

C.I.H.E.A.M
MEDITERRANIEN AGRONOMIC INSTITUTE OF
BARI

MASTER OF SCIENCE DEGREE
MEDITERRANIEN ORGANIC AGRICULTURE



Etude et évaluation du compostage
de différents types de matières
organiques et des effets des jus de
composts biologiques sur les
maladies des plantes

Etudiant : Ibrahim El Akram ZNAÏDI (Tunisie)
Encadreur : Prof. Mohamed BEN KHEDHER

Octobre 2002

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

Mon père, ma mère, ma sœur et ma grand mère et à tous les membres de ma famille, que ce travail soit le symbole de ma reconnaissance de leur amour infini.

A mademoiselle Imen Jaouadi, que je remercie pour le soutien et le réconfort qu'elle m'a apporté et pour les merveilleux moments passés ensemble.

A tous mes amis, Kais Ben Salem, Yessine Boubakri, Mourad ben Khalifa, Amine Braikia, Hela Khmiri,, Houda Kilani, Ridah Romdhane, Hatem Chhidi ,Khalaf Mehrzi, Filiz Hallac, Iyed Kacem et Fulya Koc.

Znaïdi Ibrahim El Akram.

Remerciements

Au terme de ce travail, j'aimerais pouvoir rendre hommage à tous ceux qui de loin ou de près m'ont apporté leurs concours et leurs encouragements.

Je me fais un agréable devoir de remercier vivement mon encadreur Monsieur M. Ben Kheder, Directeur du Centre Technique de l'Agriculture Biologique qui a dirigé ce travail de recherche et m'a fait bénéficier de son expérience et de ses conseils ; je le suis reconnaissant pour les facilités qu'il a mises à ma disposition afin que je puisse mener à bien ce projet.

Mes remerciements vont également à tout le staff de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Bari, notamment à Mr C. Lacirignola, Directeur de L'IAM de Bari, Mr M. Raeli Administrateur Général, Mme O. Antonelli, Mr N. Driouech, Mme L. Albitar et Mr V. Verrastro.

Je tiens aussi à exprimer toute ma reconnaissance à tous le personnel du CTAB pour leur aide et leur gentillesse, je cite Mme L. Ladhari, Mlle H. Guerissa et les Mrs Y. Omar, H. Nabli, K. Gueddes Fathi, Néjib, Menaâ et Mohamed.

Je suis aussi très reconnaissant à Monsieur M. Mahjoub qui a accepté de m'accueillir dans son laboratoire de Phytopathologie ainsi qu'à Mme M. Daami qui m'a fait bénéficier de son expérience et de ses précieux conseils.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur K. Kraim chef du laboratoire de Zootechnie et à Mlle S. Rym ainsi qu'aux personnels de la Station d'Appui de Monastir (SAM) : Mr H. Rochdi et Mme Jamila .

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance et mon amitié à Mr H. Ben Salem pour les encouragements qu'il n'a cessé de m'apporter.

Je remercie aussi Monsieur H. Abdouli de la confiance qu'il a mise en moi en me proposant pour ces études de Master.

Mes sentiments de remerciements s'adressent également à Mr Ch.Ikbel pour son aide et ses conseils en statistiques.

En fin, j'adresse mes sentiments de gratitude à tous mes amis et collègues de l'agriculture biologique qui m'ont aidé d'un énorme soutien : Mlle I.Jaouadi, Mlle F.Hallac, Mrs H.Hafid, R. Laanaya, et A.El Gharably.

RESUME

L'étude des paramètres de compostage d'un mélange de différentes matières organiques formant les quatre traitements suivants :

- **1^{er} traitement** :100% de fumier bovin.
- **2^{ème} traitement** : 80% de fumier bovin + 20% fumier ovin.
- **3^{ème} traitement** :70% de fumier bovin+20%fumier ovin+10%fiente de volaille.
- **4^{ème} traitement** :50% fumier bovin+20%fumier ovin+20%fumier de volailles+10%paille broyée.

a montré une différence de comportement au niveau des températures qui ont été plus importantes pour le T₄ riche en carbone que pour les autres traitements. Le pH basique de départ a diminué pour tous les traitements pour s'approcher de la neutralité en fin du processus du compostage surtout pour le traitement T₁. Il est aussi à noter une baisse de la concentration en azote probablement par le lessivage à cause du rapport C/N de départ qui était faible.

A partir de ces différents traitements et au stade de maturité des composts on a extrait le jus de compost après 5 jours d'incubation. Ces extraits utilisés sur des champignons (*Rhizoctonia solani*,*Fusarium solani*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium roseum*, *Fusarium graninearum* et *Phytophthora erythroseptica*) *in vitro* et *in vivo* ont démontré une bonne efficacité des traitements surtout le T₄ qui a inhibé considérablement le développement de la pourriture sèche du *Fusarium solani* sur les tubercules de pomme de terre destinées au stockage. Le *Fusarium solani* étant le principal champignon contaminant les sols Tunisiens d'où l'importance des résultats obtenus. Néanmoins, d'autres études doivent être conduites pour fixer le meilleur mode d'extraction (aérobie ou anaérobie), ainsi que la période optimale d'extraction et les doses de traitements.

Mots clés : Paramètres de compostage, Matières Organiques, Champignons, Jus de compost, *in vitro*, *in vivo*, Stockage.

Abstract

The study of composting parameters of different organic mixtures which constitute four different treatments:

- **1st treatment** : 100% Cattle manure
- **2nd treatment** : 80% Cattle manure + 20% Sheep manure
- **3rd treatment** : 70% Cattle manure + 20% Sheep manure + 10% Poultry manure
- **4th treatment** : 50% Cattle manure + 20% Sheep manure + 20% Poultry manure+ 10% crushed wheat straw

Showed a difference of behavior at the level of the temperatures which were higher for T4 rich in carbon than for other treatments.

The basic pH in the beginning decrease for all treatments and approaches the neutrality at the end of composting process, essentially for T₁. Also, there's a decrease of nitrogen percentage during composting probably due to a low level of C/N ratio in the beginning.

In the maturity stage, a compost tea were prepared from different composts after 5 days of extraction period.

The four obtained compost tea, were experimented on different plants pathogens(*Rhizoctonia solani*, *Fusarium solani*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium roseum*, *Fusarium graminearum* et *Phytophthora erythroseptica*) in vivo and in vitro.

All the treatments were efficient against pathogens essentially T₄ which reduce considerably the dry rotten of *Fusarium solani* in potatoes tubers for storage.

Fusarium solani seems to be the most important pathogen which contaminates Tunisian soils. This shows the importance of our results.

However, other studies must be conducted in order to determine the better method of compost tea extraction (aerobic or anaerobic), also the optimal period of extraction and doses used in treatments.

Key words: Composting Parameters, Organic Mixture, Plant Pathogens, Compost Tea, *in vitro*, *in vivo*, Storage.

Sommaire

Chapitre 1 :Introduction	1
Chapitre 2 :Etude bibliographique	3
1.Disponibilité des matières organiques en Tunisie.....	3
2.Les différentes déjections animaux.....	5
2.1. Les fumiers.....	5
2.2. Les lisiers.....	7
2.3. Les purins	9
3. La matière organique en agriculture biologique	9
4. Les modes d'utilisation des matières organiques	10
4.1. L'incorporation à l'état frais	10
4.2. Le compostage.....	11
4.2.1. Historique.....	11
4.2.2. Définitions	12
4.2.3. Le processus du compostage.....	13
4.2.4. Les paramètres du compostage.....	20
4.2.5. Intérêt du compostage.....	26
4.2.6. Exemples de compostage de matières organiques	29
5. Effet de la matière organique sur les maladies des plantes.....	34
Chapitre 3 :Matériels et méthodes	40
1. Problématique	40
2. Objectifs	40
3. Caractérisation du site expérimental	41
4. Matières organiques utilisées.....	41
4.1. Le fumier bovin	41
4.2. Le fumier ovin.....	41
4.3. Le fumier de volaille	42
4.4. La paille	42
5. Dispositif expérimental	43
6. Conduite du compostage.....	45
7. Observations.....	47
8. Méthodes utilisées	46
8.1. mesure de la température	46
8.2. Détermination du pH	46
8.3. Détermination de la conductivité électrique spécifique	46
8.4. Détermination de la matière organique et des cendres.....	47
8.5. Détermination de l'azote total Kjeldahl	47
8.6. Détermination des minéraux	48
8.7. Détermination de la densité sèche	49
8.8. Etude de l'effet du jus de compost sur les maladies des plantes.....	49

8.8.1. Matériel Biologique	49
8.8.1.1. Variété de la pomme de terre	49
8.8.1.2. Agents pathogènes	49
8.1.3. Extraits de compost testés	50
8.1.4. l'Essai <i>in vitro</i>	50
8.1.5. l'Essai <i>in vivo</i>	51
8.1.6. Dispositif expérimental	52
9. Analyses statistiques.....	52
Chapitre 4 : Résultats et Discussions	53
1. Etude des paramètres du compostage	53
1.1. Evolution de la température.....	53
1.2. Evolution du pH	56
1.3. Evolution de la conductivité électrique	58
1.4. Evolution de la densité.....	60
1.5. Evolution du rapport Carbone/azote(C/N).....	61
1.5.1. Evolution de l'azote total	61
1.5.2. Evolution du rapport C/N	63
1.6. les minéraux	64
1.6.1. Eléments d'intérêt environnemental	65
1.6.1.1. Le Fer	65
1.6.1.2. Le Manganèse	66
1.6.1.3. Le Zinc	67
1.6.1.4. Le Cuivre	69
1.6.2. Eléments d'intérêt agronomique	71
1.6.2.1. Le Potassium	71
1.6.2.2. Le Calcium	72
1.6.2.3. Le Magnésium	73
1.7. Classification des composts obtenus	75
2. Effet du jus de compost sur les maladies des plantes	76
2.1. Essai <i>in vitro</i>	76
2.1.1. <i>Phytophthora erythroseptica</i>	76
2.1.2. <i>Rhizoctonia solani</i>	76
2.1.3. Les <i>Fusariums</i>	78
2.2. Essai <i>in vivo</i>	80
2.2.1. <i>Phytophthora erythroseptica</i>	80
2.2.2. Les <i>Fusariums</i>	82
Chapitre 5 : Conclusion	85
Références bibliographiques	

LISTE DES TABLEAUX

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE:

- p.3 –Tableau 1 : Quantités et composition chimique des principaux résidus de récolte et sous-produits agro-industriels disponibles en Tunisie.
- p.4 –Tableau 2 : Périodes de disponibilité des sous-produits et des résidus de récolte en Tunisie.
- p.5 –Tableau 3 : Evolution des effectifs du cheptel
- p.5 –Tableau 4 : Composition des fumiers de bovins selon le type d'élevage, en kg par tonne de produit brut.
- p.6 –Tableau 5 : Quantité de fumier produite (kg produit brut/animal/jour)
- p.6 –Tableau 6 : Quantité de fientes produites en Tunisie en 1999
- p.8 –Tableau 7 : Composition des lisiers, en Kg par tonne de produit brut
- p.9 –Tableau 8 : Composition des purins, en kg par tonne de produit brut selon le mode de stabulation
- p.17 –Tableau 9 : Quantité d'êtres vivants intervenant à un moment ou à un autre pendant le compostage.
- p.18–Tableau10 : Flores contribuant au compostage.

MATERIELS ET METHODES:

- p.42–Tableau 11 : Quelques caractéristiques physiques des matériaux de départ.
- p.43 –Tableau 12 : Quelques caractéristiques chimiques des matériaux de départ.
- p.45 –Tableau 13 : Analyse de l'eau d'irrigation(eau de barrage).**

RESULTATS ET DISCUSSIONS:

- p.58 –Tableau 14 : pH au cours du processus du compostage.
- p.59 –Tableau 15 : conductivité électrique au cours du processus du compostage (mmoh/cm)
- p.61 –Tableau 16 : Densité au cours du processus du compostage.

- p.63 –Tableau 17 : Evolution de l'azote total au cours du processus du compostage.
- p.64 –Tableau 18 : Rapport C/N au cours du processus du compostage
- p.66 –Tableau 19 : Concentration en fer au cours du processus du compostage (mg/kg).
- p.67 –Tableau 20 : Concentration en manganèse au cours du processus du compostage (mg/kg).
- p.69 –Tableau 21 : Concentration en Zinc au cours du processus du compostage (mg/kg).
- p.70 –Tableau 22 : La concentration en Cuivre au cours du processus du compostage (mg/kg).
- p.72 –Tableau 23 : Concentration en potassium au cours du processus du compostage (mg/kg)
- p.73 –Tableau 24 : Concentration en calcium au cours du processus du compostage (mg/kg).
- p.75 –Tableau 25 : Concentration en Magnésium au cours du processus du compostage (mg/kg).
- p.75 –Tableau 26 : Composition des composts obtenus et leur classement.
- p.77 –Tableau 27 : Diamètre des colonies du *Rhizoctonia solani*.

LISTE DES FIGURES ET DES PHOTOS

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE:

p.13 – Figure 1 : Exemple d'évolution de température pendant le compostage d'un fumier de bovins

p.15– Figure 2 : Exemple d'une coupe d'un andain en phase thermophile, montrant l'hétérogénéité des températures.

p.22 – Figure 3 : Le compostage : une question d'équilibre entre l'eau, l'air, le carbone et l'azote.

p.25 – Figure 4 : Courbe de variation du pH au cours du compostage.

RESULTATS ET DISCUSSIONS:

p.55 – Figure 5 : Evolution de la température au cours du processus du compostage.

p.57 – Figure 6 : Evolution du pH lors du processus de compostage.

p.59 – Figure 7 : Evolution de la conductivité électrique lors du processus de compostage.

p.60 – Figure 8 : Evolution de la densité lors du processus de compostage

p.62 –Figure 9 : Evolution de l'azote total lors du processus de compostage

p.64 –Figure 10 : Evolution du rapport C/N lors du processus de compostage

p.65 –Figure 11 : Evolution de la concentration en Fer lors du processus de compostage

p.67 –Figure 12 : Evolution de la concentration en Manganèse lors du processus de compostage.

p.68 –Figure 13 : Evolution de la concentration en Zinc lors du processus de compostage

p.70 –Figure 14 : Evolution de la concentration en cuivre lors du processus de compostage

p.71 –Figure 15 : Evolution de la concentration en Potassium lors du processus de compostage

p.73 –Figure 16 : Evolution de la concentration en calcium lors du processus de compostage

p.74 –Figure 17 : Evolution de la concentration en Magnésium lors du processus de compostage

p.80 –Figure 18 : Résultats des essais *in vitro* des extraits sur différents genres de *Fusarium*.

p.82 –Figure 19 : Résultats des essais *in vivo* des extraits sur deux souches de *Phytophthora erythroseptica*.

p.83 –Figure 20: Résultats des essais *in vivo* des extraits sur les *Fusarium*.

p.77 –Photo1 : Effet du traitement 4 sur la culture *in vitro* du *Rhizoctonia solani*.

p.79 –Photo2 : Effet du traitement 4 sur la culture *in vitro* du *Fusarium graminearum*.

p.79 –Photo3 : Effet du traitement 2 sur la culture *in vitro* du *Fusarium graminearum*.

p.84 –Photo4 : Action inhibitrice du traitement 4 sur le *Fusarium solani*.

Introduction.

L'agriculture biologique a été suscitée par l'opposition d'agriculteurs et de scientifiques à la fertilisation minérale et artificielle des plantes. En effet en 1946 a été créée en Grande-Bretagne la 'Soil Association' qui est issue du mouvement pour une agriculture organique inspiré par les théories développées par Albert Howard dans son 'Testament agricole'. Celui-ci opposa aux fertilisants minéraux et artificiels, le compost.

L'agriculture biologique nécessite une période de conversion de l'unité agricole, l'application des règles du mode biologique et la certification de conformité selon la réglementation en vigueur.

Comme l'indique son appellation anglaise 'Organic Agriculture', l'agriculture biologique est basée sur la fertilisation du sol par l'apport de matières organiques, celles-ci en plus de leur rôle de réservoir d'éléments nutritifs, ont un rôle majeur dans la fertilité physique des sols, de leur aération et de leur résistance à la dégradation et l'érosion.

Leurs surfaces, réactives, chargées pour certains composés et développant un potentiel important des forces de Van der Waals, combinées à leur souplesse, confèrent au sol des propriétés de cohésion. De plus, le caractère hydrophobe de certains composés ralentit la pénétration brutale de l'eau dans les agrégats et évite l'éclatement qui peut en résulter. Enfin, les matières organiques sont dans beaucoup de sols pauvres, la principale composante du complexe absorbant, c'est à dire la source des charges retenant les cations (ITAB,2001).

Pour ces raisons les matières organiques sont essentielles pour la fertilisation en agriculture et la base du mode de production par les techniques biologiques.

En Tunisie, où la pratique de l'agriculture biologique est assez récente (les années 80). L'utilisation des matières organiques prend de plus en plus d'importance surtout suite à l'augmentation rapide des superficies converties en productions biologiques. En effet, durant les quatre dernières années (les superficies sont passées de 300 ha

en 1997 à 16800 ha en 2001, (Ben Kheder, 2002)). L'essentiel des superficies sont converties en arboriculture, caractérisée par peu de reliquats organiques. Les grandes cultures et les productions animales sont encore peu développées. Les quantités de matières organiques (résidus de récolte, déjections animales) pouvant être utilisées à l'état frais et issues de l'agriculture biologique ne suffisent pas aux besoins de cette agriculture.

Néanmoins l'agriculture conventionnelle dispose de grandes quantités (sous-produits de l'agro-industrie et des déjections animales) qui ne peuvent être utilisées en mode biologique qu'après compostage et selon certaines conditions.

Aussi des études conduites aux USA, en Allemagne et en Israël ont démontré que le jus de compost peut être utilisé comme moyen de lutte contre certains champignons et maladies des plantes essentiellement en Agriculture biologique.

Les travaux relatifs au compostage en Tunisie sont encore à leur début et n'ont touché que certaines matières organiques (Ben Rouina ,2002).

En conséquence, notre travail consiste à étudier le compostage de différents types de matières organiques et évaluer la qualité des composts obtenus. A la fin du processus de compostage des essais in vitro et in vivo seront conduits pour évaluer la capacité des jus de compost à inhiber le développement et la propagation de certains champignons.

Etude bibliographique.

1. Disponibilité des matières organiques en Tunisie

La Tunisie a l'avantage de posséder une multitude de ressources de matières organiques facilement exploitables en agriculture biologique notamment par le procédé de compostage ; ce sont les sous-produits agro-industriels en grandes quantités (tableau 1) et disponibles durant presque toute l'année (tableau 2).

Tableau 1 : Quantités et composition chimique des principaux résidus de récolte et sous-produits agro-industriels disponibles en Tunisie (Ben Salem et Nefzaoui, 1999 et Ministère de l'Agriculture, 1999).

Sous-produit	Quantité (tonne/an)	MO (g/KgMS)	MAT (g/KgMS)
Paille (blé- orge)	1500 000	920	35
Son de blé	300 000	944	181
Gruaux	50 000	980	153
Grignons d'olive	165 000	960	100
Feuilles et brindilles d'olive	800 000	910	90
Pulpe de betterave	70 000	910	100
Pulpe de tomate	18 000	960	200
Marc de raisin	15 000	920	130
Drêches de brasserie	9 000	950	300
Litière et fiente de volailles	659325		
Fiente	-	740	290
Litière	-	800	250

*MO(g/kgMS) : Matière organique.

**MAT(g/kgMS) :Matières azotées totales.

Tableau 2 : Périodes de disponibilité des sous-produits et des résidus de récolte en Tunisie (d'après Chermiti et al., 1999).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
S/P de céréales												
Chaumes						***	***	***				
Pailles	***	***	***	***	***	***	***	****	***	***	****	****
Sons	***	***	***	***	***	***	***	****	***			****
S/p de l'olivier												
Grignons d'olive	***	***									****	****
Bois de taille	***	***										
S/p de l'industrie												
Marc de raisin							***	***	***		***	
Sarment de vigne	***	***							***	***		
Pulpes de betterave	***	***				***	***					***
Pulpes de tomate								***	***			
Pulpes d'agrumes	***	***									***	****
S/p dattes	***	***									****	***
Pulpes												
Noyaux	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	****
S/Pd'origine animale	*											
Fientes de volailles												
Farines de poissons												

*peu important
 ***importance moyenne
 ****très important

A part les sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, l'agriculture biologique en Tunisie peut disposer des déjections animales du cheptel bovin et ovin qui ne cessent de s'accroître d'une année à l'autre (tableau 3).

Tableau 3 : Evolution des effectifs du cheptel (x1000 têtes).(Ministère de l'Agriculture)

Espèces	Enquête 1961-1962	Enquête 1994-1995	Taux dévolution(%)
Bovins	557	654	+17%
Ovins	2349	6221	+165%
Caprins	285	1205	+323%

2. Les différentes déjections animales

Sous l'appellation 'déjection animales', appelées aussi 'engrais de ferme' L'ITAB(2001a), regroupe tous les types de déjections produites dans une ferme.

2.1. Les fumiers

Tillie et Capdeville (1992) rapportent (tableau 4) que la composition chimique des fumiers est variable suivant la catégorie d'animaux élevés, des rations de base distribuées, des modes de paillage pratiqués etc.

Tableau 4 : Composition des fumiers de bovins selon le type d'élevage, en kg par tonne de produit brut (IFE,1993).

Type de fumier	M.S	M.O	N _{total}	P ₂ O ₅	K ₂ O
Fumier très compact de litière accumulée	221	180	5.8	2.3	9.6
Fumier issu de litière sur sol en pente	182	148	4.9	2.3	9.3
Fumier issu d'étable à stabulation entravée	185	152	5.3	1.7	7.1
Fumier compact issu de logette	190	160	5.1	2.3	6.2

Les quantités de fumier produites dépendent aussi selon Ziegler et Hedit (1991), (tableau 5) du mode de stabulation et de la catégorie des animaux.

**Tableau 5 : Quantité de fumier produite (kg produit brut/animal/jour)
(Ziegler et Hedit, 1991).**

Type de bâtiment Animaux	Stabulation 100% paillée	Stabulation 50% paillée	Etable entravée
Vaches laitières	39	25	22
Vaches allaitantes	35	22	19
Génisses de 6 à 15 mois et Taurillons de 6 à 12 mois.	13	8	7
Génisses de plus de 15 mois et Taurillons de 12 à 24 mois.	22	14	12
Veaux de 0 à 6 mois	8,5	5,5	5

**Tableau 6 : Quantité de fientes produites en Tunisie en 1999(Ministère
de l'Agriculture).**

Type de poulettes	Production (t/an)
Reproducteurs chair et dindes	43351
Reproducteurs ponte	4774
Poules pondeuses	446600
Poulets de chair	106600
dindes	58000
Production totale= 659 325 t/an	

En Tunisie, la quantité des fientes produites varie suivant le type de volailles envisagé. En effet, les poulettes produisent 12 Kg de fumier jusqu'à 20 semaines lors d'élevages au sol, alors que les pondeuses et reproducteurs donnent 150 à 200 g par poule et par jour soit 65 kg par an au minimum. Quant aux dindes de type Médium, ces dernières produisent 15 kg par sujet en 12 à 15 semaines d'élevage.

En conclusion, la quantité des fientes produites dépend de plusieurs paramètres : la spéculation et l'espèce, la consommation alimentaire, le poids des sujets, la durée d'élevage des animaux et le mode d'élevage.

Il est à noter que les poulets de chair produisent à eux seuls 2 kg de fientes par sujet, soit 1.7 à 2.3 kg en 7 à 8 semaines d'élevage ; dont le 1/3 est constitué de fientes et 2/3 de litière.

2.2. Les lisiers

Les lisiers sont des mélanges liquides de fèces et d'urines avec quelques déchets de litière ou d'aliments. On distingue les lisiers liquides, dont le taux de matière sèche est inférieur à 13%, et les lisiers pailleux, qui contiennent une quantité variable de litière, et dont le taux de matière sèche moyen varie de 10 à 20 % (ITEB, 1991). Les lisiers présentent différentes contraintes environnementales (Adas, 1993) par leur richesse en nitrates et certains métaux tel que le cuivre et le zinc. Le tableau 7 présente la composition des lisiers.

**Tableau 7: Composition des lisiers, en Kg par tonne de produit brut
(Ziegler et Hedit, 1991).**

	M.S	M.O	C/N	pH	Ntotal	NH₄⁺	P₂O₅	K₂O	CaO	MgO
Vaches laitières lisier complet	120	55	8	7.1	5	2.5	2.5	6	2.4	0.7
Vaches laitières Aire d'égouttage	185	128	-	6.8	6	1.5	2.8	4.2	1	0.9
Bovins à viande	150	107	-	7.2	5.2	3.1	3.1	5	4.5	1.5
Veaux	19	10	-	7.4	2.7	2.1	2.1	3.8	0.3	0.3
Porcs engraissement Alimentation farine	80	70	8	7.6	5.5	3.5	6	3	3.5	0.8
Porcs engraissement alimentation sérum	60	40	-	6.8	4.5	2.6	4	2.3	5.9	2.8
Truites gestantes	100	69	-	7.4	5.5	3.6	6.5	2.4	6.7	1.5
Porcelets	88	66	-	7.2	6.3	3.5	5.6	2	4.8	1.8
Poules pondeuses	258	182	-	7.1	10.5	7.4	10.4	7.2	40.5	3
Poulet de chair	330	239	-	-	16	-	12	8.7	8.8	1.2
Dindes	440	362	-	-	32.6	7	21.2	7.7	23.5	3.7
Canards	390	-	-	-	11	-	14	5	-	-
Lapins	260	182	-	8.5	8.5	1.9	13.5	7.5	13.9	3.5

2.3. Les purins

D'après l'ITAB (2001b), les purins sont des exsudats liquides provenant du stockage des fumiers, comprenant éventuellement des urines (moins de 3% de matière sèche), ou constitués d'eau de pluies souillées lors de leur passage sur, ou à travers du tas de fumier. Ziegler et Hédit (1991), présentent la composition de quelques purins (tableau 8).

Tableau 8 : Composition des purins, en kg par tonne de produit brut selon le mode de stabulation (Ziegler et Hédit ,1991).

	MS	MO	PH	N _{total}	NH ₄ ⁺	P ₂ O ₅
Vaches laitières étable entravée	30	15	-	2,9	2,5	0,2
Vaches laitières lessivage fumières	10	5	7,8	0,6	0,5	0,2

Il est à noter que la densité des purins étant proche de 1 alors 1t=1m³.

3. La matière organique en agriculture biologique

En agriculture biologique, l'utilisation des différents types de matières organiques est régit par un cahier de charge et des dispositions réglementaires. Les produits utilisables en mode biologique sont énumérés dans l'annexe II du règlement européen n° 2092/91. Cet annexe I, vient en complément de l'annexe I " principes de production biologique dans les exploitation".

L'annexe II mentionne que la fertilité et l'activité biologique du sol doivent être maintenues ou augmentées, en premier lieu par : (1) la culture de légumineuses, d'engrais verts ou de plantes à enracinement profond dans le cadre d'un programme de rotation pluriannuelles approprié;

(2) l'incorporation dans le sol de matières organiques compostées ou non dont la production est assurée par des exploitations se conformant aux dispositions du règlement CEE 2092/91.

Pour les déjections animales, leur utilisation est soumise à une obligation ou non à être compostées suivant leur origine. Ainsi les déjections provenant d'un élevage en agriculture biologique peuvent être utilisées sans être compostées et sans restrictions.

Pour les déjections ne provenant pas d'un élevage en agriculture biologique, trois cas de figure sont possibles :

- Elles proviennent d'un élevage extensif : elles peuvent être utilisées comme celles provenant d'un élevage en agriculture biologique et donc sans être compostées.
- Elles proviennent d'un élevage intensif : elles doivent être compostées.
- Elles proviennent d'un élevage hors-sol : elles ne peuvent pas être utilisées.

4. Les modes d'utilisation des matières organiques

4.1. L'incorporation à l'état frais

L'ITAB (2001c) rapporte que selon le type de matière organique, les modes de traitement, les doses utilisées, les dates et les techniques d'incorporation au sol, certains effets négatifs sur l'environnement sont possibles : dégagement de gaz nocifs (mauvaises conditions d'épandage), risques pour les eaux (nitrates, phosphates) et contamination des sols (éléments traces métalliques).

En ce qui concerne la pollution par les nitrates, Eriksen et al.,(1999) ont mené une expérimentation avec cases lysimétriques pour mesurer les pertes d'azote par lessivage au champs. L'étude a porté sur l'effet du type de fumier, des cultures et de la densité du troupeau sur les lessivages d'azote d'une rotation pâture/cultures d'une ferme biologique pendant 4

années au Danemark, et a montré l'intérêt de la gestion de l'inter culture pour éviter les pertes d'azotes.

Les travaux scientifiques portant sur le lessivage des nitrates en agriculture biologique sont encore peu nombreux. D'une part parce qu'il s'agit d'un mode de production marginal couvrant une faible superficie, d'autre part parce que les moyens de la recherche agronomique développés dans ce domaine sont très faibles. Néanmoins dans plusieurs pays d'Europe, des scientifiques ont rapporté des pertes

en azote inférieures en agriculture biologique par rapport à l'agriculture conventionnelle. Ainsi au Danemark, sur 30 fermes en polyculture-élevage, dont 14 en agriculture biologique, une étude a montré que l'azote pouvant être potentiellement perdu est significativement plus faible en agriculture biologique qu'en agriculture conventionnelle. Aux Pays-Bas, Van der werf et al. (1995) ont mesuré des surplus en azote dans des fermes de polyculture- élevage biologique de 110 Kg d'N/ha/an contre 500 Kg/ha/an dans les fermes laitières conventionnelles , avec des coefficients d'efficacité de l'azote variant de 14 à 40% dans les fermes biologiques et de 14 à 25% dans les fermes conventionnelles.

D'autres études menées par le GRAB(1988) et Leclerk et al.,(1995) sur différents types de fumier et différents composts apportés à différentes cultures ont montré que le compost de fumier a donné les meilleurs rendements avec de moindre pertes d'azote par lessivage.

En ce qui concerne la pollution de l'air, Gibbs et Lewis (1989) rapportent que le fumier conservé dans des conditions anaérobies (enfouis dans le sol) dégage plus de méthane que le fumier en contact avec l'air.

4.2.Le compostage

4.2.1. Historique

Le compostage n'est pas une technique récente mais très ancienne pratiquée dès l'Antiquité. Depuis des millénaires, les Chinois ont rassemblé et composté toutes les matières organiques du jardin, des champs, de la maison y compris les matières fécales.

Au Proche-Orient par exemple, une aire de dépôt des déchets urbains était aménagée devant les portes de Jérusalem : certains déchets étaient brûlés et les autres compostés.

Aussi le mot 'compost' vient du latin 'Compositus' qui signifie 'composé de plusieurs choses'. Les romains appelaient ainsi les préparations de légumes et de fruits avec des adjonctions d'huiles, de sel et d'autres adjuvants. C'est sous ce nom que la Choucroute a été introduite en Europe centrale au XI^{ème} siècle.

4.2.2. Définitions

La définition du compost n'est pas une chose facile car c'est un processus complexe, plusieurs interprétations du compostage peuvent exister selon que les auteurs prennent en compte le caractère naturel des transformations observées et des réactions biochimiques ou la maîtrise de la technique par l'homme.

Pour Gotschall et al.(1991), le compostage est la culture de la faune et de la flore naturelle du sol activées par aérations du tas. Mustin (1987) le considère comme étant un procédé biologique assurant la décomposition des constituants organiques des sous-produits. Quant aux suisses Gobat et al.(1998), le compostage est un procédé de traitement intensif des déchets organiques qui met en œuvre, en les optimisant, des processus biologiques aérobies de dégradation et de stabilisation des matières organiques complexes.

Hoitink(1995)., voit dans le compostage une technique artificielle qui démarre et se poursuit sous conditions maîtrisées au lieu d'accepter le résultat d'une décomposition naturelle incontrôlée. La définition la plus précise du processus reste celle de Godden (1986) qui désigne par le compostage un processus de transformation biologique de matériaux organiques divers. C'est un processus oxydatif qui comprend une phase thermophile. Les produits formés sont principalement du CO₂ et un produit stabilisé : Le compost mûr. Les déchets organiques de départ sont colonisés, transformés par une succession de différentes populations

microbiennes. Chacune de ces populations modifie le milieu puis est remplacée par d'autres mieux adaptées à ces nouvelles conditions.

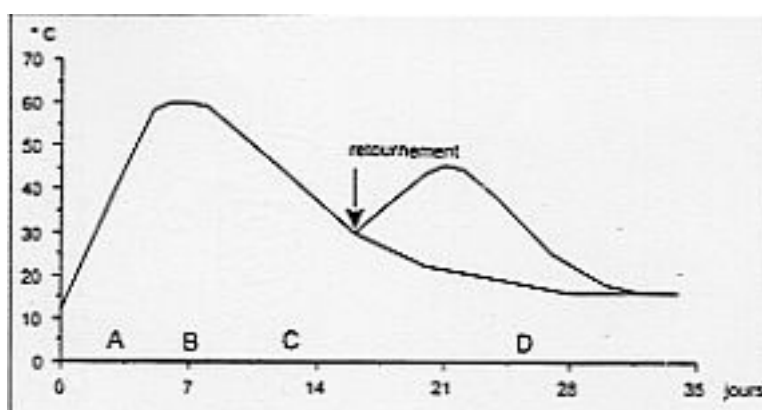
D'après l'ITAB(2001d), d'autres définitions peuvent être retenues en fonction du type de produit à traiter ou en fonction de l'objectif du compostage recherché. La nécessité d'une définition est très liée au règlement européen sur l'agriculture biologique, qui oblige au compostage de certaines déjections mais sans en donner de définition.

Le compostage est donc 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 aérobie.

4.2.3. Le processus du compostage

Le processus de compostage peut être décomposé en 4 phases. Plusieurs paramètres (température, PH, taux d'oxygène...) présentent des variations au cours du compostage. L'évolution de la température, qui exprime l'activité de la succession de populations microbiennes liées aux modifications du milieu, est la manifestation la plus perceptible de la dynamique du compostage. Elle permet de distinguer quatre phases (figure1).

Figure 1 : Exemple d'évolution de température pendant le compostage d'un fumier de bovins (Godden, 1995).



A : phase mésophile

B : phase thermophile

C : phase de refroidissement

D : phase de maturation

4.2.3.1. Les phases du processus de compostage

- **La phase mésophile :(A)**

C'est la phase initiale de compostage. Les matières premières sont envahies par les micro-organismes mésophiles indigènes (bactéries et champignons essentiellement) ; leur activité engendre une montée en température (de 10-15°C à 30-40°C) un dégagement important de CO₂ (d'où la diminution du rapport C/N) ainsi qu'une acidification.

La dégradation de la cellulose durant cette phase est responsable de plus de 75% de la perte de poids sec

- **La phase thermophile : (B)**

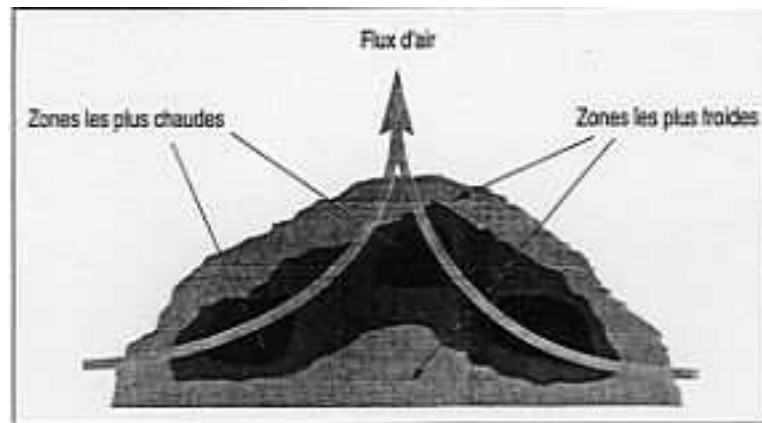
Elle est atteinte au centre du tas, à des températures élevées (de l'ordre de 60 à 70°C) pour les composts agricoles, auxquelles ne résistent que des microorganismes thermotolérants ou thermophiles (arrêt de l'activité des champignons développement des actinomycètes et des bactéries thermophiles).

Les pertes en azote, minéralisé sous forme ammoniacale (NH₄⁺) qui peut être volatilisé sous forme d'ammoniac (NH₃) dans certaines conditions, ainsi que l'évaporation d'eau, sont plus importantes au cours de cette phase. La libération de

CO₂ peut entraîner, à la fin des phases thermophiles, jusqu'à 50% de perte en poids sec.

Les hautes températures caractérisant la phase thermophile ne concernent que le centre du tas (voir figure2).

Figure 2 : Exemple d'une coupe d'un andain en phase thermophile, montrant l'hétérogénéité des températures (Gobat et al., 1998).



Les matières présentes en bordure du tas doivent être reprises par un ou deux retournements. Après un retournement on observe la succession des 3 phases (mésophile, thermophile, de refroidissement) (ITAB, 2001d); les températures atteintes en phase thermophile sont cependant de moins en moins élevées au fur et à mesure des retournements. Cette technique permet de s'assurer que tous les éléments du tas subissent les différentes phases de compostage afin que le produit final soit homogène et entièrement assaini.

- **La phase de refroidissement : (C)**

C'est la phase intermédiaire entre la phase thermophile et la phase de maturation. Elle prend fin avec le retour à la température ambiante. Le milieu est colonisé de nouveau par des micro-organismes mésophiles. Ils dégradent les polymères restés intacts en phase thermophile et incorporent l'azote dans des molécules complexes.

- **La phase de maturation : (D)**

Cette phase présente peu d'activités micro biologiques (recolonisation par des champignons) mais est adaptée à la colonisation par la macro-faune, en particulier les lombrics lorsque ceux-ci sont présents dans l'environnement

du tas. Les matières organiques sont stabilisées et humifiées par rapport aux matières premières mises à composter.

Les trois premières phases sont relativement rapides par rapport à la phase de maturation. Leur durée ainsi que l'amplitude des variations dépendent cependant des matériaux de départ et des conditions techniques dans lesquelles s'effectue le compostage.

Les dates des retournements ne peuvent donc être fixées selon un calendrier précis, mais sont déterminées par la baisse de la température. La phase de maturation se prolonge *a priori* jusqu'à l'épandage du compost.

Il est impossible de définir une période de maturation puisque celle-ci dépend de la composition des matières premières. Il est cependant possible de distinguer les composts des déchets ligno-cellulosiques (les fumiers) qui peuvent être utilisés au bout de 6 semaines (la phase de maturation est alors très courte, voire inexistante), des composts de déchets ligneux (les déchets verts par exemple) qui ne sont utilisés en général qu'au bout de 6 mois.

4.2.3.2. Les êtres vivants et le compostage

Les êtres vivants actifs dans le processus de compostage sont de deux types : micro-organismes et macro-organismes. 95% de l'activité du tas de compost due aux micro-organismes est réalisée par les bactéries, les champignons et les actinomycètes.

Bactéries et champignons sont responsables de l'accroissement de la température en phase mésophile, alors que les actinomycètes interviennent davantage en phase thermophile. Les bactéries, présentes dans la matière première, dominent en quantité et en diversité. Les champignons ont la possibilité de consommer les éléments non transformés par les bactéries, ils sont inactifs au-delà d'une température de 55°C et se trouvent donc principalement en périphérie du tas ou en phase de basses températures. Les actinomycètes s'attaquent aux structures très résistantes (cellulose, lignine). Il existe aussi des champignons ligninolytiques.

5% de l'activité du tas de compost est l'œuvre d'algues chlorophylliennes (dans les 10 premiers centimètres du tas, à pH neutre et

humidité élevée) et de cyanophycées, fixatrices d'azote atmosphérique (Godden, 1986 ; Zeglès et Masscho, 1999).

Les macro-organismes interviennent lorsque la température est inférieure à 40°C, c'est à dire essentiellement des lombrics mais aussi de nombreuses espèces d'insectes, acariens, gastéropodes, myriapodes, cloportes etc. (Zeglès et Masscho, 1999).

Tableau 9: Quantité d'êtres vivants intervenant à un moment ou à un autre pendant le compostage (Zeglès et Masscho, 1999).

Type d'organisme vivant	Nombre par kilogramme de compost
Bactérie	De 1 milliard à 10 milliards
Actinomycètes	De 1 million à 100 millions
champignons	De 10.000 à 1 million
Algues	10 millions
Virus	Indéterminés
Protozoaires	Jusqu'à 5 milliards
Lombrics	Jusqu'à 1000
Collemboles	10.000
Autres insectes et larves	2.000
Acariens	10.000
Crustacés (cloportes)	Jusqu'à 1.000
Gastéropodes (escargots, limaces)	20

Mustin (1987) donne une autre estimation par espèces de la flore contribuant au compostage et un résumé de l'action de ces microorganismes (tableau 10)

Tableau10: Flores contribuant au compostage (Mustin,1987).

Groupes	Caractéristiques et commentaires	Nombre estimé d'espèces dans les composts
Bactéries	<ul style="list-style-type: none"> - toujours présente dans les composts et largement dominantes en qualité et en quantité. - Forte croissance si C/N est faible et l'humidité est élevée. - Large spectre d'activité sur une large gamme de pH. 	800 à 1000 espèces au minimum
Champignons	<ul style="list-style-type: none"> - Dominants si C/N est élevé (dégradation de la cellulose et de la lignine) - Capable de croître avec des taux d'humidité plus bas. - Tolérance d'une large gamme de pH(2-9) 	Plusieurs dizaines de millier d'espèces.
Actinomycètes	<ul style="list-style-type: none"> - attaquent des substances non dégradées par les bactéries et les champignons. - Neutrophiles - Développement dans les phases finales du compost 	Plusieurs dizaines d'espèces.
Algues	<ul style="list-style-type: none"> - Organismes chlorophylliens - Retrouvés en surface et dans les premiers centimètres de la couche superficielle. - Utilisant des sels minéraux 	Idem
Protozoaires	<ul style="list-style-type: none"> - Grand groupe hétérogène d'unicellulaires mobiles de petites tailles. - Besoin d'un milieu humide 	Plusieurs dizaines d'espèces
Cyanophycées	<ul style="list-style-type: none"> -Procaryotes proches des bactéries. -Abondance avec une activité des bactéries 	Plusieurs dizaines d'espèces.

4.2.3.3. Evolution des éléments chimiques et biochimiques

L'évolution est rapide : en quelques semaines, plus de la moitié des matériaux de départ sont transformés.

- Les sucres simples, fractions solubles contenant du carbone, et les liquides, sont presque intégralement dégradés dès la phase mésophile
- La cellulose est dégradée pendant la phase mésophile thermophile, et de refroidissement, par des champignons(tels que les *Penicillium* et les *Mucorales*), des bactéries et des actinomycètes. Ces deux composés donnent des sucres utilisés par les micro-organismes comme source d'énergie.
- La lignine subit une biotransformation sans être dégradée en petites molécules (comme la cellulose qui est dégradée en glucose), avec inclusion d'azote dans les cycles, et déméthylation des fonctions méthoxyl (Godden et al.,1992). Dans une litière naturelle (premiers centimètres du sol), la ligninolyse est opérée essentiellement par certains champignons ne se développant pas à des températures élevées. Elles n'intervient donc pas durant la phase thermophile du processus. Il s'ensuit une conservation de la lignine, très favorable à la qualité du compost, la lignine étant un précurseur des substances humiques(Gobat et al., 1998)
- Les phosphates, présents dans les déchets à composter, ou ajoutés à faible dose avant(sur la litière des animaux) ou en cours du compostage, sont incorporé, lors du processus, à des molécules organiques, ce qui peut améliorer leur pouvoir fertilisant s'il s'agit de phosphates insolubles.
- Le potassium, le calcium, le magnésium, le soufre, sont contenus en quantités généralement suffisantes pour les besoins de la majorité des sols. Concernant les pertes de potassium pendant le compostage, on observe de très fortes différences en fonction du type de fumier. En effet les pertes en potassium sont essentiellement dues au tassement des fumiers pendant le compostage et donc liées au manque de structure, c'est à dire de pailles, des fumiers. Ce rapport paille/déjections s'exprime au travers du rapport

carbone/azote. Pour des C/N de 35, les pertes en potassium sont pratiquement nulles(Godden,1995).

- Le soufre peut être réduit en phase thermophile en hydrogène sulfuré par les bactéries sulforéductrices qui se développent jusqu'à 80°C. l'hydrogène sulfuré est ensuite réoxydé en sulfate dans le sol. Si le tas de compost présente des zones mal aérées, il peut cependant être perdu sous forme de H₂S gazeux (Gobat et al. ;1998).
- L'azote organique est minéralisé sous forme ammoniacale(NH₄⁺), qui se trouve en général rapidement incorporé dans la biomasse microbienne, avec en parallèle assimilation de carbone. Cette dégradation a lieu durant la phase thermophile, d'où des risques de volatilisation d'ammoniac au cours de cette phase. Pendant le refroidissement, une partie est oxydée par les bactéries nitrifiantes dès que la température devient inférieure à 45°C. Une partie de l'azote va réagir avec des sucres et autres composés carbonés pour se retrouver dans les composés humiques. L'azote peut être perdu sous forme de N₂ si le tas renferme des zones anoxiques ou de protoxyde d'azote, même si les quantités sont faibles, ou encore de NH₃ (Gobat et al. ;1998).

4.2.4 Les paramètres du compostage

4.2.4.1.Température

L'évolution de la température est le résultat de l'activité microbiologique.

Godden (1986) pense que les valeurs maximales de température atteintes durant la phase thermophile sont déterminées par les caractéristiques du milieu (nature des matières premières, taille des particules, dimensions et conformation du tas, humidité, aération etc.)

La température peut atteindre 70 à 80 °c au centre du tas (en particulier dans les tas de composts de fumier de cheval et de broussailles). Cependant, des températures supérieures à 70°C sont déconseillées car elles peuvent provoquer un dessèchement excessif, une perte de matière trop importante, voire un arrêt du processus (destruction des organismes vivants) et donc

une dégradation de la qualité du compost (combustion au lieu de transformation des matières organiques).

La production de chaleur par les micro-organismes au cours du compostage est proportionnelle à la masse du tas, alors que les pertes de chaleur dépendent de la surface. L'augmentation de la température est donc d'autant plus élevée que le rapport volume/surface du tas est grand.

Pour Mustin (1987), les microorganismes contrairement aux animaux homéothermes, ne peuvent pas réguler leur température. Ils restent à la température de leur milieu de croissance. Leur activité métabolique est profondément modifiée lorsque les températures sortent de la gamme optimale de chaque souche. En fonction de la température optimale de croissance, les microorganismes peuvent être ainsi classés ainsi en germe psychrophiles dont la température optimale de croissance varie de 5 à 15°C et qui se multiplient avec difficulté à - 5°C.

Les mésophiles ont une température optimale comprise entre 30 et 45°C et représentent les germes les plus nombreux de l'environnement.

Les thermophiles qui sont peu nombreux ont une température optimale de prolifération qui se situe au delà de 45°C, le plus généralement vers 50-60°C et dont la température maximale de croissance peut atteindre les 85°C.

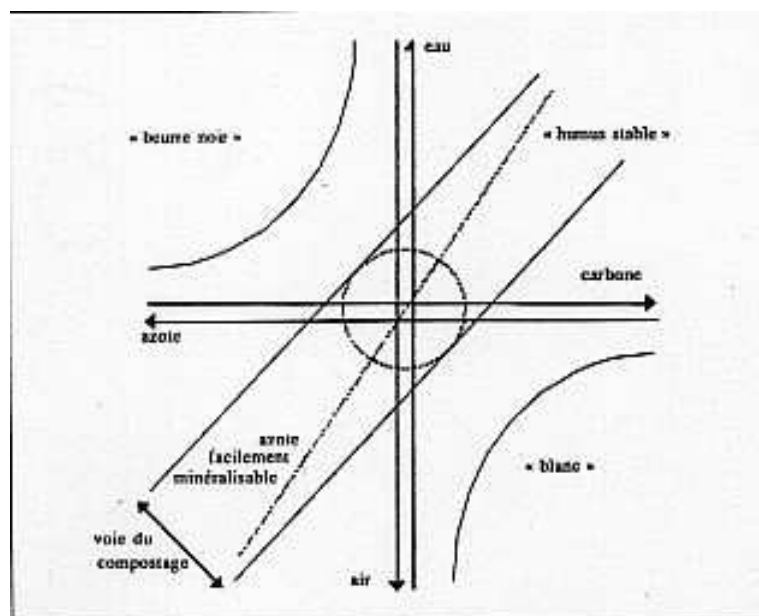
La chaleur produite lors de la fermentation renseigne, au même titre que le taux d'oxygène consommé ou le gaz carbonique produit. Toutefois, le suivi de la température représente une mesure indirecte de l'intensité microbienne de dégradation aérobie.

4.2.4.2.Humidité

Godden (1986) rapporte que le taux d'humidité dépend essentiellement des matériaux de départ. L'évaporation d'eau en phase thermophile doit parfois être compensée par un ou plusieurs arrosages du tas, il est donc difficile de définir les volumes d'eau à apporter. L'eau peut être ajoutée tant qu'aucun écoulement n'apparaît sous le tas, et à condition de ne pas bâcher en phase thermophile. Un échantillon présente une humidité correcte si en le pressant, on observe un écoulement de quelques gouttes. Un manque d'eau

entraîne l'apparition du 'blanc' (forme de résistance des actinomycètes et champignons) qui traduit un ralentissement de l'activité microbologique, et qui apparaît déjà à 40% de matière sèche en moyenne du tas. Il suffit d'un simple apport d'eau pour rétablir le processus de décomposition. Attention toutefois à ne pas apporter d'eau vers la fin du processus de compostage, puisque l'on ne relancera pas de phase thermophile et que l'on n'a aucun intérêt à augmenter le taux d'humidité (augmentation du coût de transport). Un excès d'eau (taux de matière sèche inférieur à 20%) provoque en revanche des conditions anaérobies défavorables(voir figure 3).

Figure 3 : Le compostage : une question d'équilibre entre l'eau, l'air, le carbone et l'azote.



4.2.4.3. Aération

L'aération est essentielle pour apporter l'oxygène indispensable au métabolisme des micro-organismes du compostage, c'est elle qui déclenche le processus de compostage. Une mauvaise ventilation du tas de compost présente plusieurs conséquences néfastes :

- Moindre élévation de la température car il y a ralentissement de l'activité des organismes aérobies.
- Diminution de la décomposition et transformations différentes pouvant aboutir à ce qui est appelé 'beurre noir'(résidu sombre,malodorant, de texture semblable à celle du beurre, donc difficilement récupérable et non épandable),
- Perte d'azote, sous forme de NH_3 , N_2O , N_2 (dénitrification)
- Perte de soufre, sous forme de H_2S .

D'après l'ITAB (2001e), pour éviter les tassements et les zones anaérobies en bas de tas pour les fumiers on ne cherchera pas les hauteurs supérieures à 1.5m, ce qui conduit à réaliser des tas allongés de section triangulaire, dont la largeur dépend des retournements d'andains utilisés (jusqu'à 4m). il est possible de composter des tas plus volumineux mais dans ce cas l'aération doit être contrôlée par des systèmes d'insufflation d'air, systèmes demandant trop d'investissement pour des entreprises agricoles. L'aération d'un tas de fumier à composter est liée à sa structure et donc à la quantité de paille apportée(ainsi que de la longueur des brins). Des valeurs de 6 à 7 Kg de paille/Unité Gros Bétail(UGB)/jour constituent un repère.

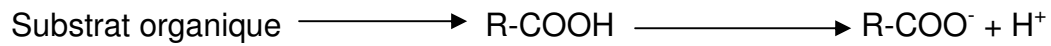
4.2.4.4.pH

Le pH oriente les réactions du compostage en favorisant certaines espèces de micro-organismes. Un pH acide est propice au développement des bactéries et champignons en début de compostage, alors qu'en pH basique se développent plutôt les actinomycètes et les bactéries alcalines. La plupart des bactéries qui interviennent dans le compostage ont leur optimum compris entre des pH de 6 à 8,

tandis que les champignons sont plus tolérants à des pH de 5 à 8.5 environ.

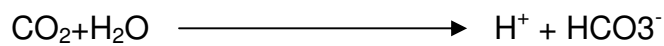
Au cours du compostage, plusieurs processus sont susceptibles de faire varier le pH de la masse organique :

L'acidification peut avoir plusieurs origines : elle peut résulter de la production d'acides organiques à partir des glucides, des lipides ou d'autres substances, selon la réaction ci-dessous :



Ces acides se dissocient en solution aqueuse et peuvent s'accumuler jusqu'à acidifier fortement le substrat.

Ainsi, la production de CO_2 lors de la dégradation aérobie contribue à l'acidification du milieu par sa dissolution dans l'eau, ce qui génère l'acide carbonique selon la réaction :



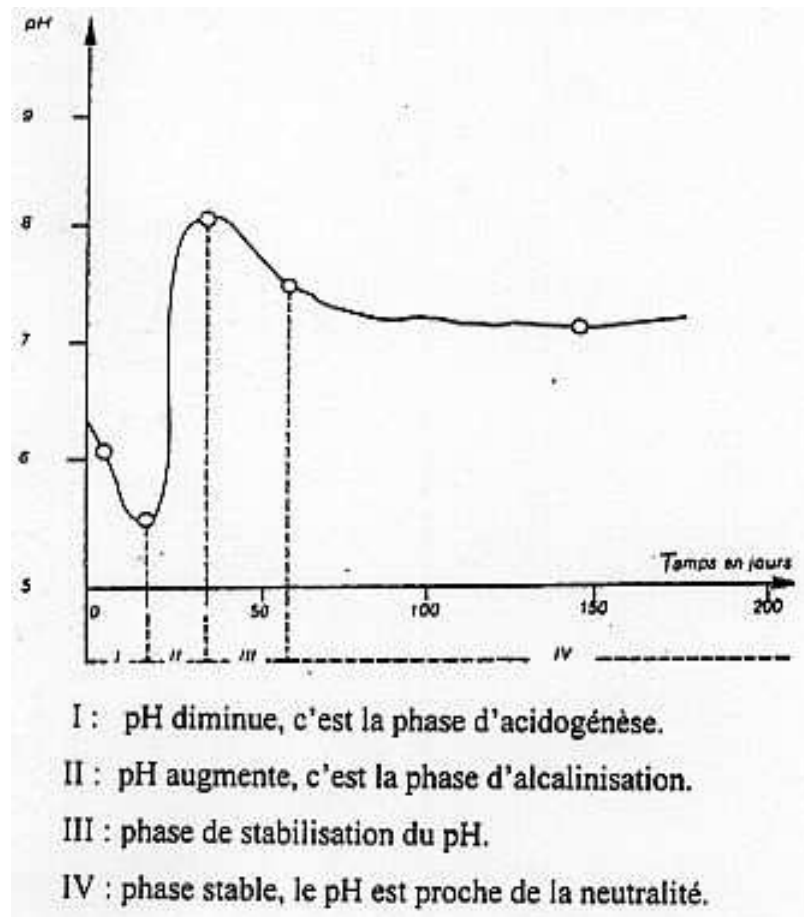
D'autre part, l'alcalinisation du milieu serait le résultat soit d'une production ammoniacale à partir de la dégradation des amines (protéines, bases azotée), soit de la libération des bases intégrées auparavant à la matière organique.

L'évolution du pH au cours du compostage renseigne sur les différentes phases du processus microbologique en cours (acidification en phase mésophile par exemple).

Ainsi , la mesure du pH est indispensable au cours du compostage, elle permet de suivre un processus fermentaire, ou même de l'orienter favorablement en le contrôlant (Mustin, 1987).

D'après Godden (1986) et Gobat et al.(1998), a la fin de compostage(phase de maturation), le pH s'équilibre vers la neutralité.

Figure 4 : Courbe de variation du pH au cours du compostage (Mustin, 1987)



4.2.4.5. Le rapport Carbone/Azote (C/N)

De façon générale, un manque d'azote implique un processus de compostage lent et un excès d'azote ou un défaut de carbone entraînent des pertes importantes en azote. Pour les fumiers à composter, l'optimum se situe pour un C/N de 25 à 35 (Godden, 1995). Un C/N trop bas du matériel de départ à composter traduit souvent un rapport litière/déjection trop faible, ce qui accroît fortement le risque de perdre de l'azote.

Selon l'ITAB(2001e), ce n'est pas tant le rapport C/N qui est déterminant pour le déroulement du compostage, que la structure de l'andain. Ainsi, il est préférable d'amener le carbone sous forme de paille, qui a un effet

structurant (enchevêtrement des brins, air à l'intérieur des tiges), que sous forme de sciure par exemple, qui va empêcher l'air de circuler suite au tassement. Le C/N peut être le même dans les deux cas, mais le facteur limitant sera le manque d'oxygène dans les andains contenant la sciure. Notons aussi que plus que le C/N, c'est la structure biochimique des molécules considérées qui détermine la vitesse de dégradation : ainsi pour un même C/N compris entre 8 et 10, les vitesses de décomposition des substances humiques sont de l'ordre de 2% par an, alors que pour des engrais verts la décomposition est très rapide.

Mustin (1987), rapporte que lors de la phase de fermentation aérobie active, les microorganismes consomment 30 fois plus de carbone que d'azote (les substrats organiques perdent plus rapidement leur carbone métabolisé et dégagé sous forme de gaz carbonique que leur azote métabolisé et ou perdu sous forme de composés azotés volatils comme l'ammoniac NH_3). Ainsi le rapport C/N idéal de départ doit être de 30 à 35, il va diminuer pour arriver en fin du processus de compostage à se stabiliser vers 10 (entre 15 et 8).

4.2.5. Intérêt du compostage

4.2.5.1. Réduction des volumes

La réduction des volumes est de l'ordre de moitié pour les fumier ou les déchets verts. Elle est due aux pertes de carbone et d'eau, suivies de tassements, qui ont lieu pendant le compostage. Cette réduction des volumes permet une réduction des stocks de fumier à épandre, dans un délai relativement court puisqu'en 6 semaines en moyenne ces stocks sont diminués de moitié. L'économie de temps réalisée grâce à la diminution des volumes à épandre couvre en général le temps nécessaire à la fabrication du compost (ITAB,2001f).

4.2.5.2. Concentration en éléments minéraux

Grâce à la diminution de masse, très supérieure à celle des fumiers de dépôts de même âge, les composts sont plus concentrés en éléments fertilisants que les fumiers (ITAB,2001f).

4.2.5.3. Assainissement vis à vis des adventices

Vaseix (1997) montre par la mise en sachets de voiles perméables à de graines d'*Avena fatua* et de *Raphanus raphanistrum* enfouies à 50 cm de profondeur pendant un mois dans un tas de compost chauffant à 60°C provoque leur destruction totale, la combinaison entre hautes températures et libération de facteurs biochimiques inhibiteurs au cours du compostage assure la destruction des graines. Ainsi, l'épandage de compost plutôt que de fumier frais peut permettre de résoudre le problème de la dissémination des Rumex en particulier, dont l'arrachage, en agriculture biologique, est fastidieux mais indispensable sous peine de rendre les prairies inaptées au pâturage.

Halberg (1999) et Ragdale et al.,(1992), rapportent que dans les essais réalisés, ils ne révèlent la présence d'aucune graine de mauvaise herbe en fin de compostage lorsque la température dépasse 55 à 60°C. Selon Wiart (1997), le temps nécessaire pour détruire les graines dépend de leur emplacement dans le tas : plus de 24 jours pour les graines placées en surface, 24 jours en moyenne à 30cm et 3 jours à 90cm du bord. Une recolonisation par les graines véhiculées par le vent est possible après la phase de refroidissement.

4.2.5.4. Assainissement vis-à-vis des agents pathogènes et parasites des animaux

Hacala (1998) rapporte que les déjections animales contiennent les agents pathogènes et les parasites des animaux malades ou sains en état latent. Ce problème empêche bien souvent l'épandage des matières organiques sur prairies, ce qui les prive d'une possibilité de fertilisation et réduit les surfaces d'épandage des matières organiques sur prairies. Le compostage des fumiers peut présenter une solution à ce problème. Le danger majeur concerne certaines bactéries, comme *Clostridium tyrobutyricum* (butyriques), *Clostridium botulinum* (botulisme), rare en élevage bovin mais observé dans les élevages avicoles, tel que les Listerias ou les Salmonelles. Leurs conditions de vie sont très diverses (pH, température) et certaines sont

résistantes pendant plusieurs semaines ; les formes de résistance de *Clostridium botulinum* (spores), ne sont pas sensibles à la chaleur et ne sont donc pas détruites au cours du compostage. (Hacala, 1998).

Hacala (1998), note que pour les troupeaux de bovin très contaminés en Salmonelles (104 à 106 Salmonelles pour 100g) ; un compostage de 6 semaines à 2 mois, avec 2 retournements à 7 jours d'intervalle, dans de bonnes conditions météorologiques (pas de pluie après retournement ou protection du tas), est une garantie d'assainissement quel que soit le type de Salmonelle concerné. L'efficacité est maximale si la température est maintenue au-dessus de 50 °c pendant 3 à 4 semaines. Il suffit en effet d'une heure à plus de 67 °c pour détruire les Salmonelles, mais la durée minimale monte à 40 jours si la température n'est que de 41 °c.

De point de vue des parasites, le compostage réduit fortement la population d'Helminthes après 1 mois, mais il reste à vérifier si elle est détruite en totalité après plusieurs mois de compostage. La population de Coccidies est en revanche complètement éliminée (Lorthios, 1998).

Hacala et al.(1999) pensent que le compostage ne garantit l'hygiénisation du produit d'origine de certains parasites que s'il est réalisé dans de bonnes conditions. C'est la température qui sert d'indicateur mais il existe aussi d'autres facteurs d'hygiénisation (antagonismes microbiens, etc.) beaucoup plus difficiles à mesurer. Pour le compostage du fumier de bovins, il faut ainsi 6 semaines à plus de 50 °c pour détruire la plupart des pathogènes.

4.2.5.5.Destruction partielle ou totale des résidus de produits phytosanitaires

Halberg (1999), rapporte que des études effectuées aux Etats-Unis sur les 200 pesticides les plus courants ont révélé la présence en fin de compostage des produits les plus rémanents (le Chlordane: insecticide contre les termites; le Pentachlorophénol: fongicide pour le traitement du bois; le Captan, le Lidane et le 2,4-D).

L'activité de dégradation biologique au cours du compostage détruit la plupart des molécules et les résidus sont faibles ou nuls.

4.2.5.6. Absence d'odeur désagréable

Le compostage conduit à un produit qui rappelle l'odeur du terreau des litières de forêt. Même en cours de compostage il y a peu d'émission d'odeurs désagréable. Si de telles odeurs existent, elles traduisent une évolution incorrecte du compostage (manque d'oxygène) (ITAB,2001f).

4.2.5.7. Homogénéité du produit fini

Quel que soit l'équipement utilisé, les retournements opérèrent un mélange des matières à composter. Une des caractéristique du compost est son homogénéité, ce qui facilite grandement l'épandage. Le fumier stocké présente en revanche une 'structure fragmentaire' très hétérogène, imputable à la présence de 'mottes' plus au moins agglomérées ou prise en masse en fonction des zones et de la maturité du tas. Cette hétérogénéité du fumier entraîne des épandages grossiers et gêne notamment les apports sur prairies (ITAB 2001f).

4.2.5.8. Limitation des pertes d'azote nitrique

D'après Le Houérou (1993), le compostage a été étudié de manière à répondre à cet objectif :

La réduction de poids (40% environ pour fumier de bovin) et de volume (50% en moyenne) permet le transport du compost sur des passerelles trop éloignées pour faire l'objet d'épandage et permet simultanément de réduire les épandages sur les zones à risque limitant ainsi les pertes nitriques.

4.2.5.9. Lutte contre les maladies des plantes

Plusieurs recherches menées dans différentes partie du monde ont montré que le jus de compost en plus de son action fertilisante, pourrait être un moyen efficace de lutte contre les maladies fongique des plantes en stoppant ou en inhibant le développement des champignons pathogènes. Les études sont encore récentes et le mécanisme d'action du jus de compost n'est pas encore bien connue. Cette partie sera développée d'une façon plus approfondie plus tard dans la bibliographie.

4.2.6. exemples de compostage de matières organiques

4.2.6.1. Le fumier bovin

C'est le fumier le plus couramment composté, la composition du fumier d'origine conditionne en grand partie la qualité du compost en fin de processus, ainsi la meilleure façon d'obtenir un bon compost est d'utiliser un fumier de litière accumulée. Pour un bon équilibre entre carbone et azote, la quantité de paille à apporter est de 7 kg/Unité de gros bétail(UGB)/jour en moyenne. Le compostage est donc bien adapté aux systèmes d'élevage avec aire paillée ou stabulation entravée très paillée. Notons que cette quantité de paille est également fonction de l'alimentation des animaux.(ITAB, 2001g).

L'ajout de paille à un fumier « mou » est possible , mais contraignant en terme de manipulation, donc cher en main d'œuvre, et donne des résultats moins satisfaisants. Dans le cas des fumiers de raclage, il est toutefois possible d'ajouter de la paille avant chaque passage de rabot. Les résultats en terme d'absorption des déjections sont variables selon la longueur des brins, le type de paille. Il est à noter que l'utilisation de litière présente aussi des avantages sur le plan sanitaire , sur le plan du confort des animaux et sur le plan des conditions de travail de l'éleveur.

Le compostage est réalisé soit sur une plate-forme aménagée près du corps de ferme(aire stabilisée ou plate-forme bétonnée), soit en plein champs.

Sur la plate forme, la réalisation du compost ne produit pas d'écoulement de jus.

En effet, les pertes par jus sont surtout des signes d'anaérobiose or c'est l'aérobiose qui est favorisée. Le site de compostage ne présente donc pas de risque de pollution. Cependant pour prendre toute les précautions, une plate-forme stabilisée et adaptée pourra peut être réalisée, afin de permettre le passage des engins en conditions humides. Il faut éviter les sites de compostage sur sol filtrants, sur sols hydromorphes et sur terrains en pente. Toutes les mesures doivent être prises pour éviter la stagnation d'eaux pluviales sous les andains et le rejet d'eaux souillées dans le milieu (la plate-forme doit être équipé d'une fosse).

Pour la méthode plein champs et afin d'éviter les pertes par ruissellement, seuls les fumiers de départ suffisamment pailleux seront mis en tas. Le compostage ne doit pas être réalisé au même endroit chaque année (1 an sur 3) et ne doit pas entraîner de pollution des eaux (d'où la distance suivante à respecter : 50m des points de prélèvement d'eau potable, 200m des lieux de baignade et des plages, 35m des cours d'eau).

Les dimensions de l'andain dépendent du mode de retournement et des caractéristiques du matériel utilisé. L'étude des paramètres de compostage a montré que la section de l'andain doit être de préférence triangulaire et que la taille maximale pour que le processus soit efficace est de 3 à 4m de large pour 1.5 à 2m de haut. (Godden, 1995).

D'après l'ITAB (2001g) , l'objectif des retournements est avant tout l'aération du mélange à composter . Ce sont eux qui apportent l'oxygène nécessaire aux micro-organismes. Un seul retournement est en général insuffisant, car l'intense activité biologique au sein de l'andain conduit rapidement au tassement de celui-ci (pratiquement de moitié en hauteur). Il faut donc remuer de nouveau l'andain pour y apporter encore de l'oxygène. Ce deuxième retournement permet de plus de porter les parties du tas de la périphérie vers le cœur de l'andain, ce qui est très important dans une optique d'assainissement.

Le premier retournement est réalisé dès que possible après la mise en andain du fumier. Il démarre le compostage.

Le second retournement assure l'homogénéité du processus dans le tas et donne au compost les caractéristiques recherchées (évolution des composants, assainissement...). L'intervalle de temps entre les deux retournements est souvent de 10 à 15 jours, mais la date du second retournement ne peut être fixée à l'avance. Elle est déterminée par la mesure de la baisse de la température(phase de refroidissement). Dans certains cas la phase thermophile dure de 3 à 4 semaines, selon les techniques employées, le nombre de retournements peut ainsi varier de 1 à 3.

Deux retournements représentent un bon compromis entre la réussite du processus de compostage et un coût total du compost modéré. Cependant, le nombre de retournements est dépendant d'une part de la qualité du fumier d'origine, d'autre part des objectifs de compostage fixés : pour un épandage sur prairie avec un objectif d'assainissement vis à vis des pathogènes et parasites animaux, un troisième retournement peut s'avérer nécessaire si l'andain n'est pas monté en température suffisamment longtemps. A l'inverse pour une utilisation en grandes cultures sans besoin spécifiques d'assainissements (sauf phytosanitaires), un seul retournement pourra suffire.

Le premier facteur limitant du processus de compostage étant l'oxygène le deuxième c'est l'eau mais le taux d'humidité des fumier de bovins est en général suffisant de plus la dégradation du sucre au cours du processus de compostage libère du CO₂ et de l'eau. Il n'y a donc pas besoin de rajouter d'eau pour le compostage des fumiers de bovins (il y en a même de trop dans le cas des fumiers mous). Ce n'est pas le cas des autres fumiers (ovins, volailles).

Une pluie importante survenant derrière un retournement, en provoquant un tassement et une asphyxie du tas, peut annuler l'effet de celui-ci (Revest et Küng benoit, 1998). D'autre part les risques de perte en azote, phosphore, potasse et autres éléments nutritifs par lessivage dû aux pluies sur un tas ne sont pas négligeables, surtout en phase de maturation. La qualité du compost peut en être considérablement dégradée.

Sous climats très pluvieux, deux solutions sont possibles, le compostage sous hangar et le bâchage de l'andain.

Les bâches noires ne sont pas recommandées car elles donnent lieu à de fortes condensations en surface et provoquent l'apparition de zones anaérobies, réorientant le processus de compostage vers des fermentations (production de méthane au lieu de CO₂).

4.2.6.2. Le fumier ovin

La pratique du compostage à partir de fumier d'ovins est similaire à celle du fumier bovin néanmoins les déjections ovines sont plus sèches que les déjections bovines, la quantité de paille nécessaire à une bonne structure du tas de fumier est un peu plus faible. Il n'est cependant pas recommandé de descendre en dessous de 6 kg/UGB/jour.

Humidifier le tas au départ (avant le premier retournement), sans dépasser toutefois sa capacité d'absorption, permet de faciliter la mise en route des réactions microbiologiques (ITAB 2001g).

L'humidification des andains peut se justifier lorsque ceux-ci sont réalisés en période sèche. L'ajustement peut se faire en arrosant le fumier avant sa sortie de la bergerie. Il devient plus lourd à sortir mais le tas sera mouillé plus uniformément que si l'humidification a lieu une fois le fumier en tas.

4.2.6.3. Les fientes et fumiers de volailles

Les fientes de volailles constituent l'ensemble des éléments rejetés par l'appareil digestif et urinaire des volailles, dont les voies se rejoignent dans le cloaque.

Considérant la terminologie des éleveurs, les fientes de volailles désignent le produit obtenu sous les caillebotis ou dans les fosses, sous les batteries des pondeuses. Toutefois, il faut distinguer entre fientes et fumier de volaille dans la mesure où le fumier présente l'ensemble des déjections des volailles, mêlés à un support de paille ou de copeaux de bois.

Les fumiers de volaille (poulets de chair ou dindes) sont beaucoup trop secs pour être compostés tels quels. En effet, leur taux de matière sèches est la plupart du temps compris entre 60 et 75%. Leur humidification est donc nécessaire pour les ramener à un taux compatible avec le compostage, c'est à dire entre 40 et 50% de MS (à titre d'exemple pour ramener des fumiers de volailles de 75 à 50% de MS, il est nécessaire de rapporter 500 litres d'eau par tonne de fiente).

Les fumiers de départ sont généralement très riches en azote (2,5 à 3% de produits brut), avec un rapport C/N relativement bas, ce qui constitue des facteurs favorisant les pertes d'azote sous forme gazeuse représentant 40% de l'azote de départ et ont tendance à être plus importantes avec les fumiers de dindes (46%) qu'avec les fumiers de poulets (26%). Malgré ces pertes, le compost de fumiers de volailles, avec une teneur en azote qui reste supérieure à 2%, reste un des plus azotés parmi les composts d'effluents d'élevage (Aubert, 1998).

L'Institut Technique de l'Aviculture a mené une série d'essais sur le compostage de fumier de volailles et leur synthèse montre les limites techniques lorsqu'on apporte l'eau après la mise en andain. En effet, étant donné les quantités d'eau à ramener, il semble plus judicieux de faire l'apport d'eau directement dans le bâtiment, avant la sortie du fumier .

Le premier retournement, lors de la mise en andain, est indispensable à une bonne homogénéisation du produit. D'autres retournements seront à faire au bout de 15 jours, puis de 30 jours . après 45 jours environ, la part active du compostage peut être considérée comme terminée. Il convient alors de procéder à un dernier retournement, avant reprise du compost, pour un stockage sous abri(ITAB,2001g).

Au cours du compostage les pertes de masse sont de l'ordre de 30 à 45 % par rapport à la masse totale de départ(fumier+eau), mais par rapport à la seule masse de fumier les pertes sont minime (entre 15 et 20%).

4.2.6.4. Autres types de matières organiques

divers types de matières organiques peuvent être composté soit seuls soit associés aux fumiers : paille, reliquat de cultures, grignon d'olive et produits issus des industries agro-alimentaires. Diverses études menée en Tunisie ont démontrées l'avantage environnemental et économique de l'utilisation des grignons d'olive en compostage (Ben Rouina, 2002).

5.Effet de la matière organique sur les maladies des plantes

En plus des méthodes bien connues de gestion des maladies des plantes en agriculture biologique tel que la rotation des cultures, le choix de variétés

résistantes et semences certifiées indemne de maladies, la solarisation du sol etc. Des approches nouvelles et intéressantes sont explorées pour la suppression des maladies des plantes par des moyens naturels tel que l'utilisation de compost et de jus de compost.

Pour le compost, Serra-Wettling (1995), Serra-Wettling et al.(1997) ont révélé que l'addition de 10% en volume de compost de fraction fermentescible d'ordure ménagères, à un sol limoneux permet de diminuer voire de supprimer le développement de la Fusariose vasculaire du lin (causée par *Fusarium oxysporum*).

Des études menées par Tratch et Bettioli (1997), sur des composts biologiques ont montrés que la pulvérisation d'une solution de jus de compost à 10% de concentration inhibe la croissance mycelienne de la majorité des pathogènes testés (une dizaine dont *Rhizoctonia solanii*, *Fusarium oxysporium*, *Botrytis cinerea*, *Alternaria solani*, *Septoria lycopersicii*...); la germination des spores est inhibée à des concentrations de 20% pour *Botrytis cinerea* et 10% pour *Alternaria solanii*.

Dans le même contexte Serra-Wettling et al.(1996), rapportent que d'autres exemples d'amélioration de la résistance du sol par apport de compost ont été observés : résistance aux Rhizoctones, Fusariose, Fonte de semis, pourritures provoquées par *Rhizoctonia sp.* L'effet bénéfique du compost est dû à l'activité biologique et/ou à une modification physique du milieu. La résistance d'origine biologique est attribuée soit à l'ensemble des micro-organismes du sol et du compost (c'est la résistance générale), soit à la présence de micro-organismes antagonistes des agents pathogènes (c'est la résistance spécifique).

Dans le cas de la résistance générale, l'ensemble des microorganismes entrent en concurrence avec les agents pathogènes du point de vue des éléments nutritifs ou du milieu de vie. Ce système est observé pour la Fusariose, et d'autres maladies dont les propagules des pathogènes sont peu pourvu en éléments nutritifs et dépendent directement de leur environnement (*Pythium sp.*, *Phytophthora sp.*).

Dans le cas de la résistance spécifique, une population antagoniste prend la place de la population infectieuse sans en avoir les conséquences néfastes sur la plante(par exemple *Trichoderma sp.*, antagoniste de *Rhizoctonia solanii* et *Sclerotinium rolfsii*), ou bien produit un antibiotique qui anéantit les agents pathogènes.

L'ajout de compost peut également empêcher le développement de la maladie par augmentation du PH (exemple de la hernie des crucifères qui se développe plus difficilement au- dessus de PH 7) ou libération de composés toxiques lors de sa dégradation dans le sol (composés cireux de décomposition de la lignine).

Les causes de l'amélioration de la résistance aux maladies grâce au compost dépendent de sa composition et de son âge. Seuls les composts jeunes et riches en lignine sont susceptibles de libérer des composés inhibiteurs et c'est l'activité biologique qui prend le relais pour les composts mûrs. Toutefois , il est à noter que les composts trop riches en azote peuvent activer certaines maladies telles que les Fusarioses au lieu de les limiter.

En règle générale, les composts les mieux adaptés semblent être les composts de déchets verts ou tout compost riche en branchages, écorce(le compost d'écorces de pins est utilisé par exemple aux Etats-Unis)

La proportion à introduire pour observer une action inhibitrice sur le développement des maladies est cependant importante(10 à 20% en volume) et n'est donc adaptée qu'aux systèmes de type pépinière ou support de cultures.

Le jus de compost aussi connu sous le nom d'extrait de compost, est un outil de protection des plantes agissant comme inhibiteur des maladies foliaires et comme inoculant qui rétablit ou augmente la microflore du sol.

Des recherches menées en Allemagne, au Japon, en Israël et aux Etats Unis ont montrées que les jus de compost pourrais être efficaces dans le contrôle des maladies suivantes :

Mildiou de la pomme de terre, <i>Phytophthora</i> de la tomate	Extraits de compost de cheval Weltzein(1990)
Pourriture grise de la fève, <i>Botrytis cinerea</i> de la fraise	Extraits de compost de bovins Weltzein(1990)
<i>Fusarium oxysporum</i>	Extraits de compost d'écorce Kai et al (1990)
<i>Mildiou</i> et <i>Oïdium</i> de la vigne	Extraits de compost de déjections animales et de paille Weltzein(1990)
<i>Oïdium</i> du concombre <i>Sphaerotheca fuliginea</i>	Extraits de compost de déjections animales et de paille Weltzein(1990)
Pourriture grise de la tomate	Extraits de compost de déjections de volailles et de bovins. Extraits de compost de marcs de raisin Elad et Shtienberg(1994)
Gale de pomme <i>Venturia conidia</i>	Extraits de compost de champignon dépensé Cronin et Andrew(1996)

D'après Brinton et William (1995), les extraits de compost permettent un biocontrol par leur actions sur la phyllosphère (la surface des feuilles et les microbes associées). Plusieurs mécanismes qui sont l'induction de la résistance , l'inhibition de la germination des spores, l'antagonisme et la compétition avec les pathogènes semblent être les responsables de l'effet suppressif.

Les composants actifs du jus de compost qui ont été identifiés jusqu'à maintenant sont des bactéries(le Bacille),des levures(*Sporobolomyces* et *Cryptococcus*) et des moisissures, aussi il y a des antagonistes chimiques tel que les phénols et les acides aminés (Trankner et Andreas, 1992).

Selon Brinton et William (1995), plusieurs facteurs influencent l'efficacité d'extraits de compost comme : l'âge du compost, la nature des matériaux de départ (les composts issus d'extraits d'animaux conservent plus

longtemps leur activité que les composts d'origine uniquement végétale), le type de pathogène cible, la méthode de préparation du jus, le mode et la fréquence d'application de l'extrait, les conditions climatiques. Enfin, l'efficacité du jus de compost peut être améliorée suite à son inoculation par des microbes bénéfiques.

Les méthodes par lesquelles les jus de compost sont préparés varient d'un chercheur à un autre néanmoins, il semble y avoir deux méthodes de préparation divergentes, l'une par aération et l'autre par fermentation.

La méthode d'extraction originale, par fermentation a été développée par le chercheur allemand Heinrich Wetzein et améliorée par Will Brinton sur la Côte Est des Etats-Unis. Cette méthode peut être récapitulée comme suit :

Les jus de compost ont été obtenus en couvrant le compost avec de l'eau de robinet à une proportion entre 1 :5 à 1 :8 (volume/volume). Le contenu a été remué une fois et laissé pour fermentation au grand air à une température entre 15 et 20°C. après une période d'absorption mentionné comme " le temps d'extraction", la solution a été passée à travers un tissu pour fromage et appliquée ensuite avec un pulvérisateur ordinaire. Les périodes d'extraction se sont étendues entre 2 à 21 jours bien qu'elles soient le plus souvent entre 3 à 7 jours.

Une méthode modifiée promue par Amigo Bob Cantisano (conseillers en agriculture biologique) et la famille Luebke d'Autriche(les fondateurs de la méthode du compost microbien contrôlé) a gagné la faveur d'un certain nombre de fermier de la Cote Ouest des Etats-Unis, cette méthode appelée aussi "La méthode aérobie" peut être accomplie se plusieurs façons. La méthode décrite par Cantisano en novembre 1995 à St. Louis aux Etats-Unis peut être récapitulée comme suit :

Les jus de compost sont fabriqués en mettant l'accent sur l'aération. Un tube PVC de 12 pouces est coupé en deux suivant le sens de la longueur, les tubes sont montés plusieurs l'un dans l'autre pour faire au moins 4 pieds de longueur au dessus d'un réservoir qui collectera le jus de compost . Le tube PVC qui s'introduit dans le réservoir collecteur est troué en bas par une

multitude de petits trous pour laisser passer le jus. Les tubes PVC montés l'un dans l'autre formeront une cuvette où seront placés des sacs contenant le compost, un courant d'eau passera alors dans les tubes et emmènera le jus de compost extrait directement au réservoir où une pompe le refoulera en haut des tubes PVC pour qu'il refasse le chemin de nouveau. Les jus de compost sont ainsi aérés et cette opération peut durer 7 jours mais des variations pourrait ramener le temps d'extraction de jours en heures (2 à 8 heures).

Matériels et méthodes

1. Problématique

- En agriculture biologique l'utilisation de fumier frais est limitée et ne doit pas dépasser l'équivalent de 170kg d'azote/ha/an.
- Le fumier des ovins et en particulier des bovins même s'il est répandu il est très utilisé en agriculture conventionnelle donc présente un coût élevé.
- Les fientes de volailles présentent un grand problème écologique, elles ne peuvent être incorporées au sol à l'état frais à cause des pathogènes qu'elles contiennent et de leur richesse en azote.
- Lors des années caractérisées par une bonne production céréalière, la paille est très répandue et à bon prix.
- L'utilisation de fumier frais peut engendrer un accroissement du problème des mauvaises herbes à cause des graines qu'il peut contenir.
- L'incorporation de fumier frais dans le sol peut engendrer une compétition pour l'oxygène du sol entre les micro-organismes de décomposition de la matière organique et la graine ou la plante existante sur le sol.
- En agriculture biologique seuls les fongicides d'origine naturelle sont permis.

2. Objectifs

Ce travail consiste à étudier les paramètres de compostage (température, pH, salinité, densité etc.) de mélanges de différentes matières organiques pouvant être utilisées en agriculture biologique. Cette étude comparative permettra de déterminer le comportement de chaque mélange organique afin d'apporter les corrections nécessaires pour un futur bon compostage de ces matières à la fin du processus de compostage c'est à dire en phase de maturité on procédera à la fabrication du jus de compost qui sera étudié sur plusieurs champignons (*Fusarium*, *Phytophthora* et *Rhizoctonia*.) *in vitro* et *in*

vivo sur des tubercules de pommes de terre afin de déterminer la capacité du jus issu de chaque traitement à inhiber ou à détruire le développement des champignons pathogènes des plantes.

Le jus de compost le plus performant pourrait alors être utilisé comme un fongicide donc une alternative à l'utilisation des fongicide synthétiques. Puisque ce fongicide est naturel alors il serait autorisé en agriculture biologique.

3. Caractérisation du site expérimental

Les travaux d'expérimentation ont été réalisés dans une parcelle expérimentale du Centre Technique de l'Agriculture Biologique (CTAB), situé dans la région de Sousse localisée sur la côte Est de la Tunisie. Son climat est typiquement méditerranéen, jouissant d'une température moyenne annuelle de 18.5°C et une température moyenne mensuelle variant de 28.0°C (mois d'août) à 11.4°C (mois de janvier). La pluviométrie annuelle est de 300 mm/an. Le sol dans son ensemble est du type sablonneux argileux.

4. Matières organiques utilisées

4.1. Le fumier bovin

Il s'agit de fumier bovin issu de stabulation libre non paillée de vaches laitières de race Frisonne. Le fumier acheté chez un privé à été collecté durant l'été et stocké afin d'être utilisé en automne.

Ce fumier bovin démunie de pailles se présente sous forme d'agglomérats difficiles à manipuler.

4.2. Le fumier ovin

Il s'agit de fumier ovin frais issu d'élevage ovin extensif pour la production de viande. Les animaux sont de race Barbarine et Queue Fine de l'Ouest ; il à été récupéré au niveau de plusieurs bergeries.

4.3. Le fumier de volaille

C'est un fumier composé de fientes et de litière en copeaux de bois, issues d'élevage au sol pour poulet de chair. Le fumier a été récupéré et stocké durant l'été ; il ne dégage pas d'odeur désagréable.

4.4 .La paille

Ce sont des pailles de blé tendre issues de la dernière campagne céréalière achetées d'une ferme de la région de Beja dans le nord de la Tunisie. Avant leur incorporation dans l'andain, les pailles ont été broyées pour l'homogénéité de l'andain.

Les résultats d'analyses des différents types de matières organiques utilisées sont présentés au tableau 11 et 12.

Tableau 11 : Quelques caractéristiques physiques des matériaux de départ.

Composition Matériaux	MS en %	MO en%	C/N	pH	Salinité(g/l)
	MB	MS			
Fumier Bovin	27	38.07	20	8.13	1.33
Fumier Ovin	33	49.28	20	8.26	2.1
Fumier de Volailles	63	51.9	14	8.14	1.96
Paille	88.4	91.4	98	6.96	0.84

Tableau 12 : Quelques caractéristiques chimiques des matériaux de départ.

Composition en Mg/kg Matériaux	Zn	Mg	Ca	K	Mn	Fe	Cu
Fumier Bovin	1.49	84.7	261.3	91	2.683	64	0.204
Fumier Ovin	0.74	44.95	252.1	114.7	2.85	127.9	0.2
Fumier de Volailles	0	12.45	131.6	62.88	1.73	66.36	0.03
Paille	8.65	43.77	300.9	125.8	3.91	108.7	0.64

5. Dispositif expérimental

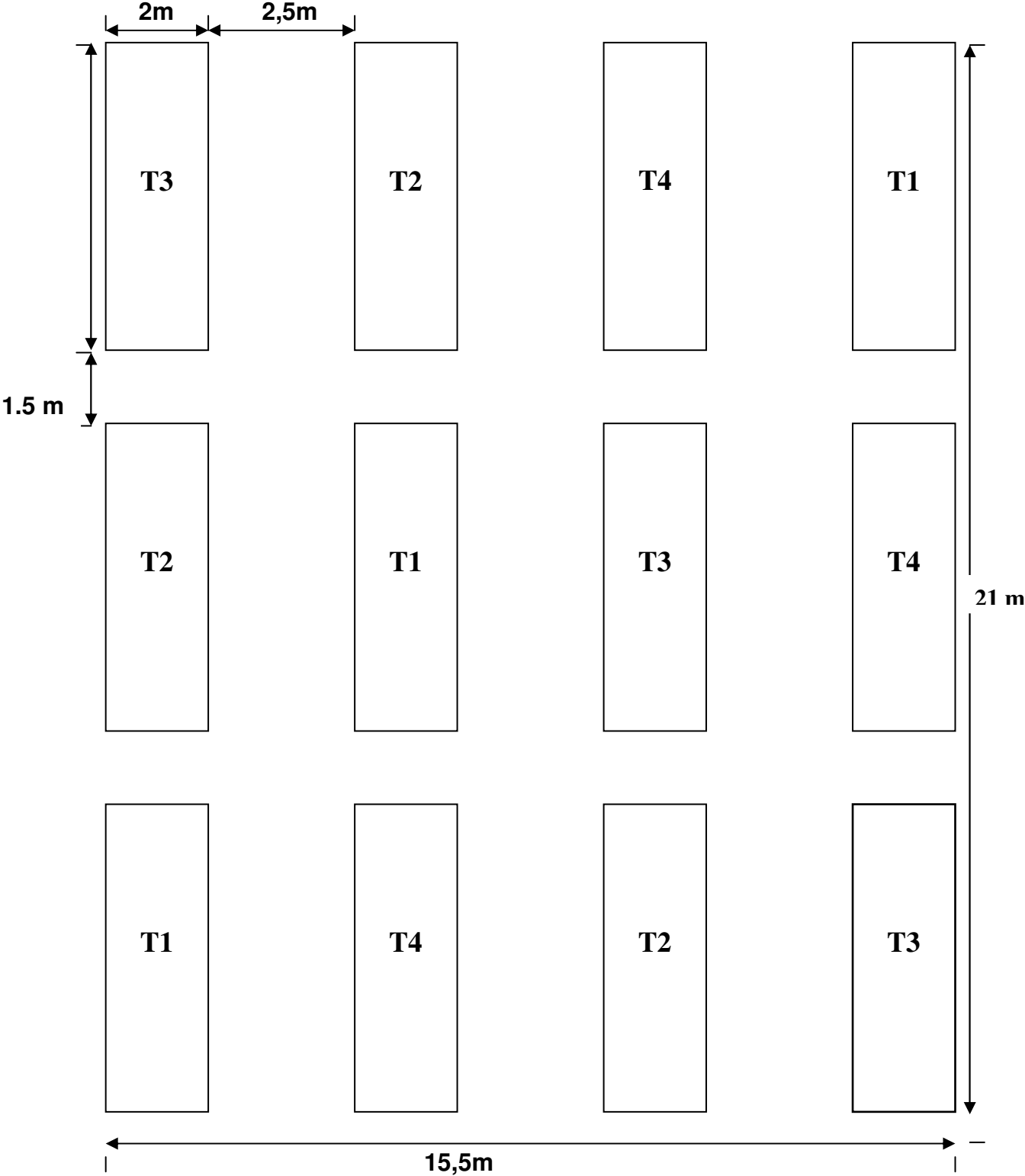
Il s'agit d'un essai à blocs aléatoires complets à trois répétitions. Les traitements sont déposés en forme d'andains ayant une longueur de 6m, une hauteur variant entre 0,8 et 1,5m et une largeur de 2m (voir dispositif expérimental).

Les traitements sont les suivant :

- **1^{er} traitement** :100% de fumier bovin.
- **2^{ème} traitement** : 80% de fumier bovin + 20% fumier ovin.
- **3^{ème} traitement** :70% de fumier bovin+20%fumier ovin+10%fiente de volaille.
- **4^{ème} traitement** :50% fumier bovin+20%fumier ovin+20%fumier de volailles+10%paille broyée.

Il est à remarquer que les pourcentages représentent la proportion en poids de chaque composant de l'andain. Le poids global de l'andain est de 20 tonnes de matière brute.

DISPOSITIF EXPERIMENTAL



6. Conduite du compostage

Les travaux réalisés en cours de compostage sont l'arrosage (les caractéristiques de l'eau d'irrigation sont dans le tableau 13) et le retournement à chaque fois que c'est nécessaire.

Tableau 13: Analyse de l'eau d'irrigation (eau de barrage)

Caractéristiques	pH	Conductivité électrique (mmoh/cm)
Eau d'irrigation	8.08	1.07

7. Observations

Les observations suivantes ont été réalisées :

Observations	Début du processus du compostage	Milieu du processus du compostage	Fin du processus du compostage
Mesure de la température	x	x	x
Détermination du pH	x	x	x
Conductivité électrique spécifique	x	x	x
Matière organique	x	x	x
Azote total	x	x	x
Détermination des minéraux	x	x	x
Détermination de la densité sèche	x	x	x
Effet du jus de compost sur les pathogènes			x

8. Méthodes utilisées

8.1. mesure de la température

La température de chaque andain a été mesurée durant tout le processus du compostage par un thermomètre à sonde. La sonde de 50 cm de longueur est introduite complètement des différents cotés de l'andain (6 fois au total) pour avoir la moyenne de la température de l'andain.

Au début du processus du compostage la température a été prélevée chaque jour puis chaque 3 jours et lors de la phase de maturation chaque semaine.

Il est à noter qu'à chaque fois on a aussi prélevé la température ambiante journalière.

8.2. Détermination du pH

la mesure du pH a été réalisée selon la norme internationale ISO 10390 (1994) ; la méthode consiste à préparer une suspension de compost dans cinq fois son volume d'eau, la laisser en agitation pendant 5 minutes puis la faire reposer pendant au moins deux heures mais pas plus que 24 heures. Le pH est ensuite mesuré à l'aide d'un pH mètre de type Mettler-Toledo MP 225.

8.3. Détermination de la conductivité électrique spécifique

elle est déterminée selon la norme ISO 11265 (1994) qui consiste à extraire l'échantillon avec de l'eau à 20 ± 1 °C dans une proportion au 1/5 ; cette extraction a pour but de faire dissoudre les électrolytes.

L'extraction consiste à placer 20g de l'échantillon dans 100 ml d'eau, et à laisser agiter la solution pendant 30 minutes puis la filtrer. De la même manière, on effectue une détermination à blanc en mesurant la conductivité de l'eau à la même température.

La conductivité électrique spécifique de l'extrait filtré est mesurée à l'aide d'un conductimètre AMEL de type 123 et le résultat est corrigé à une température de 25 °C.

8.4. Détermination de la matière organique et des cendres (NT.76.04,1983)

après évaporation de l'échantillon (M = 10 g) à 105 °C, on place les creusets en porcelaine qui contiennent la matière sèche dans un four à moufle à chauffage électrique à 900 °C pendant deux heures afin de calciner la matière organique(MO).

La matière organique MO est déterminée par simple calcul de la différence entre la matière sèche MS et la matière minérale MM.

$$\text{MO} = \frac{\text{MS} - \text{MM}}{\text{MS}} \times 100$$

Les résultats sont exprimés en pourcentage de la matière sèche . Le four à moufle utilisé est un Advantec modèle KM 600.

8.5. Détermination de l'azote total Kjeldahl (NT 76.05,1983)

l'azote total Kjeldahl est déterminé par minéralisation de l'échantillon de masse égale à 5g par l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur (sélénium) à 400 °C pendant 2 heures. Une alcalinisation des produits de la réaction s'effectue ensuite par une solution de NaOH de concentration 400 g/l, une distillation et un titrage de l'ammoniac libéré se fait en dernière étape à l'aide d'une solution d'acide sulfurique de concentration égale à 0.05 M.

de la même façon, on un blanc. L'azote total Kjeldahl est donné par :

$$\text{NTK}(\%) = \frac{(V-V_0) \times C \times 14 \times f}{M} \times 100$$

V : volume de H₂SO₄ qui sert pour le titrage de l'échantillon ;
V₀ : volume de H₂SO₄ qui sert pour le titrage du blanc ;
C : Concentration de la solution de l'acide sulfurique pour le titrage de l'ammoniac ;
F : Facteur de correction de la solution d'acide sulfurique ;
M : masse de l'échantillon en mg.

8.6.Détermination des minéraux

les analyse des minéraux ont été procédées par une attaque acide des cendres. Les échantillons sont analysés ensuite par l'absorption atomique. L'appareil utilisé est de type HITACHI modèle Z-6100.

L'analyse par cet appareil consiste à pulvériser l'échantillon minéralisé dans une flamme à haute température (air acétylène : 2400°C, N₂O- acétylène 2900°C) ; où se produit l'atomisation de l'élément à doser. Cette population d'atomes est ensuite traversée par une radiation de lumière monochromatique d'intensité I₀ dont une partie sera absorbée.

La lumière résiduelle d'intensité I est détectée par des photomultiplicateurs puis analysée. La différence I₀-I qui correspond à la lumière absorbée, varie linéairement avec la concentration de l'élément à doser selon la loi de Beer-Lambert :

$$A = \text{Log } I_0/I = a.b.c$$

A: absorbance exprimée en densité optique;

I₀ : intensité du rayon réfléchi ;

I : intensité du rayon réfléchi ;

a : coefficient d'absorption atomique ;

b : longueur de l'atomiseur ;

c : concentration de l'élément à doser.

Préparation de l'échantillon : 5 g de compost subissent une attaque acide avec un mélange concentré d'acide chlorhydrique (10ml) et d'acide nitrique (5 ml) et à chaud jusqu'à décoloration de l'échantillon.

8.7. Détermination de la densité sèche

Après 24 heures passés dans l'étuve à 105 °C, l'échantillon est pesé puis mis dans une éprouvette graduée pour mesurer le volume occupé par l'échantillon, la densité sèche est calculée alors comme suit :

$$D = m/v$$

D : densité sèche

m : masse de l'échantillon en g

v : volume de l'échantillon en cm³

8.8. Etude de l'effet du jus de compost sur les maladies des plantes

8.8.1. Matériel Biologique

8.8.1.1. Variété de la pomme de terre

pour les essais effectués sur les tubercules (in vivo), la variété Spunta est choisie car elle est la plus cultivée et la plus estimée par les agriculteurs tunisiens. Les tubercules proviennent d'une culture de saison effectuée au domaine agricole de l'Ecole Supérieure d'Horticulture et d'Elevage de Chott-Mariem.

8.8.1.2. Agents pathogènes

Les agents pathogènes testés sont isolés à partir de tubercules produites localement, montrant des symptômes de pourriture sèche ou de pourriture rose suivant le cas :

-Agent de pourriture sèche :

- *Fusarium roseum* var *sambucinum*
- *Fusarium roseum* var *graminearum*
- *Fusarium oxysporum*
- *Fusarium solani* var *coeruleum*
- Agent de pourriture rose : *Phytophthora erythroseptica*

Aussi on a testé le *Rhizoctonia solani*, l'agent responsable de la maladie appelée 'Maladie de manchette' ou 'Rhizoctone brun

Ces variétés sont multipliées, à 25°C, sur milieu de culture à base de pomme de terre (Potato Dextrose Agar = PDA composé de 200 g de pomme de terre, 20g de gélose et 20g de glucose).

8.1.3. Extraits de compost testés

il s'agit du jus de compost préparé à partir de quatre andains différents représentant les traitements(T₁, T₂, T₃ et T₄). La préparation des jus a été effectuée selon la méthode d'extraction originale, par fermentation développée par le chercheur allemand Heinrich Wetzstein et améliorée par Will Brinton sur la Côte Est des Etats-Unis. Cette méthode peut être récapitulée comme suit :

Les jus de compost ont été obtenu en couvrant le compost avec de l'eau (celle utilisée pour l'irrigation) à une proportion entre 1 :5 (volume/volume). Le contenu a été remué une fois et laissé pour fermentation à l'air libre à une température comprise entre 15 et 20°C. après une période d'absorption de 5 jours mentionné comme " le temps d'extraction", la solution a été passée à travers un tissu. Les extraits obtenus ont été conservés dans des bouteilles au réfrigérateur à une température de 4°C.

Les extraits sont sorti du réfrigérateur une demi heure avant leur utilisation.

8.1.4.l'Essai *in vitro*

l'essai est conduit dans des boites de Pétri, 1 ml de jus de compost sont mélangé dans 200 ml de PDA encore liquide, après agitation le liquide (PDA+Extraits de compost) sont déposé dans des boites de Pétri sous une haute et près d'un bec benzène (4 boites de Pétri par traitement et par champignon étudié). Après solidification du milieu, l'agent pathogène est déposé au centre de la boite de Pétri sous forme d'une pastille de gélose. Les boites sont incubées dans une étuve fixée à la température de 25°C.

la lecture a lieu après 48 heures pour le *Phytophthora erythroseptica*, après 6

Cet essai est conduit seulement pour les agents de pourriture (les *Fusarium* et le *Phytophthora*).

8.1.5. l'Essai *in vivo*

Les tubercules de la variété Spunta sont soumis à une désinfection superficielle à l'hypochlorite de sodium dilué à 10% pendant 5 minutes. Ensuite ils sont abondamment rincés par de l'eau distillée stérile afin d'éliminer les traces d'hypochlorite de sodium. Le séchage se fait à l'air ambiant.

La technique d'inoculation des tubercules consiste à occasionner une blessure (6 mm de diamètre et de profondeur) à l'aide d'un emporte-pièce. Une pastille gélosée (6 mm) portant l'agent pathogène considéré est déposée au niveau de cette blessure. Nous utilisons 10 tubercules par traitement élémentaire sur lesquels sont occasionnés un seul site d'infection pour le *Phytophthora* et 5 tubercules par traitement élémentaires sur lesquels sont occasionnés deux sites d'infection pour les *Fusarium*.

Les tubercules sont immergés dans une solution d'eau avec 10% de solution de jus de compost pendant 10 minutes puis sont séchés sur des plaques à alvéoles avant d'être mis en incubation.

L'incubation des tubercules se fait dans des bacs en plastique dont le fond contient de l'eau (pour augmenter l'humidité du milieu), les bacs sont couverts avec du papier aluminium.

Les tubercules sont incubés pendant (48 heures pour le *Phytophthora* et 21 jours pour les *Fusarium*) dans une cellule de serre vitrée.

Au terme de la période d'incubation, les tubercules, les tubercules sont sectionnés longitudinalement, à travers le site d'inoculation, et les paramètres de la pourriture occasionnée (largeur maximale (l) et profondeur (p)) sont notés. La pénétration, à travers les tubercules, des agents pathogènes testés est calculée selon la formule de Lapwood et al. (1984) où :

$$\text{Pénétration (mm)} = \frac{(l/2 + (p-6))}{2}$$

8.1.6. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est ainsi un essai factoriel complètement aléatoire à deux facteurs dans lequel les traitements (différents jus de compost) représentent le facteur A, les agents pathogènes font parti du facteur B. Les moyennes sont comparées avec le test Duncan au seuil de 5%.

9. Analyses statistiques

Les différentes observations réalisées ont été analysées moyennant le logiciel SPSS 10, selon l'analyse de la variance. La comparaison des moyennes a été effectuée selon le test Duncan au seuil de 5%.

Résultats et Discussions

1. Etude des paramètres du compostage

Le compostage des différents tas de MO a duré 109 jours moyennant des arrosages et des retournements selon les besoins ; ceci a abouti à un compost mur caractérisé par :

- il ne dégage pas d'odeur d'ammoniac ;
- sa température est similaire à la température ambiante ;
- il est granuleux, foncé et sent bon ;
- on y trouve au moins trois types d'arthropodes : des cloportes, des mille-pattes et des carabes ;
- on ne distingue plus à l'œil nu les composés d'origine ;

1.1. Evolution de la température

L'étude de l'évolution de la température au cours du processus du compostage montre que la température de départ est différente selon la composition de l'andain (figure 5).

Ainsi les traitements T_2 et T_3 partent de 25°C , le traitement T_4 qui contient de la paille part d'une température plus élevée au alentours de 33°C . Pour le traitement T_1 qui contient seulement le fumier bovin la température est celle de la température ambiante et ne présente pas donc d'activité microbienne.

La température du traitement 4 croit rapidement au cours du temps pour atteindre son maximum au $10^{\text{ème}}$ jour après le début du compostage à la valeur de 66°C (phase mésophile très courte). Cette activité est due aux microorganismes thermophiles (Mustin, 1987). Cette valeur reste inférieure à 70°C température au dessus de laquelle il y a destruction des organismes vivants et donc dégradation de la qualité du compost (Godden 1986

Cette hausse rapide de la température pourrait s'expliquer par la richesse du traitement T₄ en carbone. Aussi comme rapporté par Godden (1986), la production de chaleur par les micro-organismes est proportionnelle à la masse du tas or l'andain du traitement T₄ a été le plus volumineux.

Les autres traitements ont une évolution de la température très lente qui suit la courbe de la température ambiante. Cela signifie que l'activité microbienne n'a pas encore démarré et que les hausses de température sont dues en grande partie à l'irradiation extérieure.

Aux alentours du 25^{ème} jours du compostage, et suite au premier retournement, la température commence une croissance rapide pour atteindre la valeur maximale de 40°C pendant 3 jours. C'est la durée minimale estimée pour avoir un assainissement des maladies à une température de 30°C.

La longue durée de la phase mésophile, peut s'expliquer par le fait que les traitements T₁, T₂ et T₃ ne renferment pas un composé très riche en carbone (paille) et peuvent donc présenter un manque de porosité et d'aération nécessaire pour le bon développement des microorganismes. Cette aération indispensable a été apportée suite au retournement.

Pour les traitements T₁, T₂ et T₃ durant toute la période du compostage il n'y a eu qu'un seul pic de température. Toutefois, pour le traitement T₄ contenant de la paille à chaque fois qu'il y a eu retournement il y a eu élévation et pic de la température.

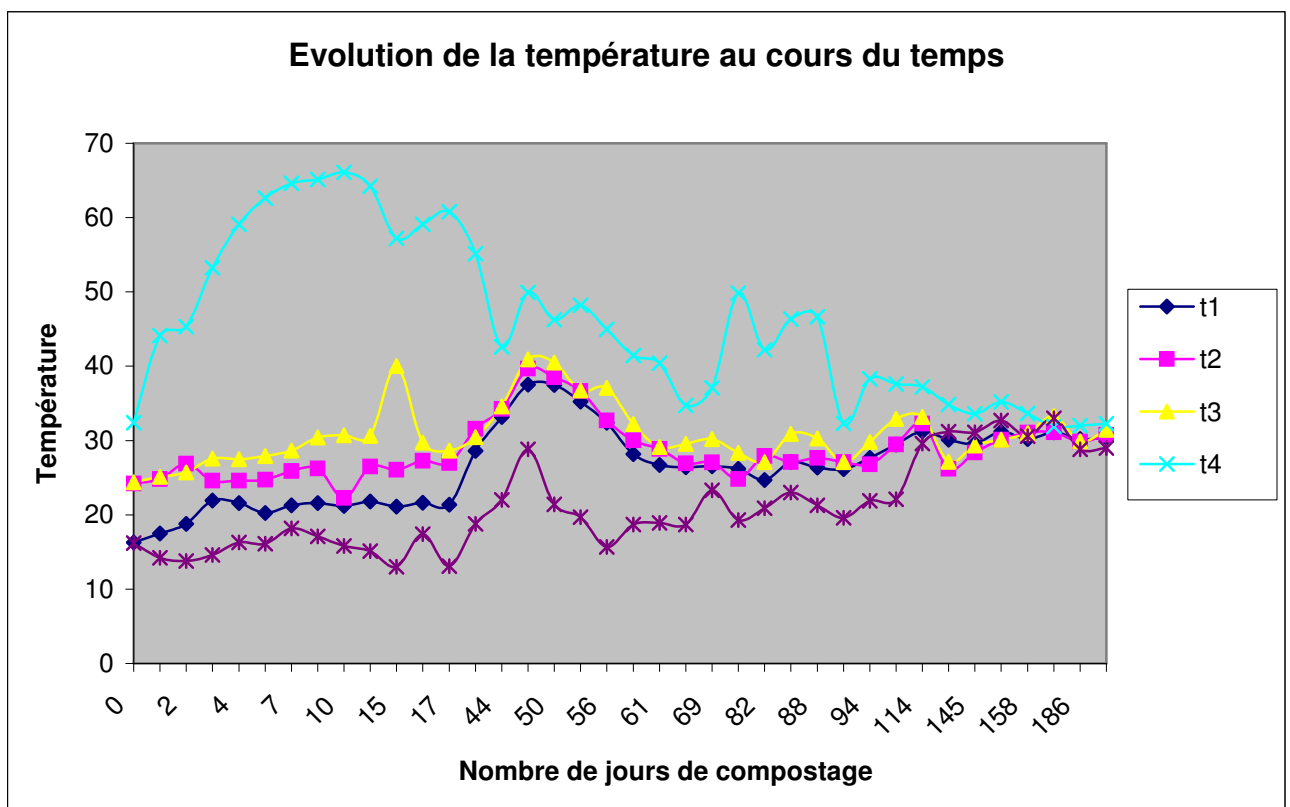
En effet, il y a plusieurs phases thermophiles au cours du processus du compostage; cependant les températures atteintes sont de plus en plus faibles (ITAB, 2001d).

La multitude de phase thermophile, peut s'expliquer par le fait que le T₄ contient de la paille et celle-ci riche en composés ligneux; sa décomposition nécessite plus de temps que les fumiers aussi l'andain du T₄ est le moins homogène. Les matières qui restent en bordure tardent à composter et elles n'augmentent en température qu'après le retournement lorsqu'elles sont introduites à l'intérieur de l'andain (ITAB, 2001d).

On peut considérer que la phase de maturation débute à partir du 114^{ème} jours du compostage puisque le dernier retournement du jour 109 n'a pas eu d'effet considérable sur l'élévation de la température.

A la fin les températures des andains se confondent avec la température ambiante ce qui montre qu'il n'y a plus d'activité microbienne, le compost est donc mûr et prêt à l'emploi.

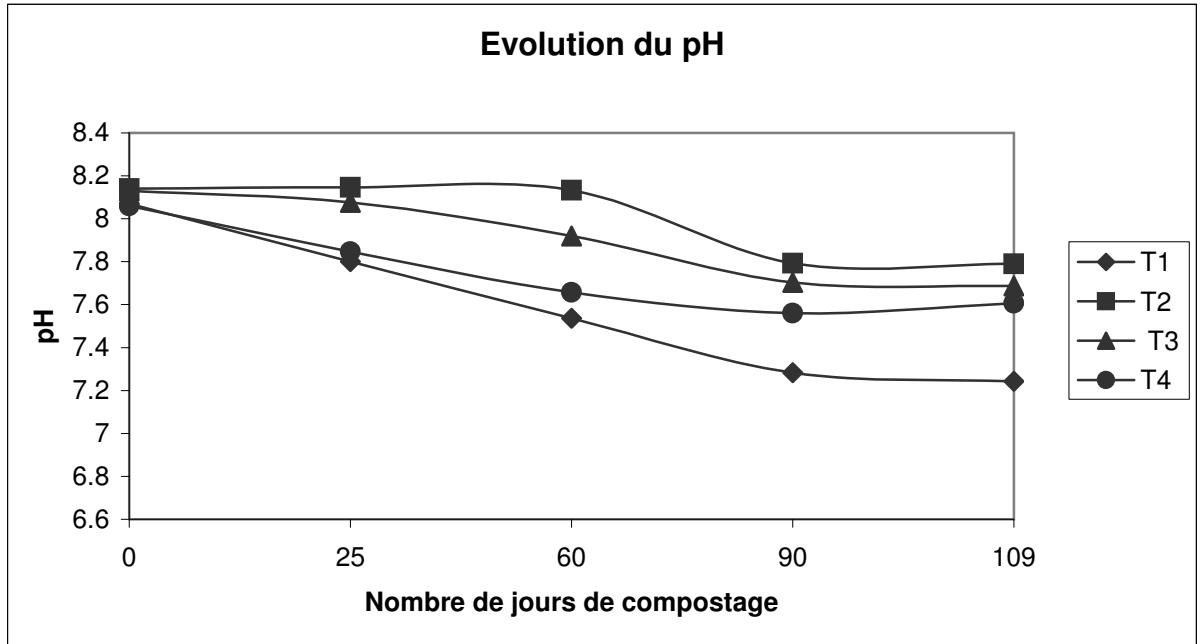
Figure 5: Evolution de la température au cours du processus du compostage



1.2. Evolution du pH

D'après la courbe de l'évolution du pH au cours du processus du compostage (figure6), il paraît que tous les traitements ont au départ un pH basique situé entre 8 et 8.2. Ce pH basique favorise le développement des actinomycètes et des bactéries alcalines (Mustin, 1987). Au début du compostage, les traitements T₁ et T₄ se comportent de la même façon. En effet, jusqu'à la première moitié de la durée du processus du compostage, le pH diminue rapidement pour atteindre environ la valeur 7.8 pour T₄ et 7.6 pour T₁. Lors de la deuxième moitié, le traitement T₁ à base de fumier bovin continue à baisser rapidement jusqu'à une valeur de 7.4 alors que le traitement T₄ qui contient de la paille fléchit légèrement puis entame une tendance croissante pour arriver à la fin à une valeur proche de 7.8. Cette baisse du pH peut s'expliquer selon Mustin (1987) par la production d'acides organiques suite à la dégradation des glucides, lipides et d'autres substances. Aussi, la production de CO₂ lors de la dégradation aérobie contribue à l'acidification du milieu par sa dissolution dans l'eau et production d'acide carbonique. Pour les traitements T₂ et T₃, le comportement de la courbe du pH varie selon qu'on est dans la première moitié du processus de compostage ou dans sa deuxième moitié. En effet, le pH du traitement T₂ à base de fumier bovin et ovin semble se stabiliser à une valeur légèrement inférieure à 8.2 puis commence une légère descente pour atteindre à la phase de maturation une valeur proche de 7.8. Quant à la courbe du traitement T₃, elle part d'une valeur identique à celle de T₂ et diminue progressivement pour arriver à la fin à une valeur de 7.7. Il est à remarquer qu'à partir du 90^{ème} jour du compostage (date estimée du début de la phase de maturation du compost, le pH des différents traitements demeure presque constant. Cela peut s'expliquer par l'arrêt de l'activité des microorganismes responsables de la variation du pH. A la fin, le traitements T₁ a un pH qui se rapproche de la neutralité comme rapporté par Godden (1986) et Gobat et al (1998).

Figure 6: Evolution du pH lors du processus de compostage



L'étude statistique montre qu'il y a une différence hautement significative entre les différents traitements au départ et au milieu du processus de compostage. En effet, les traitements T₁ et T₄ ont présenté un pH moins élevé que les autres traitements. A la fin du processus de compostage, tous les traitements ont presque un pH similaire avec une légère différence non significative (tableau14).

Tableau 14: pH au cours du processus du compostage

Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	7.80 _b	8.15 _a	8.07 _a	7.84 _b	**
Milieu	7.54 _c	8.13 _a	7.92 _b	7.66 _c	**
Fin	7.24 _a	7.79 _a	7.69 _a	7.61 _a	ns

NB : les moyennes qui sont munis de lettres différentes, diffèrent significativement entre elles, alors que celles ayant les mêmes lettres ne diffèrent pas significativement selon le test Duncan au seuil de 5%.

** Hautement significative

* significative

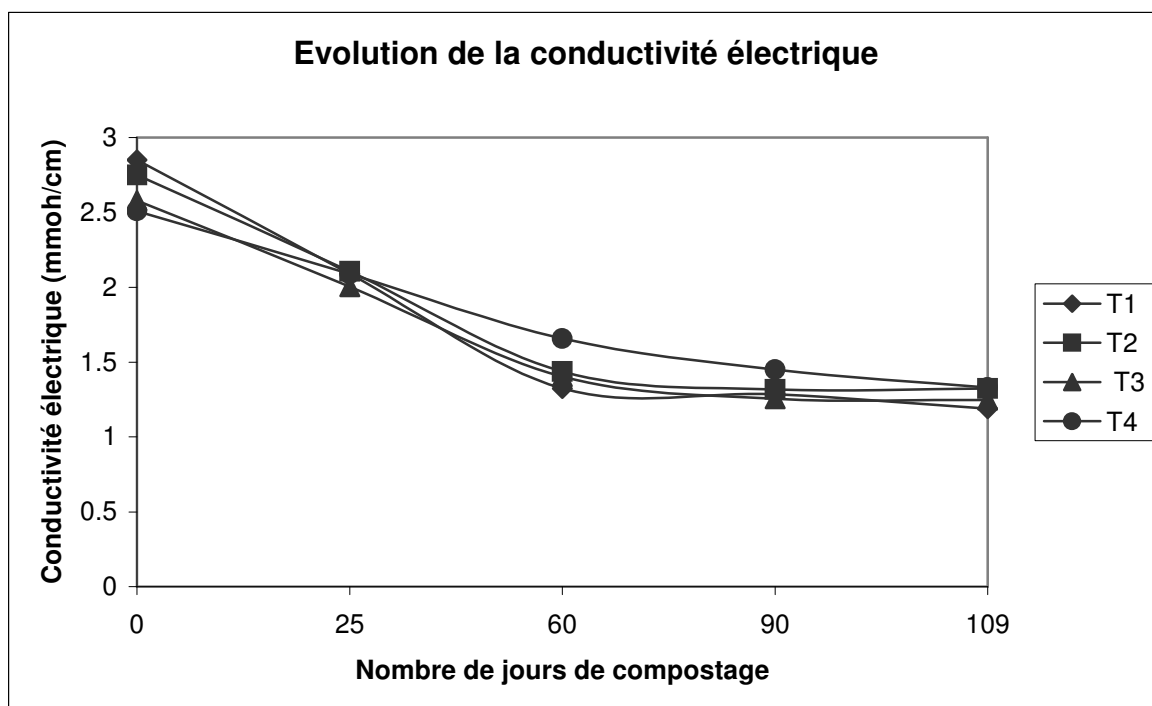
ns : non significative

Ceci est valable pour tous les tableaux ultérieurs.

1.3. Evolution de la conductivité électrique

L'évolution de la conductivité électrique (figure7), montre que les différents traitements partent d'une valeur entre 2.5 et 2.9 mmoh/cm. Cette valeur est assez élevée est peut s'expliquer par la salinité des matériaux de départ notamment le fumier ovin (3mmoh/cm) et le fumier de volaille (2.8mmoh/cm). Au cours du processus de compostage la salinité diminue rapidement pour atteindre des valeurs inférieures à 1.8 mmoh/cm aux environ du 60^{ème} jour du compostage. Il est à remarquer que les traitements (T₁ et T₂), qui avaient au départ une salinité supérieure aux autres, ont diminué leur salinité plus rapidement que les autres (T₃ et T₄). La diminution de la salinité peut s'expliquer par le lessivage des sels suite aux précipitations pluviales et arrosages avec une eau de barrage à faible salinité (1.52mmoh/cm). A la fin du processus de compostage, les différents traitements se stabilisent aux alentours d'une valeur de 1.3 mmoh/cm.

Figure 7 : Evolution de la conductivité électrique lors du processus de compostage



Le tableau 15 montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements durant les trois phases du processus du compostage. Néanmoins, au milieu du processus, le traitement T₄ semble avoir une salinité légèrement supérieure aux autres traitements.

Tableau 15 : conductivité électrique au cours du processus du compostage (mmoh/cm)

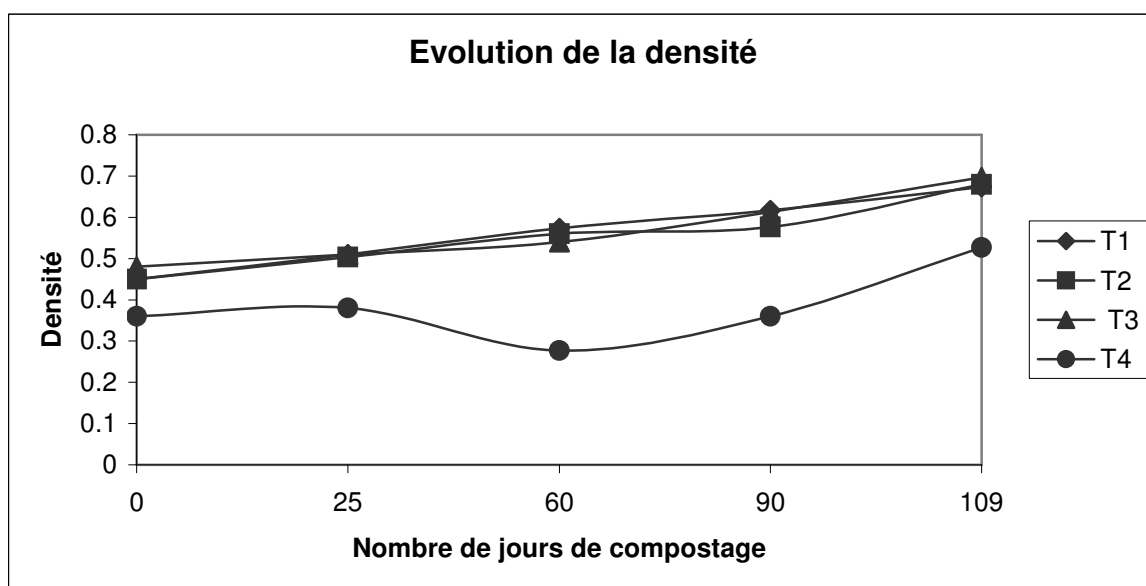
Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	2.09 _a	2.10 _a	2.00 _a	2.09 _a	ns
Milieu	1.32 _a	1.44 _a	1.40 _a	1.66 _a	ns
Fin	1.19 _a	1.32 _a	1.25 _a	1.33 _a	ns

1.4. Evolution de la densité

Pour la densité, les traitements T₁, T₂ et T₃ qui contiennent seulement des fumiers partent d'une valeur proche de 0.5 alors que le traitement T₄ renfermant de la paille broyée part d'une valeur inférieure à savoir 0.35 (figure 8).

Après le départ du processus du compostage, la courbe de densité du traitement T₄ reste presque constante jusqu'au 25^{ème} jours du compostage (phase mésophile) puis entame une descente pour atteindre une densité minimale de 0.28 au 60^{ème} jours de compostage. Cette diminution de la densité peut s'expliquer par la prise de volume de la paille de T₄ suite à sa décomposition par les microorganismes. A partir du 60^{ème} jours du compostage, la densité de T₄ commence une remontée pour atteindre vers la fin une densité de 0.53. Les courbes de densité des autres traitement se superposent et augmentent au cours du processus du compostage pour atteindre la densité de 0.7 au 109^{ème} jour du compostage. Cette augmentation de la densité est obtenue suite à la perte de volume par libération du carbone des composés organiques sous forme de CO₂. Il est à noter que plus l'andain est riche en carbone, plus il perd en volume lors du processus du compostage (Mustin, 1987).

Figure 8: Evolution de la densité lors du processus de compostage



Le tableau 16 indique qu'il n'y a pas au départ du processus de compostage une différence significative,. Néanmoins le traitement T₄ a tendance à avoir une densité légèrement inférieure à celle des autres traitements. Au milieu et à la fin du processus du compostage, les traitements T₁, T₂ et T₃ ont des valeurs significativement supérieures à celles du traitement T₄.

Tableau 16: Densité au cours du processus du compostage

Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	0.51 _a	0.50 _a	0.51 _a	0.38 _a	ns
Milieu	0.57 _a	0.56 _a	0.54 _a	0.27 _b	**
Fin	0.67 _a	0.68 _a	0.7 _a	0.53 _b	**

1.5. Evolution du rapport Carbone/azote(C/N)

1.5.1.Evolution de l'azote total

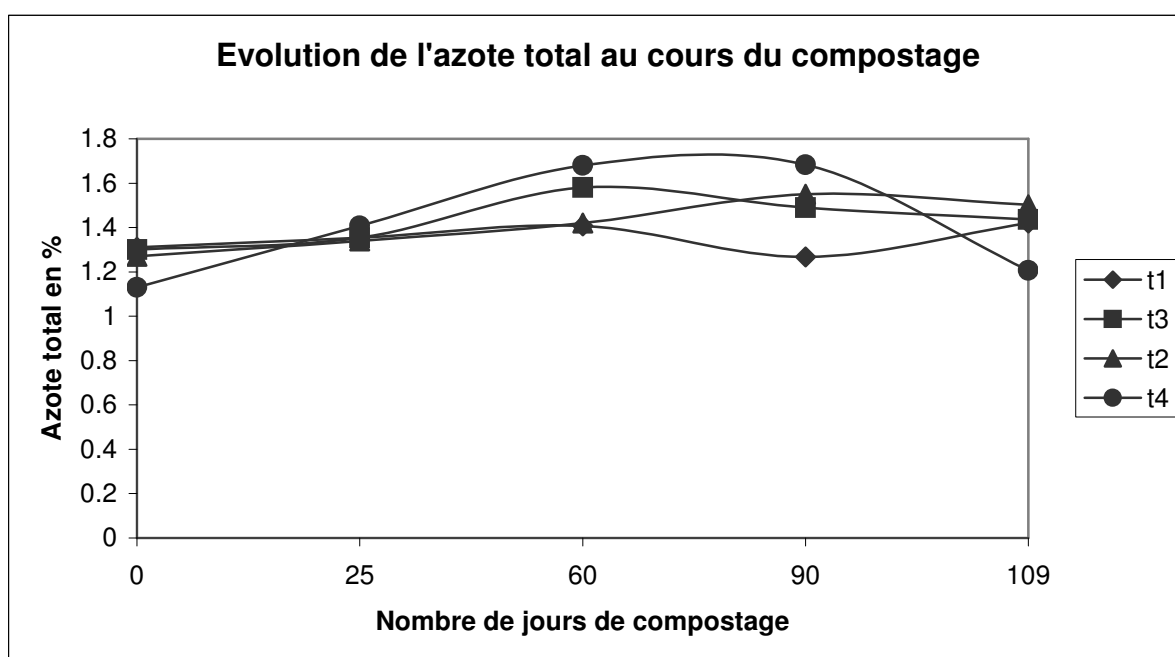
La courbe d'évolution de l'azote total au cours du processus du compostage(figure9), montre que les traitements T₁,T₂ et T₃ partent d'un pourcentage d'azote total de 1.3% alors que pour le traitement T₄, la valeur de départ est inférieure et est aux alentours de 1.1%. Cette valeur faible pour T₄ peut s'expliquer par la pauvreté de la paille en azote.

Au cours du processus de compostage, le pourcentage d'azote augmente pour tous les traitements mais plus rapidement pour T₄ et T₃ arrivant au 60^{ème} jours de compostage respectivement à1.7% et 1.5%. Cette augmentation rapide du pourcentage d'azote total peut s'expliquer par la nature des éléments de départ constituant les traitement. En effet, le fumier de volaille(présent dans T₄ et T₃) contient de la fiente très riche en azote fermentescible.

D'après Mustin (1987), l'augmentation du pourcentage d'azote total lors du processus de compostage vient de la dégradation des protéines des matériaux de départ sous l'effet de la chaleur et de l'action des microorganismes. On peut aussi supposer qu'une partie de l'augmentation

de l'azote vient des résidus des microbes et bactéries qui se sont multipliés notamment pendant la première phase du processus du compostage. A partir du 60^{ème} jours de compostage, le pourcentage d'azote a diminué pour T₄, stagné pour T₁ et T₂ et a augmenté pour T₃. La diminution du pourcentage d'azote pourrait s'expliquer par son lessivage suite aux arrosages successifs et aux pluies.

Figure 9: Evolution de l'azote total lors du processus de compostage



Il n'y a pas de différence significative entre les traitements durant les différentes phases du processus de compostage. Néanmoins, la comparaison des moyennes des traitements montre que le traitement T₄ a tendance à présenter des valeurs légèrement supérieures au début et au milieu et inférieures à la fin du compostage par rapport aux autres traitements. (tableau 17).

Tableau 17: Evolution de l'azote total au cours du processus du compostage

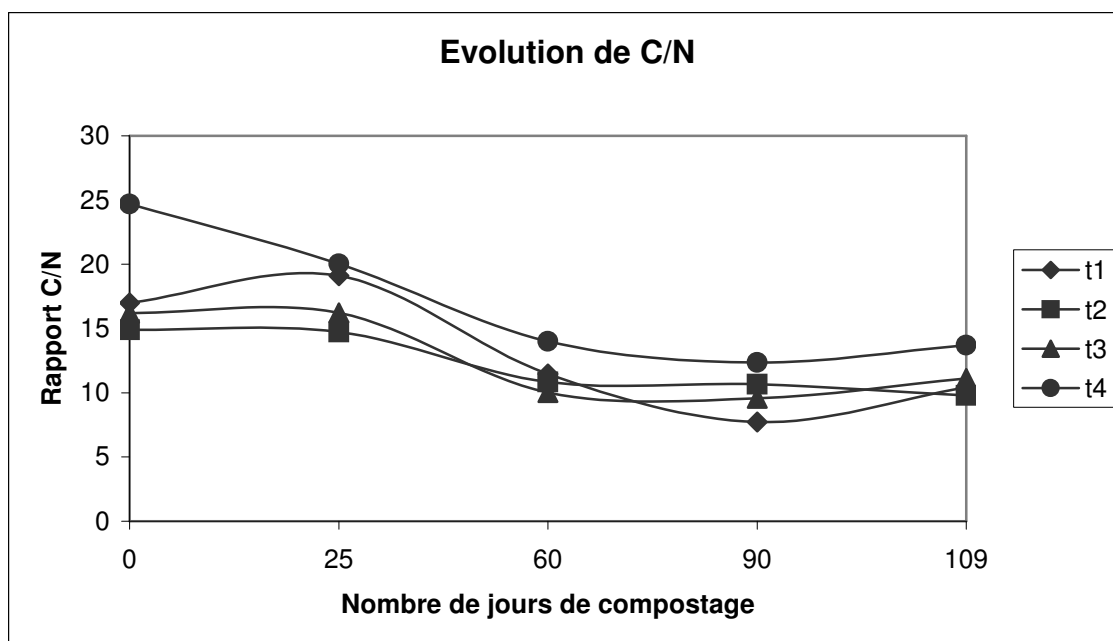
Traitements	T1	T2	T3	T4	Signification
Départ	1.35 _a	1.34 _a	1.35 _a	1.41 _a	ns
Milieu	1.41 _a	1.42 _a	1.58 _a	1.68 _a	ns
Fin	1.42 _a	1.5 _a	1.44 _a	1.21 _a	ns

1.5.2.Evolution du rapport C/N

La figure 10 illustre l'évolution du rapport C/N au cours du processus du compostage, elle révèle que les traitements T₁, T₂ et T₃ partent d'une valeur entre 15 et 17 alors que le traitement T₄ part à la valeur de 25. Le rapport élevé du traitement 4 peut s'expliquer par la présence de la paille riche en carbone et de la litière formée de copeaux de bois dans le fumier de volaille elle aussi riche en carbone.

D'après Godden (1995), l'optimum pour un C/N de départ doit se situer entre 25 et 30 dans ce cas seul le T₄ est dans cette zone. Pour Mustin (1987), l'optimum se situe entre 30 et 35. Au cours du processus de compostage, le rapport C/N diminue suite à la libération du carbone sous forme de CO₂ (Mustin 1987). A la fin du processus du compostage les rapports C/N des différents traitements se rapprochent et sont aux alentours de 9 à 14 ce qui d'après Mustin (1987), est dans la zone optimale(entre 15 et 8). Néanmoins, il est à remarquer que même si les différents traitements ont à la fin un rapport dans le normes, un C/N bas des matériaux de départ à sûrement accru les risque de perte d'azote pour les traitements T₁, T₂ et T₃. (Godden, 1995).

Figure 10: Evolution du rapport C/N lors du processus de compostage



On note d'après le tableau 18 qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements durant toutes les phases du compostage. Cependant, le traitement T₄ tend à présenter un rapport C/N légèrement supérieur à ceux des autres traitements qui ont des valeurs très proches l'une de l'autre.

Tableau 18: Rapport C/N au cours du processus du compostage

Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	19.1 _a	14.7 _a	16.2 _a	20 _a	ns
Milieu	11.47 _a	10.8 _a	10 _a	14 _a	ns
Fin	10.4 _a	9.8 _a	11.1 _a	13.7 _a	ns

1.6. Les minéraux

Les minéraux peuvent être classés en deux groupes différents selon leur intérêts. Ainsi on distingue des minéraux qui sont des indicateurs de la qualité environnementale des composts comme le fer, le manganèse, le zinc et le cuivre. Un excès de ces minéraux peut représenter une forme de pollution et de dégradation de la qualité chimique du compost. L'autre

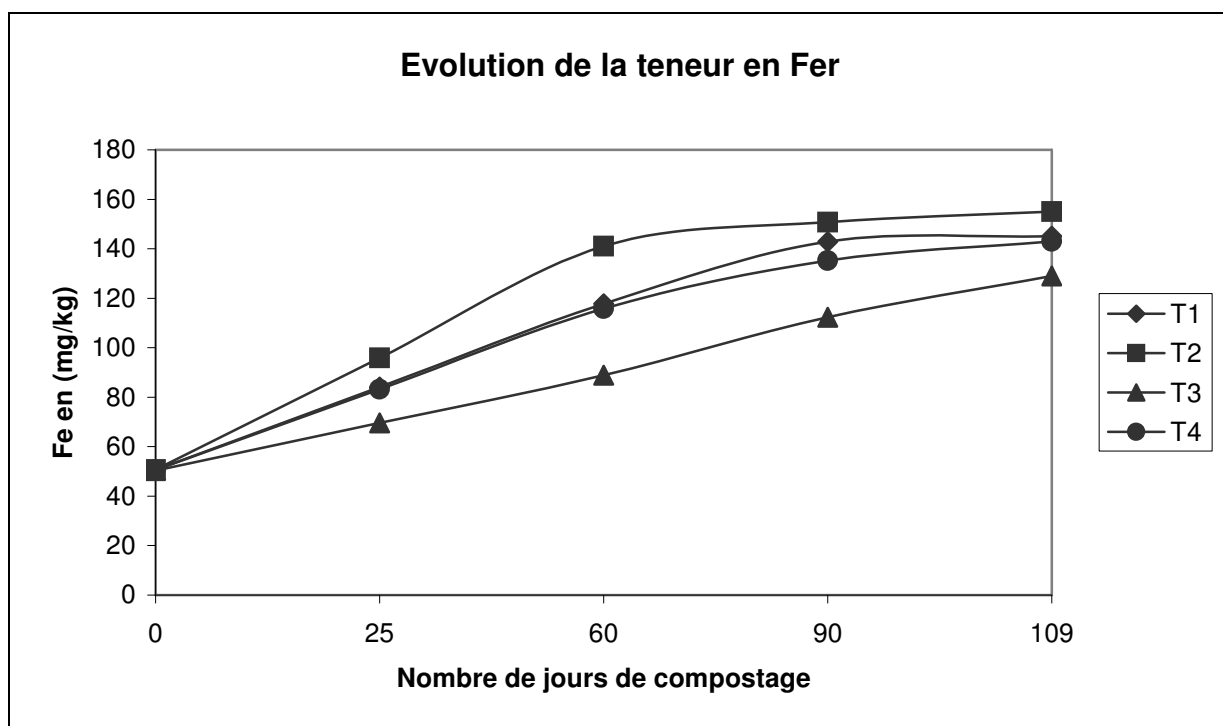
groupe est celui des minéraux à intérêt agronomique tel que le potassium, le calcium et le magnésium qui sont des indicateurs de la valeur fertilisante du compost.

1.6.1. Eléments d'intérêt environnemental

1.6.1.1. Le Fer

L'évolution du fer au cours du processus du compostage (figure 11), montre que les quatre traitements partent d'une valeur identique de 50 mg/kg. La concentration en fer de tous les traitements évolue au cours du temps, néanmoins, c'est le traitement T2 qui a la concentration la plus élevée en fer en fin de compostage à savoir environ 160 mg/kg. Le fer en grande concentration peut empêcher l'assimilation par les plantes de certains minéraux tel que le Molybdène (Ben Kheder, 1998). L'élévation des concentrations en fer pourrait s'expliquer par la concentration continue des andains suite à leur perte en volume.

Figure 11: Evolution de la concentration en Fer lors du processus de compostage



On note que les 4 traitements n'ont pas présenté de différence significative entre eux au cours du processus du compostage (tableau 19). Cependant, le traitement T₂ à base de fumier bovin et ovin tend à présenter une concentration en fer légèrement supérieure à celle des autres traitements.

Tableau 19: Concentration en fer au cours du processus du compostage (mg/kg).

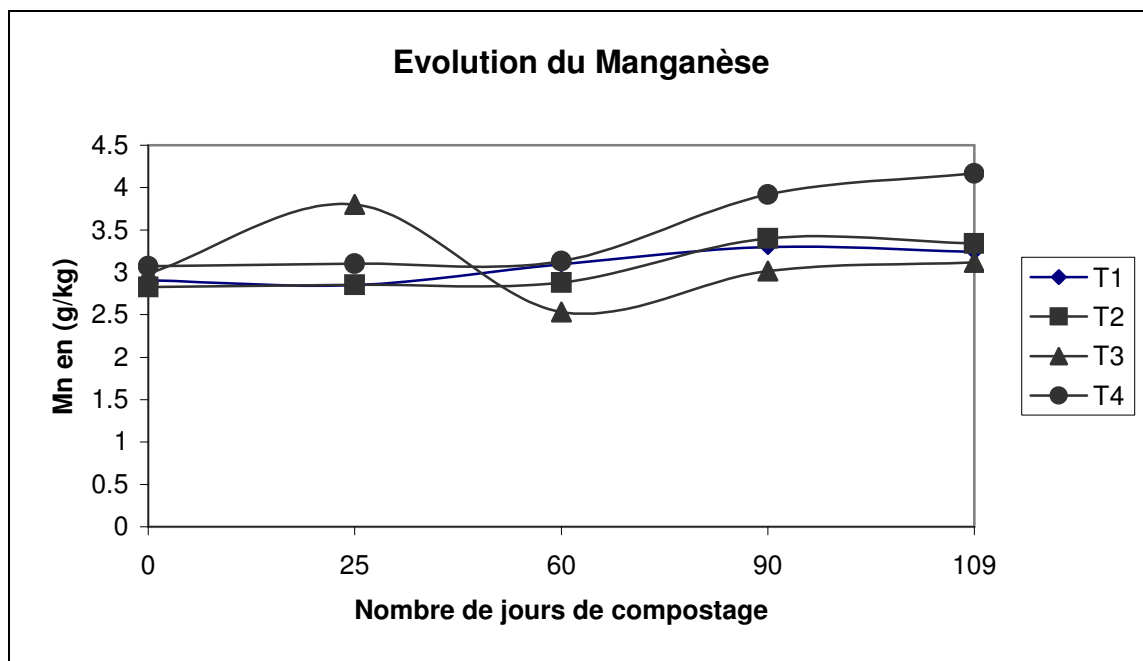
Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	84.1 _a	95.9 _a	69.6 _a	89 _a	ns
Milieu	117.7 _a	141 _a	88.9 _a	127.4 _a	ns
Fin	145.1 _a	155 _a	129 _a	143.4 _a	ns

1.6.1.2. Le Manganèse

Comme pour le fer, la concentration de départ du manganèse est identique pour tous les traitements. Le comportement de la courbe du manganèse est très variable au cours du processus du compostage. Ainsi, pour le T₃, la courbe est sinusoïdale, la courbe entame une croissance et atteint un pic au 1^{er} retournement puis descend pour atteindre un minimum lors du 2^{ème} retournement, croit de nouveau jusqu'à se stabiliser à une valeur de 3 mg/kg. Il est à remarquer que même si la courbe varie au cours du processus, la valeur finale atteinte est proche de la valeur initiale. Le changement en concentration du manganèse au cours du processus du compostage pourrait s'expliquer par le fait que la forme du manganèse est variable en fonction de la phase du compostage, ainsi si le Mn est sous une forme simple il est détectable et s'il est sous une forme complexe, il n'est pas détectable.

Enfin, étant un élément d'intérêt environnemental, il est déconseillé d'avoir des composts riches en manganèse, car comme le fer cet élément pourrait empêcher l'absorption par la plante de certains minéraux (effet antagoniste avec d'autre minéraux) telque le calcium (Ben Kheder, 1998).

Figure 12: Evolution de la concentration en Manganèse lors du processus de compostage



D'après le tableau 20, on constate qu'au début et au milieu du compostage, il n'y a pas de différence significative entre les traitements mais à la fin du processus du compostage cette différence devient très significative notamment entre T₄ et les autres traitements.

Tableau 20: Concentration en manganèse au cours du processus du compostage (mg/kg)

Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	2.8 _a	2.8 _a	3.8 _a	3.1 _a	ns
Milieu	3.1 _a	2.9 _a	2.5 _a	3.1 _a	ns
Fin	3.2 _b	3.3 _b	3.1 _b	4.2 _a	**

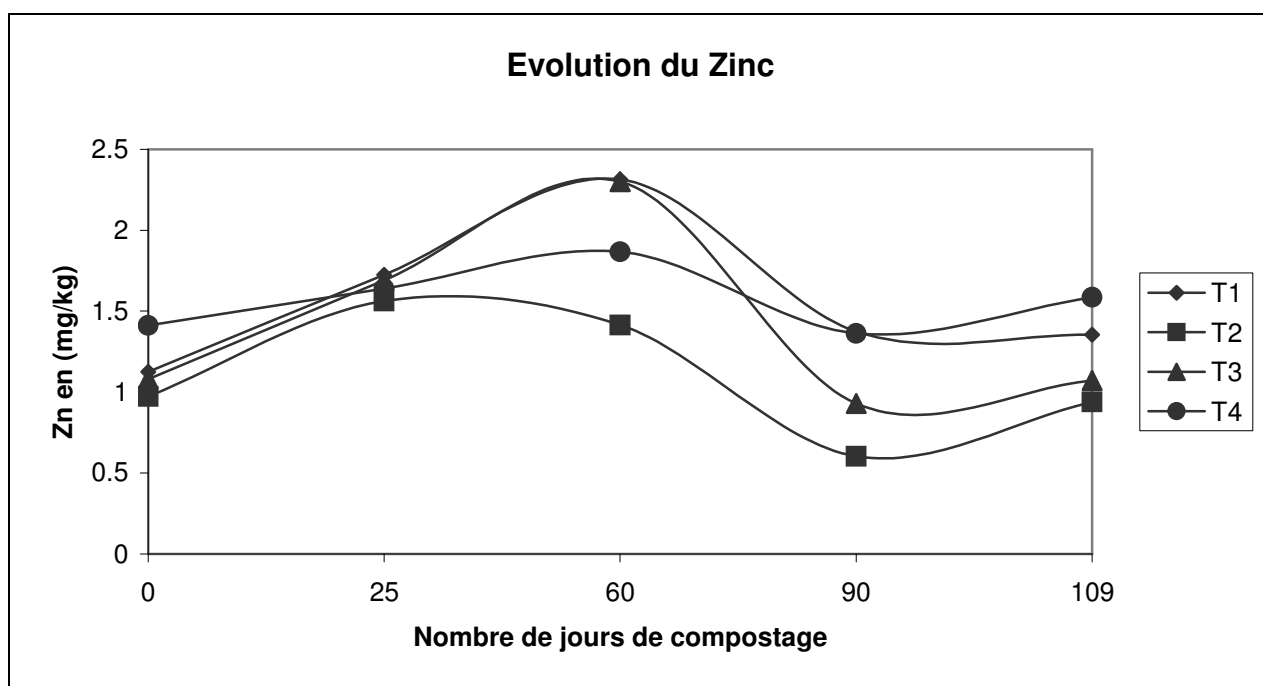
1.6.1.3. Le Zinc

La courbe de la concentration du zinc au cours du processus du compostage (figure 13) montre une valeur de départ plus élevée pour le T₄

(1.5 mg/kg) par rapport aux autres traitements. Cette différence pourrait s'expliquer par la richesse des fumiers de volailles en zinc. Au cours des différentes phases de compostage, les courbes de concentration en zinc des différents traitements se superposent.

A la fin du compostage, les valeurs obtenus sont proches des valeurs de départ ce qui signifie que la variation de la concentration au cours du processus est due au fait que le zinc se trouve sous des formes décelables ou non décelables. Il est aussi à noter qu'une concentration excessive en zinc pourrait nuire à l'absorption de phosphore par les plantes (Ben Kheder, 1998).

Figure 13: Evolution de la concentration en Zinc lors du processus de compostage



Le tableau 21, montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements durant les différentes phases du processus du compostage.

Tableau 21: Concentration en Zinc au cours du processus du compostage (mg/kg)

Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	1.4 _a	1.2 _a	1.3 _a	1.5 _a	ns
Milieu	2.3 _a	1.4 _a	2.3 _a	1.9 _a	ns
Fin	1.3 _a	0.9 _a	1.1 _a	1.6 _a	ns

1.6.1.4. Le Cuivre

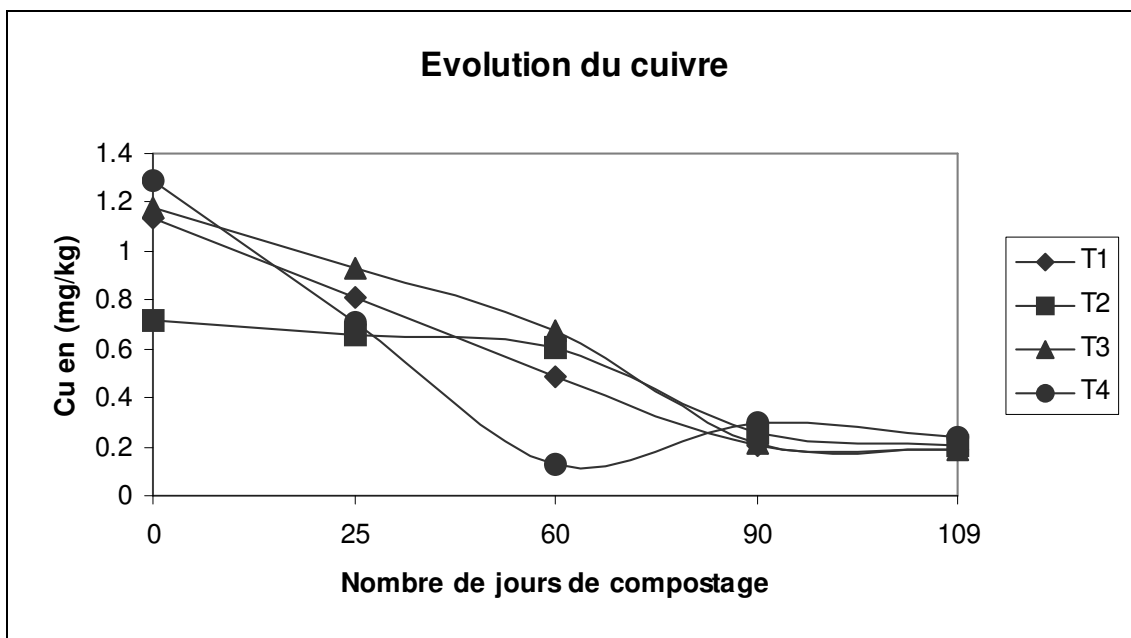
L'allure générale de la courbe d'évolution du cuivre au cours du temps montre que la concentration en cuivre est en baisse continue. Au départ les différents traitements partent de concentrations différentes, le plus concentré est le traitement T₄ avec environ 1.3 mg/kg et le moins concentré est T₂ avec environ 0.7 mg/kg. Cette différence de concentration est due au fumier de volailles riche en cuivre.

Lors du processus de compostage, les courbes évoluent selon les traitements de différentes manières. Ainsi, le traitement T₄ a une baisse très rapide de sa concentration en cuivre qui passe de 1.3 mg/kg au départ à 0.1 mg/kg au deuxième retournement. Pour le T₂, la concentration en cuivre baisse légèrement jusqu'au deuxième retournement puis plus au moins rapidement.

La différence de comportement pourrait s'expliquer par des phases de processus de compostage variable en durée. En effet, le T₄ est vite entré en phase thermophile alors que pour le T₂ la phase mésophile a été assez allongée dans le temps.

En fin du processus de compostage tous les traitements atteignent la même concentration qui est au alentours de 0.2 mg/kg de cuivre. Cette valeur pourrait s'expliquer par le fait que le compost est mûr. Par conséquent, tous les traitements sont dans la même phase du processus du compostage.

Figure 14: Evolution de la concentration en cuivre lors du processus de compostage



L'évolution de la concentration en cuivre des traitements au cours du processus du compostage montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements durant les différentes phases du processus. (Tableau 22)

Néanmoins, le traitement T₄ a en milieu du processus du compostage a tendance à avoir une teneur en cuivre sensiblement plus faible que les autres traitements.

Tableau 22: La concentration en Cuivre au cours du processus du compostage (mg/kg)

Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	0.8 _a	0.7 _a	0.9 _a	0.7 _a	ns
Milieu	0.3 _a	0.6 _a	0.7 _a	0.1 _a	ns
Fin	0.2 _a	0.2 _a	0.2 _a	0.2 _a	ns

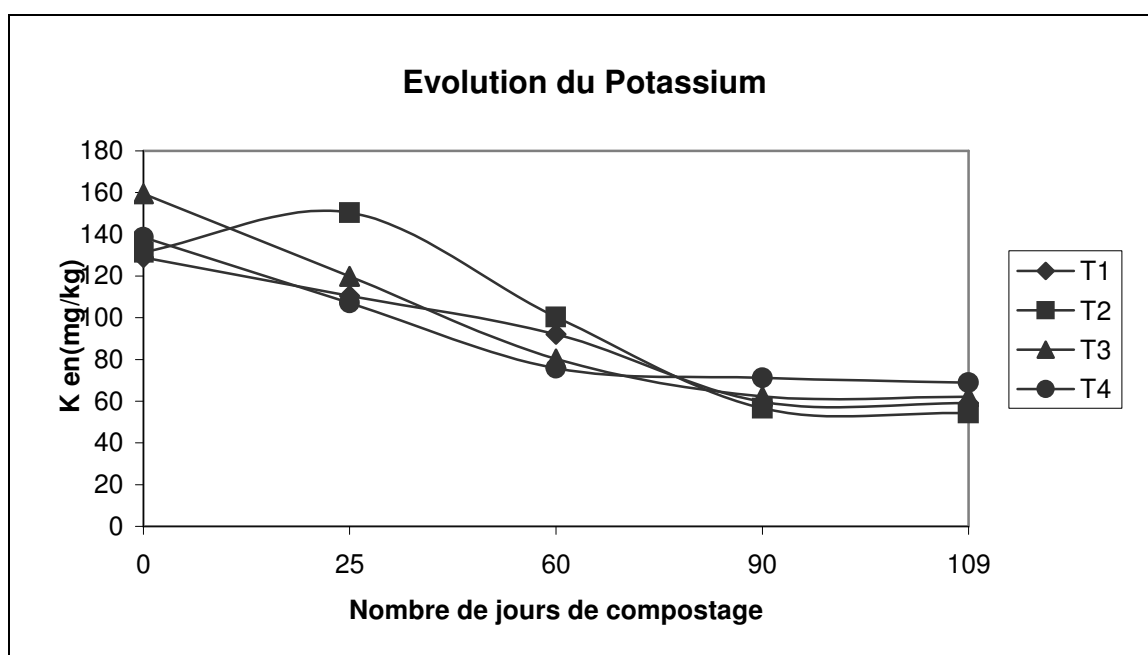
1.6.2. Eléments d'intérêt agronomique

1.6.2.1. Le Potassium

La figure 15 relative à l'évolution du potassium au cours du processus du compostage montre une diminution de la concentration au cours du temps. Au départ les traitements partent d'une concentration entre 130 et 160 mg/kg de potassium. Ce sont les traitements T₃ et T₄ qui ont la concentration de départ la plus élevée cela est due à la présence de fumiers de volailles dans leur composition. Ces traitements voient leur concentration en potassium baisser plus rapidement que les autres traitements (T₂ et T₁) pour se stabiliser au 60^{ème} jours du processus de compostage.

En fin de compostage, tous les traitements ont des concentrations de potassium similaires, néanmoins, on note un léger avantage pour les traitements T₃ et T₄. A la suite de la concentration finale en potassium (environ 70 mg/kg) on peut considérer que les différents composts obtenus sont riches en potassium (ITAB 2001f).

Figure 15: Evolution de la concentration en Potassium lors du processus de compostage



Le tableau 23, montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements en ce qui concerne la concentration en potassium. Toutefois, on constate que T₂ tend à présenter une valeur légèrement plus élevée que les autres traitements surtout au départ.

Tableau 23 : Concentration en potassium au cours du processus du compostage (mg/kg)

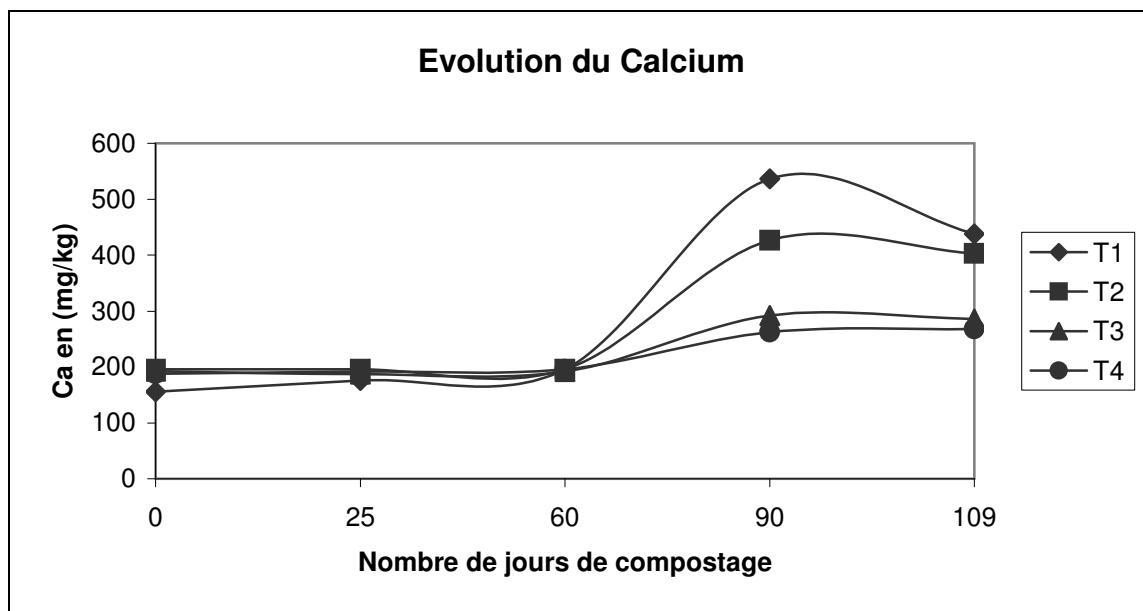
Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	110.5 _a	150.4 _a	120 _a	107.1 _a	ns
Milieu	92.1 _a	100.4 _a	80.3 _a	75.8 _a	ns
Fin	59.1 _a	54.3 _a	62.2 _a	69.9 _a	ns

1.6.2.2. Le Calcium

L'évolution de la concentration en calcium durant le processus de compostage, on révèle que les différents traitements ont au départ la même concentration située entre 150 et 200 mg/kg de calcium.(figure 16). Pour tous les traitements, la concentration du calcium reste stable jusqu'au 60^{ème} jours du compostage puis augmente rapidement pour T₁ et T₂ et faiblement pour T₄ et T₃. L'augmentation de la concentration à partir du 60^{ème} jour du compostage (deuxième retournement) pourrait s'expliquer par le fait que tous les traitements entrent dans la phase de refroidissement.

Cette phase est caractérisée par une recolonisation du milieu par les micro-organismes mésophiles (ITAB, 2001d). On peut supposer alors qu'il y a libération du calcium dans le milieu par transformation des matériaux de départ. Un excès en calcium peut nuire à l'absorption de du B, Cu, Mn et Fe (Ben Kheder, 1998).

Figure 16: Evolution de la concentration en calcium lors du processus de compostage



On note qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements durant les différentes phases du processus du compostage. (tableau 24)

En fin du compostage, il apparaît une légère différence entre les moyennes des traitements T₄ et T₁ néanmoins elle reste non significative.

Tableau 24: Concentration en calcium au cours du processus du compostage (mg/kg)

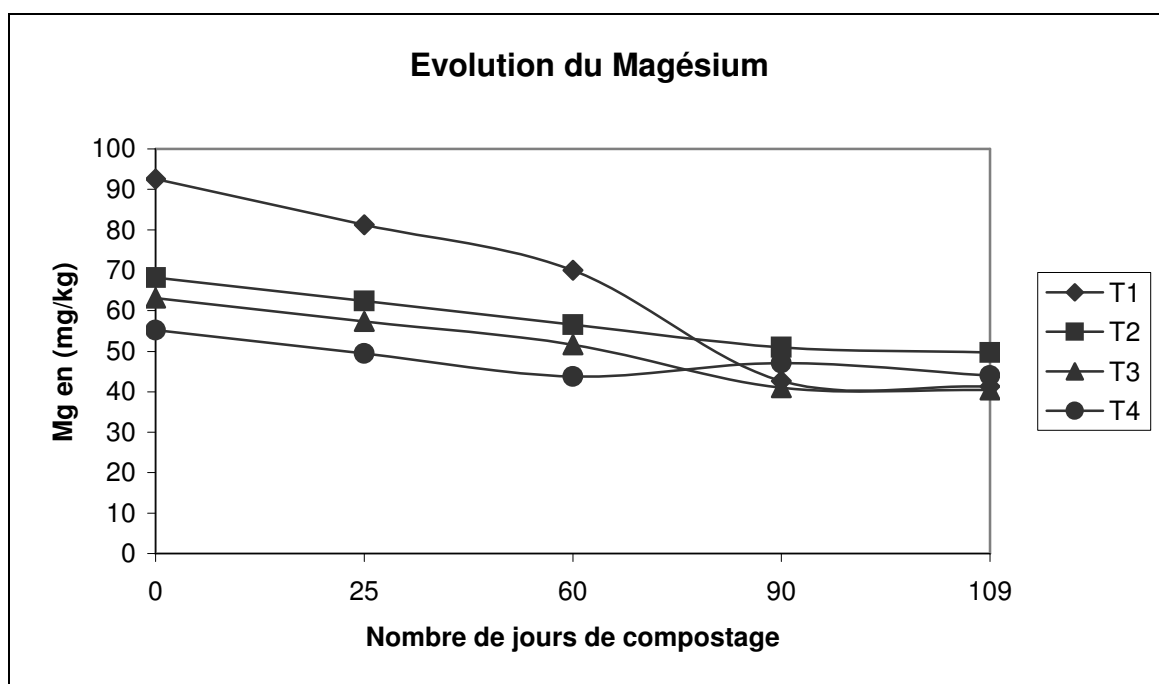
Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	176.1 _a	196.2 _a	187.5 _a	192.1 _a	ns
Milieu	196.1 _a	196.1 _a	192.1 _a	196 _a	ns
Fin	437.7 _a	403.1 _a	286.2 _a	268.1 _a	ns

1.6.2.3. Le Magnésium

L'évolution générale des courbes du magnésium des différents traitements montre qu'il y a une diminution de la concentration au cours du temps pour tous les traitements (figure 17). Les traitements T₂, T₃ et T₄ partent d'une valeur située entre 55 et 70 mg/kg de magnésium alors que le traitement T₁

part d'une valeur plus élevée 93 mg/kg. Pour le traitement T₁, la concentration en magnésium diminue lentement jusqu'au 60^{ème} jour du compostage puis rapidement jusqu'au 90^{ème} jour. A partir du 90^{ème} jour la concentration en magnésium du T₁ varie très peu jusqu' à la fin du processus du compostage pour aboutir à la valeur de 40 mg/kg. Pour les autres traitements, à savoir T₂, T₃ et T₄ la diminution de la concentration se fait progressivement. En fin du processus, toutes les concentrations sont proches et situées entre 40 et 50 mg/kg.

Figure 17: Evolution de la concentration en Magnésium lors du processus de compostage



La concentration en magnésium analysé au cours du processus du compostage, montre qu'il y a une différence hautement significative entre les traitements au départ. En effet, la teneur en magnésium du T₄ est significativement plus faible que les autres traitements (tableau 25). Au milieu et à la fin du processus de compostage, les traitements n'ont pas présentés de différence significative entre eux.

Tableau 25: Concentration en Magnésium au cours du processus du compostage (mg/kg)

Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Départ	81.2 _a	62.4 _b	57.3 _b	49.5 _b	**
Milieu	70 _a	56.5 _a	51.6 _a	43.8 _a	ns
Fin	41.3 _a	49.8 _a	40.4 _a	44 _a	ns

1.7. Classification des composts obtenus

Tableau 26: Composition des composts obtenus et leur classement

Traitements	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Azote total	1.42 ₍₃₎	1.5 ₍₁₎	1.44 ₍₂₎	1.21 ₍₄₎
Fer	145.1 ₍₂₎	155 ₍₁₎	129 ₍₄₎	143.4 ₍₃₎
Manganèse	3.2 ₍₃₎	3.3 ₍₂₎	3.1 ₍₄₎	4.2 ₍₁₎
Zinc	1.3 ₍₂₎	0.9 ₍₄₎	1.1 ₍₃₎	1.6 ₍₁₎
Cuivre	0.2	0.2	0.2	0.2
Potassium	59.1 ₍₃₎	54.3 ₍₄₎	62.2 ₍₂₎	69.9 ₍₁₎
Calcium	437.7 ₍₁₎	403.1 ₍₂₎	286.2 ₍₃₎	268.1 ₍₄₎
Magnésium	41.3 ₍₃₎	49.8 ₍₁₎	40.4 ₍₄₎	44 ₍₂₎

Nb : les chiffre entre parenthèses indiquent le classement des composts d'après leur richesse en minéraux.

Le tableau ci dessous montre que le compost T₄ est classé le premier pour les concentrations en manganèse et en zinc (éléments d'intérêt environnemental) et le dernier en ce qui concerne l'azote et le calcium (éléments d'intérêt agronomique).

Le traitement T₃ semble le plus intéressant pour la protection de l'environnement et les traitements T₁ et T₃ sont les mieux classés pour leur richesse en éléments d'intérêt agronomique.

2.Effet du jus de compost sur les maladies des plantes

Des extraits de jus de compost ont été préparé à partir des différents traitements au stade de la maturité. Ces extraits ont été appliqués sur des tubercules de pomme de terre pour l'expérimentation *in vivo* et des cultures de champignons pour l'expérimentation *in vitro*.

2.1. Essai *in vitro*

2.1.1. *Phytophthora erythroseptica*

L'ajout des différents jus de compost au milieu a eu pour conséquences:

- Une inhibition de la croissance mycélienne traduite par une réduction de la densité de mycélium chez les cultures traitées par les différents jus de compost
- Une zone d'antibiose est détectée sur les cultures traitées par le jus de compost marquant la présence de substances inhibitrices produites par les microorganismes contenus dans les extraits.

Vu la difficulté d'estimer le diamètre des colonies de *Phytophthora erythroseptica*, la comparaison *in vitro* des différents traitements n'a pas pu se faire.

Le test de ces extraits en traitement des tubercules pourrait nous renseigner d'avantage sur l'efficacité pratique des différents jus de compost sur le développement de la pourriture rose sur tubercules.

2.1.2. *Rhizoctonia solani*

Une différence très significative apparaît entre le diamètre du témoin et celui des boîtes de pétri traitées avec les différents traitements. Après 6 jours d'incubation pour le témoin le mycélium envahit tout le diamètre de la boîte de pétrie à savoir 8.5 cm.

Pour les autres traitements on a des moyennes de diamètres plus faibles et qui varient significativement d'un traitement à l'autre comme rapporté dans le tableau 27.

Tableau 27: Diamètre des colonies du *Rhizoctonia solani*

Traitements	Témoin	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Signification
Diamètre des colonies (cm)	8.5 _a	7.1 _b	5.5 _c	7.4 _b	4.5 _d	**

D'après ces résultats, il apparaît que le traitement T₄ est le plus performant inhibant au mieux le développement des colonies suivi par le traitement T₂. Ces deux traitements ont des compositions de départ largement différentes et aussi une évolution de température au cours du processus du compostage différente.

Néanmoins, les traitements T₂ et T₄ ont des valeurs finales de pH, de conductivité électrique et d'azote proches ce qui pourrait expliquer le développement d'une même flore microbienne responsable de l'inhibition du développement du *Rhizoctonia*.

Photo 1 : Effet du traitement 4 sur la culture *in vitro* du *Rhizoctonia solani*.



2.1.3. Les Fusariums

L'étude statistique fait apparaître qu'il y a bien une interaction très significative entre les traitements et les différentes souches testées de *Fusarium*. Les résultats de l'essai *in vitro* montrent que les extraits agissent différemment selon le genre de *Fusarium* testé. Pour le *Fusarium solani*, tous les traitements ont eu pour effet une diminution du diamètre des colonies par rapport au diamètre des colonies du témoin. Les traitements les plus efficaces et comme dans le cas du *Rhizoctonia solani*, sont les traitements T₄ et T₂.

Avec le *Fusarium oxysporum*, se sont successivement les traitements T₂, T₄ et T₁ qui sont les plus efficaces. Le traitement T₃ vient à la fin.

Kai et al (1990) ont aussi obtenu un effet similaire sur le *Fusarium oxysporum* en utilisant des jus de composts d'écorce donc riche en composés ligno-cellulosiques.

On pourrait alors expliquer l'efficacité du T₄ contre le *Fusarium oxysporum* par le fait qu'il contient de la paille (composé riche en lignine et en cellulose).

Les extraits sont aussi efficaces contre les cultures *in vitro* de *Fusarium roseum*, ainsi le traitement le plus efficace reste le T₄ suivi par le T₃ et enfin il y a le T₂ et le T₁.

Il est à remarquer que le T₃ peu efficace pour les *Fusarium solani* et *Fusarium oxysporum* devient très efficace pour les *Fusarium roseum*. Cela pourrait s'expliquer par le fait que pour le *Fusarium roseum* c'est la présence de fumier de volailles dans les matériaux de départ qui aurait pu inhiber le développement du pathogène. En effet, Weltzen (1990), a pu obtenir de bon résultats contre un pathogène des plantes (agent de la pourriture grise de la tomate), en utilisant un extrait de compost à base de fumier bovin et de déjection de volaille (éléments se trouvant dans nos composts T₃ et T₄).

Enfin pour le *Fusarium graminearum*, les résultats montrent aussi que les différents extraits restent efficaces, les meilleurs jus sont ceux issus des traitements T₂ et T₄ alors que le moins bon est T₃.

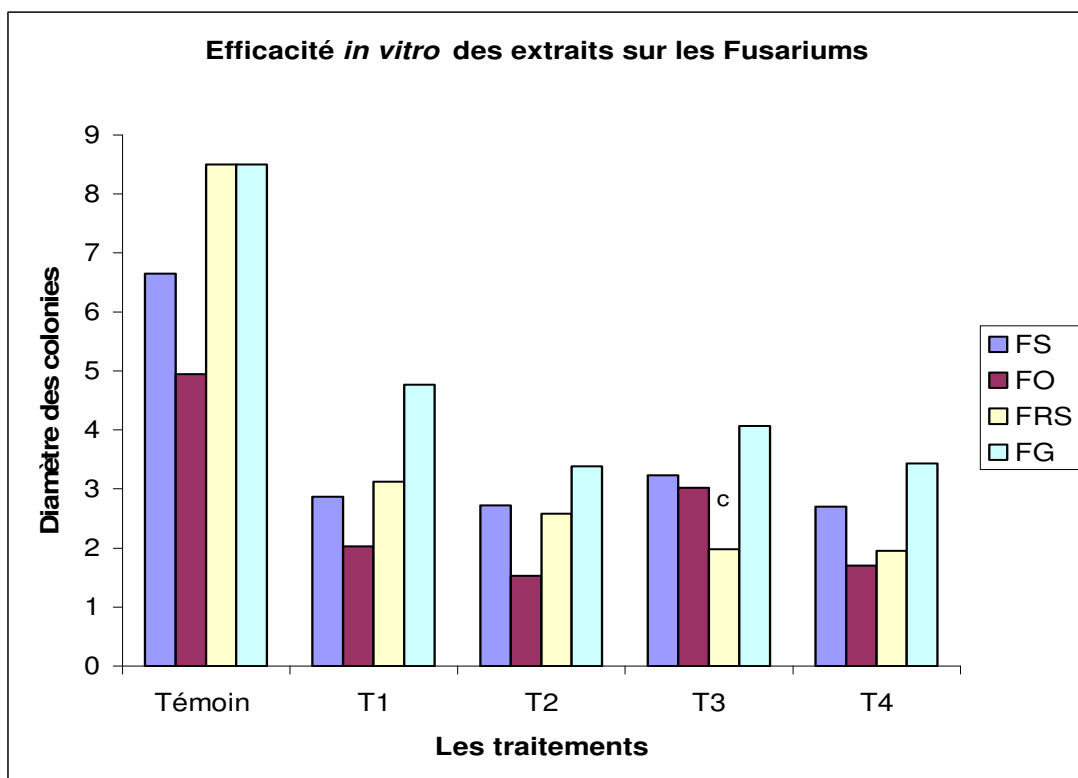
Photo2: Effet du traitement 4 sur la culture *in vitro* du *Fusarium graninearum*.



Photo 3: Effet du traitement 2 sur la culture *in vitro* du *Fusarium graninearum*.



Figure 18: Résultats des essais *in vitro* des extraits sur différents genres de Fusarium.



FS : *Fusarium solani*

FO : *Fusarium oxysporum*

FRS: *Fusarium roseum*

FG: *Fusarium graminearum*

2.2 Essai *in vivo*

2.2.2 *Phytophthora erythroseptica*

L'essai *in vivo* des jus de compost s'est effectué sur deux souches de *Phytophthora erythroseptica* et selon les souches on a pu obtenir des résultats différents. Pour la souche Pr₂ le traitement T₂ n'a pas d'effet inhibiteur sur le développement du champignon, les tubercules traités avec le T₂ ont même une pénétration du champignon plus importante que les tubercules non traitées

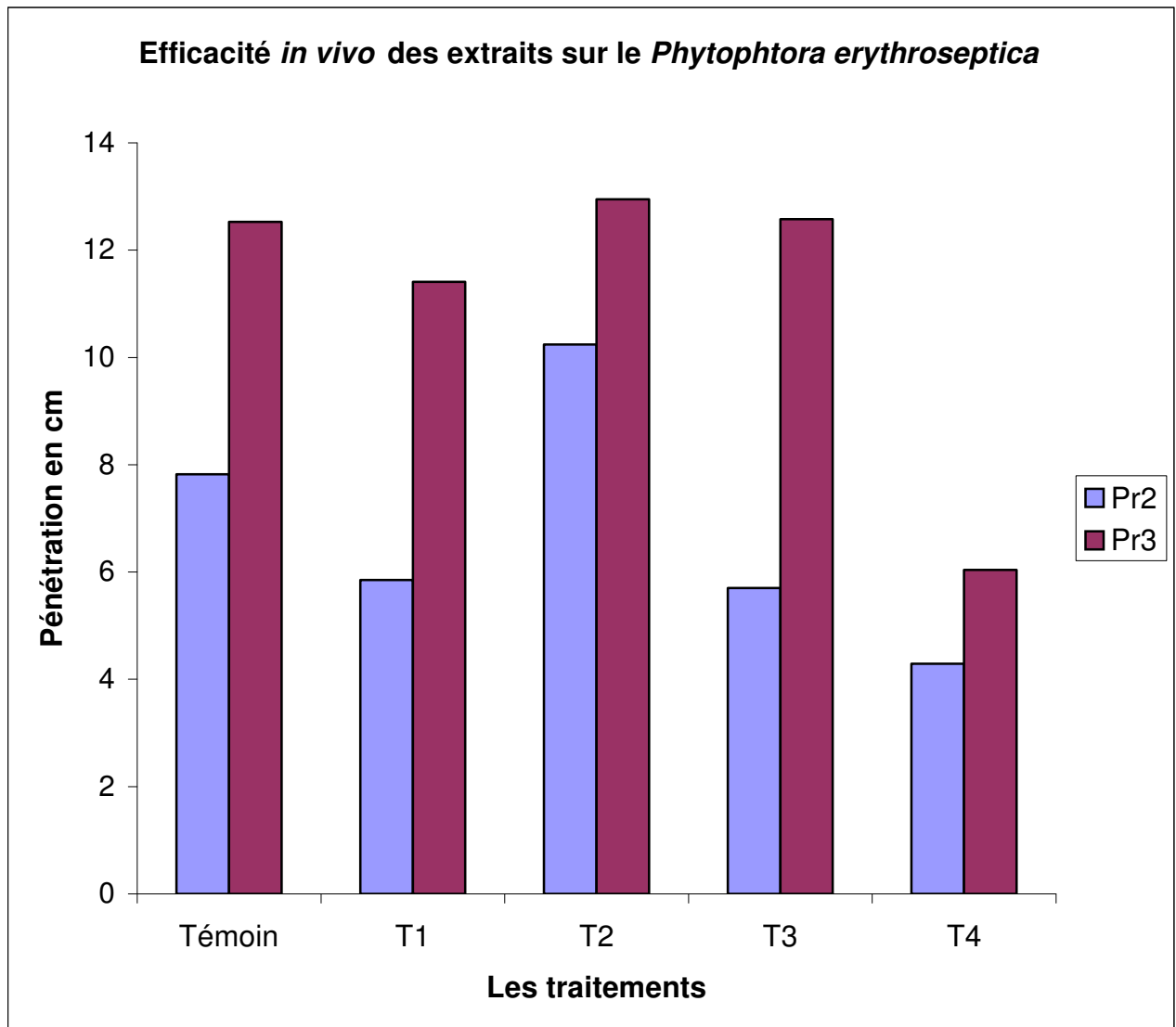
(témoin). Cette augmentation pourrait s'expliquer par le fait que l'extrait étant inefficace, le champignon a aurait pu utiliser les nutriments qu'il contient pour se développer encore plus que le témoin. Les autres traitements sont efficaces et le meilleur reste le T₄ suivi par le T₃.

Pour la souche Pr₃ qui paraît plus virulente, seul le traitement T₄ reste efficace, on peut supposé que la richesse de ce traitement en fumier de volailles aurait pu représenter un antagoniste chimique au développement des champignons grâce à sa richesse en acides aminés comme rapporté par Trankner et Andreas (1992).

La faible efficacité des jus de compost sur le développement des souches de *Phytophthora erythroseptica* pourrait s'expliquer par la vitesse de développement du champignon qui est très rapide, cette vitesse ne permet pas aux composants actifs du jus de compost qui sont plus long à se développer d'agir efficacement.

L'efficacité du T₄ serait due alors plus aux antagonistes chimiques qu'il contient (acides aminés et phénols) qu'aux antagonistes biologiques à savoir les bactéries et les levures.

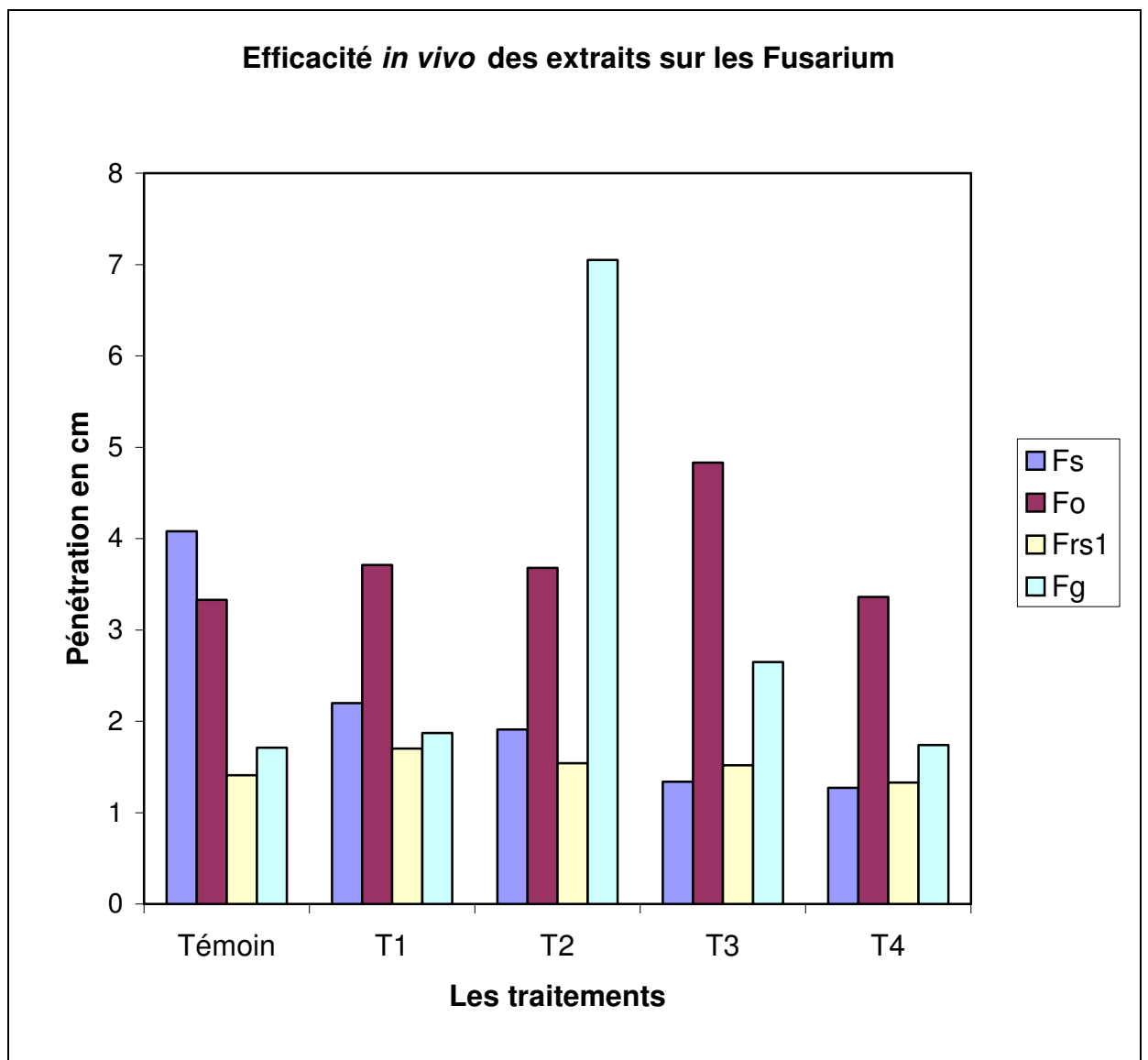
Figure 19: Résultats des essais *in vivo* des extraits sur deux souches de *Phytophthora erythroseptica*.



2.2.3. Les Fusarium

Les différents essais conduits sur les tubercules de pomme de terre montrent que les traitements sont efficaces seulement avec le *Fusarium solani* et restent inefficaces contre *Fusarium oxysporum*, *Fusarium graminearum* et *Fusarium roseum*. Pour le *Fusarium solani*, les traitements T₄ et T₃ sont les plus efficaces peut être grâce à leur richesse en acides aminés.

Figure 20: Résultats des essais *in vivo* des extraits sur les *Fusarium*

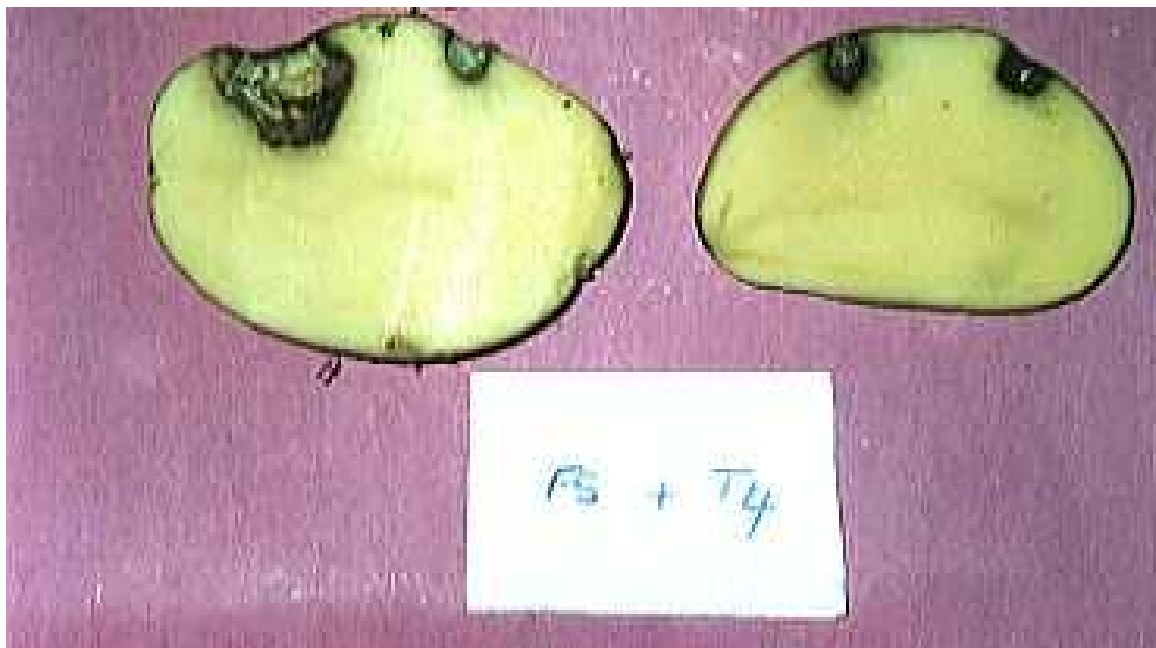


Même si les extraits de compost n'étaient efficace *in vivo* que contre le *Fusarium solani*, ce résultat représente en soit un gain car comme rapporté dans l'étude menée par Daami et Mahjoub (1996), les sol tunisiens sont contaminé essentiellement par le genre solani du *Fusarium*.

Une diminution de la contamination des tubercules obtenus par au moins 50% est possible par l'utilisation des extraits des composts T₄ et T₃, cela permettrait d'obtenir de moins en moins de tubercules contaminées et

destinées à la plantation et brisera ainsi le cycle de survie du pathogène contribuant à long terme à sa disparition.

Photo4: action inhibitrice du traitement 4 sur le *Fusarium solani*.



Conclusion

Cette étude met en exergue le comportement de différentes matières organiques issues des déjections animales et des sous-produits agroindustriels lors du processus du compostage et a pour objectif de trouver les bons mélanges et le mode de compostage le plus approprié.

Ainsi, il s'est avéré que le traitement T_4 qui comporte essentiellement de la paille et du fumier de volaille est celui qui est monté le plus en température favorisant ainsi l'hygiénisation du mélange. Pour les autres traitements, le minimum a été atteint à savoir une température au alentours de 40°C pendant au moins trois jours. Néanmoins, il est préférable d'augmenter le pourcentage de carbone dans les mélanges des traitements T_1, T_2 et T_3 afin d'avoir des températures plus hautes et aussi un rapport C/N de départ plus élevé qui permettrait de perdre moins d'azote lors du processus du compostage.

Pour le pH, il était basique au départ puis s'est abaissé progressivement suite à la productions d'acides pour s'approcher finalement de la neutralité (surtout dans le cas du traitement T_1). Un pH proche de la neutralité, permet au nutriments du compost d'être facilement absorbés par les plantes, car un pH acide ou basique pourrait inhiber l'absorption de certains minéraux.

Il est aussi à noter, que le T_4 a été le traitement le plus volumineux par rapport aux autres, ce volume exagéré a eu pour effet un mélange et une humidité des composés non homogènes. Cet inconvénient pourrait être corrigé en laissant la paille 24 heures dans un bassin d'eau afin qu'elle puisse s'humidifier et se gonfler pour mieux accueillir l'action des microbes et bactéries lors du processus du compostage. Aussi, il est recommandé de mélanger la paille avec les autres composants du tas avant sa mise en andain afin d'obtenir plus d'homogénéité.

Pour les minéraux, les composts les plus intéressants sont T_1 et T_2 car ils sont les plus riches en éléments nutritifs.

Suite à cette étude, il s'est avéré que les fumiers de volailles qui sont très répandus en Tunisie et dont l'utilisation à l'état frais peut présenter de nombreux inconvénients, ces fumier peuvent se composter facilement avec d'autre déjections animales et peuvent donc être valorisés.

Pour les jus de compost utilisés comme fongicides naturels, il s'est avéré pour les essais *in vitro* que les différents extraits sont efficaces, néanmoins l'extrait issu du T₄ est souvent le plus efficace contre les maladies des plantes testées(*Rhizoctonia solani*, *Phytophthora septica*, *Fusarium solani*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium Roseum* et *Fusarium graninearum*).

Cette efficacité pourrait s'expliquer par l'évolution même du compost au cours du processus du compostage. En effet l'évolution spécifique de la température, du pH et de la teneur en azote du T₄ au cours du processus de compostage a pu favoriser le développement de microorganismes responsables des effets d'inhibition des champignons pathogènes. Ces microorganismes n'auraient pas pu se développer dans les autres traitements à cause de l'évolution différente des paramètres de compostage.

L'essai des extraits *in vivo* a donné des résultats moins probants mais qui sont encourageants, en effet les extraits ont pu diminuer le développement de certaines souches de *Phytophthora* et l'extrait du T₄ s'est avéré très efficace contre le *Fusarium solani*, le pathogène le plus présent dans les sols Tunisiens.

Ainsi, le traitement des tubercules de pommes de terre avec le jus issu du compost T₄ avant leur stockage peut diminuer considérablement l'attaque du *Fusarium solani* par un moyen biologique et à long terme on pourrait avoir une décontamination des sols tunisiens.

La technique de fabrication du jus de compost reste à perfectionner; en effet des études doivent être menées pour déterminer la période optimale d'extraction, le mode le plus intéressant à savoir aérobie ou anaérobie et enfin les concentrations à utiliser pour le traitement des maladies.

Références bibliographiques

Adas (1993). **Les fertilisants organiques. Sciences et techniques de l'an 2000 : 124 pages.**

Aubert C. (1998). **Le compostage des fumiers de volailles. Recueil des interventions du 15 décembre 1998. Paris. ACTA/ADEME/Ministère de l'Agriculture et de la Pêche : 45-55.**

Ben Salem H., Nefzaoui A.(1999). **An over view of tunisian experience on the manufacturing and utilisation of feed blocks as strategic supplement to poor quality forages fed to ruminants. Workshop on feed blocks technology and its impact on improving animal performance.**

Baghdad 22-24/3/1999.

Ben Kheder M. (1998). **Fertilisation Des Culture De Primeur. Journées d'information CFRA JEMMAL 9/101998. p 4-5.**

Ben Kheder M. (2002). **Organic Agriculture in Tunisia. Organic Agriculture in the Mediterranean Basin. Edition de l'IAV Hassan II Maroc. P213.**

Ben Rouina B., Gargouri K. (2002). **Une fertilisation non conventionnelle : L'utilisation des effluents des huileries en agriculture. Séminaire sur la gestion durable des systèmes de production oléicoles. Monastir-Tunisie 1/3/2002.**

Brinton., William F. (1995). **The control of plant pathogenic fungi by use of compost teas. Biodynamics. Janury-February. P 12-15**

Chermiti A., Rouissi H., Mehouchi M.(1999). **Bilan des recherches sur l'utilisation des sous-produits en alimentation des petits ruminants. Atelier de travail : bilan de recherche sur les petits ruminants. Mateur 20-21/9/1999.p19-29.**

Cronin M., Andrews H. (1996).**Putative mechanism and dynamics of inhibition of the apple scab pathogen *Venturia inaequalis* by composts extracts. Soil Biology & Biochemistry. Vol. 28, No. 9 p 1241-1249.**

Daami M., El Mahjoub M.(1996). **Fusariose de la Pomme de Terre En Tunisie : Potentiel Infectieux et Comportement Variétal. Annales de l'INRAT. No 69 p 89-99.**

Elad Y., Shtienberg D. (1994). **Effect of compost water extracts on grey mould (*Botrytis cinerea*). Crop protection. Vol 13, No 2 p 109-114.**

Eriksen J., Askegaard M., Kristensen K.(1999). **Nitrates leaching in an organic dairy/crop rotation as affected by organic manure type, livestock density and crop. Soil use and mangement, 15 : (3) 176-182.**

Gibbs J., Lewis L. (1989). **Reducing Methane Emissions from Livestock: oppurtunities and issues. Cité par ITAB (2001). Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 .**

Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. (1998). **Le sol vivant. Bases de la pédologie. Biologie des sol. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Collection Gérer l'Environnement N° 14. Lausanne, Suisse. 519 pages.**

Godden B. (1986). **Etude du processus de compostage du fumier de bovin. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, Université Libre de Bruxelles. Laboratoire de microbiologie, 136 pages+annexes.**

Godden B. (1995). **La gestion des effluents d'élevage. Techniques et aspect du compostage dans une ferme biologique. Revue de l'Ecologie.No 13.p37.**

Groupement de Recherche en Agriculture Biologique. (1988). **Effet comparés de fertilisation organique et minérale sur le lessivage des nitrates et la dynamique de l'azote au cours d'une rotation. Rapport final 1984-1988, ANRED, Conseil Régional PACA, 62 pages.**

Hacala S. (1998). **Le compostage du fumier en exploitation d'élevage. Recueil des interventions du 15 decembre 1998. Paris. ACTA/ADEME/Ministère de l'Agriculture et de la Pêche : 28-43.**

Hacala S., Farruggia A., Le Gall A., Pfimlin A. (1999). **Le compost, mieux qu'un engrais de ferme. Technipel editions, 12 pages.**

Halberg N. (1999). **Indicators of ressources use and environmental impact for use in a decision aid for Danish livestock farmers. Cité par ITAB (2001). Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 .**

.

Hoitink H.A.J. (1995). **The Composting Process. Cité par ITAB (2001). Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 .**

ITAB (2001). **Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 p 22-23.**

ITAB (2001b). **Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 p 87.**

ITAB (2001c). **Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 p 122.**

ITAB (2001d). Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001p 105-106.

ITAB (2001e). Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 p 112.

ITAB (2001f). Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 p 115-119.

ITAB (2001g). Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001p 124-132.

ITEB (1991). L'élevage bovin et l'environnement –guide pratique. Annexe : Bâtiments d'élevage bovin et porcin- réglementation et préconisations. Ministère de l'Agriculture, ITEB, 94 pages.

Kai., Hideaki, Tohru U., Masahiro S. (1990). Antimicrobial activity of bark-compost extracts. Cité par ATTRA : Appropriate Technology Transfer for Rural Areas.(<http://www.attra.org/attra-pub/PDF/comptea.pdf>).

Leclerc B., George P., Cauwel B., Lairon D. (1995). A five year study on nitrate leaching under crops fertilized with mineral and organic fertilizers in lysimeters. Cité par ITAB (2001). Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 .

Le Houérou B. (1993). Les dépôts de fumiers au champs : pertes en azote par percolation des jus sous les tas. In Uget 13, Dossier Ruralité Environnement Développement. Luxembourg , 18 novembre 1992. P 73-83.

Lorthios P. (1998). Hygénéisation des fumiers d'ovins lors du compostage. Recueil des interventions du 15 decembre 1998. Paris. ACTA/ADEME/Ministère de l'Agriculture et de la Pêche : 91-95

Mustin M. (1987). **Le Compost, gestion de la matière organique.**F. Dubuse 954 pages.

Ragdale J.V., Stasis P., Rudd M.J., Bradsha W.(1992). **Mulch production from yardtrash. Biocycle.** Cité par ITAB (2001). **Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 .**

Serra-Wittling C. (1995). **Valorisation de composts d'ordures ménagères en protection des cultures :influence de l'apport de compost sur le développement de maladies d'origine tellurique et le comportement de pesticides dans un sol.** Thèse de doctorat, INA-PG, 221p + annexes.

Serra-Wittling C., Houot S., Alabouvette C. (1996). **Increased soil suppressiveness to Fusarium wilt of flax after addition of municipal solid waste compost.** Cité par ITAB (2001). **Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 .**

Serra-Wittling C., Houot S., Alabouvette C., Rouxel F. (1997). **Suppressiveness of municipal solid waste composts to plant diseases induced by soilborne pathogens.** Cité par ITAB (2001). **Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 .**

Tillie M., Capdeville J. (1992). **Etude sur les déjections de bovins. Octobre 1992. Institut de l'Elevage. paris-France.**

Tranker., Andreas. (1992). **Use of agricultural and municipal organic wastes to develop suppressiveness to plant pathogens.** Cité par ATTRA : **Appropriate Technology Transfer for Rural Areas.** (<http://www.attra.org/attra-pub/PDF/comptea.pdf>).

Weltzen H. C. (1990). **The use of composted materials for leaf disease suppression in field crops.** Cité par ATTRA : **Appropriate Technology Transfer for Rural Areas.**(<http://www.attra.org/attra-pub/PDF/comptea.pdf>).

Tratch R., Bettiol W.(1997). **Effect of biofertilizer on micelial growth and spores germination of plant pathogenic fungi.** Cité par ITAB (2001). **Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001 .**

Wiar J. (1997). **Qualité, maturité et efficacité agronomique des composts de déchets verts : synthèse de références. Session de formation : valeur agronomique des composts. 17-21/3/1997. Trie-château.**

Ziegler D., Héduit M. (1991). **Engrais de ferme, valeur fertilisante, gestion et environnement. ITCF, ITP, ITEB, France 35p.**