FD-BD	COMP ET COMP-BD	RET ET RET-BD	INT ET INT-BD
CONDITIONS DE FABRICATION	pas de soins particuliers	très technique & suivi important ; réussite rare	technique & suivi importants ; besoin machine + organisation	technique & suivi importants ; besoin machine + bonne organisation
STABILISATION DU CARBONE	pire que fumier	meilleure que fumier	meilleure que fumier	meilleure que fumier
RENDEMENT EN AZOTE	plus de pertes que fumier	moins de pertes que fumier*	moins de pertes que fumier*	moins de pertes que fumier*
TENEUR EN AZOTE MINERAL**	~ 60% N _{total} (très riche)	~ 3% N _{total}	~ 3% N _{total}	~ 3% N _{total}
TENEUR EN AZOTE TOTAL**	-	~ 24 kg/t MS	~ 24 kg/t MS	~ 24 kg/t MS
TAUX DE MINERALISATION ANNUEL***	65% et plus très élevé	~ 15-20% moyen	~ 15-20% moyen	~ 25-35% élevé
P**	-	5 kg/t PB	5 kg/t PB	5 kg/t PB
K**	-	14 kg/t PB	14 kg/t PB	12 kg/t PB
Mg**	-	2 kg/t PB	2 kg/t PB	4 kg/t PB
Ca**	-	10 kg/t PB	10 kg/t PB	20 kg/t PB
REMARQUE UTILISATION	printemps, mais éviter les cultures	à tout moment	à tout moment	à tout moment

PATHOGENE	mauvaise hygiénisation	hygiénisation moyenne	bonne hygiénisation	très bonne hygiénisation
ADVENTICES	mauvais assainissement	assainissement partiel	bon assainissement	bon assainissement

* à condition d'avoir un bon rapport C/N ; pour des fumiers très riches en azote (porcs, volailles), enrichir le substrat avec de la paille ou mieux, de la sciure (sans toutefois étouffer le tas).

** variable en fonction de la composition des matériaux de départ et des pertes au cours du compostage, mieux vaut faire une analyse

*** variable en fonction du degré de maturité

On insiste sur l'influence déterminante de deux éléments qui se superposent à cette typologie :

- le degré de maturité du compost
- la composition des matériaux de départ

5. Diffusion des résultats du projet

5.1. Quels leviers pour que ces résultats soient pris en compte dans les pratiques ?

Ce travail participe d'une remise en cause des pratiques existantes pour une aide à la décision. Le but du projet n'est pas de proposer des changements techniques, il est d'apporter un éclairage sur des pratiques existantes.

L'information qui est présentée dans ce rapport doit servir à conforter voire à enrichir le référentiel technique des agriculteurs compostant ou susceptibles de composter. Cette information devrait déboucher sur 2 niveaux de réflexion puis de décision :

- au niveau de la stratégie, les typologies et la comparaison entre les différents types doivent permettre à chacun de situer de façon objective l'effet ses pratiques en fonction d'un résultat souhaité ou attendu. Ceci peut éventuellement conduire à une ré-interprétation des effets observés et à un changement de stratégie,

- au niveau de la technique, les acquis scientifiques et techniques rassemblés par le projet doivent permettre à chacun de juger dans quelle mesure un surcroît d'intérêt pour les aspects techniques (plus de suivi, plus de connaissances, plus d'observations) permettrait un gain en qualité et en effet.

En clair, grâce aux informations que contient ce rapport, les agriculteurs doivent pouvoir :

- déterminer quel est le type de compost qu'ils fabriquent,
- juger la réussite de leur compost (est-on plus ou moins loin de l'idéal technique, peut-on être satisfait de la qualité produite ?) par rapport aux effets qu'ils en attendent.

La diffusion de l'information doit être conçue en fonction de ce but principal d'aide à la décision.

5.2. La stratégie de communication

La stratégie de diffusion de l'information définie au départ par le projet prévoyait, outre la rédaction du présent rapport de synthèse, la rédaction d'un guide technique à l'usage des agriculteurs. Les résultats obtenus par le projet ne permettent pas de donner des recettes infaillibles pour une utilisation optimale des composts, mais le projet n'aura servi à pas grand chose si l'on ne propose que de la réflexion ou des discussions à des agriculteurs qui demandent des clés pour l'action. Il faut donc trouver un compromis acceptable entre le pôle scientifique et technique et le pôle pratique.

Le guide devrait contenir plusieurs parties.

- une introduction qui rappelle la place des composts dans la perspective de la gestion de l'ensemble des matières organiques en agriculture biologique (rotations, légumineuse, engrais verts, fumiers, lisiers...),

- une première partie rapide sur les grands principes du processus 'compostage' et sur les paramètres permettant de suivre ce processus de manière concrète (température et humidité). Les facteurs techniques de réussite du compostage seront largement abordés dans cette partie.
- une seconde partie présentera la hiérarchie de la classification des composts de fumiers proposée par le projet : par un système de clé de détermination et de renvois, le guide doit accompagner l'agriculteur dans l'identification du type de compost qu'il fabrique :
 - un premier niveau concernera la stratégie du compostage,
 - un second niveau le degré de maturité du compost,
 ces deux premiers niveaux doivent aboutir à l'estimation d'un taux de minéralisation de l'azote l'année de l'apport. Des indications seront données pour réaliser des analyses complémentaires. De plus, on donnera les références des types de compost pouvant se rapprocher les uns des autres, les limites entre certains types pouvant être relativement floues en fonction des conditions de fabrication.
 - un troisième niveau tentera de caractériser la composition des matières premières (type de fumier) et leur influence sur le produit fini. A défaut, on donnera un ordre de grandeur et on conseillera une analyse complémentaire,
 - un quatrième niveau proposera une synthèse de ces trois étapes et donnera des fourchettes de valeurs de disponibilité de l'azote, avec le conseil insistant de vérifier ces valeurs par des analyses (le simple fait d'avoir des fourchettes très larges pourra inciter à faire des analyses)
- une troisième partie présentera une clé de détermination pour les composts de déchets verts, selon le même cheminement que dans la seconde partie,
- une quatrième partie attirera l'attention sur les paramètres pouvant influencer la minéralisation des composts au champ. On donnera également quelques exemples d'adaptation de l'utilisation des composts aux besoins des cultures, dans différents systèmes de production-type ou à partir d'études de cas concrets.

Ce guide devrait être constitué de fiches recto verso présentant une information condensée, facilement transposable et utilisable et comptera au maximum 50 pages.

Le fait d'utiliser une clé de détermination peut présenter deux risques :

- certains agriculteurs peuvent ne pas se reconnaître dans les types décrits,
- certains types risquent d'être trop généralistes pour rendre compte de différences constatées sur le terrain.

Pour pallier à ces problèmes, on propose :

- d'établir des limites floues entre les types et surtout de donner les références de types voisins pour que les agriculteurs puissent s'y retrouver,
- de retourner sur le terrain pour confronter cette typologie aux pratiques existantes dans des fermes non enquêtées (validation et ajustement de la typologie).

Subsiste une dernière interrogation : est-ce que le guide sera lu et consulté ? *ou*, comment assurer sa diffusion et susciter l'intérêt pour son contenu ?

Le projet envisage de développer quelques actions complémentaires pour répondre à cette question.

5.3. Les prolongements du projet

Les clés de la réussite de la diffusion des informations rassemblées par le projet sont selon nous :

- sur le fond : la multiplication des événements autour de la problématique 'compost' (créer l'événement pour cristalliser l'intérêt des agriculteurs, en particulier de ceux qui ont des exigences d'efficacité),
- sur la forme : trouver des moyens de communication adaptés aux attentes des agriculteurs (réflexion-discussion, prise de décision).

On propose ainsi de mettre en place à partir de cet automne une série d'activités de formation, d'animation, de rencontres, de visites techniques, d'échange entre praticiens pour entretenir les discussions au sein de petits groupes constitués ou dynamiques. Ce sera l'occasion de faire circuler un maximum d'informations techniques sur la fabrication des composts et d'obtenir un retour des agriculteurs pour mieux cerner le contenu du guide (traits saillants, validation de la typologie). On insiste sur le caractère oral et interpersonnel de ces rencontres qui sera déterminant pour une bonne circulation de l'information.

Ces actions de terrains serviront également à préparer la tenue d'un colloque * que l'OPABA, en collaboration avec l'IfuL, a souhaité organiser pour la fin du mois de novembre. Ce colloque aura pour thème 'la fabrication et utilisation des composts de fumiers et de déchets verts'. Il rassemblera des spécialistes de la question venant de différents pays (Allemagne, Belgique, France, Suisse), se tiendra sur une journée et sera ouvert principalement aux agriculteurs, ainsi qu'aux techniciens et conseillers, aux partenaires des projets et aux représentants des collectivités territoriales.

Enfin, en complément, on pourrait proposer une campagne d'analyse pour affiner la typologie (cf. § 4.3.9) et pour apporter un conseil plus pointu aux agriculteurs intéressés par la thématique compost et azote.

**) ce colloque a eu lieu le 20 novembre 2001 à Mittelwihr (68) et a réuni environ 200 participants. Les documents remis aux participants sont disponibles sur demande auprès du secrétariat de l'ITADA.*

6. Perspectives et conclusions

Proposition d'une clé de détermination pour prédire le potentiel de minéralisation de l'azote des composts

Ce travail a permis de réunir une somme d'informations sur le thème de la fabrication et de l'utilisation des composts.

On s'est efforcé de relier le mieux possible ces éléments pour présenter une approche qualitative globale.

Fort de ces acquis, on peut proposer une clé de détermination du potentiel de minéralisation des composts, à partir d'éléments relativement simples et surtout objectifs. Cette clé de détermination demande à être étayée par des références plus nombreuses que celles que le projet a pu rassembler.

Elle doit en outre être utilisée en complément de la typologie basée elle aussi sur des critères simples, mais plus subjectifs et conduisant à de grandes variations dans la fabrication des composts. Ces variations sont parfois difficiles à cerner au travers de la discussion.

Le principe de la clé de détermination est d'identifier en premier lieu si le produit est toujours en activité. On cherche ainsi à connaître la stabilité, à partir d'un indicateur comme le rapport C/N (ou encore comme la mesure de la température ou du taux de respiration). C'est la **première étape**.

1^{er} étape : détermination de la stabilité du produit

RAPPORT C/N, OU AUTRE INDICATEUR DE STABILITE	STABILITE
< 15	<i>STABLE</i>
12-15	<i>EN TRANSITION</i>
> 15	<i>EN ACTIVITE</i>

Un produit instable mérite encore d'être composté. Un produit stable peut avoir différents degrés de maturité.

On cherche à connaître ce niveau de maturité dans une **deuxième étape** et grâce à des indicateurs adaptés (rapport $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, qui peut toutefois être erroné s'il y a du lessivage en fin de compostage ; le mieux serait alors d'utiliser un indice d'humification facile à mesurer en routine de laboratoire).

2^{ème} étape : détermination du degré de maturité

RAPPORT $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	INDICE D'HUMIFICATION	DEGRE DE MATURETE
très élevé	très élevé	<i>TRES MUR</i>
élevé	élevé	<i>MOYENNEMENT MUR</i>
moyen	moyen	<i>DEBUT DE MATURETE</i>
faible	faible	<i>IMMATURE</i>
très faible	très faible	<i>TRES IMMATURE</i>

En associant ces deux premiers paramètres à un troisième comme la CEC, on dispose d'une série de critères pour évaluer les qualités des transformations biochimiques qui ont eu lieu pendant le compostage et en particulier pendant la phase de maturation si elle a réellement existé. C'est la troisième étape qui consiste à qualifier les composés humiques produits au cours du compostage.

3^{ème} étape : qualité des composés humiques et vitesse de minéralisation du carbone et de l'azote

STABILITE	DEGRE DE MATURITE	CEC ^a (méq/kg)	COMPORTEMENT ET VITESSE	TYPE DE COMPOST ^b	% N DISPONIBLE DANS L'ANNEE
<i>STABLE</i>	<i>TRES MUR</i>	200-600	minéralisation lente	COMP ou RET vieux et couverts	10-15%
<i>STABLE</i>	<i>TRES MUR</i>	100-200, voire plus	minéralisation très lente	COMP ou RET vieux et humides	5-10%
EN TRANSITION VOIRE STABLE	MOYENNEMENT MUR	200-600	minéralisation très rapide	INT	25-35%
<i>STABLE</i>	<i>MOYENNEMENT MUR</i>	100-200, voire plus	minéralisation rapide	COMP ou RET d'âge moyen	~ 15-20%
<i>STABLE</i>	<i>DEBUT DE MATURITE</i>	< 100	beaucoup d'azote minéral	FD	jusqu'à 65% et plus
EN ACTIVITE VOIRE EN TRANSITION	DEBUT DE MATURITE	100-200	immobilisation ou minéralisation	COMP jeune ou RET très jeune	~ 0%
<i>EN ACTIVITE</i>	<i>IMMATURE</i>	< 100	immobilisation	FD jeune	< 0%
<i>EN ACTIVITE</i>	<i>TRES IMMATURE</i>	< 100	immobilisation	FD très jeune	<< 0%

a : ces références sont extraites de commentaires de résultats d'analyses effectuées par le LAMS-21 pour l'OPABA (campagne d'analyse de composts en 1992/1993) et de LEVI-MINZI *et al.* (1986)

b : voir le Tableau 24 pour la signification des types

NB : les composts les plus fréquemment observés par le projet au cours de l'enquête sont ceux du centre du tableau, entourés en gras

NB' : la typologie des déchets verts présentée dans le § 4.2. serait une clé de détermination relativement acceptable, pour peu qu'elle soit complétée par quelques données analytiques

En appréhendant la nature de ces composés, on dispose de quelques éléments pour prédire leur comportement de minéralisation.

Ces conclusions demandent confirmation. Le lien entre tous ces éléments (stabilité → degré de maturité → voie d'humification → comportement) n'est pas établi de façon continue par les auteurs. Une démarche d'ensemble devrait permettre de renforcer ces hypothèses.

7. Bibliographie

- ATALLAH T., 1993. Conditions de valorisation du fumier et risques de lixiviation de l'azote. Cahiers Agricultures. 2, 26-35
- ATALLAH T., ANDREUX F., CHONE T., GRAS F., 1995. Effect of storage and composting on the properties and degradability of cattle manure. Agriculture, Ecosystems and Environment. 54, 203-213
- AUBERT C., 1998. Le compostage des fumiers de volailles. *In* Le compostage à la ferme des effluents d'élevage. Faisabilité technique et valorisation agronomique. Recueil des interventions du 15 décembre 1998. Paris. ACTA / ADEME / Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 45-55.
- BALESDENT J., CHENU C., LECLERC B., 2000. Quelques avancées récentes sur la dynamique des matières organiques dans les sols. Echo-MO. 25, 3-4
- BERNAL M.P., KIRCHMANN H., 1992. Carbon and nitrogen mineralization and ammonia volatilization from fresh, aerobically and anaerobically treated pig manure during incubation with soil. Biol Fertil Soil. 13, 135-141
- BERNAL M.P., SANCHEZ-MONEDERO M.A., PAREDES C., ROIG A., 1998. Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil. Agriculture, Ecosystems and Environnement. 69, 175-189
- BERNER A., SCHERRER D., ALFÖLDI T., 1997. Stickstoffeffizienz von unterschiedlicher aufbereiteten Misten in einer Ackerfruchtfolge auf Lösslehm. Posterbeitrag zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau. 3. Und 4. März 1997. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn
- BODET J.M., HACALA S., AUBERT C., TEXIER C., 2001. Fertiliser avec les engrais de ferme. INSTITUT DE L'ELEVAGE, ITAVI, ITCF, ITP, 104 p.
- BRUN G., 1997. Matières organiques des sols. Session de formation : Valeur Agronomique des Composts. 17 au 21 mars 1997. Trie-Château. APCA/ADEME.
- CARPENTER-BOGGS L., RENAGOLD J.P., KENNEDY A.C., 2000. Effects of biodynamics preparations on compost development. Biological Agriculture and Horticulture. 17, 313-328
- CASTELLANOS J.Z., PRATT P.F., 1981. Mineralization of manure nitrogen. Correlation with laboratory indexes. Soil Sci. Soc. Amer. J. 45, 354-357
- CHÈNEBY D., NICOLARDOT B., GODDEN B., PENNINGKX M., 1994. Mineralization of composted 15N-labelled farmyard manure during soil incubations. Biological Agriculture and Horticulture. 10, 255-264.
- CHENU C., BALESDENT J., LECLERC B., 2000. La protection physique et l'autoprotection des matières organiques du sol. Echo-MO. 24, 3-4
- CITTERIO B., CIVILINI M., RUTILI A., PERA A., DE BERTOLDI M., 1987. Control of a composting process in bioreactor by monitoring chemical and microbial parameters. *In* : DE BERTOLDI M., FERRANTI M.P., L'HERTMITE P. and ZUCCONI F. (Eds), Compost : Production, Quality and Use. Elsevier Applied Science, London, pp. 633-642

- COOPERBAND L.R., 2000. Composting : art and science of organic waste conversion to a valuable soil resource. *Laboratory Medecine*. 31-5, 283-289
- CREPAZ C., AMOR K., RENNER M., INSAM H., 1997. Kompostierung von Stallmist. Ergebnisse aus mehrjährigen Praxisversuchen. *Der Forderungsdienst*. 45: 4, 25-30
- DAS K., KEENER H.M., 1997. Moisture effect on compaction and permeability in composts. *Journal of Environmental Engineering*. March 1997, 275-281
- DEWES T., 1995. Nitrogen losses from manure heaps. *Nitrogen Leaching in Ecological Agriculture*. 309-317
- DEWES T., AHRENS E., WILLING O., 1991. Sickersaft-Austrag und Stickstoff-Fracht aus Mistmieten. *Journal of Agronomy & Crop Science*. 166, 145-151
- Dictionnaire encyclopédique Larousse, 1979. Paris, 1515 p.
- DRIEUX T., 1993. Le compostage à la ferme : approche technique et économique. ABCDE, Cuma Ouest, Rennes
- DUNST G., 1991. Kompostierung. Anleitung für die Kompostierung am Bauernhof, im Garten und im kommunalen Bereich. Leopold Stocker Verlag. Graz, Stuttgart.
- EGHBALL B., POWER J.F., GILLEY J.E., DORAN J.W., 1997. Nutrient, carbon and mass loss during composting of beef cattle feedlot manure. *J. Environ. Qual.* 26, 189-193
- FINSTEIN M.S., STROM P.F., HOGAN J.A., COWAN R.M., 1999. Composting on mars or the moon : I. comparative evaluation of process design alternatives. *Life Support & Biosphere Science*. 6, 169-179
- GAGNON B., SIMARD R.R., 1999. Nitrogen and phosphorus release from on-farm and industrial composts. *Canadian Journal of Soil Science*. 79, 481-489
- GERKE H.H., ARNING M., STÖPPLER-ZIMMER H., 1999. Modeling long-term compost application effects on nitrate leaching. *Plant and Soil*. 213, 75-92
- GOBAT J.M., ARAGNO M., MATTHEY W., 1998. Les sol vivant. Bases de la Pédologie. Presse polytechniques Universitaires Romandes. Collection Gérer l'environnement N° 14. Lausanne, Suisse. 519 p.
- GODDEN B., 19???. Résultats des expérimentations sur le compostage des fumiers. Unité de physiologie et écologie microbienne, Section Interfacultaire d'Agronomie. Université libre de Bruxelles. 32 p.
- GODDEN B., 1995a. La gestion des effluents d'élevage. *N.S.T.* 13-1, 131-134
- GODDEN B., 1995b. Le compostage : processus, production et utilisation. In : *Compostage des déchets organiques*, UGET 15, RED/ATEAR-Nord, rue des Potiers, 2, 6717 Attert – juin 1995, Belgique, 6-12
- GODDEN B., PENNINCKX M., 1987. Biochemistry of manure composting : lignin biotransformation and humification. In: de BERTOLDI M., FERRANTI M.P., L'HERTMITE P. and ZUCCONI F. (Eds), *Compost : Production, Quality and Use*. Elsevier Applied Science, London, pp. 238-244

GODDEN B., PENNINGCKX M., PIÉRARD A., LANNOYE R., 1983. Evolution of enzyme activities and microbial populations during composting of cattle manure. *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 17, 306-310

GOLUEKE C.G., 1992. Bacteriology of composting. *BioCycle*. January 1992, 55-57

GRUNDMANN J., 1990. Zusätze zur Kompostierung. Der Einfluss auf die Veränderung der organischen Substanzen bei der Kompostierung von Biomüll. *Deutscher Gartenbau*. 35, 2204-2207

HABIB Z., GRÉGOIRE J.L., 1998. Chantiers de compostage et d'épandage. Organisation collective efficace en CUMA pour des coûts individuels réduits. *In* Le compostage à la ferme des effluents d'élevage. Faisabilité technique et valorisation agronomique. Recueil des interventions du 15 décembre 1998. Paris. ACTA / ADEME / Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 96-102.

HACALA S., 1998. Le compostage du fumier en exploitations d'élevage. *In* Le compostage à la ferme des effluents d'élevage. Faisabilité technique et valorisation agronomique. Recueil des interventions du 15 décembre 1998. Paris. ACTA / ADEME / Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 28-44.

HACALA S., FARRUGGIA A., LE GALL A., PFIMLIN A., 1999. Le compost, mieux qu'un engrais de ferme. *Technipel éditions*, 12 pp.

HADAS A., PORTNOY R., 1994. Nitrogen and carbon mineralization rate of composted manures incubated in soil. *J. Environ. Qual.* 23, 1184-1189

HAMMOUDA G.H.H., ADAMS W.A., 1987. The decomposition, humification and fate of nitrogen during the composting of some plant residues. *In* : DE BERTOLDI M., FERRANTI M.P., L'HERMITE P. and ZUCCONI F. (Eds), *Compost : Production, Quality and Use*. Elsevier Applied Science, London, pp. 245-253

HARTZ T.K., MITCHELL J.P., GIANNINI C., 2000. Nitrogen and carbon mineralization dynamics of manures and composts. *Horticultural Science*. 35(2), 209-212

HÉBERT M., KARAM A., PARENT L.E., 1991. Mineralization of nitrogen and carbon in soils amended with composted manure. *Biological Agriculture and Horticulture*. 7, 349-361

HELLER W.E., 1999. Stickstoff-Mineralisierung aus Komposten im Brutversuch. *Agrarforschung* 6(2), 75-77

HELLMANN B., ZELLES L., PALOJÄRVI A., BAI Q., 1997. Emission of climate-relevant trace gases and succession of microbial communities during open-windrow composting. *Applied and Environmental Microbiology*. 63-3, 1011-1018

HERODY Y., 1992. Guide BRDA des engrais et fumures. Fascicule 2 : les engrais organiques. BRDA – Charency.

HLBS (Hauptverband der Landwirtschaftlichen Buchstellen und Sachverständigen e. V.), 1991. Betriebswirtschaftliche Nachrichten für die Landwirtschaft, März 1991, Verlag Pflug und Feder.

HONG, J.H., MATSUDA, J., IKEUCHI, Y., 1984. Aerobic windrow composting of mixed dairy manure with rice straw. *J. Fac. Agr. Hokkaido Univ.* 62, pt.1.

- INSAM H., 1990. Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime. *Soil Biology & Biochemistry*. 22: 4, 525-532
- INSAM H., AMOR K., RENNER M., CREPAZ C., 1996. Changes in functional abilities of the microbial community during composting of manure. *Microbial Ecology*. 31: 1, 77-87
- KAISER J., 1996. Modelling composting as a microbial ecosystem : a simulation approach. *Ecological Modelling*. 91, 25-37
- KIRCHMANN H., BERNAL M.P., 1997. Organic waste treatment and C stabilization efficiency. *Soil Biol. Biochem.* 29(11/12), 1747-1753.
- KIRCHMANN H., LUNDEVALL A., 1998. Treatment of solid animal manures : identification of low NH₃ emission practices. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 51, 65-71
- KIRCHMANN H., WITTER E., 1989. Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition. *Plant and Soil*. 115, 35-41
- KISLIG K., 1989. Un premier jugement agronomique sur la pratique des dépôts de fumiers en plaine. Mémoire de stage de 2^{ème} année d'ingénieur. Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois, IAAL, INRA-SAD Mirecourt.
- KÖRNER I., BRILSKY H., JENSEN U., RITZKOWSKI M., STEGMANN R., 1997. Possibilities of the regulation of the composting process to optimize the nutrient composition of compost. *Organic Recovery & Biological Treatment (ORBIT) into the next millenium*. International conference. 3-5 september 1997. Harrogate, UK. 1-18
- KÖRNER I., STEGMANN R., 1997. Influence of biowaste composition and composting parameters on the nitrogen dynamics during composting and on nitrogen contents in composts. *International symposium on composting and use of composted materials for horticulture*. 5-11 April 1997. Ayr, Scotland UK. 97-110
- LARNEY F.J., OLSON A.F., CARCAMO A.A., CHANG C., 2000. Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and in summer. *Bioresource Technology*. 75, 139-148
- LECLERC B., 1995. Guide des matières organiques, Fertilité des sols - Ressources - Gestion - Fiches techniques. ITAB - Paris
- LECLERC B., 2001. Guide des matières organiques. Deuxième édition, Tome I. ITAB – Paris.
- LE HOUEROU DECLERCQ B., 1992. Les dépôts de fumier au champ : pertes en azote par percolation des jus sous les tas. UGET 13 La gestion des effluents d'élevage R.E.D. Journée transfrontalière de l'environnement, 18 novembre 1992. Luxembourg. 199-211
- LEVI-MINZI R., RIFFALDI R., SAVIOZZI A., 1986. Organic matter and nutrients in fresh manure and mature farmyard manure. *Agricultural Wastes*. 16, 225-236
- LOPEZ-REAL J., BAPTISTA M., 1996. A preliminary comparative study of three manure composting systems and their influence on process parameters and methane emissions. *Compost Science and Utilization*. 4(3), 71-82
- LYNCH J.M., 1987. Lignocellulolysis in composts. In : DE BERTOLDI M., FERRANTI M.P., L'HERMITE P. and ZUCCONI F. (Eds), *Compost : Production, Quality and Use*. Elsevier Applied Science, London, pp. 178-189

- MAHIMAIRAJA S., BOLAN N.S., HEDLEY M.J., 1995. Denitrification losses of N from fresh and composted manures. *Soil. Biol. Biochem.* 27(9), 1223-1225
- MARTINS O., DEWES T., 1992. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes. *Bioresource Technology.* 42, 103-111
- MASSON, P., 2001. Guide pratique de la bio-dynamie à l'usage des agriculteurs. Les dossiers techniques du mouvement du culture bio-dynamique. Colmar, 36 pp.
- MICHEL F., 1999. Managing compost piles to maximize natural aeration. *BioCycle.* March 1999, 56-58
- MICHEL Jr F.C., FORNEY L. J., HUANG A. J.-F., DREW S., CZUPRENSKI M., LINDEBERG J. D., ADYNARAYANA REDDY C., 1996. Effects of turning frequency, leaves to grass mix ratio and windrows vs. pile configuration on the composting of yard trimmings. *Compost Science & Utilization.* 4-1, 26-43
- MOREL C., 1989. Les sols cultivés. Tec & Doc Lavoisier, Paris. 373 p.
- MORVAN T., DACH J., 1998. Estimating ammonia losses during the composting of farmyard manure, using closed dynamic chambers. Ramiran 98 posters presentations. 8th International Conference on Management Strategies for Organic Waste Use in Agriculture. 26-29 mai 1998. Rennes, France. 261-265
- MUSTIN M., 1987. Le compost / Gestion de la matière organique. Editions Francois DUBUSC - Paris
- OTT P., 1991. The composting of farmyard manure with mineral additives and under forced aeration. *Ecology and Farming.* 3, 10-14
- PARÉ T., DINEL H., SCHNITZER M., DUMONTET S., 1998. Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper. *Biol. Fertil. Soils.* 26, 173-178
- ROBIN D., 1997a. Intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de matière organique stable après décomposition dans le sol et classification des produits organominéraux. *Agronomie.* 17, 157-171
- ROBIN D., 1997b. Intérêt de la caractérisation biochimique de la matière organique pour l'évaluation et la classification des fertilisants organiques. *Echo MO.* 6, 3-4
- SHAW K., DAY M., KRZYMIEN M., MOHMAD R. et SHEEHAN S., 1999. The role of feed composition on the composting process. I. Effect on composting activity. *J. Environ. Sci. Health.* A34(6), 1341-1367.
- SHEPHERD M., PHILIPPS L., BHOGAL A., 2000. Manure management on organic farms : to compost or not to compost ? Proceedings of the 13th international IFOAM scientific conference. 28-31 August 2000. Alföldi T., Lockeretz W. and Niggli U. Eds. 50-53
- SIEBERT S., 19???. Forschungsprojekt Stickstoffnachlieferung aus Komposten. 6-7.
- SOLTNER D., 1996. Les bases de la production végétale. Tome I : le sol et son amélioration. Editions Sciences et Techniques Agricoles. 21^{ème} édition. S^{te}-Gemmes-sur-Loire. 466 pp.

- SOMMER S.G., DAHL P., 1999. Nutrient and carbon balance during the composting of deep litter. *J. agric. Engng Res.* 74, 145-153
- SOMMER S.G., DAHL P., ROM H.B., MOLLER H.B., 19???. Emission of ammonia, nitrous oxide, methane and carbon dioxide during composting of deep litter. 157-169
- STROM P.F., 1985a. Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid-waste composting. *Applied and Environmental Microbiology.* 50-4, 899-905
- SVENSSON K., 1994. Kompostering av fast stallgödsel med och utan biodynamiska preparat 502-507. Examensarbete 1994:9. Institutionen för mikrobiologi. Sveriges lantbruksuniversitet. Uppsala
- TAMURA T., KATAYAMA T., HAGA K., 1999. Emission patterns of malodorous compounds and greenhouse gases from the pile-type composting of cattle manure. *Animal Science Journal.* 70(4), 235-239
- TEXIER C., 1998. Le compostage des litières et des fumiers de porcheries. Recueil des interventions du 15 décembre 1998. Paris. ACTA/ADEME/Ministère de l'Agriculture et la Pêche : 56-71.
- TEXIER C., LEVASSEUR P., VAUDELET J.C., 2000. Remplacement de la paille par de la sciure ou des copeaux de bois, en porcherie d'engraissement : influence sur le compostage des litières. *Journées Rech. Porcine en France.* 32, 77-82.
- THAKUR S.K., SHARMA C.R., 1998. Effect of rock phosphate enrichment and *Azotobacter* inoculation on the transformation of nitrogen and phosphorus during composting. *Journal of the Indian Society of Soil Science.* 46-2, 228-231
- THOMSEN I.K., 2000. C and N transformation in ¹⁵N cross-labelled solid ruminant manure during aerobic and anaerobic storage. *Bioresource Technology.* 72, 267-274
- TUOMELA M., VIKMAN M., HATAKKA A., ITÄVAARA M., 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment : a review. *Bioresource Technology.* 72, 169-183
- TYSON S.C., CABRERA M.L., 1993. Nitrogen mineralization in soils amended with composted and uncomposted poultry litter. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24(17&18), 2361-2374
- VEEKEN A., NIEROP K., DE WILDE V., HAMELERS B., 2000. Characterisation of NaOH-extracted humic acids during composting of a biowaste. *Bioresource Technology.* 72, 33-41
- VUORINEN A.H., SAHARINEN M.H., 1998. Effect of process conditions on composting efficiency and nitrogen immobilization during composting of manure in a drum composting system. *Proc. IS Composting and use Composted Materials.* Ed. R.A.K. Szmidt. Acta Hort. 469, ISHS. 89-95
- WALTHER U., 2001. Stickstoffeffizienz von Stallmist in langjährigen Versuchen. In Neue Erkenntnisse zu Stickstoffflüssen im Ackerbau. FAL-Tagung vom Freitag 6. April 2001. Zürich-Reckenholz.
- WIART J., 1997. Qualité, maturité et efficacité agronomique des composts de déchets verts : synthèse de références. Session de formation : Valeur Agronomique des Composts. 17 au 21 mars 1997. Trie-Château. APCA/ADEME.

WILLSON G.B., HUMMEL J.W., 19???. Conservation of nitrogen in dairy manure during composting. *Managing livestock wastes*. 490-491, 496

WITTER E., KIRCHMANN H., 1989. Effects of addition of calcium and magnesium salts on ammonia volatilization during manure decomposition. *Plant and Soil*. 115, 53-58.

ZIEGLER D., HÉDUIT M., 1991. *Engrais de fermes. Valeur fertilisante, gestion, environnement*. ITP, ITCF, ITEB, France. 35 pp.

8. Résumé

1. Structure du projet

1.1. Partenaires institutionnels

Chef de Projet : OPABA

(Organisation Professionnelle de l'Agriculture Biologique en Alsace)
Maison de l'Agriculture
2, rue de Rome
F - 67 309 SCHILTIGHEIM

Partenaire : IfUL

(Institut für umweltgerechte Landwirtschaft)
D - MÜLLHEIM

Autres participants : FiBL

(Forschungsinstitut für biologischen Landbau)
CH - FRICK

Coordination :

Secrétariat ITADA
F - COLMAR

1.2. Mise en œuvre du projet et rédaction du rapport final

Joseph WEISSBART (OPABA) : formulation, démarrage et suivi du projet, relecture du rapport final

Benjamin LAMMERT (OPABA) : coordination et mise en œuvre du projet, rédaction du rapport final

Christine GROSCHUPP (IfUL) : mise en œuvre du projet, conduite de l'essai, participation à la rédaction du rapport final

1.3. Durée du Projet :

01.09.1999 - 31.12.2001

2. Problématique et objectifs

Le compostage des fumiers et des déchets verts conduit à une restructuration de l'azote sous forme organique. La dynamique de libération de l'azote lorsque ces produits sont mis en terre est mal connue. Ce défaut de connaissance peut conduire à des sur-fertilisation ou à une inadéquation entre la disponibilité de l'azote dans le sol et les besoins des plantes. Les risques de lixiviation de nitrates, s'ils sont faibles, existent cependant et sont à l'heure actuelle mal évalués.

Le projet a pour objectifs :

- de mieux cerner la dynamique de libération de l'azote des principaux engrais de ferme et déchets verts compostés disponibles en agriculture biologique dans le bassin rhénan
 - d'établir une corrélation entre les mesures et tests possibles en laboratoire avec la disponibilité des éléments fertilisants.

Les résultats attendus par ce projet sont :

1. l'amélioration des conseils de fertilisation tant sur le plan de la préparation des engrais de ferme que sur leur utilisation
2. l'amélioration de l'adéquation entre les apports et les besoins des cultures, sans risques de pertes par lessivage

3. l'évaluation des coûts économiques des pratiques actuelles des producteurs et l'identification de solutions de préparation et d'apport d'amendements qui présentent le meilleur intérêt économique en fonction de chaque situation

3. Matériel et méthodes

Sources

Le projet disposait de quatre type de sources :

- la littérature scientifique et technique
- des investigations approfondies en laboratoire d'analyse pour 6 composts
- des enquêtes auprès de fabricants et d'utilisateurs de compost (fumier et déchets verts)
- un essai au champ avec un compost de déchets verts

Approche méthodologique et conceptuelle

Pour arriver à caractériser la disponibilité de l'azote des composts, le projet s'est appuyé sur un certain nombre d'hypothèses :

- pour des produits organiques comme les composts, la libération de l'azote est fortement corrélée à la minéralisation du carbone,
- le compostage est un processus qui vise à la stabilisation de l'azote dans des composés humiques de stabilité variable,
- afin de pouvoir discriminer des composts selon le critère 'disponibilité de l'azote', il faut pouvoir caractériser les composés humiques et leurs conditions de fabrication
- ce qui détermine la qualité des compost (composition totale, types de composés humiques, comportement de minéralisation), ce sont les matériaux de départ et le procédé de fabrication du compost.

La méthode retenue par le projet a alors été de construire des typologies pour discriminer différents types de composts selon leur comportement. Dans ce cheminement, nous avons été confrontés à quelques problèmes méthodologiques :

- la discontinuité des sources dans la littérature : les deux aspects de la question - fabrication et minéralisation des composts - ne sont pas traités par les mêmes auteurs. Le lien entre conditions de fabrication de composés humiques et dynamique de libération de l'azote de ces mêmes composés ne pouvait donc pas être établi sur la base de preuves expérimentales,
- aucune expérimentation n'était initialement prévue par le projet pour pallier à cette carence (nous avons malgré tout pu réaliser un essai pour un compost qui a été étudié de façon approfondie en laboratoire),
- le recours aux enquêtes pour bénéficier de l'expérience de praticiens qui ont pu observer un lien entre fabrication et utilisation était délicat dans la mesure où les informations peuvent être énoncées de manière subjective et où l'interprétation de l'enquêteur peut peser sur les résultats.

Afin de limiter de trop grands écarts d'interprétation, des choix ont dû être faits pour structurer au maximum l'approche. Après une première revue bibliographique, un modèle de connaissance sur le fonctionnement du processus de compostage a été proposé. La première partie des résultats (§ 4.1.) rassemble tous les éléments de bibliographie concernant la fabrication des composts selon cette approche. Les seconde et troisième parties des résultats (§ 4.2. et § 4.3.) se basent sur ces éléments scientifiques et techniques pour proposer une classification des composts observés chez les fabricants (respectivement plate-forme de déchets verts et agriculteurs)

dans la zone du Rhin Supérieur. Les apports de la littérature concernant la minéralisation des composts viennent soutenir l'édification de ces typologies. Des explications pour faire le lien entre conditions de fabrication des composts (et des composés humiques) et vitesse potentielle de minéralisation de ces mêmes composts sont ainsi proposées. Enfin, un modèle de connaissance sur le fonctionnement d'une parcelle cultivée recevant du compost a été construit à partir des dires des agriculteurs utilisateurs de compost. Ce modèle, renforcé par des données scientifiques, permet d'apporter des nuances au potentiel de minéralisation proposé par la typologie.

La principale critique méthodologique que peut souffrir ce travail est le manque de preuves expérimentales (lié à la discontinuité de la bibliographie) et le caractère partiellement subjectif de certaines sources (enquêtes). L'interprétation des auteurs de ce rapport a ainsi certainement pesé sur les conclusions, reste à évaluer le risque et la gravité des erreurs contenues dans ces interprétations. Des propositions sont avancées en dernière partie (§ 6.) pour la mise au point d'outils analytiques plus objectifs de caractérisation des composts.

4. Résultats et discussions

4.1. Le compostage : rappels sur le fonctionnement et les objectifs du processus

4.1.1. Définition du processus de compostage et caractérisation générale des transformations de la matière organique au cours du compostage

'Le compostage est un processus de décomposition et de transformation « contrôlés » de déchets organiques biodégradables, d'origine végétale et/ou animale, sous l'action de populations microbiennes diversifiées évoluant en milieu aérobie. Il est caractérisé par :

- *une production de chaleur au début du processus (température couramment observées comprises entre 40 et 70°C) consécutive à la forte activité des microorganismes aérobies décomposeurs (oxydations thermiques),*
- *une perte de masse et de volume, due à la perte de matière (CO₂ et H₂O produits à partir des molécules de matières organiques), à l'évaporation de l'eau sous l'effet de la chaleur et au tassement (perte de structure),*
- *une transformation des matières premières organiques par voies chimique, biochimique (microbienne) et physique (changement de couleur, d'aspect, de granulométrie), notamment avec la production de composés humiques stabilisés.*

Le compost, produit résultant du compostage, se différencie des matières premières par :

- *une structure homogène (dans un compost de fumier par exemple, on ne distingue plus les débris végétaux ni les débris animaux facilement dégradables),*
- *la stabilité des matières organiques qui le composent, d'autant plus importante que le compost est évolué (richesse en composés humiques),*
- *un assainissement partiel par destruction des germes pathogènes, des parasites animaux, des graines et des organes de propagation des végétaux,*
- *l'absence d'odeurs désagréables.'*

4.1.2. Paramètres de suivi et de compréhension du processus de compostage

Parmi les paramètres physiques chimiques et biologiques qui évoluent au cours du compostage, on décrit ceux qui ont le plus d'influence sur le déroulement du processus :

- **l'aération du tas compost** : les conditions aérobies indispensables au compostage sont obtenues en faisant attention à la fois à la structure des matériaux de départ, à la taille et à la forme de l'andain, à son orientation par rapport aux vents dominants et à son taux d'humidité. Ces paramètres (en particulier la structure et l'humidité) peuvent évoluer dans le temps et créer des conditions anaérobies. Une intervention (par exemple un retournement) peut alors s'avérer nécessaire pour rétablir les conditions aérobies du compostage ;
- **l'humidité** : l'humidité optimale varie en fonction du substrat ; on trouve dans la littérature des valeurs allant de 45 à 70% en poids. Certains auteurs recommandent en règle générale des valeurs de 55 à 65% d'humidité en poids ;
- **la température** : c'est un indicateur à manier avec précaution pour le suivi des transformations et de l'activité des microbes dans le tas de compost, car il amalgame l'activité des microorganismes avec les propriétés thermiques (diffusion, convection) du tas de compost. Cependant, il constitue la principale preuve que l'activité biologique est bien lancée au début du compostage ;
- **la structure du tas de compost** : elle évolue en fonction du type de substrat mis à composter et de la vitesse de la dégradation de la matière organique. L'effondrement et le tassement du tas de compost seront donc plus ou moins rapide et important. Cette situation réduit la porosité et donc la circulation de l'air et risque de bloquer le processus de compostage. Une intervention peut alors être nécessaire pour rétablir les conditions aérobies (retournement) ;
- **le rapport C/N** : dans une approche très pratique, on préconise un rapport C/N de 25 à 35, à condition que les proportions de carbone facilement dégradable soient compatibles avec les quantités d'azotes rapidement disponibles. Dans la pratique, on arrive à distinguer les matériaux qui sont compostables de ceux qui ne le sont pas, et le paramètre C/N n'est alors qu'un critère parmi d'autres pour qualifier la « compostabilité » d'un substrat.
- **évolution des communautés microbiennes** : pour comprendre et agir sur le compostage, il faut toujours garder à l'esprit que la grande majorité des transformations qui ont lieu au cours de ce processus sont le résultat de l'activité des microbes. On distingue usuellement quatre phases microbiennes différentes au cours du compostage. Pendant la **première phase**, des microorganismes **mésophiles** trouvant de bonnes conditions de développement (porosité, humidité, C/N...) se développent et dégradent les composés simples (sucres simples, alcools, lipides, acides aminés) et une partie des polymères. La température monte rapidement jusqu'à 30-40°C en quelques heures voire en quelques jours. La **seconde phase** débute lorsque la température devient trop élevée et une flore **thermophile** (essentiellement bactéries et actinomycètes) se développe alors. L'intérêt de cette phase (parfois dénommée pic de chaleur) est l'hygiénisation du substrat ; on atteint des températures de 60 à 70°C au centre des tas. Peu de microorganismes sont capables de soutenir de telles températures, la plupart d'entre eux meurt et certains sporulent. La **troisième phase**, de **refroidissement**, commence suite à l'épuisement du substrat combiné à l'hécatombe de microorganismes. Puis l'activité se stabilise à un niveau plus bas (35-40°C) et l'activité des microorganismes plus spécifiques évolue vers

les processus d'humification et d'incorporation de l'azote dans les composés humiques. C'est la **quatrième phase**, de **maturation**.

En résumé, les recommandations générales que l'on peut faire pour bien suivre le processus de compostage touchent au choix des matériaux de départ, au suivi de la température et au maintien des conditions aérobies. Le **matériau de départ doit être équilibré** (C/N de 25 à 35), **suffisamment humide** sans trop l'être (test à la main), avoir une **bonne structure** et être **capable de la conserver**. Au cours du compostage, il faut vérifier que **l'élévation de température** a bien lieu. La mesurer si possible de façon objective (thermomètre).

4.1.3. Qu'est-ce que « l'humus » ?

• les différents composés humiques

Les composés humiques sont constitués de cycles (aromatiques et organiques) et de chaînes carbonées latérales. L'approche biochimique permet de classer les composés biochimiques en trois grandes familles (en fonction de leur poids moléculaire, de l'importance relative des différents groupes chimiques fonctionnels et de leur solubilité dans différents solvants) :

- les acides fulviques, de petite taille, possèdent un noyau aromatique peu développé et de nombreuses chaînes latérales,
- les acides humiques, de taille intermédiaire, avec des noyaux aromatiques organisés en couche et des chaînes latérales moins prépondérantes que dans le cas des acides fulviques
- les humines, de même structure que les acides humiques, mais plus importantes en taille.

• humus et stabilisation de l'azote

L'azote organique représente la quasi-totalité de l'azote du sol et 50 à 80% de cet azote organique proviendrait des composés humiques. Cet azote se trouve d'abord dans les chaînes latérales sous forme aminée et s'incorpore au fil de l'humification dans le noyau aromatique sous forme aminée ou sous forme hétérocyclique, la seconde forme étant plus difficile à libérer que la première. En effet, l'azote incorporé aux fractions résistantes de l'humine (groupes aromatiques) se révèle stable, donc peu disponible pour les plantes. *A contrario*, l'azote des polypeptides dans les chaînes latérales est plus labile, avec une période moyenne de renouvellement courtes de 25 ans. Ces chaînes latérales ont un faible rapport C/N (~5), et peuvent contenir 10% du carbone du sol. Elles assureraient à elles seules la fourniture d'environ 80% de l'azote minéralisé annuellement. Il nous paraît important de comprendre comment sont fabriquées ces substances humiques, puisque la minéralisation potentielle de l'azote des composts est liée à la nature biochimique de ces composés.

• les voies de l'humification dans les sols naturels : bases pour une analogie

Les processus d'humification dans les tas de compost sont peu connus ; les voies d'humification dans les sols non cultivés ont été plus étudiées. Bien que les conditions de milieu et d'équilibre soient très différentes entre ces deux biotopes, nous avons été guidés par l'intuition que les processus biologiques et biochimiques en jeu ne sont pas radicalement différents et qu'une analogie raisonnable est envisageable.

Les voies d'humification dans les sols produisent les résultats suivants :

- **humus d'héritage** : des composés phénoliques issus de résidus végétaux non décomposés (conditions du milieu défavorables) s'accumulent. On obtient ainsi des humus du type Moder ou Mor, à minéralisation assez lente voire difficile, que l'on trouve dans les sols archaïques (sables, landes, podzols) ;
- **humus géochimiques** : une insolubilisation d'origine géochimique (calcaire, oxyde ou hydroxyde de fer, argile, alumine ou silice) empêche la formation de noyaux importants et de composés à fort poids moléculaire. Les humus sont des Mull calciques, vertiques ou andiques, des humus argileux ou ferriques, relativement instables, mais ayant un fort potentiel de minéralisation en saison ;
- **humus évolués ou de néoformation** : les microorganismes reconstruisent des composés humiques soit à partir de molécules qu'ils ont préalablement hydrolysées, soit à partir de molécules qu'ils trouvent dans le milieu. Ces composés humiques apparaissent alors comme une forme de stockage du carbone et de l'azote. Ces sont en principe des humus ayant une bonne capacité de minéralisation, mais des déséquilibres dans le fonctionnement du sol (climat froid, accumulation excessive de la matière organique) peuvent conduire à une réduction de ce potentiel. Parmi ces humus, on trouve le Mull forestier, typique des sols agricoles productifs, et d'autres types d'humus de qualité un peu moindre (humus microbien, humus faiblement actif, humus fibreux) ;
- **humus hydromorphes** : la présence d'eau entraîne le développement d'une flore cellulolytique anaérobie qui ne produit pas d'humus. La lignine est en partie hydrolysée et des humus du type Anmoor, et Tourbe sont produits ayant une minéralisation lente voire difficile.

• hypothèses sur la fabrication de composés humiques dans les tas de compost

On ne devrait pas parler d'humification pendant le compostage. La fabrication de composés humiques qui a lieu pendant cette transformation est tout au plus une « pré-humification ». Nonobstant, l'audace nous pousse à proposer une qualification des composés humiques produits dans un tas de compost, en fonction des conditions de compostage.

Du fait des conditions favorables à l'activité biologique, on peut penser que la voie principale de formation de composés humiques est du type 'humus de néoformation'. En condition d'excès d'eau, on obtiendrait sans doute plus d'humus fibreux.

Pour des composés plus résistants à la dégradation (cellulose, lignine), la voie de l'héritage pourrait exister, *a fortiori* si des hautes températures inhibent l'activité biologique.

Si des conditions anaérobies trop fortes se développent, on pourrait aboutir à la formation de composés hydromorphes de faible qualité agricole.

Enfin, un léger blocage géochimique pourrait éventuellement apparaître si de forts ajouts de terre ou de calcaire (lithothamne) sont réalisés.

On peut ainsi supposer que la qualité des composés humiques et donc que le potentiel de libération du carbone et de l'azote des compost peuvent être influencés par les conditions de compostage. Ces considérations sont utilisées pour discriminer les compost et pour proposer des facteurs d'explication dans la typologie.

4.1.4. Avantages et inconvénients du compostage

• bilan carbone

On compare trois techniques de gestion d'effluents d'élevage : l'épandage du fumier frais, l'épandage du même fumier après compostage et l'épandage après stockage en tas (fermentation en fumier de dépôt).

Du point de vue du bilan carboné, même si les pertes au cours du compostage sont importantes (en moyenne 45% en masse sont perdus au cours de cette opération), la stabilisation du carbone que permet cette technique donne une meilleure conservation du carbone que l'épandage du fumier en frais. Le fumier de dépôt, du fait de la décomposition anaérobie de la cellulose en sucres simples, offre une moins bonne conservation du carbone que le fumier épandu en frais.

• bilan azote

En comparant les 3 techniques citées dans le bilan carbone, du point de vue de la conservation de l'azote, on obtient le classement suivant (comparaison avec enfouissement dès épandage) :

FUMIER DE BOVINS :	fumier composté	fumier frais	fumier de dépôt
FUMIER DE PORCINS :	fumier frais	fumier de dépôt	fumier composté
FUMIER DE VOLAILLES :	fumier frais	fumier de dépôt	fumier composté

Les pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac sont très élevées pendant le compostage (fortes températures et pH élevé). Ces pertes sont d'autant plus importantes que le substrat est riche en azote et que le rapport C rapidement disponible / N rapidement disponible est déséquilibré. Il existe cependant des méthodes pratiques pour limiter les pertes en azote (bien choisir les matériaux de départ, éviter les retournements intempestifs, contrôler la température, le pH...).

• pertes en éléments fertilisants

Le potassium est très soluble et est très facilement lessivable. On peut en perdre jusqu'à 60% et plus au cours du compostage. Une bonne humidité ainsi qu'un bon mélange (suffisamment de paille) au départ, une protection des tas en cas de pluie permet de rendre ces pertes négligeables.

Les pertes en autres éléments fertilisants sont faibles : ~2% pour le phosphore et ~6% pour le calcium et le magnésium.

• autres avantages agricoles

- réduction des volumes à épandre et meilleur échelonnement dans le temps (épandage toute l'année) ;
- structure grumeleuse et homogène qui permet un épandage mieux réparti, sans mottes ;
- assainissement par rapport aux graines d'adventices ;
- hygiénisation par rapport aux pathogènes et parasites des animaux ;
- destruction totale ou partielle des résidus de produits phytosanitaires ;
- absence d'odeur désagréable aussi bien pendant le compostage que pendant l'épandage ;
- lutte contre les pathogènes du sol et contre les maladies des plantes grâce aux apports de compost.

• inconvénients et limites pour l'agriculteur

- tous les parasites ne sont pas détruits ;
- les éléments trace métallique se concentrent au cours du compostage ;
- l'organisation d'un chantier de compostage présente quelques contraintes (espace, temps, suivi, équipement et disponibilité des équipements) ;
- l'azote est stabilisé dans un compost, sa disponibilité est plus tributaire du fonctionnement du sol sous l'influence du climat.

• bilan environnemental

On compare les trois techniques : épandage du fumier frais, épandage du même fumier après compostage et épandage après stockage en tas (fermentation en fumier de dépôt) selon les pressions sur l'air, l'eau et le sols que chacune exerce :

	COMPOST	FUMIER FRAIS	FUMIER DE DEPOT
PRESSIONS SUR L' AIR			
émission de CH ₄	+	+	-
émission de CO ₂	+	+	-
émission de NH ₃	~	~	-
émission de N ₂ O	+	~	-
PRESSIONS SUR L'EAU			
lessivage de nitrates*	+	+	-
PRESSIONS SUR LES SOLS			
résistance à l'érosion	+	~	-

* risques variables en fonctions du type de sol, du climat et de la date d'apport

LEGENDE : + signifie diminution des pressions (effet positif) et – augmentation des pressions (effet négatif)

Le classement environnemental est le suivant : **compost > fumier frais > fumier de dépôt.**

4.1.5. Comment orienter les transformations de la matière organique au cours du compostage ?

Sous ce titre sont présentées les techniques et les pratiques permettant de contrôler ou pour le moins d'orienter les transformations au cours du compostage.

• choix des matériaux de base

Pour chaque type d'élevage, on donne les matériaux les mieux adaptés pour le compostage, avec quelques conseils sur les ajustements possibles.

Exemple 1 : le fumier de bovin de stabulation libre (litière accumulée) est celui qui se composte le mieux. Dans le cas d'une stabulation entravée, il faudrait faire des ajouts de paille pour réduire l'humidité et donner une bonne structure au fumier avant de le composter.

Exemple 2 : le fumier de cheval, riche en P et en N, est aussi plus sec et pailleux. Il convient soit de bine l'humecter, soit de le mélanger avec, par exemple, du fumier de porcs ou de volailles, ou encore de l'humecter avec du lisier, en faisant toutefois attention à ne pas apporter trop d'azote.

• stockage avant compostage

Le stockage en milieu confiné (litière accumulée) ou en anaérobiose (tas avec les minimum de surface d'échange) permet de limiter l'activité biologique du fumier avant le compostage. Ceci permettra au tas de compost de mieux démarrer (les composés simples nécessaires au démarrage seront encore présents) et de mieux conserver l'azote pendant le stockage.

• taille et forme des andains

Bien que la taille et la forme des tas soient en général déterminées par le matériel utilisé pour la mise en andain, c'est un paramètre très important à contrôler, car il conditionne à la fois les surfaces d'échange gazeux (et donc le maintien des conditions aérobies dans le tas) et les déperditions de chaleur (et donc les plages de

températures qui peuvent se développer à l'intérieur du tas). En principe, la section est de forme triangulaire et la taille devrait dépendre de la taille des particules du matériau à composter : plus les particules sont grandes, plus le tas peut être de grande dimension. Pour des fumiers, on recommande usuellement des tas de 1,5 à 2 mètres de haut pour une base de 2 à 3 mètres.

• retournements et processus d'aération

Les retournements permettent de relancer le processus de compostage en mélangeant le substrat, en insufflant une forte quantité d'oxygène dans le tas ('coup de fouet' à l'activité des microbes) et surtout à redonner une structure au tas pour que l'air puisse bien y circuler par mouvement de convection : le tas en s'échauffant crée un effet de cheminée qui met l'air en circulation, ce qui permet d'alimenter les microorganismes en O₂ et d'évacuer le CO₂ qu'ils produisent. Certains tas ne sont pas retournés. Il faut alors qu'ils aient une bonne structure et qu'ils la gardent pour que le compostage se déroule correctement.

• protection et couverture des andains

Des conditions climatiques difficiles (précipitations élevées) peuvent perturber le déroulement du compostage. Il convient alors de protéger les tas en les couvrant, afin qu'ils ne se gorgent pas d'eau et commencent à fermenter. Si les conditions ne sont pas trop mauvaises (par exemple moins de 200 mm de pluie en 2 mois de compostage), il est préférable de ne pas couvrir le tas pour laisser s'échapper la vapeur d'eau produite par les microorganismes pendant la phase active. Si cette eau reste dans le tas, elle va se condenser, lessiver certains éléments fertilisants (nitrate et surtout potassium) et rendre le tas trop humide.

• maturation

La littérature est parfois floue sur la définition de la maturité. Pour plus de clarté, nous distinguons entre :

- la stabilité d'un compost --> le compost est en phase de refroidissement, il n'est plus en activité,
- la maturité du compost --> un compost stable peut avoir différents degrés de maturité.

La façon la plus répandue pour contrôler le degré de maturité est de laisser faire le temps : plus un compost est vieux, plus il sera, en principe, mûr. Il convient toutefois de protéger le compost des intempéries pendant la phase de maturation (bâche).

La maturité peut être définie par un indice d'humification du compost (par exemple un rapport acides humiques / acides fulviques). L'indice d'humification est quantitatif et ne permet pas d'apprécier le type de composés humiques fabriqués (quelle voie d'humification préférentielle ?). En revanche, cette mesure combinée à une mesure de CEC permettrait de mieux qualifier les composés humiques des composts (voir les propositions faites dans ce sens sous le § 6.).

• additifs

L'effet de divers additifs est présenté sous ce titre : poudre d'argile, poudre de roche, lithothamne, préparations biodynamiques, phosphates de roche.... L'effet de ces additifs n'est pas radical, mais il permet tout de même d'influer sur le déroulement du processus.

4.2. Les composts de déchets verts : typologie et potentiel de libération de l'azote

• hypothèses pour la construction d'une typologie

Pour construire ces typologies, on considère, en s'appuyant sur la littérature, que les matériaux de base ont une influence directe sur la composition du produit fini et que le procédé de compostage détermine avant tout le comportement du compost. En seconde analyse, les matériaux de base, s'ils sont mal choisis, peuvent perturber le bon déroulement du compostage et donc influencer sur le comportement du produit fini. Réciproquement, un procédé de compostage mal maîtrisé peut conduire à plus de pertes et donc influera sur la composition du compost.

En définitive, notre typologie est construite sur la base du premier niveau d'analyse. Elle est donc représentative des acteurs maîtrisant la technique de compostage et s'approchant au mieux de l'optimum technique.

• les déchets verts : un gisement homogène de matière organique

Une étude des résultats d'analyses de composts de déchets verts nous a permis de conclure que les déchets verts compostés sur les plate-formes du Rhin supérieur ne sont pas de nature foncièrement différentes, que leur qualité n'influe pas grandement sur le processus de compostage, tout au plus sur la composition du produit fini.

• des procédés différents ayant une incidence sur les transformations de la matière organique

Les enquêtes chez les exploitants de plate-forme de compostage de déchets verts ont permis d'observer 3 procédés de transformation de déchets verts en compost, dont 2 ont pu être étudiés plus en détail. La taille et la forme des tas, ainsi que la fréquence de retournement permettent de distinguer clairement ces différents procédés. Des hypothèses ont pu être émises sur les transformations de la matière organique au cours du compostage. On obtiendrait des composés de qualité très différents en fonction du procédé adopté. Cependant, au vu des résultats de laboratoire, le procédé de fabrication ne semble pas avoir d'incidence importante sur les qualités agronomiques grossières des produits. Une approche plus fine sur la biochimie des composés humiques produits nous permettrait de trancher. Le tableau suivant propose une comparaison des qualités agronomiques de 2 types de compost de déchets verts sur la base d'un apport de 20 t PB / ha :

	ANDAINS TRIANGULAIRES (TRI)	ANDAINS TABULAIRES (TAB)
VALEUR AMENDANTE	+	++
matière organique	3,4 tonnes (2 à 7,8)	5 tonnes (3,5 à 5,8)
humus stable	1,6 tonnes (0,7 à 3,2)	2 tonnes (1,8 à 2)
VALEUR AZOTE	+	++
azote minéralisé en saison	21 unités (13 à 25)	37 unités (30 à 50)
VALEUR AUTRES FERTILISANTS	++	+
phosphore libéré	100 unités (40 à 160)	60 unités (40 à 100)
potassium libéré	140 unités (80 à 280)	120 unités (80 à 180)
calcium libéré	800 unités ! (300 à 1800)	600 unités ! (440 à 800)
magnésium libéré	160 unités (80 à 320)	80 unités (40 à 140)
quantité d'azote minéralisable l'année de l'apport	~ 18%	10 à 25%

quantité d'azote minéralisable les années suivantes (arrière-effet supposé)	~ 0 ?	??? (libération ou immobilisation ?)
---	-------	---

Les analyses effectuées par le projet ne permettent pas de connaître l'arrière-effet de ces produits.

Ces données sont assorties de quelques conseils d'utilisation pour les 2 principaux types de composts de déchets verts disponibles dans la zone d'étude.

4.3. Les composts de fumiers : typologie et potentiel de libération de l'azote

• premier facteur discriminant : la fréquence de retournement

Forts des résultats obtenus avec les composts de déchets verts, nous avons appliqué la même approche aux composts de fumiers. Les fumiers ont une composition très variable en fonction de l'espèce, mais aussi en fonction du type de bâtiment d'élevage, de la classe d'âge des animaux, de leur alimentation, de leur niveau de production... Laissant de côté ces aspects concernant essentiellement la composition du produit fini, nous avons cherché à identifier différents types de composts de fumiers fabriqués dans la zone d'étude. Le principal critère qui nous a permis de les discriminer est la fréquence de retournement. Cette dernière pèse sur la structure de l'andain, son aération donc sur l'activité biologique et par voie de conséquence sur les transformations biochimiques qui ont lieu pendant le compostage. On retrouve des conditions différentielles de production de composés humiques, ce qui conditionnerait des vitesses de minéralisation différentes.

• deuxième facteur discriminant : le degré de maturité

Pour un type de compost donné, la vitesse potentielle de libération de l'azote peut varier en fonction du degré de maturité (et donc de l'âge du compost). Ce paramètre nous paraît très important car c'est un de ceux que l'agriculteur peut contrôler le plus facilement et pour lequel il constate un effet dans l'utilisation du compost¹⁸.

• comparaison des qualités des différents types de composts de fumiers

	FUMIER DE DEPOT (Fd)	COMPOST NON RETOURNE (COMP)	COMPOST PEU RETOURNE (RET)	COMPOST RETOURNE INTENSIF (INT)
CONDITIONS DE FABRICATION	pas de soins particuliers	très technique & suivi important ; réussite rare	technique & suivi importants ; besoin machine + organisation	technique & suivi importants ; besoin machine + bonne organisation
STABILISATION DU CARBONE	pire que fumier	meilleure que fumier	meilleure que fumier	meilleure que fumier
RENDEMENT EN AZOTE	plus de pertes que fumier	moins de pertes que fumier*	moins de pertes que fumier*	moins de pertes que fumier*
TENEUR EN AZOTE	~ 60%	~ 3%	~ 3%	~ 3%

¹⁸ l'exploitation des enquêtes a permis de montrer que les agriculteurs biologiques perçoivent les composts vieux avant tout comme des amendements organiques ayant un effet fertilisant secondaire, tandis que les composts jeunes sont davantage appréciés pour leur rôle fertilisant

MINERAL**	N _{total} (très riche)	N _{total}	N _{total}	N _{total}
TENEUR EN AZOTE TOTAL**	-	~ 24 kg/t MS	~ 24 kg/t MS	~ 24 kg/t MS
TAUX DE MINÉRALISATION ANNUEL***	65% et plus très élevé	~ 15-20% moyen	~ 15-20% moyen	~ 25-35% élevé
AZOTE DISPONIBLE L'ANNEE DE L'APPORT	-	~ 4-6 kg/t MS	~ 4-6 kg/t MS	~ 7-9 kg/t MS
P**	-	5 kg/t PB	5 kg/t PB	5 kg/t PB
K**	-	14 kg/t PB	14 kg/t PB	12 kg/t PB
Mg**	-	2 kg/t PB	2 kg/t PB	4 kg/t PB
CA**	-	10 kg/t PB	10 kg/t PB	20 kg/t PB
REMARQUE UTILISATION	printemps, mais éviter les cultures	à tout moment	à tout moment	à tout moment
PATHOGENE	mauvaise hygiénisation	hygiénisation moyenne	bonne hygiénisation	très bonne hygiénisation
ADVENTICES	mauvais assainissement	assainissement partiel	bon assainissement	bon assainissement

* à condition d'avoir un bon rapport C/N ; pour des fumiers très riches en azote (porcs, volailles), enrichir le substrat avec de la paille ou mieux, de la sciure (sans toutefois étouffer le tas).

** variable en fonction de la composition des matériaux de départ et des pertes au cours du compostage, mieux vaut faire une analyse

*** variable en fonction du degré de maturité

Le type FD évolue en fermentation anaérobie. Le type COMP est rarissime : en général une perte de structure l'entraîne vers une évolution du type FD. Pour éviter ce préjudice un certain nombre d'agriculteurs ont acquis des machines à retourner les andains permettant de redonner une bonne structure au tas et de poursuivre l'évolution en aérobiose (type RET). Enfin, de rares agriculteurs utilisent de façon intensive cette machine pour obtenir plus rapidement un produit bien décomposé (type INT), mais qui conserve des caractéristiques plus proches de celles du fumier frais (plus grande disponibilité de l'azote par rapport au compost).

• paramètres ayant une influence sur la vitesse de minéralisation des composts

Des facteurs naturels comme le climat de l'année ou la nature et le fonctionnement du sol peuvent avoir une très grande influence sur la vitesse de minéralisation des composts. A l'inverse, des facteurs qui sont plus directement sous le contrôle de l'agriculteur (travail du sol, gestion des matières organiques) ont moins d'incidence sur la vitesse de minéralisation des composts. Dans ce modèle, le choix d'intervention de l'agriculteur peut porter sur la détermination du potentiel de minéralisation des composts. Ce potentiel est estimé à partir du choix des matériaux de base (teneur en éléments fertilisants) et par le mode de compostage (taux de minéralisation de ces éléments fertilisants).

5. Diffusion des résultats du projet

• intérêt de ces résultats pour les agriculteurs

Ces résultats doivent permettre d'affiner les connaissances des agriculteurs sur le résultat de l'opération de compostage sur la qualité des produits obtenus. On recherche par ce biais une remise en cause des pratiques actuelles pour pouvoir mieux appréhender ce qu'elles produisent. S'il s'avère que pour un agriculteur, la qualité du compost produit avec la méthode actuelle n'est pas satisfaisante par rapport à ses besoins, il doit pouvoir trouver quel est le mode de fabrication qui lui conviendrait le mieux. Il devra ensuite évaluer quel est l'investissement (en temps, en matériel, en changement d'organisation) à réaliser pour at-

teindre son nouvel objectif et si cet investissement est rentable (quel gain de qualité pour quel investissement). Etant donné que la valeur agronomique d'un compost est avant tout une valeur d'usage ou d'utilité, il est très hasardeux de proposer un chiffrage économique qui fasse des comparaisons brutes de valeur de l'unité N-P-K ou de la tonne d'humus stable... Le projet propose une aide à la décision technique. La décision économique devra être prise après un travail plus approfondi avec un technicien ou suite à des échanges avec d'autres agriculteurs.

• stratégie de communication

Un colloque organisé à la fin de l'automne permettra d'attirer l'attention sur la question de la fabrication et de l'utilisation des composts. Un guide technique permettant à chacun d'évaluer ses pratiques et d'en approfondir des nouvelles sera édité. Un travail d'animation auprès de groupes dynamiques (en particulier les CUMA) accompagnera ces deux opérations.

6. Perspectives et conclusions

La caractérisation des composts proposée par le projet repose sur des critères relativement subjectifs (est-ce que le compost a chauffé ? est qu'il était trop sec ou trop humide ?...) et très rarement mesurés ou observés. Afin de pouvoir discriminer de façon mieux assurée la qualité des composts, nous proposons de développer une méthode analytique en trois étapes (voir Tableau) :

1. s'assurer que le compost n'est plus en activité (stabilité)
2. mesurer le degré de maturité du compost (estimer la quantité de composés humiques produits)
3. évaluer la qualité des composés humiques produits (CEC)

1 ^{ERE} ETAPE	2 ^{EME} ETAPE	3 ^{EME} ETAPE			
STABILITE	DEGRE DE MATURETE	CEC ^a (méq/kg)	COMPORTEMENT ET VITESSE	TYPE DE COMPOST ^b	% N DISPONIBLE DANS L'ANNEE
STABLE	TRES MUR	200-600	minéralisation lente	COMP ou RET vieux et couverts	10-15%
STABLE	TRES MUR	100-200, voire plus	minéralisation très lente	COMP ou RET vieux et humides	5-10%
EN TRANSITION VOIRE STABLE	MOYENNEMENT MUR	200-600	minéralisation très rapide	INT	25-35%
STABLE	MOYENNEMENT MUR	100-200, voire plus	minéralisation rapide	COMP ou RET d'âge moyen	~ 15-20%
STABLE	DEBUT DE MATURETE	< 100	beaucoup d'azote minéral	FD	jusqu'à 65% et plus
EN ACTIVE VOIRE EN TRANSITION	DEBUT DE MATURETE	100-200	immobilisation ou minéralisation	COMP jeune ou RET très jeune	~ 0%
EN ACTIVE	IMMATURE	< 100	immobilisation	FD jeune	< 0%
EN ACTIVE	TRES IMMATURE	< 100	immobilisation	FD très jeune	<< 0%

a : ces références sont extraites de commentaires de résultats d'analyses effectuées par le LAMS-21 pour l'OPABA (campagne d'analyse de composts en 1992/1993) et de LEVI-MINZI *et al.* (1986)

b : voir le Tableau 23 pour la signification des types

NB : les composts les plus fréquemment observés par le projet au cours de l'enquête sont ceux du centre du tableau, entourés en gras

NB' : la typologie des déchets verts présentée dans le § 4.2. serait une clé de détermination relativement acceptable, pour peu qu'elle soit complétée par quelques données analytiques

Cette approche qualitative quantifiée devrait permettre de donner un potentiel de minéralisation pour chaque compost. Pour parvenir à une telle classification objective et opérationnelle du potentiel de minéralisation des composts, il faut :

- rechercher et retenir des indicateurs de stabilité, de degré de maturité des composts et de qualité des composés humiques qui soient facilement mesurables en routine de laboratoire,
- renforcer les références et les valeurs seuils proposées dans l'ébauche de clé de détermination présentée ci-dessus.

Ces prolongements pourraient être développés à l'occasion d'un prochain projet de l'ITADA.

9. Annexes

ANNEXE 1	plaquette de présentation du projet	p. 147
ANNEXE 2	liste des analyses effectuées sur les composts prélevés par le projet	p. 150
ANNEXE 3	questionnaire plate-formes de compostage de déchets verts	p. 151
ANNEXE 4	questionnaire compostage à la ferme	p. 153
ANNEXE 5	modèle de fonctionnement du compostage	p. 158
ANNEXE 6	modèle de fonctionnement d'une parcelle cultivée recevant du compost	p. 159
ANNEXE 7	fiche technique de fabrication artisanale d'un thermomètre pour tas de compost	p. 160
ANNEXE 8	correspondance entre pourcentage de pertes en potassium pendant le compostage en fonction du rapport C/N du fumier au départ	p. 161
ANNEXE 9	Protocole, matériel et méthode, résultats et discussion pour l'essai de plein champ avec un compost de déchets verts issu d'andain tabulaire	p. 162
ANNEXE 10	Représentation graphique des résultats d'analyses menées par le projet sur un compost de type RET	p. 170
ANNEXE 11	Représentation graphique des résultats d'analyses menées par le projet sur un compost de type RET-BD	p. 171
ANNEXE 12	Représentation graphique des résultats d'analyses menées par le projet sur un compost de type INT	p. 172
ANNEXE 13	Représentation graphique des résultats d'analyses menées par le projet sur un compost de type INT-BD	p. 173

ANNEXE 1 : PLAQUETTE DE PRESENTATION DU PROJET

Voir pages suivantes

la problématique du projet

ce qu'on cherche et pourquoi

En agriculture biologique, la **fertilisation** repose sur l'apport de **matières organiques**. Certaines de ces matières peuvent être **compostées**.

Les composts jouent un double rôle :

⌄ ce sont avant tout des **amendements organiques**

⌄ mais ils apportent une quantité non négligeable de **d'éléments fertilisants**, plus ou moins rapidement disponibles

Les fournitures et les dynamiques de **minéralisation de l'azote** sont encore assez mal connues et risquent d'occasionner :

⌄ une **inadéquation** entre la disponibilité de l'azote et les besoins des cultures

⌄ des **lessivages** éventuels vers la nappe phréatique

► Le projet vise à mieux cerner la **dynamique de libération d'azote** des principaux composts utilisés en agriculture biologique. Il est décomposé en deux mouvements :

- d'une part la **fabrication**
- d'autre part la **valorisation** des composts

contacts

Secrétariat ITADA	2, allée de Herrlisheim F-68000 COLMAR Tel: 03.89.22.95.50 Fax: 03.89.22.95.59 itada@wanadoo.fr
OPABA <i>Benjamin LAMMERT</i>	5, place de la Gare F-68000 COLMAR Tel/Fax : 03.89.24.45.35 compost.opaba@wanadoo.fr
IfuL <i>Christine GROSCHUPP</i>	Auf der Breite 7 D-79379 MÜLLHEIM Tel: 0049 7631 3684-61 Fax: 0049 7631 3684-30 christine.groschupp@iful.bwl.de

durée du projet

01.09.1999 au 31.12.2001

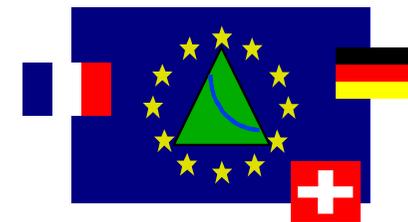
montage institutionnel

les participants et leur rôle

<u>Chef de projet:</u>	OPABA F-Schiltigheim
<u>Partenaires:</u>	IfuL D-Müllheim FiBL CH-Frick
<u>Organismes associés :</u>	SUAD-67 F-Schiltigheim Centre de recherche SCPA F-Aspach-le-Bas
<u>Financements:</u>	Communauté Européenne F : Conseil Régional d'Alsace D : Ministère de l'Espace Rural, Bade-Wurtemberg CH : Cantons de Bâle Ville, Bâle Campagne et Argovie

ITADA

Institut Transfrontalier
d'Application et de Développement Agronomique
Grenzüberschreitendes Institut
zur rentablen umweltgerechten Landwirtschaft



**DISPONIBILITE DE L'AZOTE
DES COMPOSTS UTILISES EN
AGRICULTURE BIOLOGIQUE**

Plaquette de Présentation

Projet ITADA 1.2.1
(1999/2001)

Etude cofinancée par l'initiative communautaire
INTERREG II^{bis} "Rhin Supérieur Centre-Sud"

1. le compostage

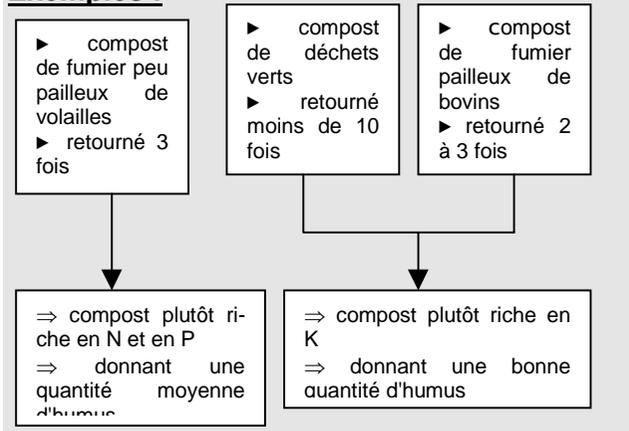
la fabrication des composts

On peut définir un compost au moins par deux entrées :

- ⌘ PAR SA **COMPOSITION**
chimique, biochimique et par son **potentiel agronomique** (valeur fertilisante et amendante)
- ⌘ PAR SON MODE DE **FABRICATION**
celui-ci varie en fonction de **l'origine des matières premières** et du **procédé de compostage**

▣ Le projet cherche à établir des **correspondances** entre le *potentiel agronomique*, en particulier la **disponibilité de l'azote**, et le *mode de fabrication* des composts.

Exemples :



On cherche donc à avoir une caractérisation agronomique des composts à partir de critères simples.

2. la valorisation des composts

l'utilisation des composts au champ

Les agriculteurs peuvent se trouver dans deux situations différentes :

⌘ IL Y A DES MATIÈRES ORGANIQUES A COMPOSTER SUR LA FERME

on cherche alors à les **valoriser au mieux**, en fonction des sols et des cultures

⌘ IL N'Y A PAS OU PEU DE MATIÈRES ORGANIQUES SUR LA FERME

on cherche à obtenir celles qui **correspondent le mieux** aux besoins des sols et des cultures.

▣ Le projet se propose d'apporter des éléments de réponse aux questions que se posent les agriculteurs pour la valorisation des composts. Ces questions touchent à la fois aux aspects :

- **techniques** (influence du sol, du climat, de la date d'apport, de façons culturales et adéquation avec les besoins des cultures),
- **économiques** (coût de l'unité fertilisante ou amendante)
- **organisationnels** (organisation du chantier dans l'espace et dans le temps, opportunité du compostage par rapport à l'épandage de produit brut, choix stratégiques...)

3. les résultats attendus

à quoi va servir ce projet ?

But du projet :

Améliorer les conseils de fertilisation, sur le plan :

- de la préparation
- et
- de l'utilisation des composts

Les résultats du projet seront :

⌘ **UN COLLOQUE**
sur le compost et le compostage pour les agriculteurs, à l'automne 2001

⌘ **UN GUIDE**
sur la fabrication et l'utilisation des composts dans la région du Rhin Supérieur

▣ En attendant et pour préparer ces résultats, des actions d'animation, de formation, d'échange d'expérience seront organisées.

ANNEXE 2 : LISTE DES ANALYSES EFFECTUEES SUR LES COMPOSTS PRELEVES PAR LE PROJET

ANALYSE	CONTENU
Analyse agronomique	% MS, % MO, % C _{org} , % N _{total} , rapport C/N, % azote nitrique, ammoniacal et uréique, % P ₂ O ₅ , K ₂ O, CaO, MgO
CBM	caractérisation biochimique de la matière organique (les différentes fractions de la matière organique)
ICC-N	incubation en condition contrôlées pour le suivi de la minéralisation de l'azote
Biomasse microbienne	suivi de l'évolution de la biomasse microbienne (concomitante à l'ICC-N)
Bio-disponibilité	mesure du CAU (coefficient apparent d'utilisation de l'azote)

CODE DU COMPOST	TYPE DE COMPOST
TRI	compost de déchets verts fabriqué en andains triangulaire
TAB	compost de déchets verts fabriqué en andain tabulaire
INT	compost de fumier de bovin lait (stabulation libre) retourné 9 fois en 1 mois ½
INT-BD	compost de mélange (fumier cheval, restes de légumes, fumier bovin) retourné 30 fois en 5 mois, avec préparations biodynamiques
RET	compost de fumier de cheval retourné 5 fois en 7 mois
RET-BD	compost de fumier de bovin lait (stabulation libre) retourné 3 fois en 4 mois

ANNEXE 3 : QUESTIONNAIRE PLATE-FORMES DE COMPOSTAGE DE DECHETS VERTS

0. Fabricant de compost

NOM DE LA STATION DE COMPOSTAGE	
CONCEPTEUR DU PROCESS	
COLLECTE DES MATERIAUX DE BASE ET TYPES	
PREPARATION DES MATERIAUX	
MISE EN ANDAIN	
COMPOSTAGE : SUIVI	
COMPOSTAGE : INTERVENTIONS (RETOURNEMENT, ADJUVANTS)	
MATURATION – FINITION SUIVI	
MATURATION – FINITION INTERVENTIONS	
COMMERCIALISATION	

1. matériaux de base

a. types de composts

Nombre de composts différents :

DENOMINATION DES DIFFERENTS COMPOSTS :

1.	
...	
8.	

b. types de matériaux, quantités et variations saisonnières

MATERIAUX			PRODUITS DIFFERENTS OU VARIATION DANS LE TEMPS							
CODE			1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
			%	%	%	%	%	%	%	%
FEUILLUS										
A.	<input type="radio"/>	écorces								
B.	<input type="radio"/>	copeaux								
C.	<input type="radio"/>	branchages								
D.	<input type="radio"/>	élagage								
E.	<input type="radio"/>	feuilles								
RESINEUX										
F.	<input type="radio"/>	écorces								
G.	<input type="radio"/>	copeaux								
H.	<input type="radio"/>	branchages								
I.	<input type="radio"/>	élagage								
J.	<input type="radio"/>	épinés								
HERBE										
K.	<input type="radio"/>	tontes fraîches								
L.	<input type="radio"/>	tontes fermentées								
AUTRES										
M.	<input type="radio"/>	résidus de criblage								
N.	<input type="radio"/>	FFOM								
O.	<input type="radio"/>	boues STEP								
P.	<input type="radio"/>	effluents d'élevage								
Q.	<input type="radio"/>	IAA								
R.	<input type="radio"/>	industrie, papeterie								
S.	<input type="radio"/>									

c. Dimension de la station

Equivalent habitants :

Production annuelle de compost :

d. caractérisation des matériaux de base et fréquence

CODE	PHYSIQUE	CHIMIQUE	BIOCHIMIQUE	BIOLOGIQUE
A.				
...				
S.				

2. préparation des matériaux

a. pré-stockage, broyage et criblage des matériaux de base

	DESCRIPTION DU PROCESS DE PREPARATION ¹⁹
1.	
...	
8.	

¹⁹ PS(12) = préstockage (jours) / B = broyage / C(0.2) = criblage (maille)

3. compostage des matériaux

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
MISE EN ANDAIN								
forme ²⁰								
taille								
masse (départ)								
système d'aération								
PARAMETRES SUIVIS	FREQ ET MES							
température								
humidité								
pH								
CO ₂								
O ₂								
activité biologique								
...								
RETOURNEMENTS								
nombre								
critères								
...								
ADJUVANTS								
nature								
quantité								
critère d'ajout								
jus récupérés								
...								
AUTRES								
durée								
couverture								
odeur/poussières								
...								

4. finition du compost

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
MATURATION								
critère début								
durée								
critère fin								
couverture								
masse								
évolution								
...								
CRIBLAGE								
place dans le process								
maille								
masse								
...								
STOCKAGE								
durée								
masse								
évolution								
couverture								
...								
AUTRES								
durée finition + com- postage								
analyses								
...								

5. commercialisation

a. Qualités générales des composts produits

b. évaluation de la valeur agronomique de chacun des produits finis

1.	
...	
8.	

²⁰ Ti = triangle ; Tp = Trapèze ; Tc = Trapèze creux

ANNEXE 4 : QUESTIONNAIRE COMPOSTAGE A LA FERME

FERME : _____

DATE : _____

1. Présentation de l'exploitation

1.1. Caractéristiques générales

Caractéristique de l'exploitation :

- Biodynamique
- Conventioneerelle

SAU :ha

Forêt :ha

- Grandes Cultures
- Maraichage
- Viticulture
- Arboriculture
- Transformation

Biologique

Autre :

STH :ha

Friches :ha

- Elevage
- Polyculture Elevage
- Plantes Médicinales
- Autres :

Orientations de l'exploitation :

orientations principales de l'exploitation :

.....

1.2. Caractéristiques de l'élevage : troupeau et bâtiment

remplir en fonction des besoins les **FICHES ELEVAGE BOVIN, PORCIN, CAPRIN, OVIN, VOLAILLES ET AUTRES...**

1.3. Quels sont les types de terrains cultivés ?

Réaliser un plan rapide du parcellaire :

- schéma des parcelles (forme et localisation)
- numérotation
- surface approximative

puis renseigner la **FICHE 1 'PARCELLES'**

2. Pourquoi faites-vous ou achetez-vous du compost ?

2.1. de façon générale :

- quels sont les besoins en matière organique
- quel est l'utilité du compost sur vos parcelles ?

Besoins MO :

Utilité compost :

2.2. Décrivez la ou les rotations sur lesquelles les composts ont le plus d'importance pour vous ?

Q° préalable → Qu'est-ce qui donne tant d'importance au compost sur ces rotations ?

renseigner les **FICHES 2 'ROTATIONS'**

2.3. D'après vos observations, quand on fait un apport de compost, quels sont les paramètres qui ont le plus d'influence sur le fonctionnement du sol et de la plante ?

sans proposition

[classer par ordre de citation]

- des types de compost
- de la date d'apport
- du climat de l'année
- de la culture
- du précédent cultural
- autre...

- du sol
- des façons culturales
- des autres apports de MO
- des micro-organismes du compost
- de la place du compost dans la rotation
- autre...

avec proposition

[présenter la Fiche 3 et classer par ordre de citation]

- des types de compost
- de la date d'apport
- du climat de l'année
- de la culture
- du précédent cultural
- autre...

- du sol
- des façons culturales
- des autres apports de MO
- des micro-organismes du compost
- de la place du compost dans la rotation
- autre...

expliquer à partir d'une étude de cas (reprendre une rotation de la FICHE 2)

(construire un modèle de fonctionnement)

2.4. Comment avez-vous appris ces choses-là ?

quelle est la meilleure façon d'apprendre ?

2.5. Quelles sont les questions que vous vous posez sur l'utilisation des composts et sur leur effet ?

[→ si besoin, repartir de quelques éléments identifiés à la question 2.3. et creuser]

noter la liste, bien préciser les termes employés

3. Comment faites-vous votre/vos compost(s) ?

3.1. Quels sont les matériaux de départ et leurs caractéristiques ?

Voir **FICHE 'COMPOSTAGE'** + faire des compléments sur les dénominations et concepts

3.2. Quels sont les différentes étapes du compostage que vous réalisez ? Avec quels outils ?

Voir **FICHE 'COMPOSTAGE'** + faire des compléments sur les dénominations et concepts

3.3. Comment prenez-vous les décisions pour intervenir sur le tas de compost ?

[→ c'est le cœur de la fabrication : les décisions relatives à la conduite de l'andain

→ paramètres suivis

→ intensité du suivi (recoupe place du compostage et contraintes)

→ demande de comparaison de pratiques et d'avis critique : comment font les autres, pour quelles raisons... ?]

se référer au modèle de compostage retenu par le projet

3.4. Comment avez-vous acquis cette pratique du compostage ?

quelle est la meilleure façon d'apprendre ?

3.5. Bilan : comment définiriez-vous les différents composts que vous produisez ?

[But : → croiser l'info avec la description du process (a-t-on décrit tous les process ?)

→ amorcer le lien entre fabrication et utilisation

encadrer un peu mieux les réponses...]

3.6. Question subsidiaire : d'après votre expérience et vos observations, quels sont les éléments qui ont le plus d'influence sur le bon déroulement du compostage et sur la qualité des produits finis.

[Buts : → croiser les info sur le suivi

→ arriver à une description assez fine des procédés de compostage, des transformations

→ appréhender l'utilité des transformations : recoupe la question pourquoi composte-t-on ?

→ critiquer le modèle de compostage retenu par le projet]

liste...

3.7. Quelles sont les questions que vous vous posez sur la fabrication des composts ?

[→ rebondir sur quelques éléments touchant à la fabrication en relation avec la valorisation]

noter la liste, bien préciser les termes employés

4. Quelles sont les principales contraintes que vous devez intégrer dans la gestion de l'activité compost (fabrication, épandage...)?

(les classer par ordre d'importance)

[On reprend quelques éléments qui transparaisaient déjà au fil de l'entretien ;

Buts : → confirmer les éléments déjà apportés

→ trouver des contradictions ou des imprécisions éventuelles et creuser]

4.1. Contraintes d'ordre technico-économiques

paillage

stockage du fumier (qualité et pertes)

participation Cuma, accès retourneur

(coût)

trop de pluies

...

4.2. Contraintes de place

stockage du fumier

place pour l'andain

...

4.3. Contraintes de temps

...

4.4. Contraintes réglementaires

mise au normes

...

4.5. Autres

FERME : _____

FICHE 1 : LES PARCELLES DE L'EXPLOITATION

[NB : indiquer les parcelles qui reçoivent du compost (aborder fréquence et dose, date)]

N°	PARCELLE	TYPE DE TERRE	HOMOG ?(O/N)	PARTICULARITES

FERME : _____

PARCELLE N° : _____

FICHE 2 : ROTATIONS

DATE	CULTURE	FAÇON CULTURALE	APPORT MO	ENGRAIS VERT

FICHE 3 : 'PARAMETRES POUVANT INFLUENCER LE FONCTIONNEMENT DU SOL ET DE LA PLANTE'

le type de compost	les autres apports de MO
le type de sol	la culture
la date d'apport	les ferments bactériens
le climat de l'année	le précédent cultural
les façons culturales	la place de l'apport dans la rotation
	autres...

FICHE ELEVAGE BOVIN (source : Joséphine PEIGNE)

Race n°1 (idem Race n°2 et Race n°3) :

Catégories	Nombre moyen sur l'année	UGB	Séjour en bâtiment	
			Partiel	Permanent
Reproducteur mâle				
femelle				
Elève mâle				
femelle				
Jeune mâle				
femelle				

STOCKAGE

Type de fumier et/ou lisiers	Fosse	Tas / aire bétonnée	Tas / terre battue	Tas au champs

BATIMENTS

Animaux (race, catégories, nombre)	Stabulation libre				Stabulation entravée		Logettes			
	Aire de repos : couverture, paillage et surface	Quantité (kg et périodicité de l'évacuation) et type de déjections	Aire d'exercice : couverture, paillage et surface	Quantité (kg et périodicité de l'évacuation) et type de déjections	Couverture, paillage et surface	Quantité (kg et périodicité de l'évacuation) et type de déjections	Aire de repos : couverture, paillage et surface (par logette et totale)	Quantité (kg et périodicité de l'évacuation) et type de déjections	Aire d'exercice : couverture, paillage et surface	Quantité et type de déjections

FICHE ELEVAGE PORCIN (source : Joséphine PEIGNE)

Race n°1 & Race n°2 :

Catégories	Nombre moyen sur l'année	Séjour en bâtiment	
		Partiel	Permanent
Truies maternité			
Truies gestantes			
Porcelets			
Porcs à l'engraissement			

BATIMENTS

Catégories	Nombre animaux par case	Taille des cases	Litières (quantité et nature) et/ou caillebotis	Quantité de déjections et nature
Truies maternité				
Truies gestantes				
Porcelets				
Porcs à l'engraissement				

STOCKAGE

Type de fumier et/ou lisiers	Fosse	Tas / aire bétonnée	Tas / terre battue	Tas au champs

FICHE ELEVAGE DE VOLAILLES (source : Joséphine PEIGNE)**Espèces n :****Race n° :**

Catégories	Nombre moyen sur l'année	Séjour en bâtiment	
		Partiel	Permanent

BATIMENTS

Catégories (Espèce, race)	Nombre animaux par cage / surface	Taille des cases / surface	Litières (quantité et nature) et/ou caillebotis	Quantité de déjections et nature

STOCKAGE

Type de fumier et/ou lisiers	Fosse	Tas / aire bétonnée	Tas / terre battue	Tas au champs

FICHE ELEVAGE CAPRIN (source : Joséphine PEIGNE)**Race n°1 & Race n°2 :**

Catégories	Nombre moyen sur l'année	Séjour en bâtiment	
		Partiel	Permanent

BATIMENTS

Catégories	Nombre animaux par case / surface	Taille des cases / surface des bat	Litières (quantité et nature) et/ou caillebotis	Quantité de déjections et nature

STOCKAGE

Type de fumier et/ou lisiers	Fosse	Tas / aire bétonnée	Tas / terre battue	Tas au champs

FICHE ELEVAGE OVIN (source : Joséphine PEIGNE)**Race n°1 & Race n°2 :**

Catégories	Nombre moyen sur l'année	Séjour en bâtiment	
		Partiel	Permanent

BATIMENTS

Catégories	Nombre animaux par case / surface	Taille des cases / surface des bat	Litières (quantité et nature) et/ou caillebotis	Quantité de déjections et nature

STOCKAGE

Type de fumier et/ou lisiers	Fosse	Tas / aire bétonnée	Tas / terre battue	Tas au champs

FICHE AUTRE ELEVAGE (source : Joséphine PEIGNE)**Race n°1 & Race n°2 :**

Catégories	Nombre moyen sur l'année	Séjour en bâtiment	
		Partiel	Permanent

BATIMENTS

Catégories	Nombre animaux par case / surface	Taille des cases / surface des bat	Litières (quantité et nature) et/ou caillebotis	Quantité de déjections et nature

STOCKAGE

Type de fumier et/ou lisiers et quantité	Fosse	Tas / aire bétonnée	Tas / terre battue	Tas au champs

FICHE COMPOSTAGE (source : Joséphine PEIGNE)

Date de mise en tas :
 Durée de compostage actif :
 Durée totale (jusqu'à épandage) :

Chantier n° ____

1. Caractéristiques du matériel de départ

Tonnage de produit brut composté :

Matériel produit sur l'exploitation

Matière végétale (nature et préparation si il y a)	Proportion / quantité

Matière animale : Nature (Cf. partie élevage) et âge	Proportion / quantité

Matériel provenant de l'extérieur

Matière végétale (nature et préparation si il y a)	Proportion / quantité

Matière animale (Nature la plus précise)	Proportion / quantité

Matière minérale (Facultatif)	Quantité

Récupérer Analyse de produit brut si possible

2. Aire de compostage

Aménagement de la plate-forme	
Aire bétonnée / récupération des jus	O/N
Tas au champs (localisation de la parcelle)	O/N
Type de sol et sous-sol	
Environnement	
Changement de place / an	O/N

3. Mise en place du tas

Matériel utilisé

Type de matériel	Hauteur et forme du tas

Ajouts

Nom	Quantité	Date d'apport

z

Couverture

Type de couverture (et épaisseur)	Date de mise en place

4. Management du compostage

Retournement

Durée des phases de retournement (si changement de fréquences etc.)	Nombres de retournements	Fréquences

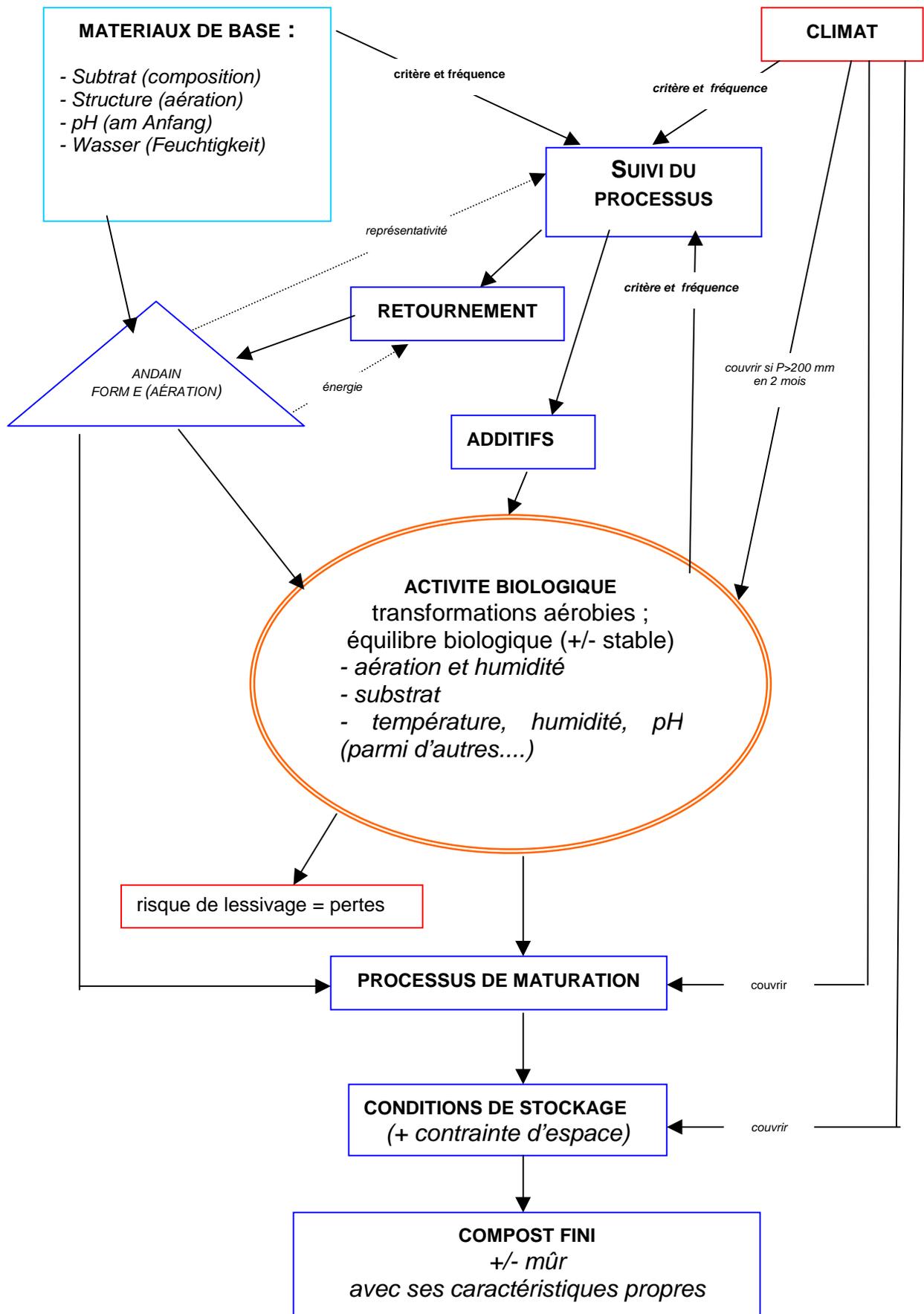
Ajouts

Nom	Quantité	Date d'apport

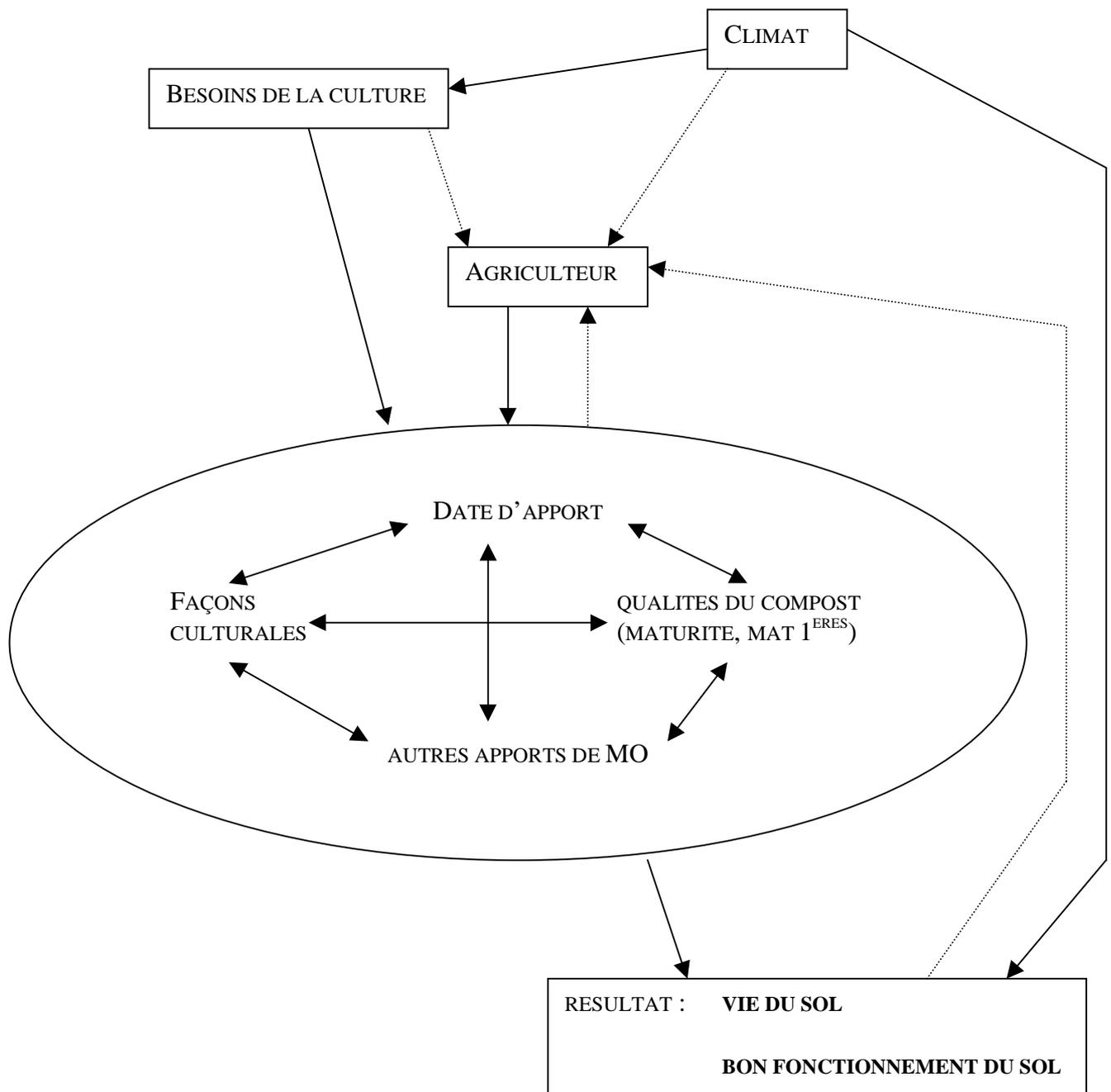
Couverture

Type de couverture (et épaisseur)	Date de mise en place

ANNEXE 5 : MODELE DE FONCTIONNEMENT DU COMPOSTAGE



ANNEXE 6 : MODELE DE FONCTIONNEMENT D'UNE PARCELLE CULTIVEE RECEVANT DU COMPOST



Commentaires au schéma de fonctionnement

Les flèches en pointillés correspondent à l'expérience de l'agriculteur : c'est le retour d'information sur l'effet combiné du climat, de la physiologie de la culture, et de ses activités agricoles sur la vie du sol et son bon fonctionnement qui est la base de l'agriculture biologique.

Ce système permet de mettre en valeur le comportement adaptatif de l'agriculteur et ainsi que les paramètres sur lesquels il pourrait *a priori* influencer. Ce système permet également de souligner quels sont les aspects techniques à présenter aux agriculteurs, tout en restant cohérent par rapport à un système opérationnel.

ANNEXE 7 : FICHE TECHNIQUE DE FABRICATION ARTISANALE D'UN THERMOMETRE POUR TAS DE COMPOST

Thermomètre sonde pour compost.

Fiche de fabrication proposée par Pierre MASSON

Cet ustensile est très utile, sinon indispensable, pour suivre l'évolution de la température dans les composts. Une sonde métallique professionnelle est très coûteuse.

Il est cependant possible de bricoler un tel outil à peu de frais, à partir d'un simple thermomètre à alcool allant de -20° à 100° . On le fixe, avec de la petite ficelle en nylon ou du chatterton résistant à l'humidité, sur une baguette de bois en demi ou trois quart de rond de 14 mm de diamètre. On introduit le tout dans un tube rigide en PVC pour canalisations électriques, de diamètre extérieur 20 mm. et intérieur 16,5 mm. On ferme l'extrémité extérieure avec un bouchon ; ceci est utile pour empêcher l'eau de pluie de faire gonfler la baguette en bois.

Matériaux :

Thermomètre (pharmacies, quincailleries, magasins pour les industries alimentaires).

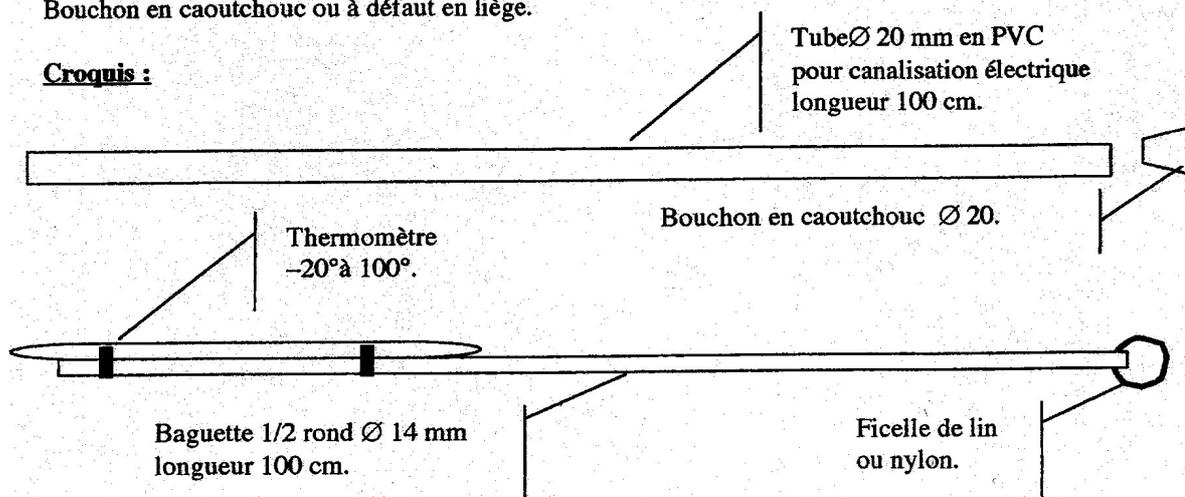
Tube PVC pour canalisations électriques de diamètre 20 : un mètre.

Baguette de bois demi rond de 14 mm : 1 mètre.

Chatterton ou petite ficelle de lin ou de nylon.

Bouchon en caoutchouc ou à défaut en liège.

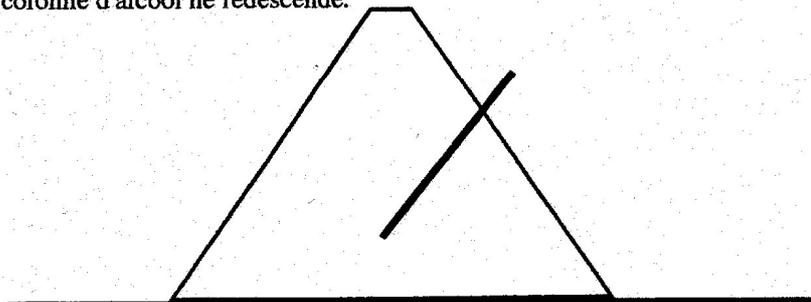
Croquis :



Mode d'emploi :

Pour prendre la température, On insère l'ensemble constitué par le tube et sa baguette à laquelle est fixée le thermomètre, au cœur du tas de compost. Le tube reste à demeure.

Pour la lecture, on retire la tige de bois avec le thermomètre. Il faut procéder très rapidement avant que la colonne d'alcool ne redescende.



**ANNEXE 8 : CORRESPONDANCE ENTRE POURCENTAGE DE PERTES
EN POTASSIUM PENDANT LE COMPOSTAGE EN FONCTION DU
RAPPORT C/N DU FUMIER AU DEPART**

RAPPORT C/N DU FUMIER AU DEPART	% PERTES K ⁺
14	60
15	57,5
16	55
17	52,5
18	50
19	47,5
20	45
21	42,5
22	40
23	37,5
24	35
25	32,5
26	30
27	27,5
28	25
29	22,5
30	20
31	17,5
32	15
33	12,5
34	10
35	7,5
36	5

Correspondance calculée selon l'équation :

$$\text{taux de perte en K}^+ \text{ au cours du compostage (\%)} = - 2,5 \times \text{C/N} + 95$$

ANNEXE 9 : PROTOCOLE, MATERIEL ET METHODE DE L'ESSAI DE PLEIN CHAMP AVEC UN COMPOST DE DECHETS VERTS ISSU D'ANDAIN TABULAIRE

Questions posées :

1. peut-on réduire le lessivage des nitrates après soja si l'on épand à l'automne un compost pas encore mûr doté d'un C/N élevé ?

2. quelle influence a ce compost sur le rendement et le taux de protéines du blé d'hiver qui suit le soja ?

Le 19.10.2000, l'essai a été mis en place sur une parcelle d'agriculteur en agriculture conventionnelle. La culture précédente était un soja qui grâce aux nodosités de ses racines peut fixer l'azote atmosphérique et de le rendre disponible pour les plantes. En l'absence de couverture du sol il s'ensuit un danger de lessivage de nitrates pendant l'hiver. Le compost utilisé possède un rapport C/N très élevé de l'ordre de 26 : 1, ce qui signifie une fraction en carbone très forte vis à vis de celle en azote.

L'essai se propose de tester l'effet d'un apport incorporé au sol de ce compost avant le semis du blé à l'automne et notamment la fixation d'azote lors du processus de décomposition des parties carbonées, sa conservation puis sa libération au printemps pour les besoins de la culture. L'essai comporte 3 niveaux d'apports en compost (0 t MS/ha en témoin, 18 t MS/ha et 36 t MS/ha) ainsi que 2 doses de fertilisations azotées. En plus des teneurs en azote minéral du sol mesurées tous les 14 jours jusque fin avril 2001 et après la récolte du blé, le rendement et la qualité (teneur en protéines) de celui-ci sont également déterminés.

MATERIEL ET METHODES

Comme le syndicat « Bioland » ne communiquait pas d'autorisation pour cette expérimentation, il a été décidé de la mettre en place dans une parcelle jugée homogène chez un exploitant conventionnel, qui avait cultivé en 2000 du soja.

Les parcelles élémentaires faisaient 3 x 28 m et l'essai un total de 18x28 m (cf. plan ci-après).

Quantité de compost [t MS/ha]	Dose de fertilisant en azote
0 (témoin)	N ₁ (27 kg N / ha)
0 (témoin)	N ₂ (54 kg N / ha)
18	N ₁ (27 kg N / ha)
18	N ₂ (54 kg N / ha)
36	N ₁ (27 kg N / ha)
36	N ₂ (54 kg N / ha)

L'importance des apports de compost s'est orientée en fonction du décret sur les déchets biologiques qui autorise un maximum de 30 tonnes MS/ha sur 3 ans. La quantité de matière fraîche de compost nécessaire a été calculée à partir de résultats d'analyse de compost analogue qui indiquaient une teneur en eau de 40 % qui ont servis de base. Un volume nécessaire approximatif a été déterminé lors de l'achat du compost qui s'est avéré faire un peu

plus que les 15 tonnes et 30 tonnes souhaitées. Le compost a été réparti sur les parcelles à l'aide de brouettes remplies de manière régulière (11 brouettes pour 18 t MS/ha, 22 brouettes pour 36 t MS/ha).

Le compost utilisé est un compost de déchets verts provenant de la station de compostage de Müllheim, qui satisfait au cahier des charges RAL-Gütezeichen-Kompost et aux exigences du décret sur les déchets biologiques. Il a un rapport C/N élevé de 26 :1 et il est donc approprié pour l'essai.

Le calcul du rapport C/N est réalisé selon la méthode : teneur C = pertes à l'incinération * 0,58. $C/N = 49 \% * 0,58 / 1,1 \% = 25,8$

Le compost est apporté le 19.10.00 après labour et enfoui à une profondeur de l'ordre de 8 - 10 cm à l'aide d'une herse.

Afin de ne pas perturber le travail de l'agriculteur, 15 échantillons de sol ont été prélevés pour détermination de l'azote minéral (N_{min}) après l'apport de compost sur les bords est et sud des parcelles. Six prises ont été faites par parcelle d'essai par un entrepreneur avec un préleveur (Pürckhauer Bohrstock). Les échantillons ont été regroupés par couche 0 - 30 cm, 30 - 60 cm et 60 - 90 cm et congelés à -18 °C. La détermination des teneurs en azote et en eau ont été faites par le laboratoire de la LUFA à Augustenberg.

Selon les conditions météorologiques, les prises d'échantillons ont été faites tous les 14 jours : 19.10.00, 2.11.00, 16.11.00, 30.11.00, 14.12.00, 28.12.00, 11.1.01, 25.1.01, 8.2.01, 22.2.01, 14.3.01, 27.3.01, 5.4.01, 20.4.01. Après la récolte le 24.07.01.

Au sein des variantes du facteur „compost“ il a été ajouté deux variantes fertilisation azotée à partir du 05.04.01 (cf. plan d'essai). Le niveau N_2 correspond à la fertilisation de l'agriculteur (54 kg N/ha), N_1 à la moitié (27 kg N/ha). A partir du 27.3.01, les échantillons ont été pris séparément au sein des parcelles en fonction des 2 niveaux d'azote. La fertilisation de la parcelle de l'agriculteur est intervenue le 03.04.01 avec 200 kg/ha (= 20 g/m) d'ammonitrate. Un apport malencontreux a alors été réalisé sur la moitié de la parcelle témoin sans compost. Ceci a eu pour effet que l'apport N_2 prévu dans le témoin a été réalisé par l'agriculteur alors que les autres apports ont été faits à la main le 05.04.01. Pour N_2 , l'apport d'ammonitrate a été de 3 m x 28 m x 20 g/m² = 1680 g et pour N_1 la moitié. Un second apport a été abandonné suite aux conditions climatiques.

Le 04.04.01, une fumure de fond a été faite avec des Thomaskali 10/15/3 (0,83 t/ha) par l'agriculteur. Le 12.04.01, l'agriculteur a désherbé avec Duplosan et de l'isoproturon IPU (2x 2,5 l/ha).

La récolte a été faite le 23.07.01 et les poids bruts et l'humidité mesurées sur 3 fausses répétitions (a, b, c) pour chacune des six variantes.

Site	
Lieu	Schliengen
Altitude	350 m
Ø température annuelle moyenne	9,5 °C
Ø précipitations annuelles (Müllheim)	650 mm/a
Sol (analyse LUFA Augustenberg)	
Type espèce	Sol brun colluvial Limon de Lehm
pH	7,3
Teneur en Humus	2,1 %
P ₂ O ₅	11 mg/100 g
K ₂ O	9 mg/100 g
Mg	10 mg/100 g
Total N	0,15 %

Métaux lourds	Sous les limites du décret sur les déchets bio
Compost	
Teneur en matière sèche	65 % MF
Pertes à l'incinération (Substance Organique)	49 % MS
N	1,1 % TM
P ₂ O ₅	0,46 % TM
K ₂ O	0,94 % TM
MgO	0,68 % TM
CaO	4,3 % TM
C/N	26 : 1
Interventions culturales	
Récolte du soja	15.09.00 (agriculteur)
Labour	19.10.00 (agriculteur)
Apport du compost (0, 18, 36 t TM/ha)	19.10.00
Herse 8 - 10 cm	19.10.00 (agriculteur)
Semis du blé hiver variété Soissons	19.10.00 (agriculteur)
Dates de prise d'échantillons de sol (N _{min} - et teneur en eau)	19.10.00, 02.11.00, 16.11.00, 30.11.00, 14.12.00, 28.12.00, 11.01.01, 25.01.01, 08.02.01, 22.02.01, 14.03.01, 27.03.01, 05.04.01, 20.04.01, 24.07.01
Fumure de fond avec Thomaskali (10 % P ₂ O ₅ , 15 % K ₂ O, 3 % MgO)	0,83 t/ha 04.04.01 (agriculteur)
1. apport d'azote en ammonitrate (27 % N) N ₁ : 100 kg/ha (27 kg N/ha) N ₂ : 200 kg/ha (54 kg N/ha)	05.04.01
2. apport d'azote en urée (47 % N) 80 kg/ha (38 kg N/ha)	Non appliqué pour des raisons de météo
Interventions phyto (Herbicide) Duplosan 2,5 l/ha et IPU 2,5 l/ha	12.04.01 (Landwirt)
Récolte	23.07.01

Calcul du lessivage des nitrates dans le sol d'après Rohmann

L'objectif est de calculer la perte en nitrates qui intervient en dessous de l'horizon prélevé le plus profond (60 - 90 cm) en fonction des pluviométries entre deux dates de prélèvements de sols pour l'analyse des teneurs en azote minéral et mesure de l'humidité. Une description détaillée de la méthode de calcul de Rohman est faite dans le rapport final du projet ITADA A 1.5 „gestion de l'azote dans les exploitations sans ou pauvres en élevage en agriculture biologique“.

Comme le lessivage est dépendant de la capacité au champ (Feldkapazität) du sol, celle ci doit être mesurée.

Estimation de la capacité au champ du sol au moyen de prélèvements au cylindre

(en suivant le protocole de Schlichting, Blume, Stahr „sciences du sol“)

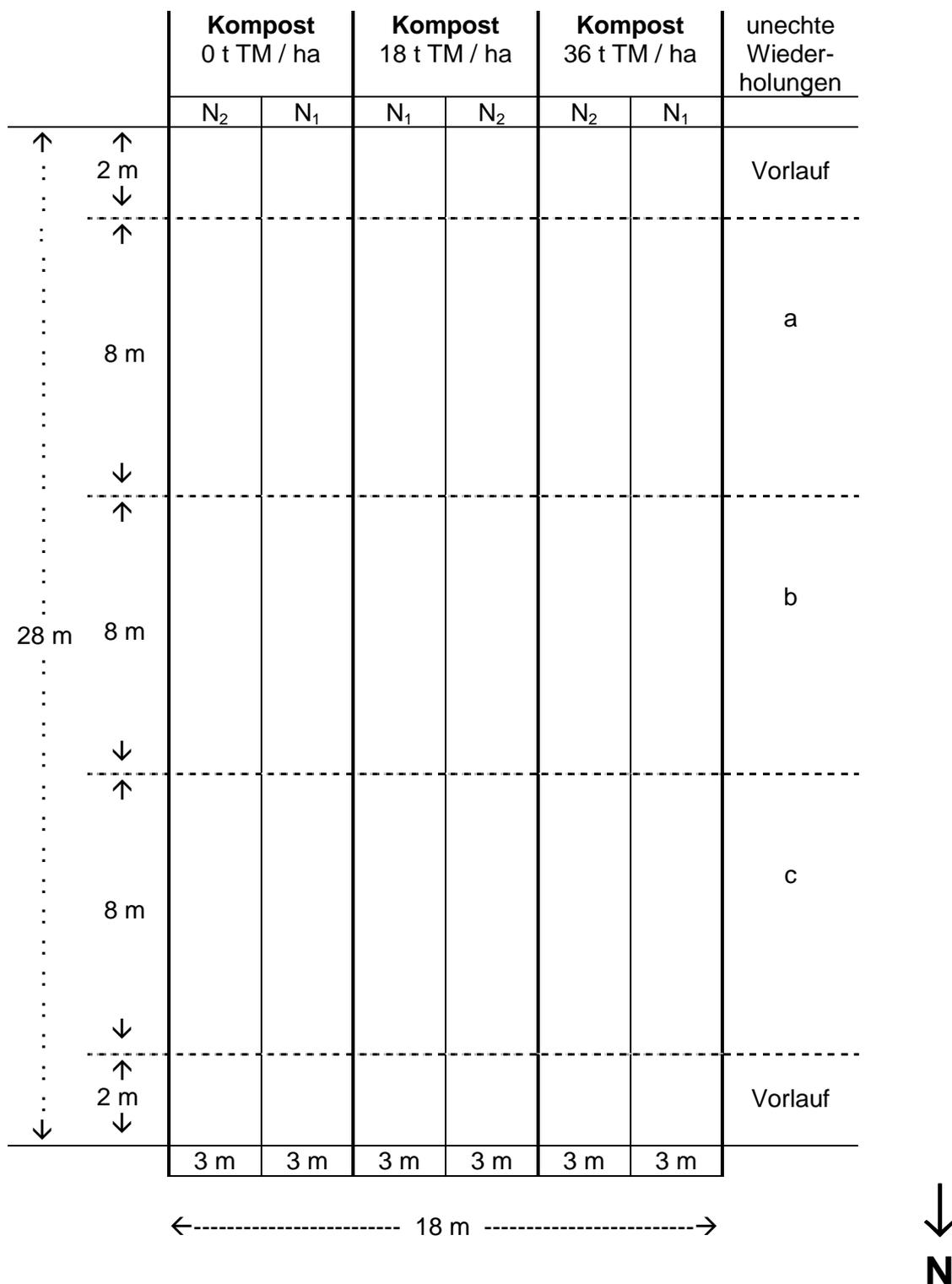
La prise d'échantillon est intervenue le 23.04.01 sur e champ d'essai en bordure des parcelles expérimentales.

Les cylindres de prises d'échantillons mis à disposition par le LUF A Augustenberg ont un volume défini de 100 cm³ pour une hauteur de 4 cm. Une arête d'un des côtés est coupante.

4 prises ont été faites par profondeur : 5 - 10 cm, 15 - 20 cm, 25 - 30 cm.

La détermination de la capacité au champ se fait alors suivant un protocole qui est disponible sur demande auprès de l'IfUL ou de la LUFA Augustenberg.

Plan d'essai :



Données météo Site de Müllheim:

	Température moy.	Pluies	Pluies entre 2 prises de sol
	°C	mm	mm
19.10.00	11,5	0,25	
20.10.00	12	0	
21.10.00	10,9	0	
22.10.00	10,8	0	
23.10.00	12,1	0	
24.10.00	13,6	0,5	
25.10.00	14,8	0	
26.10.00	12	1,5	
27.10.00	10,6	0	
28.10.00	11,9	0	
29.10.00	12,1	0	
30.10.00	15,4	0,5	
31.10.00	9,9	6,25	
01.11.00	11,1	0	9
02.11.00	12	0,25	
03.11.00	9,5	8	
04.11.00	7,7	3,75	
05.11.00	6,6	0	
06.11.00	7,5	9	
07.11.00	10,7	0	
08.11.00	9,7	0,25	
09.11.00	8,3	0	
10.11.00	5,9	0,25	
11.11.00	6,5	0	
12.11.00	9	0	
13.11.00	9,9	8,25	
14.11.00	6,3	18,25	
15.11.00	6,5	0	48
16.11.00	4,4	0	
17.11.00	4,2	8,5	
18.11.00	4,3	0	
19.11.00	6,2	1,75	
20.11.00	6,4	0	
21.11.00	6,7	1,25	
22.11.00	10,2	2,75	
23.11.00	7,5	9,25	
24.11.00	5,6	2	
25.11.00	2,9	3,5	
26.11.00	7	5	
27.11.00	6,5	0,5	
28.11.00	9,2	1,5	
29.11.00	6,1	0	36
30.11.00	7,5	0	
01.12.00	4,9	0,5	
02.12.00	7,1	0	
03.12.00	8,7	0	

04.12.00	7,3	1	
05.12.00	5,5	0,25	
06.12.00	7,1	3,25	
07.12.00	6,4	2,5	
08.12.00	9,9	11,25	
09.12.00	9,5	0	
10.12.00	9,8	0,5	
11.12.00	10,9	0	
12.12.00	9,6	0	
13.12.00	10,8	0	19,25
14.12.00	9,5	2,5	
15.12.00	5,3	1,25	
16.12.00	4,1	0,75	
17.12.00	4,6	0	
18.12.00	4,1	0	
19.12.00	7	0	
20.12.00	3,9	0,25	
21.12.00	2,3	0	
22.12.00	0,4	0	
23.12.00	-0,2	0	
24.12.00	-1,1	0,25	
25.12.00	3,4	3,75	
26.12.00	6,1	1,75	
27.12.00	6,1	0	10,5
28.12.00	3,3	0	
29.12.00	0,7	0,25	
30.12.00	1,2	0,75	
31.12.00	-0,1	0	
01.01.01	0,3	0,5	
02.01.01	9	10,5	
03.01.01	7,2	0,25	
04.01.01	7,1	2,75	
05.01.01	9,9	8,25	
06.01.01	7,9	3,25	
07.01.01	4,9	0,5	
08.01.01	3,5	0	
09.01.01	2,4	0	
10.01.01	5,1	1,75	28,75
11.01.01	5,4	0,25	
12.01.01	1,1	0,25	
13.01.01	-1,1	0	
14.01.01	-3,2	0	
15.01.01	-3,9	0	
16.01.01	-3,1	0	
17.01.01	-1,4	0	
18.01.01	-0,2	0,25	
19.01.01	-0,2	0,75	
20.01.01	0,7	4	
21.01.01	0,3	0	
22.01.01	6	0	
23.01.01	9,4	3,75	
24.01.01	9,9	9,75	19

25.01.01	5,8	4,25	
26.01.01	5,9	0	
27.01.01	4,6	6,25	
28.01.01	2,4	0	
29.01.01	0,9	0	
30.01.01	1,5	0,5	
31.01.01	-0,5	0	
01.02.01	-0,2	0	
02.02.01	-0,3	0	
03.02.01	4,6	0	
04.02.01	10,1	0	
05.02.01	10,3	0	
06.02.01	12,8	0	
07.02.01	10,8	0	11
08.02.01	9,3	1,5	
09.02.01	6,4	0,25	
10.02.01	2,4	0	
11.02.01	4,7	0	
12.02.01	7,5	0	
13.02.01	7,6	6,75	
14.02.01	3,3	0	
15.02.01	2,7	0	
16.02.01	4,8	0	
17.02.01	3	1,25	
18.02.01	2,6	0	
19.02.01	1,6	0	
20.02.01	2,2	0	
21.02.01	3,6	0	9,75
22.02.01	5,5	0,25	
23.02.01	4,8	4,5	
24.02.01	0,4	0	
25.02.01	-1,3	0,25	
26.02.01	-1,6	0	
27.02.01	0	0	
28.02.01	1,6	0	
01.03.01	2,4	1,25	
02.03.01	3,4	4	
03.03.01	0,6	25,75	
04.03.01	6,2	18	
05.03.01	5,2	2	
06.03.01	2,2	0	
07.03.01	5,1	3	
08.03.01	7,2	8,75	
09.03.01	8,8	0,25	
10.03.01	9,5	3,75	
11.03.01	11,3	6	
12.03.01	10,2	26,5	
13.03.01	7	6,25	110,5
14.03.01	6,1	1,25	
15.03.01	8,7	1,75	
16.03.01	9,5	0	
17.03.01	9	8,25	

18.03.01	9,6	1,5	
19.03.01	6,1	0,5	
20.03.01	3,4	12,75	
21.03.01	11,6	8,25	
22.03.01	10,8	5,25	
23.03.01	12,8	0,5	
24.03.01	13,4	7,5	
25.03.01	11,8	2,25	
26.03.01	6,3	3,5	53,25
27.03.01	5,5	0	
28.03.01	9	4,75	
29.03.01	9,6	2,5	
30.03.01	7,3	2,25	
31.03.01	8	0	
01.04.01	10,6	0	
02.04.01	13,5	0	
03.04.01	11,9	0	
04.04.01	9,2	9,75	19,25
05.04.01	7,9	0	
06.04.01	11,1	3,25	
07.04.01	9,7	4,75	
08.04.01	8,3	2,5	
09.04.01	7,5	12	
10.04.01	8,7	3	
11.04.01	7,3	7	
12.04.01	8,1	0	
13.04.01	5,3	0	
14.04.01	3,7	0	
15.04.01	4,5	1,5	
16.04.01	6,2	8	
17.04.01	6,6	3,25	
18.04.01	6,3	4,75	
19.04.01	4,5	2,25	52,25
20.04.01	3,5	0,75	

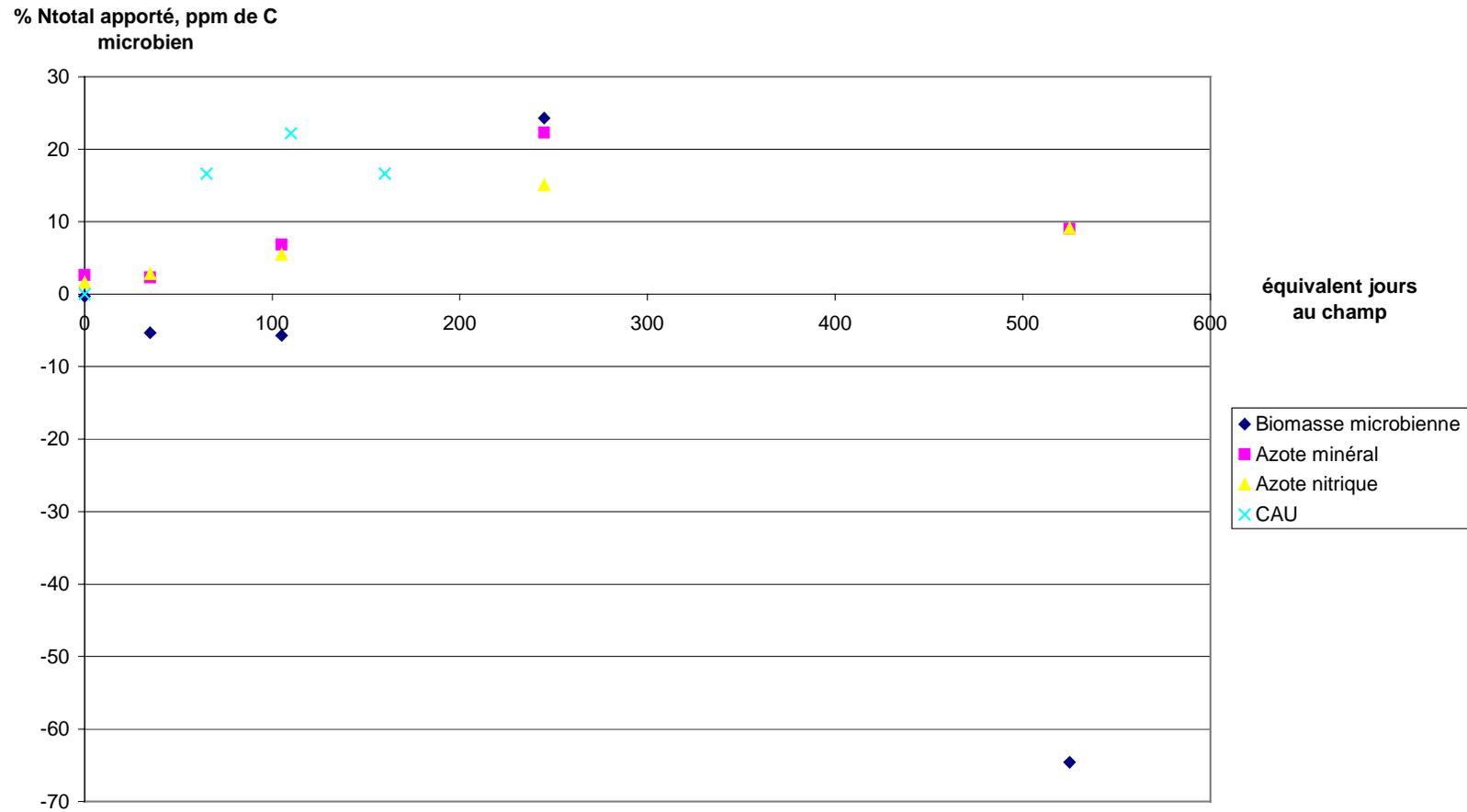
Bibliographie

BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST E. V., 1998. Methodenbuch zur Analyse von Kompost. 4. Auflage. Verlag Abfall Now e. V., Stuttgart, 1998

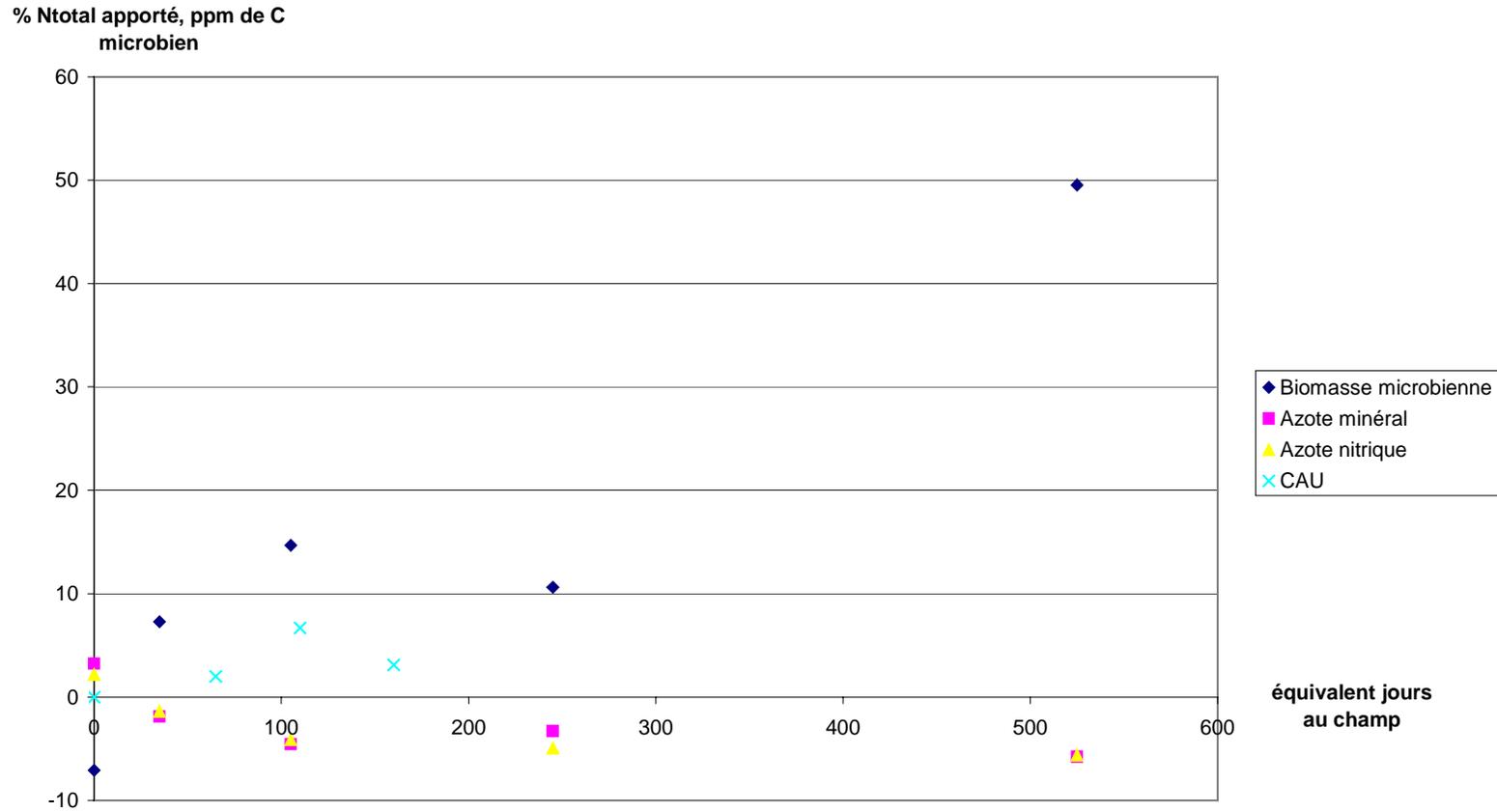
SCHLICHTING E., BLUME H.-P., STAHR K., 1995. Bodenkundliches Praktikum. 2. Auflage. Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin, 1995

VETTER R., MIERSCH M., 1999. Stickstoffversorgung und -dynamik in Fruchtfolgen vieharmen Betriebe des ökologischen Landbaus, Abschlussbericht zum Projekt A1.5

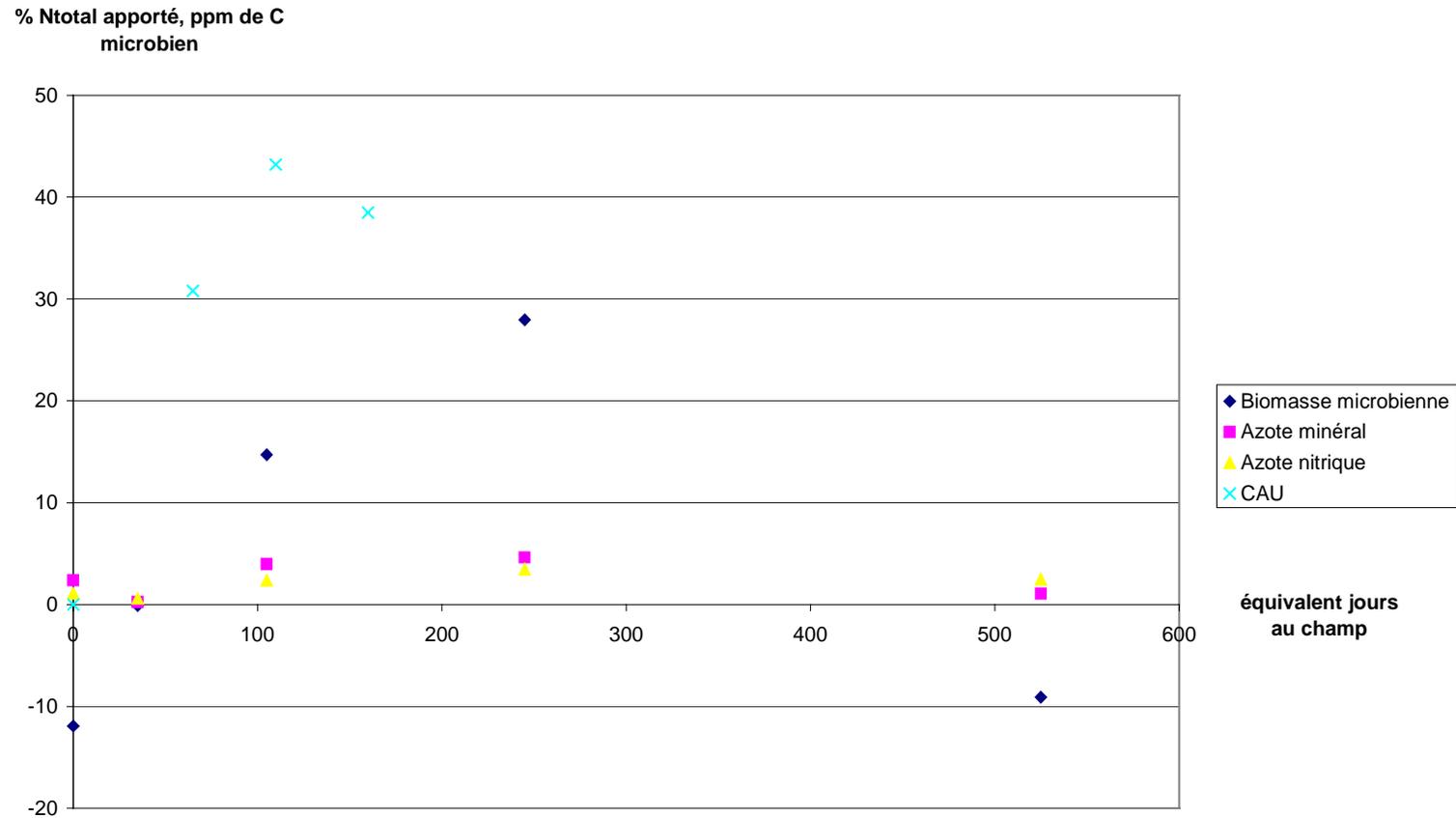
ANNEXE 10 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS D'ANALYSES MENEES PAR LE PROJET SUR UN COMPOST DE TYPE RET



ANNEXE 11 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS D'ANALYSES MENEES PAR LE PROJET SUR UN COMPOST DE TYPE RET-BD



ANNEXE 12 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS D'ANALYSES MENEES PAR LE PROJET SUR UN COMPOST DE TYPE INT



ANNEXE 13 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS D'ANALYSES MENEES PAR LE PROJET SUR UN COMPOST DE TYPE INT-BD

