

Université Abdelhamid Ibn
Badis-Mostaganem
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس
مستغانم
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté par :

TOUATI Abdallah

BOUTAIBA BENKLAOUEZ Mohamed

Pour l'obtention du diplôme de Master en Sciences Agronomiques

Spécialité : Gestion Conservatoire des eaux, des sols et de l'environnement

THEME

Essai d'une culture de tomate sur une parcelle
amandée en compost

Devant le Jury :

Président	M.GHELAMALLAH Amine	MCA	U Mostaganem
Encadreur	M. REGUIEG YSSAAD Larbi	MAA	U Mostaganem
Examineur	M.BOUALEM ABDELKADER	MCA	U Mostaganem
Examineur	M.TAHRI MILOUD	MCA	U Mostaganem

Année Universitaire : 2020-2021

Remerciements

*Avant tous nous **remercions Dieu de tout puissant**, de nous avoir donné courage et patience a fin de réaliser ce modeste travail.*

*Mes remerciements les plus chaleureux à, **Mr REGUIEG YSSAAD Larbi**, qui nous cesse aidé, encouragé et qui témoigné une grande disponibilité.*

Nous tenons également à remercier:

*Monsieur **GHELAMALLAH Amine** de nous avoir fait l'honneur de présidé le jury; **Monsieur Boualem AEK** et **Monsieur TAHRI MILOUD** qui ont acceptés d'examiner notre travail;*

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à :

*Tous les cadres ainsi que le personnel: De la direction des Services Agricoles de Mostaganem tous particulièrement :**Mr. Gorine Abdelkder, Mr. Hammou Mokhtar, Mr. Saidi Habib, M^{elle} Kahlouch et M^{me} Benbakhti.***

Et de la chambre de l'agriculture de la wilaya de Mostaganem.

En fin, nous remercions tous les personnes qui nous à aider de près ou de loin.

Mohamed

Remerciements

Avant tous nous **remercions Dieu le** tout puissant, de nous avoir donné courage et patience a fin de réaliser ce modeste travail.

Nos remerciements vont d'abord à notre vivement encadreur, **Monsieur REGUIEG YSSAAD Larbi**, qui nous cesse aidé, encouragé et qui témoigné une grande disponibilité.

Nous tenons également à remercier:

Monsieur GHELAMALLAH Amine de nous avoir fait l'honneur de présidé le jury; **Monsieur Boualem AEK** et **Monsieur TAHRI MILOUD** qui ont acceptés d'examiner notre travail;

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les cadres ainsi que le personnel:

De la chambre de l'agriculture de la wilaya de Mostaganem.

De la direction des services agricoles de Mostaganem .

En fin, nous remercions tous les personnes qui nous à aider de près ou de loin.

Abdallah

DEDICACE

Je Dédie ce modeste travail

A mes très chers grands-parents,

A mes très chers parents,

A ma très chère femme

A mes très chers enfants

A mes très chères sœurs,

A mon très cher frère,

A toute ma famille,

A tout mes Amis,

Mohamed BOUTAIBA BENKLAOUZ

DEDICACE

Je Dédie ce modeste travail

A l'âme mes très chers parents,

A ma très chère femme

A mes très chers enfants

A mes très chères sœurs,

A l'âme de mon très cher frère,

A mon très cher frère,

A toute ma famille,

A tout mes Amis,

Abdallah TOUATI

<i>Sommaire</i>	<i>pages</i>
Introduction	02
Partie I : BIBLIOGRAPHIQUE	05
Chapitre I : Présentation générale du compostage	06
1- Objectifs du compostage :	07
2- Définition du compostage :	07
3. Avantages du compost :	09
3.1. L'amélioration de la structure	09
3.2. La rétention d'eau	09
3.3. L'influence sur la chimie du sol	09
3.4. L'effet phytosanitaire	09
4. Paramètres du compostage	10
4.1. pH :	10
4.2. Température	10
4.3. Teneur en humidité	11
4.4. Rapport Carbone/Azote	12
4.5. Teneur en Matière Organique Totale :	13
4.6. Apport d'oxygène	13
4.7. Granulométrie	14
5. Les quatre phases du compostage :	15
5.1. Phase mésophile	15
5.2. Phase thermophile	15
5.3. Phase refroidissement	15
5.4. Phase de maturation	16
6. Les micro-organismes du compost	18
6.1. Les bactéries	18
6.2. Les champignons	19
6.3. Les algues, les protozoaires et les animaux pluricellulaires	20
7. Les différents procédés de compostage :	21
7.1. Compostage en andains :	21
7.1.1. Andains retournés :	21
7.1.2. Andains aérés passivement :	22
7.1.3. Tas statique aéré	22
7.2. Compostage en récipients clos :	22
7.3. Compostage en casier :	23
7.3.1. Lits rectangulaires remués :	23
7.3.2. Silos :	23
7.3.3. Tambours rotatifs :	23
7.4. Vermicompostage	24
8. Pourquoi composter ?	24
9. Les différents composts	24

9.1. Les composts d'origine urbaine	25
9.2. Autres composts	25
9.2.1. Les composts d'effluents d'élevage	25
9.2.2. Les composts de déchets industriels et agricoles	25
10. Quels déchets composter ?	26
10.1. Les boues de station d'épuration	26
10.2. Les déchets verts :	26
10.3. Les déchets ménagers	26
11. Conditions réglementaires de l'utilisation des composts en agriculture	27
Chapitre II : Caractéristique de la matière organique des composts et évolution au cours du compostage	29
1. Aspects biochimiques du compostage :	30
2. Substances non humiques : structure et dégradation :	30
2.1. Les glucides	30
2.2. La lignine et le complexe lignocellulosique	32
2.3. Les protéines :	33
2.4. Les lipides et polyesters lipidiques	34
2.5. Les tanins	35
3. Substances humiques	37
4. Evolution de la matière organique	40
4.1. Dégradation enzymatique des glucides	40
4.2. Dégradation enzymatique de la lignine	41
CHAPITRE III : Maturité et la valeur Agronomique des composts	43
1. la maturité d'un compost :	44
2. Critères d'évaluation de la maturité d'un compost :	45
2.1. Stabilité biologique de la matière organique, une condition nécessaire de maturité	45
2.2. Indicateurs basés sur l'évolution physique, chimique et biologique des composts	46
2.2. 1. Respirométrie :	46
2.2.2 Test d'auto échauffement :	47
2.2.3. Test Solvita	47
2.2.4. Caractéristiques physico-chimiques classiques	48
2.2.5. Rapport d'humification (AH/AF) :	49
2.2.6. Autres critères relevés dans la littérature :	49
3. Effets physico-chimiques des composts sur les caractéristiques du sol :	50
3.1. Evolution de la teneur en matière organique du sol : utilisation de modèles dynamiques :	50
4. Valorisation agronomique des composts par apport d'éléments fertilisants :	51
4.1. Azote (N) :	52
4.2. Phosphore (P) :	53
4.3. Potassium (K) :	53
5. Valeurs agronomiques, tests sur plantes :	54
5.1. Phyto-Toxicité	54
6. Amélioration des aspects biologiques des sols amendés :	54

7. Effets remédiant des amendements organiques :	55
8. Carbone organique du sol et effet de serre :	55
9. Valeur azotée des composts :	56
9.1. Cycle de l'azote	56
9.2. Méthodes d'évaluation de la valeur azotée :	58
9.3. Données sur les valeurs azotées des composts :	59
Partie I : Techniques expérimentales	61
Chapitre I : Présentation de la zone d'étude	62
I.1. Présentation de la wilaya de Mostaganem	63
I.2. Aspect socio-économique	64
I.3. Climat	64
I.4. Le Sol	65
I.5. Site expérimental :	66
I.6. Caractéristiques du sol de la zone d'étude :	66
Chapitre II : matériels et méthodes	67
I. Matériels :	68
I-1. Matériels Végétal :	68
I.1.1. données générales de la culture de « Tomate » (<i>Solanum lycopersicum</i>)	68
I.1.2. Irrigation et protection phytosanitaire :	68
A- Irrigation :	68
B- Protection	68
C- Gestion des mauvaises herbes :	68
I.1.3. Caractéristiques morphologiques de la tomate	69
A- Racines	69
B- Tiges	69
C. Feuilles	69
D. Fleurs :	70
E. fruit :	70
I-2. Matériels organiques :	70
A) compost	70
B) Caractéristiques du compost utilise	71
II- La Méthode :	71
II-1- Le dispositif expérimental :	71
II-1.1 - Le protocole expérimental :	71
A- Les traitements : les traitements sont les suivants :	72
B- Croquis du dispositif expérimental :	72
II.2. Conduite des travaux :	73
II.2.1. Préparation du sol :	73
II.2.2. La méthode d'utilisation de compost :	73
II.2.3. Mise en place de l'essai :	73

II.2.4. Transplantation :	74
II.2.5. Entretien :	74
A. L'irrigation	74
B. Désherbage ; binage	74
C. Soins phytosanitaires	74
III. Méthode d'étude	75
III.1. Mesure des paramètres physiologiques et agronomiques	75
III.1.1. Paramètres de croissance	75
III.1.2. Evaluation des paramètres physiologiques et agronomiques	75
III.1.3. Echantillonnage	75
Chapitre II : Résultats et Discussion	77
I. Partie 01 : Les effets des composts sur la hauteur des plantes du Tomate (les Tiges) :	78
I.1. Première mesure du 15/05/2021:	78
I.1.1. Hauteur de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents :	78
I.1.2. Hauteur Moyen :	79
I.1.3. Observation 01 :	79
I.2. Deuxième mesure du 01/06/2021:	79
I.2.1. Hauteur de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents:	79
I.2.2. Hauteur Moyen	80
I.2.3. Observation 02	80
I.3. Troisième mesure du 16/06/2021:	80
I.3.1. Hauteur de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents	80
I.3.2. Hauteur Moyen :	81
I.3.3. Observation 02	81
I.4. Vitesse de croissance:	81
I.5. Conclusion partielle 01	82
II. Partie 02: Les effets des composts sur les des plantes du Tomate (les feuilles) :	82
II.1. Première mesure du 15/05/2021:	83
II.1.1. Nombre de feuilles de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents :	83
II.1.2. Nombre de feuille moyen :	83
II.1.3. Observation 01 :	84
II.2. Deuxième mesure du 01/06/2021:	84
II.2.1. Nombre de feuilles de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents :	84
II.2.2. Nombre de feuille moyen :	84
II.2.3. Observation 02 :	85
II.3. Troisième mesure du 16/06/2021:	85
II.3.1. Nombre de feuilles de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents :	85
II.3.2. Nombre de feuille moyen :	86
II.3.3. Observation 03 :	86
II.4. Vitesse de croissance:	86
II.5. Conclusion partielle 02	87

III. les grappes	87
IV. les Racines	89
Conclusion générale	90

Liste de figures

Partie I : Bibliographique	05
<i>Chapitre I : Présentation générale du compostage</i>	06
<i>Figure I.01: Processus de compostage</i>	08
<i>Figure I.02 : Courbe théorique d'évolution de la température et du pH au cours du compostage d'après MUSTIN 1987</i>	17
<i>Figure I. 03 : Représentation schématique des principaux transferts de chaleur et de matière au sein du compost</i>	17
<i>Figure I. 04 : Les différents types de composts urbains.</i>	27
Chapitre II : Caractéristique de la matière organique des composts et évolution au cours du compostage	29
<i>Figure II.01: Structure de la cellulose : (a) Deux molécules de glucose liées par une liaison β-1,4 glycosidique; (b) Liaisons hydrogène entre deux chaînes de cellulose; (c) Structure fibrillaire de la cellulose (Extrait de KÖGEL- KNABNER, 2002)</i>	31
<i>Figure II. 02: Exemple d'une unité d'hémicellulose : Arabino-4-O-méthyl-glucurono-xylane (Extrait de KÖGEL- KNABNER, 2002)</i>	31
<i>Figure II.03: Structure des précurseurs de la lignine. (I) : Alcool p-coumarylique ; (II) : Alcool coniférylique ; (III) : Alcool sinapylique ; d'après KÖGEL-KNABNER (2002)</i>	32
<i>Figure II.04: Structure des liaisons principales dans la lignine (Extrait de KÖGEL- KNABNER, 2002)</i>	32
<i>Figure II-05 : Modèle de lignine tridimensionnelle (Extrait de KÖGEL-KNABNER, 2002)</i>	33
<i>Figure II-06 : Modèle de lignine linéaire (Extrait de BANOUB ET DELMAS, 2003)</i>	33
<i>Figure II-07 : Monomères et structure de la cutine (Extrait de KOLATTUKUDY, 1980)</i>	34
<i>Figure II-08 : Modèle de la subérine de pomme de terre. Les connections indiquées sont respectivement C : polysaccharide ; P : groupe phénolique et S : subérine (Extrait de BERNARDS, 2002)</i>	35
<i>Figure II-09 : Unités de base de tanins hydrolysables : (a) acide gallique (b) acide ellagique (Extrait de KOGEL- KNABER, 2002)</i>	36
<i>Figure II-10: Structure des tanins condensés (Extrait de KOGEL-KNABER, 2002)</i>	36
<i>Figure II-11: Modèle d'acides humiques d'après SCHULTEN & LEINWEBER (2000), les éléments colorés sont : H (blanc), C (cyan), O (rouge), N (bleu) et S (jaune)</i>	39
<i>Figure II-12: Modèle de structure des composés humiques (ANDREUX & MUNIER-LAMY, 1994)</i>	40
CHAPITRE III : Maturité et la valeur Agronomique des composts	43
<i>Figure III.01: Schéma simplifié du cycle de l'azote lié à un apport de compost L'azote organique est minéralisé en NH_4^+ (ammonification), puis nitrifié en NO_3^-</i>	56
Partie I : Techniques expérimentales	61
Chapitre I : Présentation de la zone d'étude	62
<i>Figure I.1. Les communes de la wilaya de Mostaganem</i>	63
<i>Figure I.2. Régions agricoles de la wilaya de Mostaganem</i>	64

Chapitre II : matériels et méthodes	67
Figure II.1 : Système racinaire de la tomate (Naika et al, 2005).	69
Figure II.2 : Tige de tomate (Naika et al, 2005).	69
Figure II.3 : Feuille de tomate (Naika et al, 2005).	69
Figure II.4 : La fleur de tomate	70
Figure II.5 : Le fruit de tomate	70
Figure II.6 : Chronologie des opérations	73
Chapitre III : Résultats et Discussion	77
Figure III.01 : les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.	78
Figure III.02 : Les résultats représentant la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure	79
Figure III.03 : les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure	80
Figure III.04 : Les résultats représentant la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure	80
Figure III.05 : les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure.	81
Figure III.06 : Les résultats représentant la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure	81
Figure III.07 : Les résultats représentant la vitesse de croissance	82
Figure III.08 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure	83
Figure III.09 : Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.	83
Figure III.10 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure.	84
Figure III.11 : Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure.	85
Figure III.12 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure.	85
Figure III.13 : Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure	86
Figure III.14 : graphe représentant la vitesse de croissance	87
Figure III.15 : graphe représentant le nombre des grappes	88

Liste de tableaux

Tableau I.01 : Température et durée d'exposition nécessaire à la destruction de pathogènes (NOBLE & ROBERTS, 2003 ; LUCERO-RAMIREZ, 2000 ; GOLUEKE, 1991 dans DEPORTES, 1995).	11
Tableau I.02 : Rapport C/N de divers substrats (MUSTIN, 1987; GOOTAS, 1959, www.ademe.fr)	12
Tableau I.03 : Paramètres de contrôle et de suivi du procédé	14
Tableau I.04: Classification des espèces en fonction des phases du compostage RYCKEBOER et al. (2003) ou HARUTA et al. (2005)	19
Tableau I.05: Différents types de champignons en phase de ralentissement	20
Tableau III-01 : Différentes méthodes d'évaluation de la maturité des composts	46
Tableau III. 02 : Rôles des éléments minéraux	52
Tableau I.1. Valeurs climatiques moyennes et totales annuelles (tutiempo.net. 2020)	65
Tableau I.2. Interprétation des valeurs climatiques moyennes annuelles	65
Tableau. II.01. L'Entretien pendant la période de l'essai	74
Tableau II.02. Traitements phytosanitaires effectués	75
Tableau III.1 : Les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.	78
Tableau III.02: Les résultats représentant la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure	79
Tableau III.3 : les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure	79
Tableau III.04 : Les résultats représentant la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure	80
Tableau III.05 : les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure	80
Tableau III.06 : Les résultats représentant la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure	81
Tableau III.07: Les résultats représentant de la vitesse de croissance	81
Tableau III.08 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure	83
Tableau III.09: Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.	83
Tableau III.10 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure	84
Tableau III.11: Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure	84
Tableau III.12 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure.	85
Tableau III.13: Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure.	86
Tableau III.14: Les résultats représentant la vitesse de croissance	86
Tableau III.15 : le tableau représentant le nombre des grappes	88

<i>Liste des photos</i>	
	Pages
Partie I : Techniques expérimentales	61
Chapitre I : Présentation de la zone d'étude	62
Photo I.01 : Localisation de la ferme (A) et Site d'expérimentation (B) (Google Earth, 2020)	66
Chapitre II : matériels et méthodes	67
Photo II.01. Le compost utilisé	71
Photo II.2. Mise en place la culture de tomate	73
Photo II.3. Le désherbage manuel	74
Photo. II.4. Le binage manuel	74
Photo II.5. Les traitements phytosanitaires	75
Chapitre III : Résultats et Discussion	77
Photo III.1. Mesure les hauteurs des tiges.	78
Photo III.2.Mesure le nombre des feuilles	82
Photo III.3. Calcule nombre des grappes	87
Photo.III.4. Le système racinaire	89

Listes des Abréviations

- **ADEME** : Agence de l'environnement et la Maîtrise de l'Energie
- **AF** : Acides Fulviques
- **AFNOR** : Association Française Des Normes **AGV** : Acides Gras Volatiles
- **AH** : Acides Humiques
- **APX** : Ascorbate Peroxydase
- **C °** : Degré Siliceuse
- **C** : Composte
- **CAT** : Catalases
- **CEFREPADE** : Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l'Assainissement, Les Déchets et l'Environnement
- **C.E.C** : Capacité d'Echange Cationique
- **Cm** : Centimètre
- **COD** : Carbone Organique Dissout
- **D** : Dose ; **D1** : Dose 01 ; **D2** : Dose 02
- **DCO** : Demande Chimique Organique
- **DO** : Densité optique
- **DSA** : Direction des Services Agricoles
- **EPA** : Environmental Protection Agency, USA
- **EQH** : Equivalent habitant
- **ETM** : Eléments Traces Métallique
- **E.T.O.** : Eléments Traces Organiques
- **E.T.P** : Évapotranspiration Potentielle
- **FAO** : Organisation Mondiale de l'Agriculture et de l'Alimentation
- **G** : Gramme
- **GPX** : Glutathion Peroxydase
- **H** : Hauteur
- **HA**: Hectare
- **HAP** : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
- **HL**: Hectare/Liter
- **HPI**: Hydrophile
- **HPLC**: High-performance liquide chromatography
- **L** : Litre
- **M** : Mètre
- **MA** : Matière active
- **MG** : Milligramme
- **MI** : millilitre
- **MO** : Matière Organique
- **MS** : Matière Sèche
- **MVS** : Matières Volatiles Solides

- **NF** : Norme Française
- **NH₃** : L'ammoniac
- **P** : Plant
- **PAC** : Le Poids avant Compostage
- **PACR** : Le Poids Après Criblage
- **PED** : Pays en Développement
- **PH** : Le Potentiel D'hydrogène
- **PPM** : Parti par Million
- **PRNB** : Poids du Refus non Biodégradé
- **T** : Témoin:
- **TL** : Test de Lixiviation

Résumé

Le sol est un facteur essentiel et important dans le produit agricole, car il en est l'incubateur, et pour cette raison, il faut en prendre soin, et l'une des bonnes façons d'en un facteur essentiel et important dans le produit agricole, car il en est l'incubateur, et pour cette raison, il faut en prendre soin, et l'une des bonnes façons d'en prendre soin consiste à une fertilisation saine et bonne. Processus, et l'une de ces méthodes est l'utilisation d'engrais organiques (compost).

Dans ce travail on a fait une comparaison entre trois variantes de dose de compost ce qui nous a permis de remarquer que ce produit intervient directement sur le rendement de la tomate.

Nous préconisons l'utilisation, à grande échelle du compost ce qui permet de :

- ❖ Maintenir notre environnement sain en décomposant tout les produits susceptibles d'être transformé en compost.
- ❖ Augmenter la production de tout les produits agricoles pour attendre l'autosuffisante et pourquoi pas exporter l'excédent de production.
- ❖ Réduire le facteur d'importation des engrais ainsi que les autres produits agricoles.

Mots clés : compost, environnements, produit agricoles, autosuffisante, exporte, importation

Abstract

Soil is an essential and important factor in the agricultural product, because it is the incubator of it, and for this reason it must be taken care of, and one of the good ways in an essential and important factor in the product agricultural, because it is the incubator, and for this reason, it needs to be taken care of, and one of the good ways to take care of it is through healthy and good fertilization. Process, and one of these methods is the use of organic fertilizers (compost).

In this work a comparison was made between three variants of the compost dose, which enabled us to notice that this product has a direct effect on the yield of the tomato.

We recommend the large-scale use of compost which allows:

- ❖ Maintain our healthy environment by breaking down all products that can be turned into compost.
- ❖ Increase the production of all agricultural products in order to be self-sufficient and why not export the surplus production.
- ❖ Reduce the import factor of fertilizers as well as other agricultural products.

Keywords: compost, environments, agricultural product, self-sufficient, export, import

ملخص

تعتبر التربة عامل أساسي و مهم في المنتج الفلاحي حيث تعتبر الحاضنة له و لهذا يجب الإهتمام بها و من طرق السليمة للإهتمام بها عن طريق عملية تسميد صحية و جيدة و من هذه الطرق إستعمال السماد العضوي (كمبوست)

في هذا العمل قمنا بمقارنة بين ثلاث محاصيل طماطم لمختلف جرعات سماد العضوي (كمبوست) مما سمحنا لنا بملاحظة أن هذا المنتج (كمبوست) له تأثير مباشر على مردود منتج الطماطم.

نوصي بإستخدام هذا السماد العضوي (كمبوست) على نطاق واسع و الذي يسمح بمايلي:

- ❖ الحفاظ على بيئتنا حيث يمكن تحليل كل منتجات الملوثة إلى سماد العضوي (كمبوست).
 - ❖ رفع إنتاج كل المحاصيل الزراعية مما يحقق لنا الإكتفاء الذاتي ولما لا التوجه نحو التصدير.
 - ❖ تقليص فاتورة الإستيراد للأسمدة العضوية و كذا المنتجات الفلاحية.
- الكلمات الرئيسية: السماد العضوي، البيئة، المحاصيل الزراعية، الإكتفاء الذاتي، التصدير، الإستيراد.**

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

L'agriculture en Afrique saharienne est confrontée à de nombreux fléaux parmi lesquels la sécheresse et la dégradation des sols sont les plus menaçants (Stoorvogel et al. 1993 ; Poss et al. 1997). selon (Berg et al. 2013)La sécheresse représente le facteur environnemental le plus menaçant à l'origine des perturbations chez les végétaux , le changement du régime pluviométrique pourrait avoir un effet négatif global sur la production dans les prochaines années. Selon plusieurs études, les impacts négatifs sur les végétaux incluent plus spécifiquement la réduction du nombre de feuilles, la croissance en hauteur, le métabolisme et donc par conséquent le rendement (Triboï 1990 ; Vieira et al. 1992 ; Gates et al. 1992 ; Chapman et Edmeades, 1999 ; Fonseca et Wesgate, 2005 ; Gladden et al, 2012). Ces effets sont amplifiés si le déficit hydrique intervient avant la période reproductive (Pervez et al. 2009). Pour s'adapter au déficit hydrique, les plantes développent plusieurs mécanismes dont des modifications morphologiques comme le repli des feuilles et la fermeture des stomates dans le but de réduire la transpiration tout en gardant la turgescence et le volume cytosolique aussi élevé que possible (Cornic et al. 2002 ; Wang et al. 2003). D'autres travaux ont mis en évidence l'accumulation de molécules comme les protéines, les sucres totaux et certains acides aminés comme la proline dans les tissus des plantes sujettes à des stress abiotiques (Rai et al. 1983 ; Zerrad et al. 2008 ; Lepengue et al. 2012). Cependant, ces mécanismes deviennent inefficaces avec l'augmentation de la durée de la période de sécheresse. De plus, la sécheresse provoque des réactions négatives sur le comportement hydrique, thermique et structural des sols cultivés (Le Gouée et al. 2010). Les effets de la sécheresse sur le sol et les plantes constituent de réels handicaps pour le développement de l'agriculture dans les PED. Dans ce contexte bidimensionnel de dégradation des sols et de changements climatiques, de nouvelles pratiques culturales comme par exemple des amendements à composts de déchets, les jachères, l'utilisation des engrais verts sont pratiqués, ces pratiques s'intègrent parfaitement dans les principes de développement durable (Golueke, 1977; Attrasi et al., 2005). L'amendement des sols par les composts de déchets présente des avantages telle que la réduction des effets de serre par séquestration du carbone, la diminution de la masse et du volume des déchets (Houot et al. 2003), la limitation de l'utilisation d'engrais chimiques et la restauration des propriétés physico-chimiques des sols dégradés (Mustin, 1987 ; Francou, 2003). En plus de ces

avantages s'ajoutent un coût de production et d'achat bas. Rendant la pratique plus facilement accessible aux agriculteurs (Eriksen *et al.*, 1999 ; Wolkowski, 2003 ; Koledzi *et al.* 2011). Les effets positifs déjà recensés incluent l'amélioration de la structure et des propriétés chimiques et physiques du sol (texture, granulométrie, taux d'humidité, pH, potentiel d'oxydo- réduction et conductivité ionique) (Mustin, 1987; Hadas et Portnoy, 1997; Agassi *et al.*, 1998; Pagliai *et al.*, 2004; Pedra *et al.*, 2007; Movahedi et Cook, 2010), l'augmentation de sa capacité de rétention en eau et de sa perméabilité (Wong *et al.*, 1996; Bresson *et al.*, 2001). Ces avantages classent l'amendement des sols par des composts de déchets comme un moyen de régénération de la fertilité des sols dégradés efficace et concurrentiel. Des impacts positifs directs sur la croissance des végétaux sont observés avec une amélioration de la nutrition des plantes et surtout un meilleur potentiel de survie et de résistance en cas de sécheresse (Guittonny-Larchevêque, 2004 ; Tartoura, 2010). Cependant, les effets des composts sur les sols et les végétaux dépendent directement de la nature des déchets compostés (Francou, 2003 ; Koledzi *et al.* 2011). La productivité des plantes est par exemple fortement liée à la nature des matériaux de base du compost et au degré de maturité de la matière organique (Petruzzelli, 1989 ; Pigozzo *et al.* 2006). La nature des matériaux de base du compost, le degré de maturité, la nature de la matière organique compostée et les teneurs en éléments constituent donc les principaux facteurs influençant les effets des composts sur les sols et les plantes. Des tests caractéristiques sont utilisés pour qualifier le degré de maturité des composts. Des études ont été menées pour déterminer les effets des composts sur les propriétés du sol, la nutrition et le rendement des plantes ; ainsi, et afin de promouvoir la qualité de ces composts, il est important de définir et maîtriser des méthodes de caractérisation adéquates. Cette caractérisation assurera une évaluation de l'impact des caractéristiques chimiques des composts sur, d'une part, les propriétés des sols et l'amélioration de leur fertilité et, d'autre part, sur la croissance des végétaux.

Le compostage est un processus biologique dans lequel les déchets organiques sont transformés par les micro-organismes du sol en une terre noire riche en matières nutritives.

Cette terre noire, un produit stabilisé et hygiénique appelé compost, constitue un engrais naturel idéal pour les espaces verts, utilisable en agriculture et en horticulture pour l'amendement des sols en éléments nutritifs. L'apport de compost est un moyen simple, naturel et économique permettant d'enrichir la terre en humus, qui est la base de la fertilité et de la conservation des sols, Et assure ainsi une meilleure aération et rétention en eau (HUBER, 2001).

L'objectif général de notre étude (revue bibliographique) :

- Présentation générale du compostage;
- Caractéristique de la matière organique des composts et évolution au cours du compostage;
- Maturité et la valeur Agronomique des composts

Les axes de travail se définissent en deux points :

- Comparer deux blocs à des doses de compost en combinant des analyses statistiques sur le comportement des plantes de tomate de plein champ ;
- Identifier les effets du composts sur certains paramètres physiologiques de la plante,

PARTIE I

Bibliographique

CHAPITRE I

Présentation générale du compostage

1- Objectifs du compostage :

La mise en décharge étant interdite pour de nombreux bio-déchets (sauf les déchets ultimes), leur incinération est coûteuse et peu populaire, le compostage devient de plus en plus une solution pratique et simple. Elle présente de nombreux avantages, le principal étant la valorisation des déchets pour la production d'un amendement organique stable. En effet, le champ d'application du compostage s'est élargi avec l'évolution des techniques de compostage et la problématique de gestion collective des déchets ménagers. Cette filière concerne tous les types de déchets organiques tels que les déchets verts, les bio-déchets ménagers, les boues de stations d'épuration collectives ou industrielles, les déchets agroalimentaires, les effluents d'élevage. (Nadia RAMDANI ; 2015)

2- Définition du compostage :

Il existe plusieurs définitions assez voisines du compostage (KAISER ,1981; DE BERTOLDI *et al.*, 1983; LECLERC, 2001) qui permettent de le définir de la manière suivante :

« Le compostage est un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en condition aérobie, entraînant une montée en température, et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée. Le produit ainsi obtenu est appelé compost ».

Le compostage est donc un processus de décomposition et de transformation

« contrôlées » de déchets organiques sous l'action de populations microbiennes diversifiées évoluant en milieu aérobie (SHARMA *et al.*, 1997 ; RASTOGI *et al.*, 2011 ; PENG *et al.*, 2013). Des communautés différentes de micro-organismes se succèdent lors du compostage, elles sont constituées majoritairement de bactéries, d'actinomycètes, de champignons (ou Mycètes), de protozoaires ou d'algues (TUOMELA *et al.*, 2000, HASSEN *et al.*, 2001).

Le processus de compostage démarre donc généralement tout seul. Il reproduit en accéléré les étapes de transformation des résidus végétaux en humus dans un sol :

*« composter correspond donc essentiellement à la production des substances humiques stables dans le produit final et à un recyclage d'une matière organique dont le trajet naturel a été modifié (MUSTIN, 1987 ; INBAR *et al.*, 1990; CIAVATTA *et al.* ; 1993; CHEFETZ *et al.*, 1998 a; OUATMANE, 2000). ».*

Par voie biochimique, le compostage est un processus continu au cours duquel différentes réactions se produisent parallèlement et consécutivement. Dans les phases biologiques, différentes enzymes permettent la biodégradation de macromolécules facilement décomposables par des réactions de coupures et d'oxydations. Les phases finales font surtout appel à des phénomènes de polymérisation et de polycondensation des molécules néoformées. Grâce à ses caractéristiques chimiques, le compost peut assurer en même temps la fertilité et l'équilibre du sol. Il combat efficacement l'érosion et le lessivage des éléments fertilisants en reconstituant la structure de la terre grâce à sa composition en humus qui lui confère à la fois la fonction d'amendement organique et d'engrais minéral (MAGDI *et al.*, 2004 ; ZORPAS *et al.*, 2003 ; TATTI *et al.*, 2012). Son apport régule l'humidité et l'alimentation en substances nutritives de la plante (CEGARRA *et al.*, 1993; WONG *et al.*, 1999; OUEDRAOGO *et al.*, 2001).

Suivant leurs origines, les composts peuvent avoir des différences dans leur qualité fertilisante, mais la caractéristique standard d'un compost proposées dans d'autres travaux BRINTON (2000) ou SCOTLAND (2004). sont : un pH dans une marge de 7,0-8,5, une humidité de 35-55 %, une teneur en matière organique supérieure à 25 %, une teneur en azote total (Kjeldahl) de l'ordre de 8,1 Kg/tonne de matière fraîche, en calcium sous forme d'oxyde (CaO 50 Kg/tonne de matière fraîche), en potassium (K_2O 6,7 Kg/tonne de matière fraîche), en phosphore (P_2O_5 3,4 Kg/tonne de matière fraîche), Magnésium (2 Kg/tonne de matière fraîche) et Soufre (1 Kg/tonne de matière fraîche).

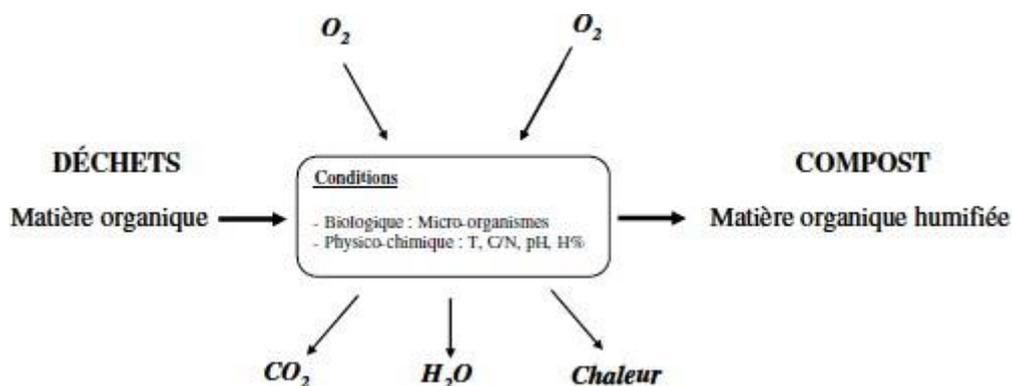


Figure I.01: Processus de compostage

Le processus de compostage se réalise en plusieurs phases dont la première est la fermentation : une dégradation rapide de la matière organique fraîche et facilement biodégradable en molécules moins complexes comme les sucres ou les polymères. La seconde phase, la maturation, plus lente correspond à la mise en jeu des processus d'humification.

3. Avantages du compost :

Le compostage est une technique très ancienne visant à valoriser les déchets organiques pour les réutiliser sous forme d'humus. Cette valorisation permet de boucler les cycles naturels et d'améliorer la productivité du sol. L'épandage d'un amendement organique laisse espérer des effets positifs sur le sol.

3.1. L'amélioration de la structure et de la stabilité structurale du sol. En effet, parmi les différents éléments minéraux présents dans le sol, les argiles s'associent à la matière organique du sol (l'humus) et aux micro-organismes pour former, sous l'action stabilisatrice du calcium, le complexe argilo-humique.

Sa structure en feuillet lui confère une puissante charge négative permettant à une certaine quantité de cations libres de la solution du sol de s'y fixer (Ca^{2+} , K^+ , H^+ , Na^+ etc.). Le complexe argilo-humique est ainsi un véritable réservoir d'éléments nutritifs pour la culture. La formation d'agrégats stables rend ainsi le sol plus résistant à l'influence éolienne et hydrique, par conséquent, moins soumis à l'érosion.

3.2. La rétention d'eau et la porosité. L'eau disponible pour les végétaux grâce à l'utilisation d'un compost correspond au double du volume d'eau pouvant être retenue par un sol minéral. Ainsi en augmentant le taux d'humus du sol de 0,2 %, la quantité d'eau disponible pour la plante croît de 0,5 % et la porosité du sol de 1%. L'amélioration de la porosité entraîne également une meilleure aération du sol et ainsi le développement de l'activité biologique.

3.3. L'influence sur la chimie du sol. Les substances basiques du compost et les substances humiques sont bénéfiques contre l'acidification du sol et le stabilisent chimiquement. Une revitalisation des sols fortement dégradés et un développement de la végétation sont favorisés.

3.4. L'effet phytosanitaire décrit la faculté fongicide du compost. D'une manière générale le compost contient des substances donnant plus de vigueur aux végétaux et augmentant ainsi leur résistance vis à vis de certains pathogènes.

4. Paramètres du compostage

Les conditions pour un bon développement des activités micro- biologiques doivent être optimisées et leur suivi est indispensable pour évaluer la bonne conduite du compostage et l'obtention d'un produit final de bonne qualité. Ces paramètres majeurs interviennent en même temps au cours du compostage et non pas séparément (JIMENEZ et GARCIA, 1992 a ; BERNAL *et al.*, 1996).

Un procédé de compostage optimal correspond à une fermentation réalisée dans les conditions les plus propices au développement de la flore bactérienne. Pour vérifier ces conditions, les principaux paramètres à suivre pendant le procédé sont les suivants :

4.1. pH :

Le **pH** des suspensions de solides (déchets, compost) varie entre 5 et 9. Une phase acidogène se produit au début du processus de dégradation : production d'acides organiques et de dioxyde de carbone (CO₂) par les bactéries acidogènes, décomposeurs du matériel carbone complexe, provoquant ainsi une diminution du pH initial. La seconde phase correspond à une alcalinisation : hydrolyse bactérienne de l'azote avec production d'ammoniac (NH₃) associée à la dégradation de protéines et à la décomposition d'acides organiques (HAUG, 1993 ; MUSTIN, 1987).

Le **pH** optimal se situe donc vers la neutralité en fonction de la nature du substrat (DAMIEN, 2004). Le suivi du pH est un indicateur du degré de décomposition biologique et biochimique. La première phase acidogène est difficilement observable comme l'indiquent les études de CANET & POMARES (1995) ou celles de SANCHEZ-MONEDERO *et al.* (2001).

4.2. Température :

Une température minimale est nécessaire à l'activité des micro-organismes et à la dégradation. VENGLOVSKY *et al.*, (2005) rapportent selon STENTIFORD (1996) qu'une température supérieure à 55°C permet l'hygiénisation, entre 45 et 55°C, elle favorise la biodégradation et qu'entre 35 et 40°C elle améliore la diversité des micro-organismes. Une température voisine de 20°C ou supérieure à 82°C inhibe, voire arrête cette activité microbienne (LIANG *et al.*, 2003).

Le suivi de la température est une mesure indirecte de l'intensité des dégradations. Il renseigne également sur la qualité du processus de dégradation : un épuisement en oxygène peut ainsi être décelé puis corrigé par des apports complémentaires (retournement). De plus,

ce suivi caractérise au début du processus la qualité du mélange. Les variations des montées en température sont fonction de l'aération et de la composition du substrat. Le Tableau III-01 indique le type de bactéries détruites en fonction de la température atteinte lors du procédé.

Type de micro-organismes	Température et durée nécessaire à sa destruction
<i>Ascaris lumbricoides</i>	4h à 60 °C à 65 °C
<i>Salmonella spp</i>	15-20 min à 60° C ou 1h à 55 ° C
<i>Escherichia coli</i>	15-20 min à 60° C ou 1h à 55 ° C
<i>Taenia saginata</i>	5 min à 71 °C
<i>Shigella spp</i>	1h à 55 °C

Tableau I.01 : Température et durée d'exposition nécessaire à la destruction de pathogènes (NOBLE & ROBERTS, 2003 ; LUCERO-RAMIREZ, 2000 ; GOLUEKE, 1991 dans DÉPORTES, 1995).

Pour obtenir cette hygiénisation du compost, l'U.S.E.P.A (1994) recommande une température de 55 °C au moins pendant 5 jours en compostage à l'air libre. Dans des réacteurs, la température doit dépasser 60 °C pendant une semaine (ADEME, 1998). Les conditions optimales pour une hygiénisation dépendent de la nature du procédé et de la durée de maintien de la température (MARTENS, 2005). En pratique un produit est dit hygiénisé après 15 jours à une température supérieure à 55 °C ou une semaine à 65 °C pour des systèmes à l'air libre, ou 7 jours en aération forcée pour des températures supérieures à 60 °C (W.R.A.P, 2004. Mais même avec une montée en température suffisante, il existe un risque pour le compost de réinfection dû à l'action de certains pathogènes en état de latence (HAMER, 2003).

4.3. Teneur en humidité :

La teneur en eau (H%) du substrat conditionne l'activité des micro-organismes. La teneur optimale dépend de la densité du milieu, qui est fonction de l'état physique et de la nature du substrat. Elle est sensible à deux phénomènes ayant des effets complémentaires : d'une part, la dégradation de la matière organique provoquant une libération d'eau et d'autre part, une évaporation de l'eau sous l'effet de l'énergie calorifique libérée par la fermentation.

La décomposition de la matière organique est inhibée si la teneur en eau baisse en dessous de 20 %. Au contraire, si elle dépasse 70 %, l'eau commence à remplir les espaces lacunaires des déchets et empêche les échanges d'oxygène, provoquant des conditions favorables à l'anaérobiose. Selon certains auteurs (TIQUIA *et al.*, 1998 ; HAUG, 1993 ; MUSTIN, 1987) l'optimum de teneur en eau se situe entre 40 % et 60 %. En fin de procédé, un produit sec ou presque facilite la finition mécanique du compost en évitant un colmatage des équipements.

Le **pH**, la température et l'humidité sont des paramètres interdépendants et difficilement dissociables. Les auteurs s'accordent pour donner des valeurs optimales de ces paramètres. LIANG *et al.* (2003) étudient plus spécifiquement les effets de deux paramètres, l'humidité et la température de dégradation des biodéchets. L'humidité semble être le paramètre ayant la plus grande influence. Cela suggère un contrôle du procédé par l'humidité et non comme habituellement par la température.

D'autres études insistent sur les valeurs de **pH** et de température au cours du procédé ou sur le compost lui-même (SMARS *et al.*, 2002 ; SUNDBERG *et al.*, 2004). Ces paramètres sont optimaux lorsqu'ils permettent une hygiénisation du produit, une vitesse de dégradation rapide et une humidification suffisamment active. Ils sont fonction de la nature du substrat et des conditions particulières de mise en œuvre du procédé.

4.4. Rapport Carbone/Azote

Les bactéries utilisent le carbone comme source d'énergie et l'azote comme source protéique. Le procédé de compostage entraîne une décomposition de la M.O, donc une consommation de l'azote et du carbone, correspondant à la diminution du rapport C/N. Ce rapport exprime la proportion entre le carbone et l'azote bio-disponible. Il dépend de la composition intrinsèque du substrat à composter comme le montre le Tableau 02.

<i>Matière</i>	<i>Rapport C/N</i>
Urines	0.8
Gazon coupé	12
Tabac	13
Légumes	12-30
Ordures ménagères	25
Papiers-cartons	70
Branches arbres	70
Paille de blés	128
Sciure de bois	200

Tableau I.02 : Rapport C/N de divers substrats
(MUSTIN, 1987; GOOTAS, 1959, www.ademe.fr)

De nombreux auteurs déterminent des valeurs optimales de ce rapport C/N qui peut varier de 107 à 18 en début de compostage. Par exemple, il se situe entre 25 et 45 pour les ordures ménagères hétérogènes (SADAKA *et al.*, 2003, BERNAL *et al.*, 1998 a, EGGEN & VERTHE, 2001), alors que le rapport minimum C/N des déchets verts est proche de 30. La valeur de 35 ne doit pas être dépassée pour les déchets urbains, sinon les micro-organismes passent par plus de cycles d'oxydation pour atteindre la valeur optimale dans le compost. De

même, si ce rapport est trop faible, une perte excessive en azote ammoniacal risque d'entraîner une diminution du pH.

Il est donc important de connaître le rapport C/N initial des déchets afin de constituer un mélange optimal en ajoutant la quantité d'éléments déficitaires pour assurer une dégradation idéale et homogène sur l'ensemble du processus. De nombreux auteurs déterminent des valeurs optimales de ce rapport C/N qui peut varier de 107 à 18 en début de compostage. Par exemple, il se situe entre 25 et 45 pour les ordures ménagères hétérogènes (SADAKA *et al.*, 2003, BERNAL *et al.*, 1998 a, EGGEN & VERTHE, 2001), alors que le rapport minimum C/N des déchets verts est proche de 30. La valeur de 35 ne doit pas être dépassée pour les déchets urbains, sinon les micro-organismes passent par plus de cycles d'oxydation pour atteindre la valeur optimale dans le compost. De même, si ce rapport est trop faible, une perte excessive en azote ammoniacal risque d'entraîner une diminution du pH. Il est donc important de connaître le rapport C/N initial des déchets afin de constituer un mélange optimal en ajoutant la quantité d'éléments déficitaires pour assurer une dégradation idéale et homogène sur l'ensemble du processus.

4.5. Teneur en Matière Organique Totale :

La minéralisation du compost correspond à une diminution de la M.O.T au cours de la dégradation biologique du substrat (HOUOT A, 2002). Cette diminution est variable et dépend des conditions de réalisation du processus de dégradation mais également de la durée du procédé. Les pertes en M.O.T au cours du procédé peuvent atteindre 20 à 60 % en poids de la M.O.T initiale (IANNATTI *et al.*, 1994 ; CANET & POMARES, 1995 ; ATKINSON *et al.*, 1996).

4.6. Apport d'oxygène

L'oxygène est utilisé par les micro-organismes comme un récepteur terminal d'électrons lors de la respiration aérobie et de l'oxydation des substances organiques (Waas, 1996). La présence d'oxygène est indispensable au bon déroulement du compostage pour maintenir les conditions aérobies nécessaires à une décomposition rapide et inodore. La teneur en oxygène lacunaire représente le pourcentage d'oxygène dans l'air des vides entre les particules de compost.

Ce taux est fonction de la granulométrie et de l'humidité des particules comme du renouvellement de l'air des lacunes. Au fur et à mesure de la dégradation du substrat, le besoin en oxygène diminue (MUSTIN, 1987 ; HAUG, 1993). Si la teneur en oxygène est trop faible ou la masse à composter trop compacte, les conditions favorables à l'anaérobiose se

mettent en place. Ce type de fermentation aboutit à un produit stabilisé mais par le biais d'un processus plus lent avec dégagement d'odeurs nauséabondes.

Les systèmes d'aération sont divers et variés : retournements mécaniques, aération forcée ou pilotée, avec ou sans recirculation (BARI, 2001 ; ILLMER & SCHINNER, 1996). L'apport d'oxygène réduit l'humidité initiale (si elle est trop forte), améliore l'homogénéité du substrat et diminue une possible élévation de température.

4.7. Granulométrie :

La granulométrie est un facteur qui détermine la vitesse de biodégradabilité. Plus la surface spécifique du substrat sera élevée, plus la zone de contact entre le substrat et les micro-organismes, sera étendue et meilleure sera la fermentation. Une granulométrie trop fine induit un espace poral trop réduit et diminue l'accès puis la circulation de l'air : « étouffement » du compost. A *contrario* si la granulométrie est trop élevée, les apports en oxygène vont dépasser les teneurs optimales, asséchant le compost, et la montée en température se réalisera difficilement. La granulométrie du substrat évolue au cours du processus de dégradation par fragmentation des agrégats vers des éléments fins. Elle peut être modifiée par l'emploi de broyeur ou de cribleur.

L'identification des principaux paramètres physico-chimiques est nécessaire pour optimiser puis améliorer l'efficacité du procédé. De la caractérisation physico-chimique du substrat va découler le réajustement des conditions du procédé : ajout d'eau, fréquences des retournements. Au cours du procédé, un contrôle des paramètres principaux permet non seulement de connaître le stade de dégradation du compost mais aussi d'avoir une idée du bon déroulement du processus.

Dans la pratique, les conditions de dégradation rapides et contrôlées dépendent du système de fermentation employé. Le Tableau III-03 représente ces caractéristiques pour un système classique en andain avec retournement mécanique.

Paramètres	Phase initiale	Compost mur
Rapport C/N	20 à 40	10-15
Humidité %	40 à 65	35-45
Température (°C)		<40
pH	5-8	7
Structurant (%)	> 15	
MO (%MS)	40-70	> 40
~ 1 en aération forcée		
Granulométrie (cm) Dépend du criblage 3-10 sans aération forcée		

Tableau I.03 : Paramètres de contrôle et de suivi du procédé

Il reste très difficile de définir avec précision les valeurs optimales pour chaque paramètre. En effet, ceux-ci dépendent de la composition intrinsèque du substrat, variant en fonction des conditions socio-économiques et du mode de vie de chaque pays. Ces paramètres s'équilibrent au cours du procédé : le dépassement de la valeur de l'un sera compensé par la valeur de l'autre. Certains paramètres comme la température, ou l'humidité sont également fonction de la technologie du procédé. En pratique, il est nécessaire de trouver un compromis entre la théorie et les contraintes de terrain.

5. Les quatre phases du compostage :

Le compostage est accompagné de production de chaleur. Il est largement admis depuis longtemps que la chaleur générée au sein du compost est essentiellement d'origine biologique, c'est à dire due à l'activité microbienne (WAKSMAN *et al.*, 1939). Des oxydations chimiques exothermiques peuvent également prendre part à l'échauffement du compost. Mais l'origine abiotique de l'échauffement est considérée négligeable devant l'origine biologique, lorsque les températures n'atteignent pas des valeurs très convenables pour l'activité microbienne dans un domaine dépassant les 80 °C (FINSTEIN & MORRI M.L. 1975; MILLER *et al.*, 1989).

L'évolution de la température au sein du compost permet de définir quatre phases au cours du compostage (Figure 01). Ces phases sont largement décrites dans la littérature (LECLERC, 2001).

5.1. Phase mésophile :

Est la phase initiale du compostage. Durant les premiers jours de compostage, la présence de matières organiques facilement biodégradables entraîne une forte activité microbienne (bactéries et champignons) générant une forte production de chaleur et une montée rapide de la température au cœur du compost.

5.2. Phase² thermophile :

Très vite la température atteint des valeurs de 60 °C jusqu'à 75 °C. Cette² phase est appelée **phase thermophile** car seuls les micro-organismes thermorésistants (essentiellement des bactéries) peuvent survivre à ces hautes températures. Au cours de cette phase, une part importante de matière organique est dégradée sous forme de CO₂, et un assèchement du compost lié à l'évaporation de l'eau est souvent observé.

5.3. Phase refroidissement :

Lors de la phase thermophile, succède la **phase de refroidissement**. La diminution de la quantité de matières organiques facilement dégradables provoque un ralentissement de

l'activité microbienne. La chaleur générée par la dégradation microbienne est alors inférieure aux pertes dues aux échanges surfaciques et à l'évaporation, entraînant un refroidissement du compost. Cette phase de refroidissement peut être très progressive ou au contraire très rapide en fonction des conditions climatiques ou de la taille du tas de compost par exemple. Au cours de cette phase, des micro-organismes mésophiles recouvrent à nouveau le compost.

5.4. Phase de maturation:

Au cours de la dernière phase appelée **phase de maturation**, les processus d'humification prédominent, ainsi que la dégradation lente des composés résistants. Cette phase de maturation dure jusqu'à l'utilisation des composts.

Il faut noter que les deux premières phases qui sont en général des phases de dégradation des matières organiques sont regroupées sous le nom de **fermentation** (du latin fermentation signifiant *altération*), correspondant donc à une **phase de dégradation intensive** de la matière organique. S'il s'agit effectivement de processus de dégradation de la matière organique, il ne s'agit pas au sens strict d'une fermentation (métabolisme énergétique au cours duquel le substrat est dégradé en anaérobiose), car par définition, le compost doit évoluer en conditions aérobies. Mais par extension, le terme fermentation définit les modifications chimiques du substrat liées à l'activité microbienne, tant en aérobiose qu'en anaérobiose (Dictionnaire d'Agriculture – Conseil International de langue française, 1999). Certains auteurs utilisent le terme de fermentation aérobie. Ce terme de fermentation est très utilisé dans le milieu du compostage (SUGAHARA & IONOKO ,1981; HARADA *et al.*, 1981; GODIN P. 1981; IGLESIASJIMENEZ & PEREZ- GARCIA ,1989 ; SANTIS *et al.*,2011 ; TIWARY *et al.*, 2010).

Bien que globalement le compostage se fasse dans des conditions aérobies, plusieurs travaux ont mis en évidence la présence possible de **sites anaérobies** durant la phase de dégradation intensive (KIRCHMANN & WIDEN ,1994; BECK-FRIIS *et al.*, 2000; HE *et al.*, 2000 ; SHRINIVAS *et al.*, 2011). De tels sites peuvent s'expliquer par l'intense activité microbienne consommatrice d'oxygène et génératrice de gaz carbonique combinée à un manque d'aération du compost.

Il faut signaler que cette vision des quatre phases du compostage est avant tout une vision théorique qui représente ce qui se passe au cœur du compost. L'évolution de température au sein d'un compost dépend de la production interne de chaleur et des échanges avec l'extérieur (BACH *et al.*, 1987). Un tas de compost est un milieu hétérogène, qui a des surfaces d'échange avec le milieu extérieur, des zones de tassement, et des gradients de température et d'humidité (MILLER *et al.*, 1989; FERMOR ,1993). Pour réduire cette hétérogénéité et

favoriser la biodégradation, un travail du compost est souvent réalisé, généralement durant la phase de dégradation: retournement, arrosage et criblage.

Ce travail entraîne fréquemment une reprise de l'activité microbienne, traduite par des remontées de la température.

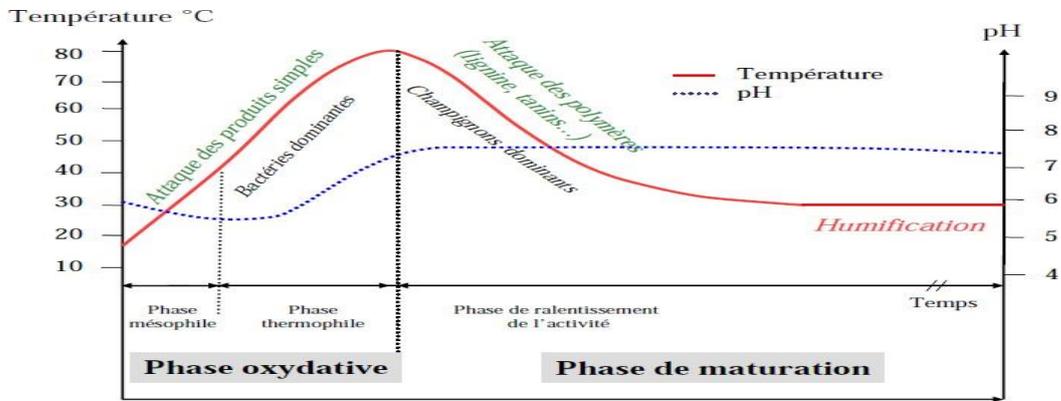


Figure I.02 : Courbe théorique d'évolution de la température et du pH au cours du compostage d'après MUSTIN 1987

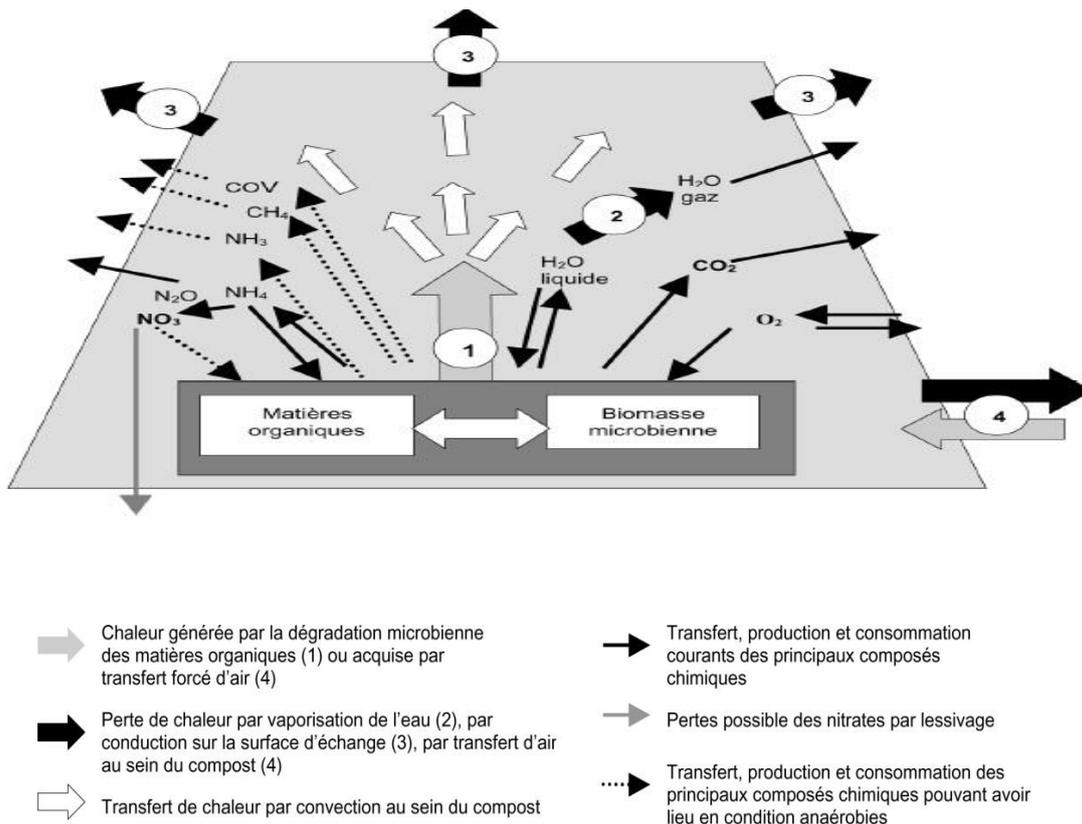


Figure I. 03 : Représentation schématique des principaux transferts de chaleur et de matière au sein du compost (MUSTIN ; 1987)

6. Les micro-organismes du compost

Le compostage est une technique très ancienne et couramment utilisée, ce procédé est l'une des biotechnologies les plus complexes qu'ils soient, en raison des changements d'états physiques et biologiques innombrables durant le processus. Une bonne compréhension de ces changements exige une étude précise des successions de communautés microbiennes comprenant l'ensemble des micro-organismes présents y compris ceux qui sont en très faible proportion. Selon certains travaux Selon HARUTA *et al.* (2005), la microbiologie du compostage doit être étudiée au travers de divers aspects, comme par exemple, la composition et la succession des communautés pendant le processus, les micro-habitats, ainsi que les fonctions des micro-organismes au sein de la communauté bactérienne (KOUTROULI *et al.*, 2009 ; REGUEIRO *et al.*, 2013 ; SINGHANIA *et al.*, 2013).

6.1. Les bactéries

Les bactéries sont toujours présentes et largement dominantes en qualité et quantité au cours du compostage. Elles sont typiquement unicellulaires avec une taille de 0,5 à 3 µm. Par leur petite taille, les bactéries ont un rapport surface/volume très élevé, leur permettant des transferts rapides de substrats solubles à l'intérieur de la cellule, ce qui assure souvent leur prédominance sur des micro-organismes de plus grandes dimensions comme les champignons (TUOMELA *et al.*, 2000). Un autre avantage des bactéries est la capacité, pour certaines d'entre elles en particulier celles appartenant au genre *Bacillus*, de se protéger en produisant des spores très résistantes à la chaleur, aux radiations et aux désinfections chimiques (HAUG, 1993). Les bactéries isolées dans les différents types de compost constituent une importante diversité de genres et d'activités.

Depuis les années 1900, de nombreuses études micro biologiques ont rendu compte des processus de compostage. Elles ont été passées en revue par certains auteurs FINSTEIN et MORRIS en 1975. Plus récemment, RYCKEBOER *et al.* (2003) ou HARUTA *et al.* (2005) ont compilé les différentes études pré-existantes et ont établi une liste des espèces isolées pour chacune des phases du compostage en fonction de la température et du pH. Pendant la phase mésophile, les bactéries isolées appartiennent à diverses familles, Sur le Tableau III-04 sont regroupées les différentes bactéries intervenant à différentes phases du compostage et qui sont responsables de la destruction des produits simples au cours des deux premières phases. Elles sont majoritaires au cours de la première phase. Comme les bactéries, la majorité des champignons sont mésophiles et se développent entre 5 °C et 37 °C.

Phase mésophile	Alcaligenaceae, Alteromonadaceae, Bacillaceae, Burkholderiaceae, Bradyhizobiaceae, Caryophanaceae, caulobacteraceae, Cellulonadaceae, Clostridiaceae, Comamonadaceae, Corynebacteriaceae, Enterobactériaceae, Flavobactériaceae, Flexibacteraceae, Hyphomicrobiaceae, intrasporangiaceae, Methylobactériaceae, Microbactériaceae, Micrococcaceae, Moraxellaceae, Neisseriaceae, Nitrosomonadaceae, Nocardiaceae, Nocardiosporeaceae, Paenibacillaceae, Phyllobactériaceae, Propionibacteriaceae, Pseudomonadaceae, Pseudonocardiaceae, Rhodobacteraceae, Sphingobacteriaceae, Sphingomonadaceae, et Xanthomonadaceae.
Phase thermophile	Micromonosporaceae, Streptomycetaceae, Thermoactinomycetaceae, Thermomonosporaceae et Streptosporangiaceae
Phase de maturation	Streptomyces et Nocardia.

Tableau I.04: Classification des espèces en fonction des phases du compostage RYCKEBOER *et al.* (2003) ou HARUTA *et al.* (2005)

Après cette phase de dégradation, et donc pendant la phase de maturation et de ralentissement de l'activité, la diversité taxonomique microbienne augmente encore (HARUTA *et al.*, 2005 ; ERMANNIO *et al.*, 2011).

Parmi les bactéries un sous-groupe a une grande importance au sein du compost : les actinomycètes. Ce sont des bactéries formant des filaments multicellulaires et agissant plus tardivement que les autres. Ils apparaissent aussi bien lors de la phase thermophile que pendant la phase de maturation du compostage (TUOMELA *et al.*, 2000).

Les actinomycètes tolèrent des pH légèrement basiques mais leur croissance est lente. Ils peuvent cependant dégrader la cellulose et la lignine comme certains champignons tout en tolérant des températures et un pH plus élevés que les champignons. Ainsi, les actinomycètes sont des agents essentiels de la lignocellulolyse pendant la phase thermophile, bien que leur capacité de dégrader la cellulose et la lignine ne soit pas aussi étendue que celle des champignons (TUOMELA *et al.*, 2000). Les genres *Streptomyces* et *Nocardia* représentent plus de 90 % de leur biomasse selon MUSTIN (1987).

6.2. Les champignons

La température est l'un des plus importants facteurs affectant la croissance fongique devant les sources de carbone et d'azote et le pH. Un niveau modérément élevé de l'azote est nécessaire pour la croissance fongique bien que quelques champignons, dits de la pourriture blanche, se développent à des taux d'azote bas. En effet, un milieu pauvre en azote est souvent un préalable à la dégradation de lignine (DIX & WEBSTER, 1995 ; ZHANG *et al.*, 2010). Cependant, ces auteurs affirment qu'une carence en azote est un facteur limitant pour

la dégradation de la cellulose.

La plupart des champignons préfère un environnement acide mais tolère un large éventail de pH, excepté les *Basidiomycotina* qui se développent moins bien au-dessus de pH 7,5. Les espèces de *Coprinus* sont les seules *Basidiomycètes* préférant un environnement alcalin (DIX & WEBSTER, 1995 ; DEBNATH *et al.*, 2013). La majorité des champignons est mésophile et se développe entre 5 et 37 °C, avec une température optimale de 25 à 30 °C.

Cependant, le processus de compostage, engendrant des élévations de température importantes, octroie une grande importance au petit groupe de champignons thermophiles dans la biodégradation de la matière organique.

Les capacités ligninocellulolytiques de tous les champignons thermophiles ne sont pas déterminées. Cependant, la plupart d'entre eux sont connus pour dégrader la lignine, la cellulose ou les hémicelluloses (TUOMELA *et al.*, 2000). Les plus importantes capacités de dégradation de la lignine sont rencontrées chez *Basidiomycotina* (MOUCHACCA, 1997).

Ceux-ci sont mésophiles mais quelques-uns d'entre eux se développent à des températures plus élevées. Par exemple, *Phanerochaete chrysosporium* qui est un champignon de la pourriture blanche, ayant fait l'objet de nombreuses études pour ses capacités de production d'enzymes actives dans la dégradation de la cellulose et de la lignine, a des températures optimales de 36 à 40 °C avec des températures maximales de 46 à 49 °C (MOUCHACCA, 1997 ; ELLIOTT *et al.*, 2012). Le Tableau III-05 présente quelques champignons intervenant à des températures et pH donnés pour dégrader la matière organique (MO) surtout au cours de la phase de ralentissement

Champignons	MO dégradée	Température	pH	Références
<i>Basidiomycotina</i>	Ligninc	5 °C à 37 °C	Sup à 7.5	Mouchacca, 1997
<i>Phanerochatete chrysosporium</i>	Cellulose lignine	36 °C à 49 °C	Sup à 7.5	Mouchacca, 1997
<i>Basidiomycètes</i>	Ligninc	15 °C à 40 °C	acide	Dix & Webster, 1995
<i>Coprinus (Basidiomycètes)</i>	Cellulose, hémicelluloses	15 °C à 40 °C	Milieu alcalin	Dix & Webster, 1995
Petits groupes de champignon	Ligninc, cellulose, hémicellulose	40 °C à 75 °C	acide	Mouchacca, 1997, Tuomocla <i>et al.</i> , 2000.

Tableau I.05: Différents types de champignons en phase de ralentissement

6.3. Les algues, les protozoaires et les animaux pluricellulaires

Il y a trois principaux types de micro-organismes, qu'on retrouve également dans le compost, des algues, des protozoaires et des animaux pluricellulaires. Les algues se développent en

surface en présence de lumière. Le rôle des algues est mal connu, mais leur importance dans l'évolution de la matière organique en milieu aérobie est sans doute faible (MUSTIN, 1987). Les protozoaires bactériophages sont connus pour une action importante sur le nombre de bactéries dans les sols. Des variations cycliques des populations prédateurs / proies ont été observées (MUSTIN, 1987). Les animaux pluricellulaires présents dans les composts appartiennent à différentes catégories. Par ordre de taille sont représentés les microarthropodes (collembolés, acariens et myriapodes) et les nématodes (vers ronds) entre 0,2 et 4 mm, les larves d'insectes (autres que les collembolés) et les Annélides (vers de terre) entre 4 et 80 mm et enfin les animaux supérieurs à 80 mm comme les mollusques (limaces, escargots, etc.) et les crustacés notamment représentés par les cloportes. Beaucoup de ces animaux pluricellulaires se nourrissent de débris végétaux et peuvent avoir un rôle important dans l'homogénéisation des composts.

7. Les différents procédés de compostage :

Il existe une grande variété d'usines de compostage allant des plates formes les plus simples, constituées uniquement d'une surface à l'air libre pour placer les andains et de quelques engins (broyeurs, tracto- pelles), aux plates-formes les plus sophistiquées constituées d'espaces abrités, d'appareils de contrôle continu de la température, de la teneur en oxygène, de systèmes de ventilation, etc.

7.1. Compostage en andains :

7.1.1. Andains retournés :

Le compostage en andains consiste à placer un mélange de matières premières dans de longs tas étroits appelés andains remués ou tournés de façon régulière. Ces andains sont aérés essentiellement par un mouvement passif ou naturel de l'air (convection et diffusion gazeuse). Le taux d'échange avec l'air dépend de la porosité de l'andain. Ainsi, la taille de l'andain qui peut être effectivement aéré de cette manière est déterminée par sa porosité. Un andain composé de feuilles peut être bien plus grand qu'un andain humide contenant du fumier. Quand l'andain est trop grand, des zones anaérobies peuvent alors apparaître à proximité du centre et des odeurs sont libérées quand l'andain est retourné. Par contre, les petits andains perdent rapidement de la chaleur et risquent de ne pas réussir à atteindre une température suffisamment élevée pour permettre l'évaporation de l'eau et l'élimination des pathogènes et des graines d'adventices. (Nadia RAMDANI ; 2015)

Pour les compostages à petites et moyennes échelles, le retournement peut être effectué à l'aide d'un chargeur frontal ou d'une pelle portée par un tracteur ou un tracto- pelle. Le

chargeur soulève les matériaux de l'andain et les déverse à nouveau, mélangeant ainsi les matières et dépose le mélange sous forme d'un andain plus aéré. Le chargeur peut mélanger les matières se trouvant à la base de l'andain avec celles du haut, formant ainsi un nouvel andain à proximité de l'ancien. Il est très important de suivre un programme de retournement. La fréquence de retournement est fonction du taux de décomposition, du taux d'humidité et de la porosité des matériaux, ainsi que de la durée désirée de compostage. Comme le taux de décomposition est plus important au début du processus, la fréquence de retournement diminue au fur et à mesure que les andains mûrissent. (Nadia RAMDANI ; 2015)

7.1.2. Andains aérés passivement :

Avec la méthode des andains aérés passivement, de l'air sont fournis aux composts par des tuyaux perforés, enfoncés dans l'andain, qui élimine la nécessité du retournement. Les extrémités des tuyaux sont ouvertes et l'air circule ainsi dans les tuyaux et à travers l'andain en raison de l'effet de tirage créé par les gaz chauds qui s'élèvent hors de l'andain. (Nadia RAMDANI ; 2015)

7.1.3. Tas statique aéré :

La méthode du tas statique aéré utilise le système d'aération par tuyau mais est plus avancée, car elle utilise un ventilateur pour fournir de l'air au compost. Le ventilateur offre un contrôle direct du processus et permet de travailler avec des tas plus importants, sans retournement après le début du compostage. L'air est aspiré ou soufflé à travers le tas. Le tas n'étant pas retourné par la suite, la sélection et le mélange initial des matières premières sont cruciaux afin d'éviter une mauvaise répartition de l'air et un compostage irrégulier. Le mélange a également besoin d'une bonne structure afin de conserver sa porosité tout au long de la période de compostage. Pour le compostage statique en tas, l'air peut être fourni de deux façons: un système d'aspiration avec l'air aspiré à travers le tas ou un système de soufflage grâce au ventilateur injectant de l'air dans le tas. (Nadia RAMDANI ; 2015)

7.2. Compostage en récipients clos :

Le compostage en récipient fait référence à un ensemble de méthodes qui confinent les matières à composter dans un bâtiment, un container ou un récipient. Ces méthodes sont basées sur l'aération forcée et des techniques de retournement mécanique qui visent à accélérer le processus de compostage. De nombreuses méthodes combinent les techniques des andains et des tas aérés dans le but de surmonter les faiblesses et exploiter les avantages de chaque méthode. (Nadia RAMDANI ; 2015)

7.3. Compostage en casier :

Le compostage en casier est peut être la méthode de compostage en récipient la plus simple. Les matières sont contenues par des murs avec le plus souvent un toit. Les bâtiments ou les silos permettent de stocker des quantités plus importantes de matériaux et d'utiliser l'espace au sol de manière plus efficace que ne le font les tas indépendants. Les casiers permettent aussi d'éliminer les problèmes climatiques, de maîtriser les odeurs et d'offrir un meilleur contrôle de la température. Les méthodes de compostage en casier fonctionnent de la même façon que la méthode du tas statique aéré. Elles comprennent des procédés d'aération forcée à la base du casier et un petit nombre, voire aucun retournement des matériaux. Un mélange occasionnel des matières dans les casiers peut faire redémarrer le processus. Les matières à composter peuvent être déplacées d'un casier à l'autre. La plupart des principes et des conseils suggérés pour le tas aéré s'applique également au compostage en casier. (Nadia RAMDANI ; 2015)

7.3.1. Lits rectangulaires remués :

Le système de lit remué est une combinaison des méthodes d'aération contrôlée et de retournement périodique. Le compostage a lieu entre des murs qui forment de longs et étroits couloirs appelés lits. Un rail ou une saignée en haut de chaque mur supporte et guide la machine retournant le compost. Un chargeur place les matières premières à l'extrémité frontale du lit. Au fur et à mesure que la machine avance sur les rails, le compost est retourné et reposé à l'arrière. (Nadia RAMDANI ; 2015)

7.3.2. Silos :

Une autre technique de compostage fait intervenir un récipient clos ressemblant à un silo à déchargement par le bas. Le système d'aération à la base du silo souffle de l'air à travers les matières à composter. L'air évacué peut être recueilli au sommet du silo de façon à en traiter les odeurs. Cependant, l'empilement présente des problèmes au niveau de la compaction, du contrôle de la température et de la circulation de l'air. Les matières n'étant que très peu mélangées dans le silo, celles-ci doivent l'être préalablement à leur chargement dans le silo. (Nadia RAMDANI ; 2015)

7.3.3. Tambours rotatifs :

Ce système utilise un tambour horizontal rotatif pour mélanger, aérer et déplacer les matières à travers le système. De l'air est fourni à partir de l'extrémité de déchargement et est intégré aux matières alors que celles-ci sont remuées.

7.4.Vermicompostage :

Le terme vermicompostage (ou lombricompostage) se réfère à l'utilisation de vers de terre pour composter les résidus organiques. Les vers de terre peuvent consommer pratiquement tous les types de matière organique et peuvent absorber l'équivalent de leur propre poids par jour, par exemple 1 kg de vers de terre peut consommer un kg de résidus chaque jour. Les excréments (turricules) des vers de terre sont riches en nitrates, et en formes disponibles de P, K, Ca et Mg. Le passage du sol à travers les vers de terre favorise la croissance des bactéries et des actinomycètes. Les actinomycètes se développent en présence de vers de terre et leur teneur dans les déjections de vers de terre est six fois supérieure à celle du sol d'origine (Nadia RAMDANI ; 2015)

8. Pourquoi composter ?

Le compostage permet de transformer un matériau en fin de vie, le déchet, en un produit utilisable, le compost. L'intérêt premier d'un compost est d'être un amendement organique permettant d'améliorer la fertilité des sols. Par rapport à des déchets non compostés le compostage présente un certain nombre d'autres avantages :

- Le compostage permet de réduire les masses et les volumes d'environ 50 % par rapport aux déchets initiaux. Ces réductions sont dues à la minéralisation des composés organiques, à la perte d'eau et à la modification de la porosité du milieu (DAS & KEENER ,1997; EKLIND & KIRCHMANN , 2000a ; BERNAL *et al.*, 2009).
- La perte en matière organique entraîne une concentration des éléments minéraux au sein du compost (KIRCHMANN & WIDEN ,1994 ; HAN *et al.*, 2010 ; PONSA *et al.*, 2010).
- L'augmentation de la température permet la destruction des agents pathogènes. D'autres facteurs qui restent à étudier pourraient intervenir (STENTIFORD ,1996; SIDHU *et al.*, 1999 ; LAKHTAR *et al.*, 2010).
- L'action combinée de l'élévation de température et de la libération d'agents inhibiteurs permet la destruction de graines d'adventices (WIART, 1997 cité par LECLERC, 2001).

9. Les différents composts :

En théorie, tout déchet organique biodégradable est compostable. Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire ne portant que sur les composts d'origine urbaine.

9.1. Les composts d'origine urbaine :

Les composts d'origine urbaine ont fait l'objet de nombreuses études depuis une cinquantaine d'années. La France produit environ 47 millions de tonnes de déchets municipaux (ensemble des déchets collectés et traités sous la responsabilité des municipalités et leurs groupements), dont environ la moitié est composée de composés biodégradables (IFEN , 2002). La loi Lalonde de 1992 qui prévoyait l'interdiction de mise en décharge des déchets dits non-ultimes (c'est à dire pouvant être traités par recyclage, valorisation biologique, ou incinération), renforcée par les circulaires d'avril 1998 et de juin 2001 du ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire, ont mis en avant le compostage dans le traitement des déchets urbains. Toutefois, le développement du compostage de déchets urbains est dépendant des débouchés qu'ont les composts, en particulier en agriculture. L'obtention de composts de qualité (valeur agronomique avérée et innocuité) est donc nécessaire (KELESSIDIS *et al.*, 2012).

L'efficacité des traitements des déchets urbains par compostage s'est considérablement améliorée ces dernières années. Cette amélioration est due en partie à la mise en place des collectes sélectives. Développées en France depuis une dizaine d'années, les collectes sélectives multi matériaux concernent près d'un Français sur trois (ADEME ,2000). Ce tri en amont est accompagné d'une efficacité croissante des techniques et matériels utilisés sur les plates-formes de compostage : amélioration du tri (table densimétrique, aimantation et soufflerie) et amélioration des techniques de compostage (suivi continu de la température, de l'humidité, etc.). L'engagement croissant des industriels et des exploitants pour produire des composts de qualité, en s'appuyant sur une meilleure connaissance du compostage, participe à cette amélioration (PIOTROWSKA *et al.*, 2011).

9.2. Autres composts

9.2.1. Les composts d'effluents d'élevage

Composter les effluents d'élevage est une pratique courante et ancienne. Le compost obtenu à partir de fumier de bovins est le compost d'effluent d'élevage le plus courant, mais des composts à partir de fumier d'ovins, de porcs et de volailles, et à partir de lisier de porcs sont également réalisés (LECLERC, 2001 ; AVIANI *et al.*, 2010).

9.2.2. Les composts de déchets industriels et agricoles

Il s'agit principalement du compostage de déchets de sucreries de la filière betteravière pour les industries agro-alimentaires, et des déchets de papeteries pour l'industrie hors agro-alimentaire.

10. Quels déchets composter ?

10.1. Les boues de station d'épuration

La boue est un mélange d'eau et de matières solides, séparé par des procédés naturels ou artificiels des divers types d'eau qui le contiennent. Les boues de station d'épuration sont issues du traitement des eaux usées domestiques ou industrielles. En effet, l'eau consommée ou utilisée par l'homme à l'échelle domestique ou industrielle génère inévitablement des déchets. Les eaux usées sont recueillies par les égouts et dirigées vers les stations d'épuration afin d'être purifiées avant leur réintroduction dans le milieu naturel (FONTS *et al.*, 2012). Leur traitement dans les stations permet de séparer une eau épurée d'un résidu secondaire, les boues, bien pourvu en matière organique, azote, phosphore ainsi qu'en oligo-éléments. Le traitement des eaux usées permet d'éliminer, d'une part, la partie la plus facilement dégradable de la matière organique et, d'autre part, les différents composés dont les eaux sont chargées (débris alimentaires, graisses, fibres textiles et cellulosiques, savons, lessives et détergents) avant leur réintroduction dans le cycle de l'eau .

10.2. Les déchets verts :

Les déchets verts sont des déchets organiques issus de l'entretien des espaces verts, des jardins privés, des serres, des terrains de sports etc. On désigne par déchets verts les feuilles mortes, les tontes de gazon, les tailles de haies, d'arbustes, les résidus d'élagage. (Nadia RAMDANI ; 2015)

10.3. Les déchets ménagers

Les déchets ménagers sont des déchets issus de l'activité domestique des ménages et pris en compte par les collectes usuelles ou séparatives. Ces déchets peuvent être séparés en deux sous catégories :

- La fraction résiduelle des déchets ménagers obtenue après séparation des papiers, cartons, verres et emballages. Elle est également désignée par le terme « ordures ménagères grises » du fait de la couleur de la poubelle utilisée par les collectivités qui pratiquent ce type de collecte sélective.

- La fraction fermentescible (putrescible) des ordures ménagères : déchets organiques biodégradables, ou bio déchets (déchets de cuisine, fleurs, etc.), récupérés lors de collectes sélectives visant à les isoler des autres composés non putrescibles. Les déchets verts des jardins des particuliers sont souvent collectés avec cette fraction. Les déchets de marchés constituent également cette catégorie. (Figure III-04).

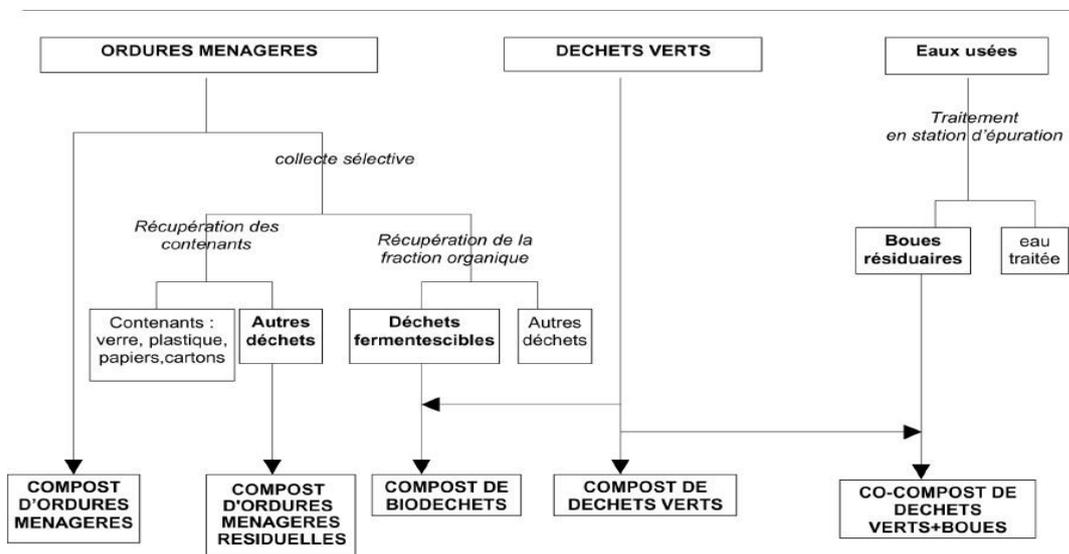


Figure I. 04 : Les différents types de composts urbains.

11. Conditions réglementaires de l'utilisation des composts en agriculture :

Les composts sont essentiellement utilisés en agriculture, mais également pour la revégétalisation des sites, ou comme support de culture. Pour être utilisés, les composts doivent faire l'objet d'une procédure d'homologation, ou répondre aux critères de spécification définis dans la norme 44-051 définissant les amendements organiques. Cette norme est d'application obligatoire pour l'utilisation de ces produits, mais est très peu contraignante en raison notamment de l'absence de critères d'innocuité (polluants et pathogènes). Elle est actuellement en cours de révision. Les composts n'entrant pas dans le cadre de cette norme (composts de boues de station d'épuration par exemple) doivent être utilisés dans le cadre d'un plan d'épandage (CHARTZOULAKIS *et al.*, 2010).

L'utilisation des composts en agriculture biologique est possible, lorsque le besoin est reconnu par l'organisme de contrôle. Les composts d'effluents d'élevage (sauf l'élevage hors-sol), les composts de déchets verts et les composts de biodéchet peuvent être utilisés en agriculture biologique. Cependant, ces

derniers doivent avoir des teneurs très faibles en métaux (LECLERC, 2001 ; MAGDICH *et al.*, 2012 ; MECHRI *et al.*, 2011).

En conclusion le compostage des déchets urbains s'inscrit dans un contexte de gestion de déchets urbains de plus en plus nombreux. C'est un mode de traitement des déchets qui permet d'obtenir un produit utilisé principalement en tant qu'amendement organique en agriculture. Il existe une grande diversité de composts, liée à la diversité de la nature des déchets compostés, et à la diversité des procédés de compostage. La mise en place de collecte sélective, l'amélioration des techniques de compostage utilisées, et la prise en considération croissante des questions environnementales par les industriels, contribuent à améliorer la qualité des composts. Cependant, le compostage ne constitue aujourd'hui qu'une faible part du traitement des déchets d'origine urbaine. Le développement du compostage passe par une amélioration des connaissances de la valeur agronomique des composts et de leur innocuité.

Chapitre II

Caractéristique de la matière organique des composts et évolution au cours du compostage

1. Aspects biochimiques du compostage :

Au sein du compost, on distingue généralement les substances non-humiques et les substances humiques. Les substances non-humiques sont des composés aux caractéristiques chimiques reconnaissables dont la majorité provient des résidus de constituants organiques végétaux, animaux ou microbiens, molécules retrouvées dans les boues et les déchets verts.

Ce sont les constituants de ces résidus organiques qui forment la matière organique du compost. Ainsi, on peut distinguer des glucides, principalement la cellulose et les hémicelluloses, ainsi que la lignine, constituants les plus abondants des plantes et donc des déchets verts, mais aussi, les lipides, les protéines, les tanins, la cutine ou la subérine, etc.

Les substances humiques sont des composés organiques stables, impliqués dans de nombreux processus au sein des composts et des sols par exemple désagrégation du sol, nutrition des plantes, stabilisation du pH, mobilité et toxicité d'élément trace métallique, disponibilité biologique , etc. Cependant, leur structure moléculaire est encore mal connue et leur définition peu précise. Ces principaux constituants seront brièvement présentés. (Nadia RAMDANI ; 2015)

2. Substances non humiques : structure et dégradation :

Une variété importante de composés organiques constitue, dans des proportions variables, les matières initiales présentes dans les composts. Leurs structures, leurs rôles et leurs métabolismes, au sein du compost, sont exposés ci-dessous.

2.1. Les glucides

Les oses, monosaccharides ou « sucres simples » sont très présents dans les végétaux, et donc dans les biodéchets (FRANCOU, 2003). Ces monosaccharides, facilement métabolisables, sont dégradés en début de compostage (LYNCH, 1992). Les polysaccharides constituent la forme principale des glucides dans la matière organique en décomposition (STEVENSON, 1994). Ce sont des homopolymères, résultant de la condensation d'un grand nombre de monosaccharides. Les polysaccharides d'origine végétale les plus abondants sont la cellulose et les hémicelluloses.

La cellulose est le composé organique le plus abondant dans la biosphère, comportant presque la moitié de la biomasse synthétisée par la fixation photosynthétique de CO₂ (DENG & TABATABAI, 1994). Ce homopolymère linéaire est constitué de sous unités de D-glucose (> 10000) liées entre elles par des ponts β -1,4 (Figure IV.01a) appelés liaisons glycosidiques.

L'arrangement régulier des groupes hydroxyles, le long des chaînes de cellulose, conduit à la formation de liaisons hydrogène (Figures IV.01b) et, par conséquent, à une structure fibrillaire (Figure IV.01c). Cette structure existe sous forme amorphe, ou sous forme cristalline, plus

2.2. La lignine et le complexe lignocellulosique

La ligninocellulose est un complexe formé de polymères de lignine, de cellulose et d'hémicelluloses. Les fibres de cellulose peuvent être étroitement liées aux hémicelluloses et à la lignine par des liaisons hydrogène ou des liaisons covalentes, ester ou éther (KOGEL-KNABNER, 2002).

La lignine est une macromolécule complexe composée d'unités de type phénylpropanoïde. Ce polymère aromatique participe à la rigidité de la paroi cellulaire et rend les plantes plus résistantes à l'attaque des organismes pathogènes. Après les polysaccharides; la lignine est le plus abondant biopolymère dans la nature (KOGEL-KNABNER, 2002 ; TUOMELA *et al.*, 2009).

Les trois unités primaires de la lignine sont l'alcool *p*-coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique (Figure IV- 03). Le pourcentage de ces unités varie selon les végétaux.

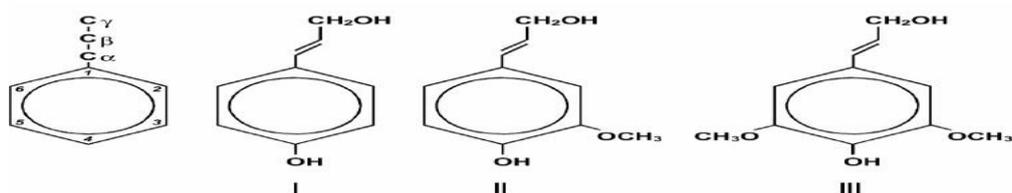


Figure II.03: Structure des précurseurs de la lignine. (I) : Alcool *p*-coumarylique ; (II) : Alcool coniférylique ; (III) : Alcool sinapylique ; d'après KÖGEL-KNABNER (2002)

La lignine résulte de la polymérisation de sous-unités liées entre elles par trois liaisons majeures : les liaisons arylglycérol- β -aryléther qui peuvent représenter jusqu'à 50 % des liaisons et en moindre proportions les liaisons carbone - carbone et les liaisons phénylcoumaranes (Figure 04).

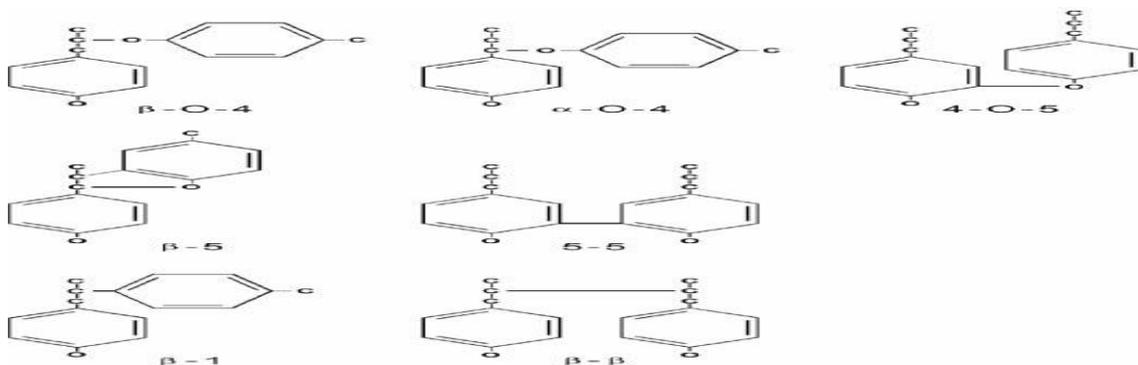


Figure II.04: Structure des liaisons principales dans la lignine (Extrait de KÖGEL- KNABNER, 2002)

CHAPITRE I I : Caractéristique de la matière organique des compsts et Evolution au cours du compostage

La structure de la lignine n'est pas encore totalement résolue. Jusqu'à présent, la lignine a été considérée uniquement comme une macromolécule tridimensionnelle (Figure IV- 05). Cependant, BANOUB & DELMAS (2003). Lui attribuent une structure linéaire (Figure IV- 06).

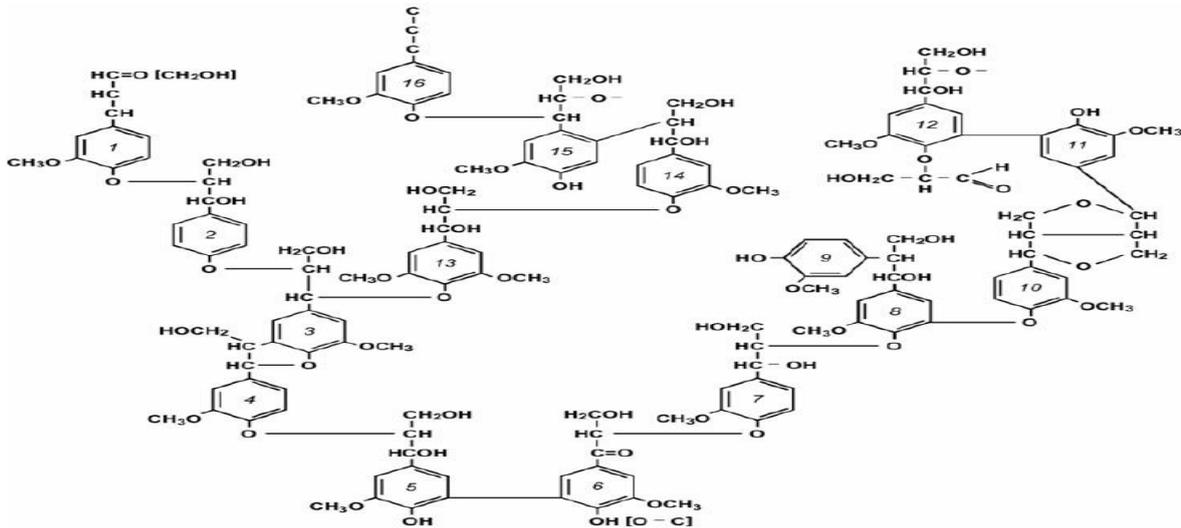


Figure II-05 : Modèle de lignine tridimensionnelle (Extrait de KÖGEL-KNABNER, 2002)

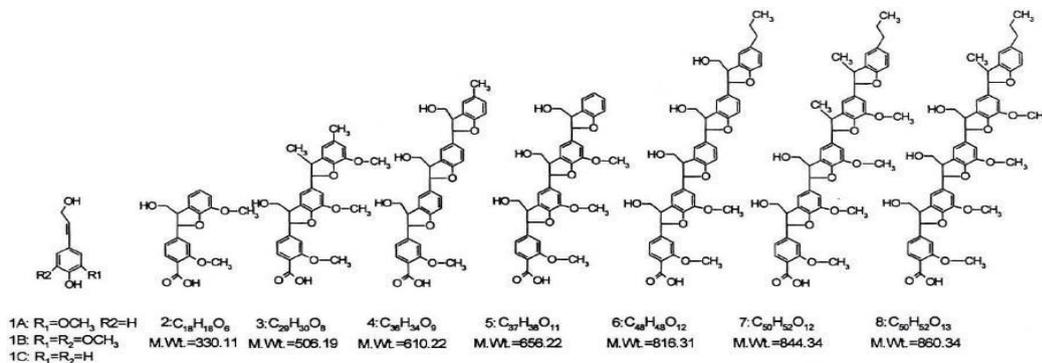


Figure II-06 : Modèle de lignine linéaire (Extrait de BANOUB ET DELMAS, 2003)

2.3. Les protéines :

Les protéines peuvent avoir des rôles très divers (structure, transporteur, hormone, enzyme, etc.) qui les a rendu ubiquistes dans le monde vivant et c'est pourquoi celles-ci sont retrouvées dans les biodéchets. Les protéines jouent un rôle majeur dans la théorie ligninoprotéique de formation des substances humiques (STEVENSON, 1994 ; JULIANA *et al.*, 2014). OÙ les composés aminés réagissent avec la lignine modifiée, mais aussi dans le cas des réactions de Maillard dans lesquelles des glucides et des composés aminés se condensent (MAILLARD, 1913).

2.4. Les lipides et polyesters lipidiques

Comme les protéines, les lipides ont un rôle très important dans la nature et se retrouvent ainsi dans les biodéchets et notamment dans les boues de station d'épuration (DIGNAC *et al.*, 1998). La dégradation de ces lipides est très variable, la plupart sont rapidement dégradés pendant le compostage mais les plus complexes sont particulièrement récalcitrants (FRANCOU, 2003). Les plantes synthétisent deux types de polymères insolubles dérivés d'acides gras : la cutine et la subérine (appelé polyesters lipidiques). La cutine compose la matrice macromoléculaire dans laquelle des cires et des lipides de faibles poids moléculaires sont imbriqués pour former la cuticule. Celle-ci établit ainsi une barrière imperméable entre la plante et son environnement, la protégeant de la dessiccation due à l'atmosphère (KOGEL-KNABNER, 2002).

La cutine est un biopolymère insoluble d'acides carboxyliques, principalement aliphatiques en C16 et C18, composé d'hydroxy et d'époxy acides (Figure IV-07). Le composé majoritaire en C16 est un dihydroxy acide et ceux en C18 sont des 1'ω-hydroxy acide, le ω- hydroxy-9,10-époxy acide, le 9,10,18-trihydroxy acide et leurs analogues insaturés (QUENEA *et al.*, 2004). FRANKE *et al.* (2005). Expliquent que les ω-hydroxy acides hydroxylés ou époxydés en positions secondaires, approximativement au milieu de la chaîne, sont les composés majeurs déterminés après dépolymérisation par hydrolyse, mais que la structure et la composition chimique de la fraction non hydrolysée est encore peu connue. Cependant, GRACA *et al.* (2002). Ont identifié des glycérols au sein de la cutine qui sembleraient jouer un rôle majeur dans sa structure polyesters.

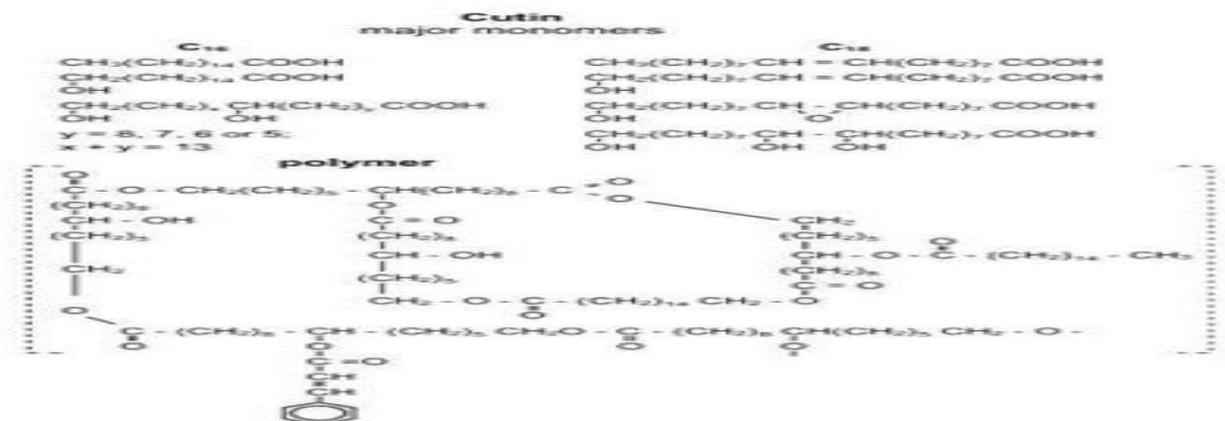


Figure II-07 : Monomères et structure de la cutine (Extrait de KOLATTUKUDY, 1980)

CHAPITRE I I : Caractéristique de la matière organique des compsts et Evolution au cours du compostage

La subérine a une structure plus complexe que la cutine. Elle est constituée de domaines aliphatiques et aromatiques liés entre eux. Le domaine aromatique contient des acides phénoliques tels que des acides *p*-coumarique et férulique (BERNARDS, 2002), vraisemblablement impliqués dans la liaison du domaine aliphatique aux polysaccharides de la paroi cellulaire végétale (KOGEL-KNABNER, 2002). Le domaine aliphatique de la subérine est un polymère de polyesters, constitué principalement de ω -hydroxy-acides (C_{16} à C_{28}) et de α,ω -di acides (C_{16} à C_{26}). Molina *et al.* (2006) rapportent que récemment, le glycérol a été identifié comme composant majeur. De même, BERNARDS (2002) explique que le modèle conceptuel, selon lequel le domaine aliphatique des tissus subérifiés est représenté comme un réseau aléatoire d'acides gras modifiés et d'alcools polyestérifiés, a été remplacé par un modèle comportant un réseau tridimensionnel lié par le glycérol. Ainsi, cet auteur a établi un nouveau modèle pour la subérine (Figure IV-08) selon lequel un domaine polyphénolique basé sur l'acide hydrocinnamique - monolignol, enrobé dans la paroi cellulaire primaire, est lié par covalence à un domaine polyaliphatique basé sur le glycérol et localisé entre la paroi cellulaire primaire et le plasmalemme (membrane plasmique végétale).

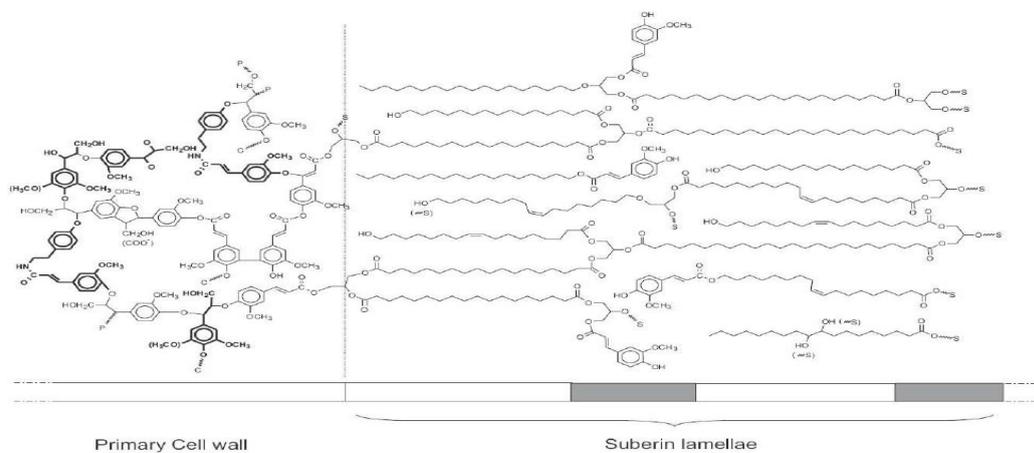


Figure II-08 : Modèle de la subérine de pomme de terre. Les connections indiquées sont respectivement C : polysaccharide ; P : groupe phénolique et S : subérine (Extrait de BERNARDS, 2002)

2.5. Les tanins

Les tanins constituent un mécanisme de défense des plantes contre les pathogènes, les herbivores et des conditions environnementales hostiles et peuvent donc se retrouver dans les

CHAPITRE I I : Caractéristique de la matière organique des compsts et Evolution au cours du compostage

déchets verts. Les tanins ont des structures polyphénoliques et regroupent des composés de structure et de masse molaire variables. Deux groupes de tanins peuvent être distingués : les tanins hydrolysables et les tanins non-hydrolysables ou condensés (proanthocyanidine et phlorotanins).

Les tanins hydrolysables sont composés de deux types d'unités de base, à savoir un glucide (la plupart du temps le D-glucose) et des acides phénoliques (Figure IV-09). Les tanins hydrolysables sont un groupe hétérogène de macromolécules, partagées entre les gallotanins pour lesquels le glucide est estérifié par l'acide gallique et les ellagitanins où le glucide est estérifié par l'acide ellagique (KOGEL-KNABNER, 2002). La dégradation des tanins est effectuée par l'hydrolyse de ces liaisons esters par des enzymes spécialisées : les tannases (EC,3.1.1.20).

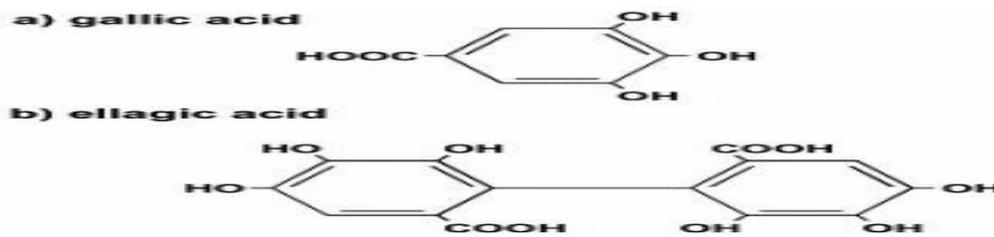


Figure II-09 : Unités de base de tanins hydrolysables : (a) acide gallique (b) acide ellagique
(Extrait de KOGEL- KNABER, 2002)

Les tanins condensés sont des polymères de polyhydroxy-flavan-3-ol, liés la plupart du temps par des liaisons entre C-4 et C-8 et sporadiquement entre C-4 et C-6 (Figure IV-10). Les tanins condensés ne dépassent couramment pas les 10 unités, même si des polymères de plus de 40 unités ont déjà été observés (KOGEL-KNABNER, 2002).

Cette classe de composés est caractérisée par une immense hétérogénéité due à la présence de divers groupes fonctionnels.

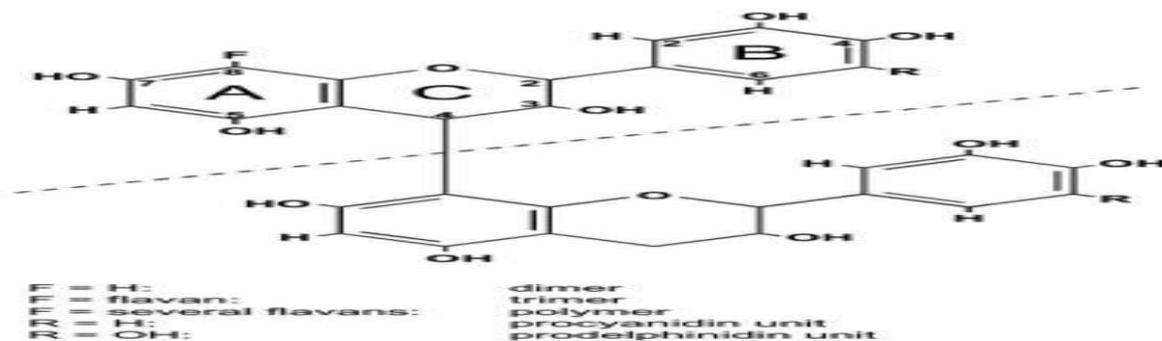


Figure II-10: Structure des tanins condensés (Extrait de KOGEL-KNABER, 2002)

3. Substances humiques

Les substances humiques sont le résultat des processus d'humification. Le compostage est classiquement associé au processus naturel d'humification observé pour la matière organique du sol. Pour cette raison, l'étude des phénomènes d'humification ou de stabilisation de la matière organique lors du compostage s'appuie sur la théorie générale de formation des substances humiques (FRANCOU, 2003). L'humification est une transformation de la matière organique pendant laquelle de nouvelles molécules sont élaborées par voie microbienne et physico-chimique : les substances humiques. Généralement, on distingue dans ces substances: les acides humiques (AH), fulviques (AF) et l'humine. Ces composés sont extraits par différence de solubilité en milieu basique et acide. (CALACE *et al.*, 2007). Seuls les acides humiques et fulviques sont solubles en milieu basique, l'humine peut ainsi être isolée facilement. En milieu acide, les acides humiques précipitent, contrairement aux acides fulviques. Cette définition est strictement opérationnelle et n'a pas de réalité biologique (QUENEA *et al.*, 2004). En effet, même si les termes génériques d'acides humiques, fulviques et d'humines couvrent la majeure fraction des substances humiques, la frontière qui les sépare n'est chimiquement pas clairement identifiée (PICCOLO, 2002).

La structure des ces trois fractions a fait l'objet de nombreuses recherches mais n'est toujours pas résolue. Plusieurs études de leurs propriétés chimiques (analyses élémentaires C, H, N et composition en groupements acides) ont montré une relative constance pour les acides humiques et fulviques provenant de différents sols (KONONOVA, 1961). Ainsi, bien que basées sur aucune compréhension moléculaire, quelques simples corrélations ont encouragé la communauté scientifique à considérer les substances humiques comme une entité ayant ses propres propriétés chimiques et pouvant être identifiées dans différents environnements, plutôt que comme une complexe composition de composées non spécifiques (PICCOLO, 2002).

A partir de différentes observations (composition élémentaire, propriétés optiques, propriétés électrophorétiques et poids moléculaire). KONONOVA (1961) a introduit alors l'idée que les substances humiques correspondent à un système de polymères.

Historiquement, plusieurs raisons ont amené la communauté scientifique à penser que les substances humiques avaient une structure polymérique, en dépit de l'absence de preuve évidente. La première de ces raisons réside dans l'acceptation de la description polymérique

CHAPITRE I I : Caractéristique de la matière organique des compsts et Evolution au cours du compostage

des macromolécules dans les cellules vivantes par STAUDINGER (1935). Il paraissait commode de supposer que les substances humiques issues de ces substances étaient elles-mêmes des polymères. Cependant, actuellement, la décomposition et la dégradation des biopolymères dans les sols sont des processus bien acceptés. KONONOVA (1961). La seconde raison réside dans les caractéristiques réfractaires des substances humiques (250 à 3000 ans) dans les sols pouvant être expliquées par une structure polymérique stable. De plus, les hypothèses classiques de formation des substances humiques impliquant la condensation entre acides aminés et composés issus de la dégradation de la lignine, tendent à envisager que les substances humiques auraient une structure polymérique similaire à celle de la lignine (WAKSMAN, 1936). De même, PICCOLO (2002) explique que d'autres hypothèses de formation des substances humiques, comme la condensation de polyphénols ou les réactions de Maillard, ont pu justifier le paradigme polymérique des substances humiques par le fait que ces réactions de polymérisation se produisaient en laboratoire. Un autre aspect contribuant à la vision polymérique des substances humiques est l'ensemble de leurs propriétés colloïdales pouvant être assimilées à celles des polyélectrolytes (polymères de très haut poids moléculaire) en milieu aqueux (VAN DIJK, 1971). La plupart des propriétés des polyélectrolytes, telles que le processus de floculation et dispersion, ont aussi été observées pour les substances humiques (Piccolo, 2002). Ainsi, le principe de haut poids moléculaire a pu être facilement transféré aux substances humiques.

Il subsiste, cependant, de nombreux débats sur le poids moléculaire des substances humiques variant suivant les méthodes d'analyses utilisées (PICCOLO, 2002). De même, il a été proposé de nombreuses théories sur la forme de ces substances: forme globulaire, configuration linéaire flexible, polyélectrolyte sphérique, forme ellipsoïdale ou repliement aléatoire de longues chaînes. GHOSH & SCHNITZER (1980) ont réconcilié les différents concepts en mesurant la pression de surface et la viscosité de substances humiques à différents pH et à différentes concentrations en sels. Leur comportement (non chargé à bas pH et polyélectrolytes pour les hauts pH) a permis, sur la base de la théorie polymérique, de montrer que la configuration macromoléculaire des substances humiques n'est pas unique, mais varie suivant le pH, la force ionique et le milieu dans lesquels ces substances ont été dissoutes. Ils ont proposé que les substances humiques soient représentées comme des colloïdes sphériques à forte concentration, bas pH et haute force ionique, et comme des polymères linéaires flexibles à concentration et force ionique basses et pH haut.

CHAPITRE I I : Caractéristique de la matière organique des compsts et Evolution au cours du compostage

Bien que ce concept de réversibilité soit le plus largement adopté pour décrire les substances humiques, ce modèle n'explique pas l'ensemble des comportements des substances humiques. Ainsi, WERSHAW (1986, 1993) a proposé un modèle dans lequel les substances humiques correspondent à un agrégat de nombreux composés amphiphiles issus de la dégradation de polymères végétaux relativement inaltérés possédant des fonctions acides.

En résumé, il est actuellement généralement admis que les substances humiques ont des structures analogues et sont formées de noyaux aromatiques oxydés, essentiellement des acides carboxyliques et des acides phénoliques, liés par des chaînes aliphatiques et des groupements acides et alcools. Le degré de polymérisation varie au sein des composés humiques, mais PICCOLO (2002) rapporte que les nombreuses tentatives de mesure du poids moléculaire des substances humiques ont abouti à des résultats présentant de très grandes différences. Il est tout de même accepté que le poids moléculaire est plus élevé dans l'humine que dans les acides humiques (10000 et 100000 Da) et les acides fulviques (1000 à 30000 Da). Il est aussi couramment admis que les acides fulviques possèdent davantage de groupements carboxyliques et phénoliques (SCHULTEN & SCHNITZER, 1997).

Parmi les modèles proposés, celui de SCHULTEN & LEINWEBER (2000) est généralement préféré. Ces auteurs proposent une structure en trois dimensions des acides humiques, basée sur un réseau formé de noyaux aromatiques (phénols, méthoxyphénols, furanes, pyrroles et pyridine) et de chaînes aliphatiques (alcanes, alcènes, acides, esters) comportant ainsi de nombreuses fonctions acides, alcools et esters (Figure IV-11). Dans ce modèle, les acides humiques possèdent des « vides » pouvant piéger ou lier d'autres composants organiques tels que des glucides, des protéines, des lipides ou des éléments inorganiques.

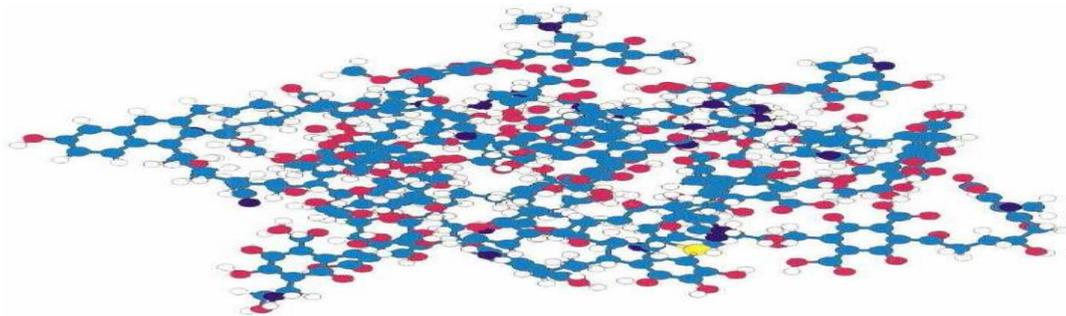


Figure II-11: Modèle d'acides humiques d'après SCHULTEN & LEINWEBER (2000), les éléments colorés sont : H (blanc), C (cyan), O (rouge), N (bleu) et S (jaune)

Cependant, une autre théorie a été émise par WERSHAW (1986, 1993). Les substances

CHAPITRE I I : Caractéristique de la matière organique des compsts et Evolution au cours du compostage

humiques seraient constituées d'unités de petites tailles formant des agrégats de grandes tailles en solution aqueuse, maintenus ensemble par des liaisons hydrophobes et hydrogène et présentant des propriétés similaires à celles des macromolécules. PICCOLO (1993) a ainsi estimé que la structure des substances humiques n'est pas polymérique mais supramoléculaire, et correspond à l'assemblage de petites molécules par des liaisons faibles (Van der Waals et π - π) en conformation de haut poids moléculaire. L'observation microscopique des substances humiques semble confirmer cette hypothèse. La représentation d'ANDREUX & MUNIER-LAMY (1994) permet de comparer la structure des acides humiques et fulviques. Elle propose une structure globale des substances humiques avec un noyau central aromatique sur lequel sont fixées des chaînes latérales aliphatiques ramifiées

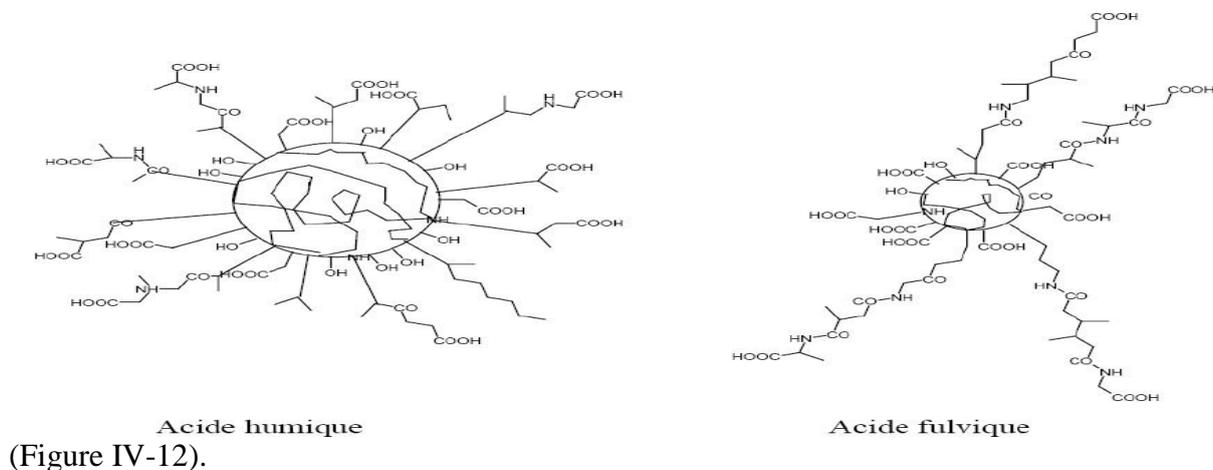


Figure II-12: Modèle de structure des composés humiques (ANDREUX & MUNIER-LAMY, 1994)

4. Evolution de la matière organique

4.1. Dégradation enzymatique des glucides

Le métabolisme des glucides existe sous forme de plusieurs voies. Les glucides sont hydrolysés ou isomérisés en glucose (ou fructose), puis dégradés en pyruvate par la glycolyse, la voie des pentoses phosphates ou, pour les bactéries, la voie d'Entner-Doudoroff. Le pyruvate, est, suivant les conditions, fermenté en lactate ou éthanol. En aérobose, il est transformé en acétylCoA et oxaloacétate. Enfin, ces derniers rentrent dans le cycle de Krebs qui libère du dioxyde de carbone et de l'eau. Le métabolisme des polysaccharides est particulièrement important dans le compostage comprenant des déchets verts. La cellulose est hydrolysée par un ensemble d'enzymes spécialisés : les cellulases. Ces enzymes hydrolysent les polymères de cellulose en de petits oligosaccharides et en glucose, par l'intermédiaire de

CHAPITRE 11 : Caractéristique de la matière organique des compsts et Evolution au cours du compostage

trois types majeurs d'enzymes.

Les endo-1,4- β -glucanases (EC 3.2.1.91) ou carboxyméthyl-cellulases attaquent aléatoirement le polymère de cellulose par endo-action. Les exo- β -1,4-glucanases (EC 3.2.1.91) ou cellobiohydrolases agissent en tant qu'exo-enzymes et opèrent à l'extrémité non- réductrice de la chaîne de cellulose. Les β -glucosidases (EC 3.2.1.21) ou cellobiases, hydrolysent les unités cellobiose (dimère de glucose) et les oligosaccharides en glucose. Ces enzymes peuvent être libres, en particulier chez les micro-organismes aérobies, ou groupées dans une même enzyme à plusieurs composants complexes, le cellulosome, chez les bactéries cellulolytiques anaérobies (BAYER *et al.*, 1998). Les mécanismes de dégradation enzymatique des hémicelluloses sont similaires à ceux impliqués dans l'hydrolyse de la cellulose avec notamment, l'intervention des xylanases et des mannanases (SINSABAUGH *et al.*, 1991). Les produits de dégradation sont variés du fait de l'hétérogénéité même des hémicelluloses.

4.2. Dégradation enzymatique de la lignine

La lignine est un polymère récalcitrant à la dégradation. Les micro-organismes principalement responsables de la biodégradation du complexe ligninocellulose sont les champignons aérobies filamenteux parmi lesquels la classe des *Basidiomycètes* est le groupe le plus actif (KIRK & FARRELL, 1987). En effet, seul un groupe limité de champignons de la pourriture blanche est capable de la minéraliser totalement. Les autres champignons (pourriture brune et molle) induisent des modifications, mais ont une action de dégradation limitée. Les champignons de la pourriture blanche (*Basidiomycètes* et *Ascomycètes*) sont les agents les plus abondants de la dégradation de la lignine. Ces champignons dégradent la lignine plus rapidement que n'importe quel autre organisme et sont responsables de la majorité de la décomposition de la lignine dans la nature (TUOMELA *et al.*, 2000). Cependant, leur substrat de croissance n'est pas seulement la lignine, mais aussi la cellulose et les hémicelluloses (KIRK & FARRELL, 1987; BLANCHETTE, 1995).

Les champignons de la pourriture brune constituent un groupe relativement restreint de *Basidiomycètes* dégradant intensément la cellulose et les hémicelluloses, mais ne dégradant pas la lignine totalement. Ces champignons modifient la lignine principalement par déméthylations bien que des hydroxylations aromatiques limitées et des clivages de cycles se produisent également. (KIRK & FARRELL, 1987). Les champignons de la pourriture molle (*Ascomycètes* et *Deutéromycètes*) sont des agents de dégradation de la ligninocellulose plus

CHAPITRE I I : Caractéristique de la matière organique des compsts et Evolution au cours du compostage

lents et moins agressifs que des champignons de la pourriture blanche et brune, et sont probablement les moins importants quantitativement. Certaines bactéries, appartenant notamment au groupe des *Actinomycètes*, peuvent aussi avoir un pouvoir limité de dégradation de la lignine (TUOMELA *et al.*, 2000). Cette dégradation de la lignine par les champignons de la pourriture s'effectue par l'intermédiaire d'enzymes oxydatives. Par la nature et la taille de la lignine, ces enzymes responsables de l'attaque initiale, doivent être extracellulaires et peu spécifiques (KIRK & FARRELL, 1987).

Les laccases (EC1.10.3.2.) sont des métalloprotéines contenant des atomes de cuivre. ces atomes de cuivre sont réduits lors de l'oxydation des substrats. D'après Bourbonnais & Paice (1990), ces laccases catalysent l'oxydation d'un large spectre de composés phénoliques (mono-, di- et polyphénols) et des amines aromatiques (anilines). Cette oxydation consiste en un transfert d'électrons du substrat à l'oxygène en formant des molécules d'eau (HAMMEL, 1997). Après avoir reçu quatre électrons, la laccase réduit l'oxygène moléculaire en eau, et retrouve son état natif. La perte d'un électron entraîne la formation de radicaux, pouvant polymériser spontanément ou continuer à être dépolymérisés.

La lignine peroxydase (EC 1.11.1.14) ressemble à d'autres peroxydase, c'est-à-dire qu'elle contient un hème ferrique et fonctionne par l'intermédiaire d'un cycle catalytique de peroxydase typique (KIRK & FARRELL, 1987). L'enzyme est oxydée par H₂O₂ en un intermédiaire déficient en deux électrons, puis revient à son état de repos en exécutant deux oxydations sur le substrat donneur. La lignine peroxydase génère des radicaux cations, des réactions de clivage des liaisons C α -C β (Figure IV- 13a) et l'ouverture de cycles. La lignine peroxydase oxyde non seulement les substrats habituels des peroxydases tels que des phénols et des anilines, mais également une variété de structures non phénoliques de lignine et d'autres éthers aromatiques qui ressemblent à l'unité structurale de base de la lignine (HAMMEL, 1997).

CHAPITRE III

Maturité et la valeur agronomique des composts

1. la maturité d'un compost :

Dans la majorité des articles et travaux, la maturité n'est soit définie que de manière implicite, soit non définie du tout. Seuls quelques auteurs donnent des définitions explicites et parfois différentes de la maturité (HE *et al.*, 1992; BECKER & KOTTER, 1995; WU *et al.*, 2000; HOUOT *et al.*, 2001) La signification précise de la notion de maturité est importante pour le choix des expériences à réaliser afin de l'évaluer. Dans la littérature, deux approches peuvent être distinguées.

La première s'appuie sur la définition même de la maturité : un produit mûr est un produit qui « *a atteint son développement complet* ». Or le compostage est la transformation d'une matière organique très instable, c'est-à-dire fortement biodégradable, en une matière organique stable, c'est à dire d'une biodégradabilité similaire à celle de la matière organique d'un sol. Selon cette approche, **Un compost est mûr si sa matière organique est stable, cette condition étant nécessaire et suffisante.** C'est à dire que : *Tout compost stable est un compost mûr.* Le degré de maturité du compost est alors estimé par l'étude de la biodégradabilité de sa matière organique (NICOLARDOT *et al.*, 1982; IGLESIAS-JIMENEZ & PEREZ-GARCIA, 1989; BECKER & KOTTER, 1995; ROBERTSON & MORGAN, 1995; HOUOT *et al.*, 2001).

La seconde approche considère qu'un compost est mûr dès lors que son utilisation n'entraîne pas de préjudice pour les plantes (RYNK, 2003). Partant de cette définition, les auteurs font la différence entre un compost stable et un compost mûr. « **Un compost est mûr s'il a une matière organique stabilisée et s'il ne présente aucun effet inhibiteur pour les plantes** ».

La stabilité de la matière organique est alors une condition nécessaire mais non suffisante. Dans cette situation le meilleur indicateur de maturité d'un compost est l'estimation de son impact sur la plante (SPOHN, 1978; ZUCCONI *et al.*, 1981; DE BERTOLDI *et al.*, 1983; NICOLARDOT *et al.*, 1986; IANNOTTI *et al.*, 1994; AVNIMELECH *et al.*, 1996; CHEFETZ *et al.*, 1996) ; (HELFRICH *et al.*, 1998; WU & MA, 2001 ; HOSSAIN *et al.*, 2010).

2. Critères d'évaluation de la maturité d'un compost :

Il existe de nombreuses méthodes pour apprécier la maturité des composts. Le Tableau III-01 présente ces différentes méthodes répertoriées dans la littérature.

2.1. Stabilité biologique de la matière organique, une condition nécessaire de maturité

Quelle que soit l'approche considérée, un compost mûr doit obligatoirement avoir une matière organique stable. Comme nous l'avons vu précédemment, la stabilité est l'opposée de la biodégradabilité. **La méthode de référence pour évaluer la stabilité d'un compost est le suivi de l'activité respiratoire d'un sol auquel le compost est incorporé.**

Cette activité respiratoire est généralement estimée par le dégagement de CO₂ au cours d'incubations à 25-30 °C de composts préalablement séchés et homogénéisés (ROBERTSON & MORGAN ,1995; BERNAL *et al.*, 1998c; GARCIA-GOMEZ *et al.*, 2003). Les composts immatures, riches en composés facilement biodégradables, entraîneront une minéralisation rapide du carbone durant les premiers jours d'incubation. Ceci conduit à dire que des incubations pour une période de 21 ou 7 jours peuvent être suffisantes pour évaluer le degré de stabilisation des composts (MOREL *et al.*, 1986). Les quantités de carbone minéralisé au cours des incubations dépendent de **l'origine des composts** (procédé et déchets) et de **l'âge du compost**. Pour des déchets urbains non compostés, 50 % du carbone peut être minéralisé après 5 mois d'incubation, alors qu'une minéralisation de 17 % obtenue avec un compost d'ordures ménagères âgé de 4 mois permet de considérer le compost mûr (MOREL *et al.*, 1986).

Pour une période de 70 jours d'incubation, dans d'autres travaux (BERNAL *et al.*, 1998b) il y a mesure des minéralisations de 40 % à 90 % du carbone initial pour des composts de déchets ménagers échantillonnés en début de compostage et sont considérés immatures, avec un pourcentage de 10 % à 40 % pour les mêmes composts échantillonnés en fin de compostage et considérés mûrs. Dans d'autres travaux, il n'y a la mesure que d'une minéralisation de 10 % du carbone apporté des déchets à base d'ordures ménagères et de boues, pour une période de 70 jours d'incubation.

Signalons cependant qu'aucune référence bibliographique fixant des niveaux de stabilité n'a été trouvée. Les travaux mettent généralement en évidence les composts très instables dont

l'incorporation au sol entraîne une très forte augmentation de l'activité microbienne et les composts très stables dont l'incorporation au sol ne modifie pas l'activité microbienne. Les situations comprises entre ces deux extrêmes correspondent à une gamme continue de stabilisation. Ces situations intermédiaires rendent **difficile la comparaison de résultats tirés d'études distinctes.**

	Tests	Exemples de références
Physique	Température compost Odeur Couleur	(HARADA <i>et al.</i> , 1981 ; KAPETANIOS <i>et al.</i> , 1993) (SUGAHARA <i>et al.</i> , 1979 ; MOREL ,1982)
Chimique	PH C/N NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺ ₂ Capacité d'échange cation. AH/AF Solvita	(AVNIMELECH <i>et al.</i> ,1996) (ROLETTO <i>et al.</i> , 1995 a ; SAVIOZZI <i>et al</i> ,1988) (FORSTER <i>et al.</i> ,1993 ; SANCHEZ-MONEDERO <i>et al.</i> , 2001) SAHARINEN, 1998 (ROLETTO <i>et al</i> , 1985 a, SAVIOZZI <i>et al</i> , 1988) (BRINTON& EVANS, 2000)(CHANGA <i>et al</i> , 2003)
Activité microbienne	CO ₂ émis ou O ₂ consommé Enzyme Auto-échauffement Solvita	(Adani <i>et al</i> , 1995) (Forster <i>et al</i> , 1993 ;Kostov <i>et al</i> , 1998) (Bidingmaier, 1993 ; Weppen <i>et al</i> , 1998) (Brinton&Evans, 2000 ; Change <i>et al</i> , 2003)
Sur plantos	Gormination Croissance Croissance racinaire	(GARCIA <i>et al</i> , 1992 ; WU <i>et al</i> , 2000) (GARCIA <i>et al</i> , 1992 ; HELFRCH <i>et al</i> , 1998) (ZUCCONI <i>et al</i> , 1981 ; BRINTON & EVANS, 2000)
Analyse spectrale	RMN-C ¹³ Infrarouge	(DEIANA <i>et al</i> , 1990 ; CHEN, 2003) (PROVENZANO <i>et al</i> , 1998 ; CHEN, 2003)

Tableau III-01 : Différentes méthodes d'évaluation de la maturité des composts

2.2. Indicateurs basés sur l'évolution physique, chimique et biologique des composts

Le Tableau 02 présente des résultats obtenus avec les différents indicateurs de stabilité répertoriés dans la littérature sur des composts considérés mûrs ou immatures par les auteurs, et les seuils de ces indicateurs fixés par certains auteurs pour définir les composts mûrs ou au contraire immatures.

2.2. 1. Respirométrie :

Les tests respirométriques sont basés sur l'activité respiratoire de la population endogène du compost. Ils consistent à incuber du compost seul, ajusté à une humidité optimale pour l'activité microbienne, et à suivre durant 3 à 10 jours la minéralisation du carbone (FORSTER *et al.*, 1993; IANNOTTI *et al.*, 1994) ou la consommation de l'oxygène (NICOLARDOT *et al.*, 1986; 1994). Du fait de leur estimation directe de l'activité microbienne, les méthodes

respirométriques sont considérées comme étant les méthodes d'évaluation de la maturité les plus fiables (RYNK, 2003). Le test AT4, qui fait l'objet d'un projet de directive européenne, considère qu'un compost minéralisant moins de 10 mg d'O₂ par kg de matière sèche en 4 jours est mûr. Selon (SCAGLIA *et al.*, 2000), un compost mûr consomme moins de 1g d'O₂ par kg de matière organique en une heure. Un compost mûr consomme moins de 1g d'O₂ par kg de matière organique en un temps d'une heure.

2.2.2. Test d'auto échauffement :

Une des conséquences de l'intense activité microbienne au cours du compostage est la production de chaleur. Le degré de décomposition de la matière organique d'un compost peut donc se traduire par son aptitude à l'auto échauffement. Le test d'auto échauffement est apparu en Allemagne à la fin des années 70, et y est actuellement utilisé comme indicateur de référence (BIDLINGMAIER, 1993 ; TAMIS *et al.*, 2013). Il estime le niveau de stabilité de la matière organique d'un compost à partir de la température maximale obtenue par auto-échauffement d'un compost placé dans un vase isotherme DEWAR de 1.5L. Le test est réalisé sur du compost dont l'humidité est ajustée à un niveau correspondant à l'activité microbienne optimale. Un indice supérieur ou égal à quatre sur une échelle de cinq révèle un compost mûr (FCQAO, 1994).

Ce test peut être considéré comme un **test respirométrique** (RYNK, 2003). Des travaux récents ont montré la pertinence du test d'auto échauffement pour évaluer la maturité des composts (BRINTON *et al.*, 1995; KUHNER & SISHLER, 1996; LEIFELD *et al.*, 2001). (BECKER & KOTTER, 1995), au cours d'une étude sur divers composts urbains, et selon d'autres (KOENIG & BARI, 2000), portant sur un compost de bio déchet élaboré en réacteur de laboratoire, ont mis en évidence l'étroite corrélation entre les résultats de ce test et les résultats donnés par les tests respirométriques. Bien que RYNK (2003) considère que « *ce test requiert un certain art* », le test d'auto échauffement est un test facilement utilisable sur plateforme de compostage et apparaît être le test le plus pratique pour déterminer la maturité d'un compost (BUTLER *et al.*, 2001).

2.2.3. Test Solvita

Il est basé sur la **minéralisation du carbone** et la **volatilisation de l'ammoniac**, il existe un test de maturité commercialisé sous le nom de test Solvita (Woods Research Management, USA). Ce test est réalisé sur du compost dont l'humidité est ajustée à un niveau correspondant à l'activité microbienne optimale. Il combine une estimation de la minéralisation du carbone et une estimation de la volatilisation de l'ammoniac du compost placé dans un flacon

hermétiquement fermé de 200 ml, grâce à deux indicateurs colorés, qui renvoient à un indice global. Un indice supérieur à 6, sur une échelle de 1 à 8, caractérise un compost mûr. Ce test récent est utilisé sur des plates-formes au Danemark et aux Etats-Unis.

Il fait l'objet de publications récentes et rares qui semblent montrer qu'il est pertinent surtout pour les composts ayant atteint un stade avancé de stabilité (SEEKINS, 1996; BRINTON & EVANS, 2000) mais qu'il n'est pas toujours correctement corrélé au test d'auto-échauffement (BRINTON & EVANS, 2000). Outre le niveau de stabilité qui est évalué directement à partir du CO₂ dégagé, l'éventuelle phyto-toxicité liée à la présence d'ammonium est approchée grâce à l'estimation de l'ammoniac volatilisé (CHANGA *et al.*, 2003).

2.2.4. Caractéristiques physico-chimiques classiques

La grande majorité des travaux portant sur le compostage montre l'évolution des caractéristiques physico-chimiques classiques des composts au cours du compostage. Les caractéristiques pouvant être utilisées comme indicateurs de maturité sont le pH, la CEC (en liaison directe avec le pH), le rapport C/N et le rapport $N-NO_3^-/N-NH_4^+$ (Tableau V-02).

Les **pH** acides sont caractéristiques des composts immatures alors que les composts mûrs sont caractérisés par des pH compris entre 7 et 9 (ROLETTO *et al.*, 1985b; FORSTER *et al.*, 1993; AVNIMELECH *et al.*, 1996). Selon (IGLESIAS-JIMENEZ & PEREZ-GARCIA, 1989), selon (105), une **CEC** (Capacité d'échange cationique) supérieure à 60 meq/100 g de MO (Matière organique) est nécessaire pour pouvoir considérer le compost comme mûr. Mais (SAHARINEN, 1998) rapporte que la **CEC** ne peut pas être utilisée comme indicateur de maturité des produits d'origine et de composition variées.

Le rapport **C/N** est un indicateur très utilisé dans l'étude des composts. Le **C/N** diminue au cours du compostage et (ROLETTO *et al.*, 1985b) considèrent qu'une valeur inférieure à 25 caractérise un compost mûr, alors que (IGLESIAS-JIMENEZ & PEREZ-GARCIA, 1989), dans leur synthèse bibliographique, considèrent qu'un rapport inférieur à 20 et même 15 est préférable. Mais beaucoup d'auteurs considèrent que la valeur du C/N d'un compost n'est pas suffisante pour déterminer sa maturité (MOREL *et al.*, 1986 ; SAVIOZZI *et al.*, 1988; SERRA- WITTLING, 1995). De plus, le C/N se stabilise avant que ne se stabilise la matière organique du compost (CHEN, 1994).

Le rapport $N-NO_3^-/N-NH_4^+$ est utilisé par certains auteurs comme indicateur de maturité. L'apparition des nitrates dans le compost peut être un indicateur de maturité et FINSTEIN (1985) (cité par (IGLESIAS-JIMENEZ & PEREZ-GARCIA, 1989) définit le concept de maturité en terme de nitrification, le compost étant considéré mûr quand des

quantités appréciables de nitrates apparaissent. Le rapport $N-NO_3^-/N-NH_4^+$ est cependant peu utilisé et les résultats trouvés sont très différents.

2.2.5. Rapport d'humification (AH/AF) :

Le procédé de compostage étant un processus d'humification, des travaux se sont logiquement orientés vers l'étude de cette matière organique humifiée. Le fractionnement chimique de la matière organique (en acides fulviques, humiques et humine) a conduit certains auteurs à calculer des indicateurs de maturité à partir des différentes fractions. Le plus courant est le rapport de la fraction humique sur la fraction fulvique (C_{AH}/C_{AF}). Les études montrent une augmentation significative de ce rapport au cours du compostage (SAVIOZZI *et al.*, 1988). Les résultats trouvés dans la littérature sont assez concordants avec des valeurs inférieures à 1 pour des composts immatures, et supérieures à 1 ou 3 pour les composts mûrs.

2.2.6. Autres critères relevés dans la littérature :

Il existe des tests basiques simples pour déterminer la maturité des composts. La **stabilisation de la température du compost** traduit la fin de phase de dégradation intensive (HARADA *et al.*, 1981; KAPETANIOS *et al.*, 1993). L'**absence d'odeurs déplaisantes** générées par l'émission de composés organiques volatiles lors de la phase de dégradation intensive peut également être utilisée (IGLESIAS-JIMENEZ & PEREZ-GARCIA, 1989). Le changement de couleur des déchets au cours du compostage a conduit certains auteurs à mettre en place des **tests colorométriques**, soit directement à partir des composts (SUGAHARA *et al.*, 1979), soit sur des solutions de composts (MOREL, 1982). Mais ces tests ne s'appliquent généralement que sur un produit donné et nécessitent le suivi de tout le procédé de compostage. L'ensemble de ces tests simples apparaît trop peu généralisable et trop peu précis pour constituer des indicateurs standards et fiables de maturité.

Il existe d'autres méthodes plus complexes et peu utilisées comme l'estimation des lipides extractibles (DINEL *et al.*, 1996) et le suivi de l'évolution de la biomasse microbienne ou de l'activité enzymatique au cours du compostage (FORSTER *et al.*, 1993; KOSTOV *et al.*, 1994). Les méthodes utilisant l'analyse spectrales sont également utilisées par certains auteurs pour déterminer la maturité des composts (CHEN, 2003). Mais ces techniques sont délicates ou assez lourdes et par conséquent ne peuvent servir d'outils pratiques pour l'estimation de la maturité des composts.

La valeur agronomique des composts peut être définie comme l'aptitude des composts à améliorer la fertilité du sol. Les composts sont en effet des produits riches en matières organiques et également en composés minéraux (N, P, K, Mn, oligo-éléments, etc.) et à ce

titre sont susceptibles d'améliorer la fertilité du sol (SOUMARE *et al.*, 2003). Plusieurs travaux ont d'ailleurs mis en évidence le gain qualitatif ou quantitatif occasionné par l'application de compost sur un sol cultivé, en combinaison ou non avec un complément de fertilisant minéral.

Cependant il est souvent difficile de voir si cette amélioration de la fertilité du sol est due à la présence d'éléments minéraux fertilisants au sein du compost, à leur minéralisation progressive, à l'amélioration des caractéristiques physiques du sol, etc.

3. Effets physico-chimiques des composts sur les caractéristiques du sol :

De nombreuses études ont montré le rôle bénéfique du compost sur les qualités physiques et chimiques des sols amendés. Par exemple, une amélioration des propriétés physiques, une augmentation de la conductivité hydrique et une diminution de la densité des sols ont été observées par WONG *et al.* (1999). De même, l'incorporation de compost au sol s'avère efficace pour lutter contre la dégradation de la surface du sol (BRESSION *et al.*, 2001). PAGLIAI *et al.* (2004) ont montré que l'ajout de compost dans un sol améliore sa porosité et sa structure. Les amendements en matière organique stable augmentent le pouvoir tampon et la capacité d'échange des sols, deux paramètres qui conditionnent la nutrition minérale des plantes (MUSTIN, 1987). De plus, l'incorporation de composts permet de réduire l'acidité du sol, et de diminuer ainsi les risques d'exportation des métaux vers la plante (BOLAN *et al.*, 2003).

La présence de micro-organismes divers dans le compost augmente l'activité biologique du sol et permet un bon échange gazeux « *sol air eau plant* ». L'apport de compost permettra au sol d'être plus poreux favorisant ainsi, les échanges gazeux et le développement de nouvelles racines.

3.1. Evolution de la teneur en matière organique du sol : utilisation de modèles dynamiques :

L'évolution de la teneur en carbone du sol est un processus lent. Par conséquent son étude en conditions réelles nécessite des expérimentations de longue durée, ce qui la rend difficile et souvent limitée à des conditions pédo-climatiques données. L'utilisation de modèles pour décrire la dynamique du carbone dans le sol s'avère donc indispensable (BALESDENT *et al.*, 2002).

- **Modèle Hénin-Dupuis**

La premier modèle de l'évolution de la matière organique d'un sol est celui établi par (HENIN & DUPUIS, 1945) (Figure V.1). Ce modèle ne considère qu'un seul compartiment de la matière organique du sol, et utilise le **coefficient isohomique K1**, défini comme le taux de matière organique d'une matière exogène apportée au sol contribuant à alimenter le stock de matière organique du sol.

4. Valorisation agronomique des composts par apport d'éléments fertilisants :

Le premier intérêt des amendements organiques est donc une diminution de la part de ces engrais lixiviables et leur remplacement par des déchets organiques valorisés. Les applications de compost dans les sols améliorent durablement et efficacement la fertilité du sol selon les travaux de GUITTONNY-LARCHEVEQUE, 2004 ; GASCO *et al.*, 2013). De même, cet auteur a montré que les amendements de composts favorisent le processus de reforestation en améliorant la nutrition et la croissance des plantes, et surtout en augmentant leur potentiel de survie en période de sécheresse.

La valorisation agronomique des composts est aussi souvent comprise comme étant l'apport d'éléments fertilisants. Les substances organiques sont caractérisées par trois éléments principaux: Carbone, Hydrogène et Oxygène représentant en masse plus de 90 % du résidu sec des végétaux. Cependant, de nombreux autres éléments font partie des éléments nutritifs majeurs pour les plantes. Ceux-ci sont classés en deux groupes: les macro-éléments tels que l'azote, le phosphore, le potassium, le soufre, le calcium et le magnésium présents à des proportions de quelques pour mille à quelques pour cent de la matière sèche et les éléments nutritifs secondaires ou oligo-éléments (proportion inférieure à 0,1 % de la matière sèche). Nous nous intéresserons plus particulièrement à trois d'entre eux: l'azote, le phosphore et le potassium. Cependant, les rôles principaux des autres éléments nutritifs sont résumés dans le Tableau 02.

éments	Proportions	Rôles
Macro-éléments		
Calcium	1 à 2 % MS	Forme facilement des chélas, diminue la perméabilité cellulaire, contole l'ouverture de canaux ioniques transmembranaires, active certaines enzymes, rôle de messenger secondaire de certaines enzymes hormones. Constituant de la chlorophylle, active de nombreuses enzymes
Magnésium	0.1 à 0.7 % MS	Constituant de composés organiques soufrés. Carence en S est très sévère et provoque une chlorose (disparition de la chlorophylle). Rôle sur la pression osmotique (algues) mais pas toujours indispensable (certaines plantes en C4 n'en exigent pas : maïs, sorgho, canne à sucre, etc.).
Soufre	0.1 à 0.6 % MS Sodium	
	Taux variables	Rôle dans la turgescence cellulaire (avec K ⁺), nécessaire à la photosynthèse.
Chlore	Taux variables	Inutile pour la plupart des plantes sauf pour les Graminées et quelques autres végétaux.
Silicium	Taux variables	Catalyseur biochimique : constituant des groupements prosthétiques (hèmes), constituant des protéines Fer-soufre.
Oligo-éléments		
Fer	<0.1%	Constituent de la cytochrome oxydase (fin de chaîne respiratoire), des phénol oxydases, de certains transporteurs d'électrons (photosynthèse) et de la superoxyde dismutase (destruction de l'ion superoxyde : très toxique).
Cuivre	<0.1%	Impliqué dans la réduction des nitrites et de l'azote atmosphérique. Cofacteur de plusieurs enzymes (phosphatase alcaline, carboxypeptidase...).
Molybdène	<0.1%	Contribue à l'intégrité de la paroi en stabilisent les chélate calciques, rôle dans les transports. Rôle dans diverses oxydo réductions.
Zinc	<0.1%	
Bore	<0.1%	
Manganèse	<0.1	

Tableau III. 02 : Rôles des éléments minéraux

4.1. Azote (N) :

L'azote est l'élément fondamental de la production végétale, le « pivot de la fertilisation ». Sa disponibilité détermine le rendement. Il entre dans la composition de très nombreux éléments essentiels à la vie cellulaire : acides aminés, acides nucléiques... Le cycle de l'azote consiste en la transformation des formes de l'azote assuré par les microorganismes du sol. L'azote minéral représente généralement moins de 5 % de l'azote total du sol et se trouve sous forme de nitrate (NO₃⁻) et d'ammonium (NH₄⁺) selon Robert (1996). L'azote organique est minéralisé en NH₄⁺ par ammonification, puis nitrifié en NO₃⁻.

L'ammonification est réalisée par des micro-organismes variés alors que la nitrification n'est opérée que par certains micro-organismes plus spécifiques. L'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) est susceptible d'être ensuite assimilé par les plantes, ou immobilisé dans la biomasse microbienne du sol.

La quasi-totalité de l'azote du sol est sous forme organique (MUSTIN, 1987). Cependant, la matière sèche des composts de déchets municipaux pouvant contenir jusqu'à 0.15% d'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) leur incorporation au sol peut entraîner une augmentation immédiate de l'azote minéral du sol (ADEME, 2000). Par ailleurs, FORTUNA *et al.* (2003) ont mis en évidence une augmentation du potentiel de minéralisation de l'azote du sol après application de compost et l'ont expliqué par l'ajout d'azote fixé aux substances humiques formées pendant le compostage.

4.2. Phosphore (P) :

Les plantes prélèvent le phosphore sous forme d'ions H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} . Le phosphore intervient dans la constitution de certains éléments structuraux essentiels à la vie cellulaire (acides nucléiques, phospholipides), dans les échanges d'énergie (phosphorylation d'un composé organique) et dans de très nombreuses réactions métaboliques (réactivité de substrats ou changement de conformation réactionnelle de coenzyme). La disponibilité du phosphore apporté par le compost dépend de la nature du sol. En effet, le phosphore peut être immobilisé par adsorption sur des oxydes de fer et d'aluminium ou précipité lorsqu'une grande quantité est apportée. Un équilibre s'établit entre le phosphore minéralisé et le phosphore immobilisé, entraînant des disponibilités du phosphore très variables selon le type de sol (nombre de sites d'adsorption, pH).

4.3. Potassium (K) :

Le potassium est absorbé par les plantes sous la forme ionique (K^+), très mobile, dissout dans le liquide intracellulaire, où il s'accumule à des concentrations jusqu'à trois cents fois supérieures à celles du milieu environnant. Son abondance et sa mobilité en font le cation le plus important pour la création de la pression osmotique et donc de la turgescence vacuolaire. Les flux de potassium jouent un rôle important dans le contrôle des mouvements de cellules ou d'organes (ex. ouverture des stomates). De plus, il accompagne les anions dans leur accumulation et leur migration, notamment les ions NO_3^- jusqu'à leur réduction (racine ou feuille). Les ions K^+ s'échangent, aussi, facilement contre les ions H^+ émis par les pompes à protons, leur permettant de fonctionner en continu. En plus de l'influence de son abondance,

s'ajoute un rôle d'activation de nombreuses enzymes et un rôle déterminant dans la synthèse des protéines et des polysaccharides (accumulation d'acides aminés et d'oses lors de carence en K). L'apport de potassium par le compost est généralement faible. CHEN *et al.* (1996) ont mesuré une concentration variant de 4 g/kg de MS pour les composts de boues, ce qui peut être limitant dans le cas d'un faible apport aux sols, jusqu'à 17 g/kg de MS pour les composts de fumier.

Le compost de fumier est alors un bon fertilisant potassique et risque même de présenter un excès pour les plantes et d'engendrer un déséquilibre K^+/Mg^{2+} . Mais à l'inverse de l'azote et du phosphore, sa disponibilité est très grande, puisque pratiquement tout le potassium est disponible (FRANCOU, 2003).

5. Valeurs agronomiques, tests sur plantes :

5.1. Phyto-Toxicité

La stabilité du compost ne prend pas en compte automatiquement son action sur les plantes. Les tests de phyto-toxicité sont les seuls moyens d'évaluer la toxicité liée à leur incorporation au sol. En effet, les composts mûrs ne doivent pas présenter de substance empêchant la germination des graines et la croissance des plantes. L'acide acétique est probablement l'acide organique, libéré par les composts immatures, le plus préjudiciable bien qu'il existe également d'autres composés (acétaldéhyde, éthanol, acétone, éthylène, etc.) contribuant aux effets phytotoxiques (JIMENEZ & GARCIA, 1989). Des concentrations élevées en sels et la libération d'acides organiques dans les composts sont également corrélées à l'inhibition de la germination et de la croissance. Par conséquent, la phytotoxicité est souvent évaluée par l'étude de la germination ou par des tests de croissance (GARIGLIO *et al.*, 2002; SAEBO & FERRINI, 2006; SAID-PULLICINO *et al.*, 2007), mais selon d'autres auteurs EMINO & WARMAN (2004) conseillent de choisir les plantes avec soin. Un indice de germination (GI) de 50 % est reconnu comme étant celui d'un compost sans effet phytotoxique (CHIKAE *et al.*, 2007).

6. Amélioration des aspects biologiques des sols amendés :

Plusieurs travaux ont montré que les activités enzymatiques sont stimulées par l'ajout d'amendements organiques dans les sols (SERRA-WITTLING *et al.*, 1996; CRECCHIO *et al.*, 2004). PASCUAL *et al.* (1998) ont montré qu'un amendement organique suffisamment important dans un sol semi-aride augmente significativement les activités enzymatiques

pendant au moins 360 jours. En revanche, l'ajout d'amendements organiques immatures produit l'effet inverse *i.e.* une diminution initiale de ces activités. L'addition de compost mature dans un sol améliore la qualité du sol et favorise le développement végétal, mais réduit aussi le nombre de maladies occasionnées par les pathogènes issus des sols (ERHART *et al.*, 1999; COTXARRERA *et al.*, 2002).

7. Effets remédiant des amendements organiques :

L'addition d'amendements organiques permet une remédiation de sols pollués, en luttant notamment contre la toxicité saline (TEJADA *et al.*, 2006). De même, GUITTONNY-LARCHEVEQUE (2004) a montré que l'épandage de compost est capable de diminuer, à court terme, le possible stress toxique qu'exercent le nickel (Ni) et le zinc (Cr) sur les végétaux dans un sol pollué. En effet, même si l'apport de compost constitue une source exogène d'éléments traces métalliques (ETM), il constitue un milieu nutritif pour les racines des végétaux (humus) plus dilué en Ni et Cr que le milieu naturel au préalable contaminé en ces deux éléments. En ce qui concerne les polluants organiques, le compostage permet aussi une remédiation de sols contaminés en augmentant la photo-dégradation de pesticides comme l'Irgarol (AMINE-KHODJA *et al.*, 2006). en minéralisant des explosifs, tels que le TNT présent dans le sol d'usines de fabrication ou de démantèlement (BREITUNG *et al.*, 1996, BRUNS-NAGEL *et al.*, 1998), ou en dépolluant un sol contaminé par du pétrole : raffinerie, désert Koweïtien (AL- DAHER *et al.*, 1998). SEMPLE *et al.* (2001) ont expliqué que les résultats de l'utilisation de composts pour le traitement de sols pollués dépendent de plusieurs facteurs, notamment la biodisponibilité et la biodégradabilité du polluant organique. Chaque pollution est donc à étudier individuellement.

8. Carbone organique du sol et effet de serre :

Dans le cadre de la lutte contre l'effet de serre additionnel, l'incorporation dans les sols de produits contenant des matières organiques stabilisées semble être une solution raisonnable. En effet, le compost à des matières non traitées (boues de station d'épuration) augmente la stabilisation du carbone. En 2004, environ 1.73 million de tonnes de compost ont été produites en France (ADEME, 2006). Cependant, le CO₂ n'est pas le seul gaz à effet de serre à prendre en considération dans le cadre de l'utilisation de compost. Le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O) sont des molécules beaucoup plus efficaces que le CO₂ pour augmenter l'effet de serre. Le N₂O libéré par la nitrification ou la dénitrification au sein du compost a un effet positif sur le réchauffement global de la même façon que le CH₄

produit par l'élevage de bétails ou le compostage de déchets organiques. En effet, le méthane est produit lors de la dégradation des lipides solubles, des hydrates de carbone et des acides organiques en conditions anaérobies (HUSTED, 1993). Ces deux gaz sont susceptibles d'être émis au cours du compostage. Même en cas de procédé avec aération forcée, l'apparition de micro-sites anaérobies responsable de la qualité de gaz produite, notamment pour les andains ou des zones anaérobies peuvent difficile d'établir un contact précis de l'effet du compostage sur l'émission de gaz à effet de serre, car les travaux sont récents et peu nombreux.

9. Valeur azotée des composts :

Nous appelons ici valeur azotée, l'**aptitude des composts à fournir de l'azote aux plantes**. Cette fourniture peut être **immédiate** dans le cas de composts riches en azote minéral, ou à plus **long terme** du fait de la minéralisation de la matière organique du compost dans le sol. La connaissance de la valeur azotée des composts constitue une demande majeure de la part des agriculteurs (FRANCOU & HOUOT, 2000).

9.1. Cycle de l'azote

L'azote du sol est essentiellement sous forme organique. L'**azote minéral** du sol représente généralement moins de 5 % de l'azote total du sol et se trouve sous forme de nitrates (NO_3^-) et d'ammonium (NH_4^+) (1996). Les transformations de l'azote sont assurées par les microorganismes du sol (Figure III-01).

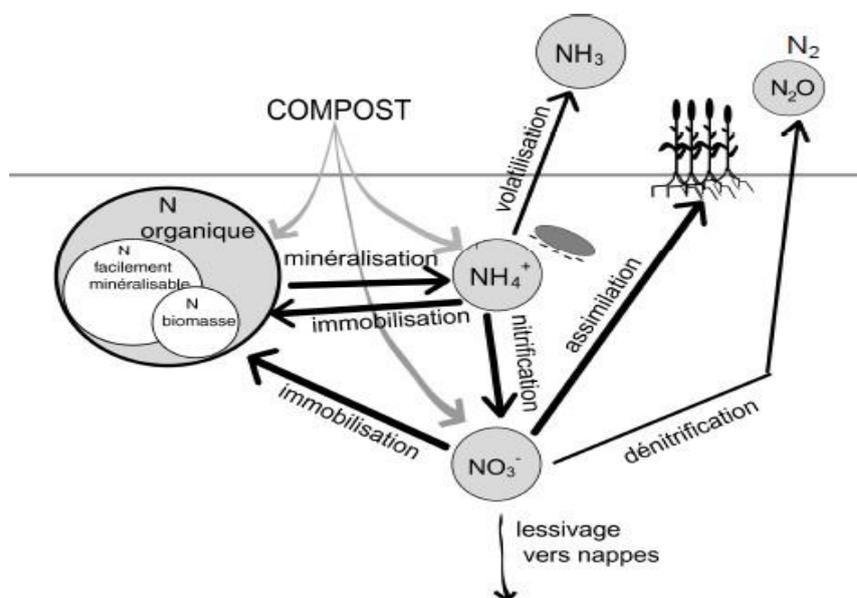


Figure III.01: Schéma simplifié du cycle de l'azote lié à un apport de compost
L'azote organique est **minéralisé** en NH_4^+ (ammonification), puis nitrifié en NO_3^- .

L'ammonification est réalisée par des micro-organismes variés alors que la nitrification est réalisée par des micro-organismes plus spécifiques, les nitrosomas et les nitrobacters. L'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) est susceptible d'être **assimilé par les plantes**, ou **immobilisé dans la biomasse microbienne** du sol. En cas de présence d'ammonium et de nitrates dans le sol, c'est l'ammonium qui est préférentiellement utilisé par les micro-organismes du sol alors que les nitrates sont préférentiellement incorporés par la culture (JANSSON *et al.*, 1955; BROADBENT & TYLER, 1962).

Dans un sol sans plante, lorsque la minéralisation brute est plus forte que l'immobilisation brute, on observe une minéralisation nette de l'azote. A l'inverse l'immobilisation nette correspondant au cas où l'immobilisation brute est plus forte que la minéralisation brute. Une forte immobilisation de l'azote peut être observée dans le cas de l'incorporation au sol d'un produit riche en carbone facilement dégradable, les microorganismes puisant dans les réserves minérales l'azote indispensable à leur développement. Bien que consommant préférentiellement l'azote ammoniacal, une organisation rapide de l'azote nitrique est observée lorsque la présence d'un excès de carbone dans le sol est conjointe à une absence d'ammonium (RICE & TIEDJE, 1989; RECOUS *et al.*, 1990).

➤ **Nitrates et environnement**

L'azote constitue un élément nutritif de base des plantes qui l'utilisent principalement sous forme de nitrates (NO_3^-). Ceci a conduit à une utilisation massive d'engrais chimiques visant à fournir aux cultures des conditions azotées optimales de développement. Les nitrates ne sont pas adsorbés sur les surfaces des argiles du sol, entraînant des pertes par ruissellement vers les eaux superficielles, et des pertes par drainage vers les nappes d'eau souterraines. Or la présence de nitrates dans l'eau constitue une pollution : risque environnemental (eutrophisation des eaux superficielles), et risque sanitaire (altération du transfert d'oxygène vers les cellules pour les nourrissons).

A l'inverse des engrais minéraux qui permettent d'évaluer de manière précise les doses à apporter aux cultures, l'incorporation au sol d'amendements organiques est suivie d'une minéralisation de l'azote dépendant des doses apportées. L'évaluation des quantités d'amendements organiques à apporter pour satisfaire le besoin des plantes et limiter les risques de lessivage sont difficiles à estimer (CHAUSSOD *et al.*, 1997). En effet la minéralisation de l'azote de l'amendement organique dépend des caractéristiques du produit et des conditions pédo-climatiques. La connaissance de la disponibilité de l'azote dans les

amendements organiques apparaît essentielle afin d'assurer une gestion agri-environnementale correcte de l'azote (KANAL & KULDKEPP ,1993; IGLESIAS-JIMENEZ & ALVAREZ ,1993; LI *et al.*, 1997; MAMO *et al.*, 1999).

9.2. Méthodes d'évaluation de la valeur azotée :

Pour apprécier la valeur azotée d'un compost il existe trois types d'expériences basées sur la mesure de l'azote dans le sol et parfois sur l'exportation de l'azote vers les plantes, dans des conditions de plein champ ou au laboratoire. Les expérimentations en présence de plantes au champ permettent d'apprécier les effets des apports de compost sur la dynamique de l'azote du sol, sur sa biodisponibilité et sur la croissance des plantes en conditions similaires aux pratiques agricoles (KANAL & KULDKEPP ,1993; SANCHEZ *et al.*, 1997; GAGNON *et al.*, 1997; ABAD BERJON *et al.*, 1997; MAMO *et al.*, 1999; ERIKSEN *et al.*, 1999; HOUOT *et al.*, 2003).

Les expérimentations avec plantes et en pot permettent également de voir les effets sur les plantes. Elles nécessitent la mise en place d'expérimentations moins lourdes et plus rapides que les expérimentations de terrain, mais s'éloignent des pratiques agricoles (IGLESIAS-JIMENEZ & ALVAREZ ,1993; ALLIEVI *et al.*, 1993; ASTIER *et al.*, 1994; BRINTON & EVANS, 2000) .

Les expérimentations au laboratoire sans plante avec des mélanges contenant du sol et du compost placés en incubations en conditions contrôlées s'éloignent des conditions réelles d'utilisation mais offrent une plus grande facilité de réalisation (STANFORD *et al.*, 1974; BELOSO *et al.*, 1993; CHENEBY *et al.*, 1994; HADAS & PORTNOY ,1994; SIKORA & YAKOVCHENKO.V ,1996; IAKIMENKO *et al.*, 1996; ERIKSEN *et al.*, 1999).

De l'azote isotopiquement marqué (N15) est également utilisé dans un certain nombre d'études sur la dynamique de l'azote dans le sol. Un tel traceur permet d'estimer les quantités brutes d'azote immobilisé et minéralisé par la biomasse, ou assimilé par les plantes (JEDIDI *et al.*, 1995; CRIPPA & ZACCHEO ,1995; SIKORA & ENKIRI, 2001; AMBUS *et al.*, 2002) ou d'étudier le « *priming effect* » lié à l'incorporation au sol d'une matière exogène (WOODS *et al.*, 1987).

Il existe un certain nombre de modèles simulant les transformations de l'azote dans le sol, généralement conjointement au carbone. Les modèles NCSOIL, CERES, CANTIS par exemple permettent de simuler le turnover de l'azote et du carbone à partir de plusieurs

compartiments (produit incorporé, biomasse microbienne, matière organique active et stable du sol) (HADAS & PORTNOY ,1994; CORBEELS *et al.*, 1999). Des modèles comme LIXIM (MARY *et al.*, 1999; TRINSOUTROT *et al.*, 2000) et DAISY (GERKE *et al.*, 1999) servent à simuler minéralisation de l'azote et son lessivage.

9.3. Données sur les valeurs azotées des composts :

La matière sèche des composts pouvant contenir jusqu'à 0.4% d'azote minéral (HIRAI *et al.*, 1986), leur incorporation au sol peut entraîner une augmentation immédiate de l'azote minéral du sol. Plus le compost est stabilisé plus cet apport initial est important, du fait de l'augmentation de la teneur en azote minéral avec l'âge du compost (Robertson & Morgan 1995). Dans le cas d'un mélange contenant 2 % d'un compost de boue, (BERNAL *et al.*, 1998a) constatent un apport immédiat en azote minéral de 75 mgN.kg⁻¹ de sol pour un compost mûr (soit approximativement 300 kg N.ha⁻¹), de 25 mgN.kg⁻¹ de sol pour un compost en fin de phase de dégradation intensive (100 kg N.ha⁻¹) . Avec un mélange à 1.5 %, (BELOSO *et al.*, 1993) obtient un enrichissement immédiat de 30 mgN.kg⁻¹ de sol (120 kg N.ha⁻¹). Mais la valeur azotée d'un compost est avant tout définie par l'intensité de minéralisation de son azote après incorporation au sol. Deux comportements distincts sont généralement observés après l'incorporation de compost dans le sol: soit une minéralisation progressive du compost entraînant une lente augmentation de l'azote minéral du sol après leur incorporation au sol (BELOSO *et al.*, 1993; HADAS & PORTNOY ,1994; ROBERTSON & MORGAN ,1995; SIKORA & YAKOVCHENKO.V,1996; N'DAYEGAMIYE *et al.*, 1997; HARTZ & GIANNINI ,1998; SHI & NORTON, 2000), soit une immobilisation nette de l'azote du sol pouvant atteindre -50 mg.kg⁻¹ de sol (JEDIDI *et al.*, 1995 ; SIKORA & YAKOVCHENKO.V ,1996 ; BERNAL *et al.*, 1998a ; ERIKSEN *et al.*, 1999 ; FRANCOU *et al.*, 1999).

Quelques rares travaux mentionnent une minéralisation rapide de l'azote du sol après un apport de compost. C'est le cas de (DE HAAN ,1981) qui considère qu'aucun arrière-effet n'est observé dans le cas de composts d'ordures ménagères et de (N. DAYEGAMIYE *et al.*, 1997) qui observent une minéralisation rapide et exponentielle (200 mg.kg⁻¹ de sol après 20 jours d'incubations) dans le cas d'un compost de fumier épandu à très forte dose (75 % massique).

Le lien entre l'état de stabilité de la matière organique et la disponibilité de l'azote a été mis en évidence par quelques travaux, montrant que le potentiel de minéralisation diminue et la

teneur en azote minéral initial augmente lorsque qu'augmente l'âge du compost (ROBERTSON & MORGAN ,1995; N. DAYEGAMIYE *et al.*, 1997; HARTZ & GIANNINI ,1998; BERNAL *et al.*, 1998a). Ceci s'explique par l'humification de la matière organique au cours du compostage qui rend la matière organique plus résistante à la biodégradation (IGLESIAS-JIMENEZ & ALVAREZ ,1993). L'immobilisation de l'azote est attribuable à un manque de stabilité du compost (JEDIDI *et al.*, 1995). La présence d'un substrat carboné facilement dégradable stimule l'activité microbienne, entraînant alors une forte assimilation de l'azote par la microflore du sol.

Les conséquences de l'apport de composts sur les exportations par les plantes ont également été étudiées. Mais les résultats relevés dans la littérature sont variables. Des gains quantitatifs et qualitatifs pour les cultures ont souvent été mis en évidence, essentiellement lorsque le compost est combiné à un fertilisant minéral (MAYS *et al.*, 1973; DE BERTOLDI *et al.*, 1983; GAGNON *et al.*, 1997; ABAD BERJON *et al.*, 1997; SOUMARE *et al.*, 2003; MARTINEZ *et al.*, 2003). A l'inverse, (PETERSEN, 2003) ne constate qu'un très faible effet sur le rendement suite à l'utilisation d'un compost d'ordures ménagères, par rapport à un fumier ou une boue. Il semble que les gains observés ne soient pas dus à l'azote, et des travaux montrent une déficience en azote pour les plantes après l'application de composts (SIMS ,1990; SIKORA & ENKIRI , 2001). Le prélèvement de l'azote par les plantes dépend du type de compost appliqué et de la dose d'application (JELLUM *et al.*, 1995; ERIKSEN *et al.*, 1999). La quantité d'azote prélevé par les plantes augmente linéairement avec la quantité d'azote minéral dans le sol (IGLESIAS- JIMENEZ & ALVAREZ,1993). (HOUOT *et al.*, 2003) observent que moins de 10 % de l'azote des composts est exporté vers les plantes dans le cas d'un apport au champ de composts d'origines urbaines à des doses agronomiques.

PARTIE I

Techniques expérimentales

Chapitre I

Présentation de la zone d'étude

I.1. Présentation de la wilaya de Mostaganem

La wilaya de Mostaganem s'étend sur une superficie de 226 900 ha pour une population estimée à la fin de l'année 2020, à 921 800 habitants l'ou une densité est de 335 habitants/km². La zone montagneuse représentant environ 11 % de la population totale de la wilaya.

La wilaya de Mostaganem est caractérisée par deux (02) zones distinctes :

- Le plateau de Mostaganem couvrant une superficie de 88 629 ha ;
- La zone de Dahra avec une superficie de 55 060 ha.

Mostaganem est située au Nord-Ouest de l'Algérie ; Elle est limitée :

- A l'Est par les Wilayas de Chlef et Relizane ;
- Au Sud par les Wilaya de Mascara ;
- A l'Ouest par les Wilayas d'Oran ;
- Au Nord par la Mer Méditerranée.

Le découpage administratif de la wilaya compte 10 dairas pour 32 communes qui sont rattachées à l'Agence du Bassin Hydrographique (ABH) Oranie –.

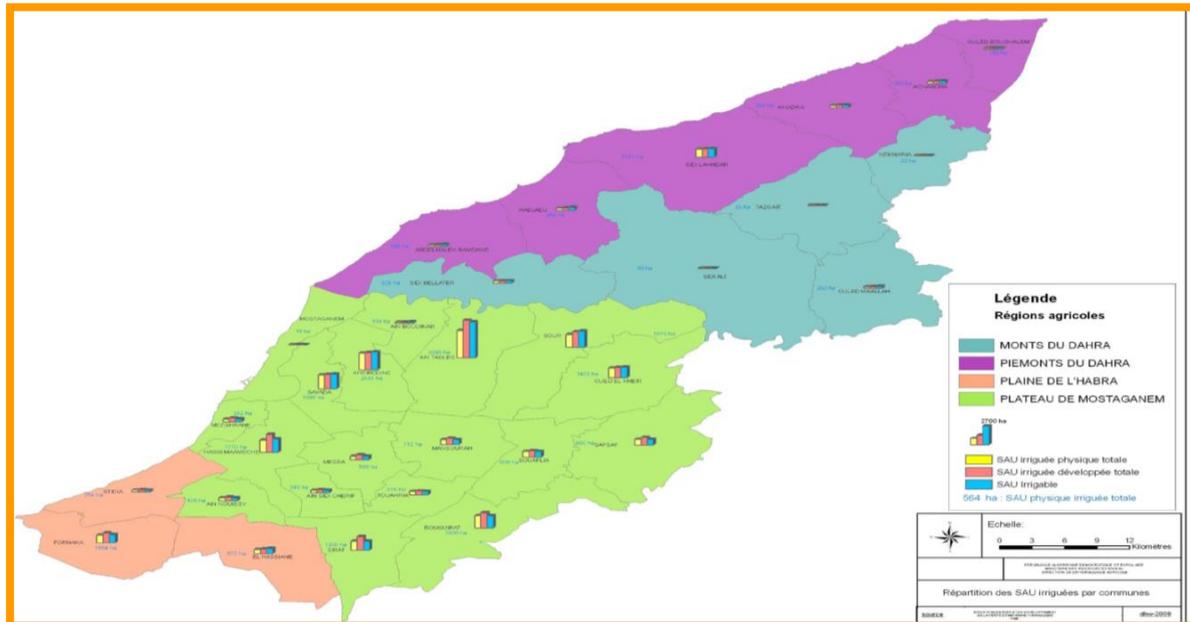


Source : DSA, Mostaganem 2020

Figure I.1. Les communes de la wilaya de Mostaganem

Les régions agricoles de la wilaya de Mostaganem se répartissent de la manière suivante :

- Les Monts du Dahra ;
- Les piedmonts du Dahra ;
- La plaine de l'Habra ;
- Le plateau de Mostaganem.



Source : DSA, Mostaganem 2020

Figure I.2. Régions agricoles de la wilaya de Mostaganem

I.2. Aspect socio-économique

L'arrière-pays se caractérise par une activité agricole importante et dynamique ; classant cette wilaya parmi les plus importantes sur le plan de la production agricole et particulièrement les fruits et légumes. L'agriculture de Mostaganem se classe au 3^{ème} rang au niveau de la production maraîchère du pays, et 9^{ème} en ce qui concerne la production arboricole et au 5^{ème} rang pour la production viticole.

Le secteur agricole emploie 25% de la population occupée. On constate l'absence de périmètres collectifs : toute l'irrigation en PMH se réalise uniquement par des exploitations individuelles, dont le développement a été fortement favorisé, ces dernières années, par la politique de subventions du gouvernement. (DRE, inventaire de la PMH)

I.3. Climat

D'un point de vue climatique, la région se caractérise par l'irrégularité de ses précipitations, dont la moyenne annuelle ne dépasse pas les 350 mm sur le plateau et avoisine le 400 mm sur le Dahra, l'hiver est doux et l'été chaud caractérisé par une humidité relativement importante oscillant entre 70 et 80 % caractérisant le climat semi aride (Boulem 2009)

Année	T	TM	Tm	PP	V	RA	SN	TS	FG	TN	GR
2003	18.3	23.8	13.3	333.54	-	52	1	1	12	0	0
2004	17.7	23.5	12.6	401.64	6.7	55	1	15	22	0	0
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	18.3	24.4	13.2	557.04	7.1	67	0	7	18	0	0
2007	17.4	23.0	12.3	407.45	7.3	62	0	12	15	0	0
2008	17.8	23.3	12.7	466.85	-	67	1	15	10	0	0
2009	18.3	24.1	13.1	267.49	8.9	48	0	16	15	0	0
2010	18.3	23.7	13.1	429.04	8.4	81	0	4	9	0	0
2011	18.2	24.3	12.7	428.76	6.2	58	0	7	24	0	1
2012	17.7	23.7	12.1	500.93	7.0	59	0	11	24	0	1
2013	17.3	22.9	12.1	557.29	-	60	0	8	8	0	0
2014	17.8	23.6	12.4	470.37	7.2	52	0	11	4	0	0
2015	17.9	24.1	12.4	299.46	6.4	37	0	17	9	0	1
2016	18.3	24.1	13.0	270.53	6.7	50	0	14	14	0	1
2017	19.6	23.5	12.9	325.38	8.7	36	0	6	6	0	0
2018	-	-	-	-	-	49	0	6	13	0	0
2019	19.6	23.1	13.0	265.18	8.2	30	0	7	10	0	1

Tableau I.1. Valeurs climatiques moyennes et totales annuelles (tutiempo.net. 2020)

T	Température moyenne annuelle
TM	Température maximale moyenne annuelle
Tm	Température minimale moyenne annuelle
PP	Précipitation totale annuelle de pluie et/ou neige fondue (mm)
V	Vitesse moyenne annuelle du vent (Km/h)
RA	Total jours de pluie Durant l'année
SN	Total jours de neige Durant l'année
TS	Total jours de tempête Durant l'année
FG	Total jours de brouillard durant l'année
TN	Total jours de tornade sou nuages Edenton noir Durant l'année
GR	Total jours de grêle Durant l'année

Tableau I.2. Interprétation des valeurs climatiques moyennes annuelles

I.4. Le Sol :

Nous distinguons deux grandes zones dans la wilaya : le plateau de Mostaganem dont la superficie est de 88 629 ha (62%) avec un sol à texture généralement sablonneuse, et la plaine du Dahra, dont la superficie est de l'ordre de 55 060 ha (38%), avec des sols à texture généralement argilo-limoneuse et dont la pente varie de 3 à 25% (DSA, 2015).

I.5. Site expérimental :

L'étude a été réalisée au niveau de l'exploitation de Monsieur Boutaiba douar Klaouzia commune de Sirat qui distante du chef lieu de la wilaya de 20 Km au sud. La superficie est de 02 ha réservée uniquement au Maraîchage à l'irrigués.

I.6. Caractéristiques du sol de la zone d'étude :

les caractéristiques du sol du site expérimental sont les suivants :

- L'ensemble des terres sont, d'une manière générale, très légère de structure possédant une texture sablino-limoneuse avec une proportion de sable élevée, ces terres conviennent aux cultures maraîchères avec un taux de 90%.
- Un pH alcalin voisin de 8,5.
- Une teneur plus ou moins faible en matière organique,
- Absence de salinité, car l'excès de teneur en sel est l'un des soucis principaux avec l'eau utilisée pour l'irrigation. Une concentration élevée en sel dans l'eau ou dans les sols affectera négativement le rendement des récoltes, et provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines.



Photo I.01 : Localisation de la ferme (A) et Site d'expérimentation (B) (Google Earth, 2020)

CHAPITRE II

MATERIELS ET METHODES

I. Matériels :

I-1. Matériels Végétal :

I.1.1. données générales de la culture de « Tomate » (*Solanum lycopersicum*)

Culture de plein champ ;

culture de saison : date de semis : Mars-Avril

Date de plantation : Avril-Mai

Date de récolte : à partir de Août

Distances de plantation : 1,00m x 0,750m

Densité : 18181,81 soit 20000 plants/Ha

I.1.2. Irrigation et protection phytosanitaire :

A- Irrigation :

Les besoins en eau de la tomate se situent entre 4000 et 5000 m³/Ha. Il faut maintenir la plante à la limite de ses besoins, toute irrégularité entraîne, au moment de la maturation, des éclatements de fruits. (CHAUX,1972).

Les doses peuvent varier entre agriculteurs et conditions climatiques, ces dernières assurent une fréquence d'apport suffisante à partir de l'eau des pluies depuis la plantation jusqu'à la moitié de mois de mai à partir du mois de juin (début de sécheresse) le manque d'eau est comblé par l'irrigation régulière assurée par un puits d'où l'eau est puisée directement (à l'aide d'une motopompe), en respectant la capacité au champ.

B- Protection

La protection phytosanitaire est assurée de manière préventive par différents traitements chimiques.

C- Gestion des mauvaises herbes :

Pour une gestion efficace des mauvaises herbes la pratique de binage est indispensable car elle permet de briser la croûte du sol (permettre donc une bonne aération du sol) et de supprimer les mauvaises herbes qui se développent autour du plant. De nombreux herbicides sélectifs s'utilisent en culture maraîchère. Dans chaque cas, il faut s'en tenir strictement aux indications des fabricants, traiter avec la pression des pulvérisateurs réduite et veiller particulièrement au rinçage des appareils de traitement

I.1.3 Caractéristiques morphologiques de la tomate

A- Racines

Le système racinaire est puissant, très ramifié à tendance fasciculée (**Chaux et Foury, 1994**). Il est de type pivotant important qui pousse jusqu'à une profondeur de 50 cm ou plus (fig. 4). La racine principale produit une haute densité de racines latérales et adventives (**Shankara et al, 2005**).

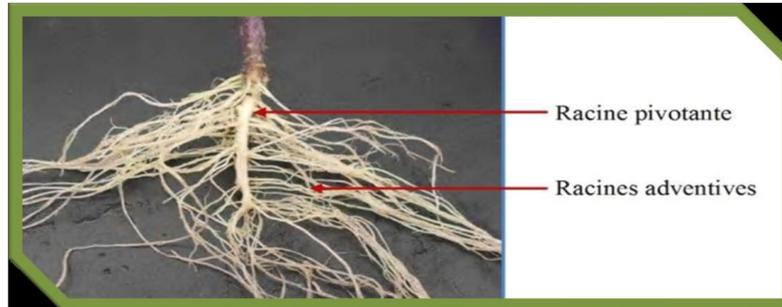


Figure II.1 : Système racinaire de la tomate (**Naika et al, 2005**).

B- Tiges

Elles sont vertes, épaisses aux entre-nœuds. Elles disposent de deux types de poils blanchâtres : des poils simples et des poils glanduleux qui contiennent une huile essentielle, qui donne l'odeur de la tomate et la coloration verte (**Kolev, 1976**). Elles portent les feuilles, les fleurs et les fruits. Une tige peut porter de nombreuses ramifications (appelées axillaires) et a une croissance indéterminée ou déterminée selon les variétés.



Figure II.2 : Tige de tomate (**Naika et al, 2005**).

C. Feuilles

Les feuilles sont composées de 5 à 7 folioles principales, Elles ont une disposition alterne sur la tige (**Abbeyes et al, 1963**), longues de 10 à 25cm et d'un certain nombre de petites folioles intercalaires ovales, un peu dentées sur les bords. Elles sont souvent repliées en forme de cuillères ou même à bords roulés en dessus (**Raemaekers, 2001**).



Figure II.3: Feuille de tomate (**Naika et al, 2005**).

D. Fleurs :

Les fleurs de la tomate sont des organes bisexués. Elles sont hermaphrodites et autofécondes et regroupées sur le même pédoncule en bouquet lâche en inflorescence formant des grappes plus ou moins bifurquées de 3 à 8 fleurs chez les variétés fixées et au-delà chez les hybrides



Figure II.4 : La fleur de tomate

E. fruit :

Le fruit est une baie (**fruit** à péricarpe entièrement charnu, contenant des graines appelées pépins). Cette baie est rouge, parfois jaune ou orangée, de forme ronde ou plus ou moins allongée, lisse ou creusée de sillons.



Figure II.5 : Le fruit de tomate

I-2. Matériels organiques :**A) Compost :**

Le compost utilisé s'appelle Compost produit par société PROFERTS SPA est un amendement organique issu à 100 % du compostage végétaux sous forme de fragments d'une granulométrie inférieure de 4 mm.

Réf de demande N° 82/Agro/21 de 14/04/2021 (copie ci-joint).

B) Caractéristiques du compost utilisé :

Analyse minérale (kg/t produit brut)	Caractéristique physique :
N : 1% Mgo : 0,9 %	MO : 35 %
P ₂ O ₅ : 1,4 % C/N % 16 %	MS : 65 %
K ₂ O : 2,5 %	Densité : 0,55
PH : 8,9	

**Photo II.01. Le compost utilisé****II- La Méthode :****II-1- Le dispositif expérimental :****II-1.1 - Le protocole expérimental :**

Le dispositif de split plot d'une superficie de 60 m² est divisé en 06 parcelles.

Les parcelles constituent de 03 lignes, chaque ligne contient 04 plants donc 12 plants/parcelles.

A- Les traitements : les traitements sont les suivants :

- A) Parcelles 1 et 2 : sans compost (témoin).
- B) Parcelle 3 et 4 : compost dosé 8 L /m²
- C) Parcelle 5 et 6 : compost dose 4 L /m²

Les différents traitements appliqués sont se présentés aux (figurés) et correspondent aux 02 répétitions de traitements, comparés à un témoin. Afin d'étudier l'effet du compost sur les plants de tomates.

B- Croquis du dispositif expérimental :

conduite 75 cm 75 cm 150 cm 75 cm 75 cm

d'irrigation



II.2. Conduite des travaux :

Pour atteindre les objectifs assignés à ce travail de recherche, l'itinéraire technique, les

méthodes liées à la détermination des paramètres et à l'analyse statistique ainsi que les méthodes de comparaison des données ont été mise en place comme déterminé ci après.

II.2.1. Préparation du sol :

Pour réussir notre expérimentation il est nécessaire de travailler le sol judicieusement pour ce, il est nécessaire de recourir à plusieurs opérations, tout en préservant la stabilité structurale du sol. Avant la mise en place de la culture, exactement le 20/04/2021, on a effectué un labour profond à l'aide d'une charrue à disque le but de cette opération est de retourner la terre jusqu'à une profondeur de 30cm, cette opération a été suivie le 21/04/2021 par le passage du cover crop pour affiner et niveler le terrain.

II.2.2. La méthode d'utilisation de compost :

L'épandage du compost a été réalisé le 22/04/2021 suivi immédiatement par l'enfouissement (à une profondeur de 30 cm), pour éviter la volatilisation de l'azote sous forme d'ammoniac (NH_3).

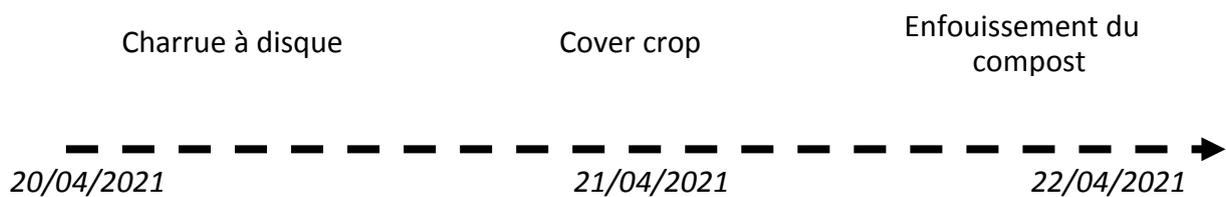


Figure II.6 : Chronologie des opérations

II.2.3. Mise en place de l'essai :

Après avoir effectué la préparation du sol, la mise en place de l'essai a été faite suivant le dispositif expérimental



Photo II.2. Mise en place la culture de tomate

II.2.4. Transplantation :

La transplantation et le repiquage ont été effectués 10 jours après l'enfouissement du

compost soit le 01/05/2021. Les plantules ont été plantées à une distance de 100 cm sur les rangées et de 75cm entre les lignes. Chaque bloc comporte trois (3) lignes et chaque ligne contient (4) plants.

II.2.5. Entretien :

Pour atteindre les objectifs du travail les opérations suivantes ont été appliquées : l'irrigation, le binage, le désherbage et les soins phytosanitaires avec divers traitements.

A. L'irrigation

Etant assurée par un dispositif élémentaire de « goutte à goutte », nous avons effectué une irrigation tous les sept (7) jours durant le moment pré florale et deux irrigations par semaine après la floraison.

B. Désherbage ; binage

Ils sont effectués afin de supprimer les adventices et le sarclage à (3 cm de profondeur) pour l'aération du sol.

Date	L'Entretien pendant la période de l'essai	
	Désherbage (manuel)	Binage
10/05/2021	☆	
20/05/2021	☆	
15/06/2021		☆

Tableau. II.01. L'Entretien pendant la période de l'essai



Photo II.3. Le désherbage manuel



Photo. II.4. Le binage manuel

C. Soins phytosanitaires

La protection phytosanitaire est assurée de manière préventive par différents traitements chimiques. Les traitements sont mentionnés dans le tableau ci-dessous :

Date	Malade	traitement
20/05/2021	Mildiou	Fongicide systémique (Folio Gold)

		MA : métalaxyl ; chlorothalonil
25/05/2021	mauvaises herbes	Désherbage chimique
30/05/2021	Les insectes	Insecticide (ProAct) MA : Emamectin Benzoate
15/06/2021	Tuta absoluta	Installation des pièges phéromone

Tableau II.02. Traitements phytosanitaires effectués



Photo II.5. Les traitements phytosanitaires

NB : le même les itinéraires techniques ont été appliqués à toutes les parcelles expérimentales.

III. Méthode d'étude

III.1. Mesure des paramètres physiologiques et agronomiques

III.1.1. Paramètres de croissance :

La hauteur et le nombre moyen de feuilles sont les paramètres physiologiques de croissance.

III.1.2. Evaluation des paramètres physiologiques et agronomiques

La hauteur et le nombre de feuilles au moment de la période végétative et florale sont les deux paramètres de croissance qui permettent de mesurer les effets du compost sur le comportement des plants de Tomate.

III.1.3. Echantillonnage

Notre échantillonnage s'est basé sur cinq plants dans chaque parcelle élémentaire, pris au hasard sur lesquels on a fait les mensurations (longueur de tige et nombre des feuilles)

Nous précisons que les relevés ont été effectués tous les 15 jours à partir du mois de Mai, Une première application a été effectuée le 15/05/2021, la deuxième a été

effectué le 01/06/2021, quant à la dernière opération a été réalisé le 16/06/2021.

La hauteur de la plante (H, cm), est prise à la période végétative-florale, du niveau du sol au sommet du bourgeon terminal pour chaque plante.

Chapitre III

Résultats et Discussion

I. Partie 01 : Les effets du compost sur la hauteur des plantes du Tomate (les Tiges) :

Dans cette expérience, nous allons faire trois mesures de la hauteur des tiges ; ou la première mesure a été effectuée quinze jours après la plantation.

Nous avons pris des mesures pour les cinq plantes au hasard dans chaque bloc, ce qui équivaut à quinze mesures par application, puis nous comparerons les trois résultats qui sont consignés dans les figures et les tableaux suivants :



Photo III.1. Mesure les hauteurs des tiges.

I.1. Première mesure du 15/05/2021:

I.1.1. Hauteur de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents :

Plants/ Dose	T	D1	D2
P1	17,5	24,1	23,2
P2	18,3	24,3	22,1
P3	16,2	20,6	18,3
P4	17,7	19,4	16,9
P5	19	23,3	18,5

Tableau III.1 : Les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.

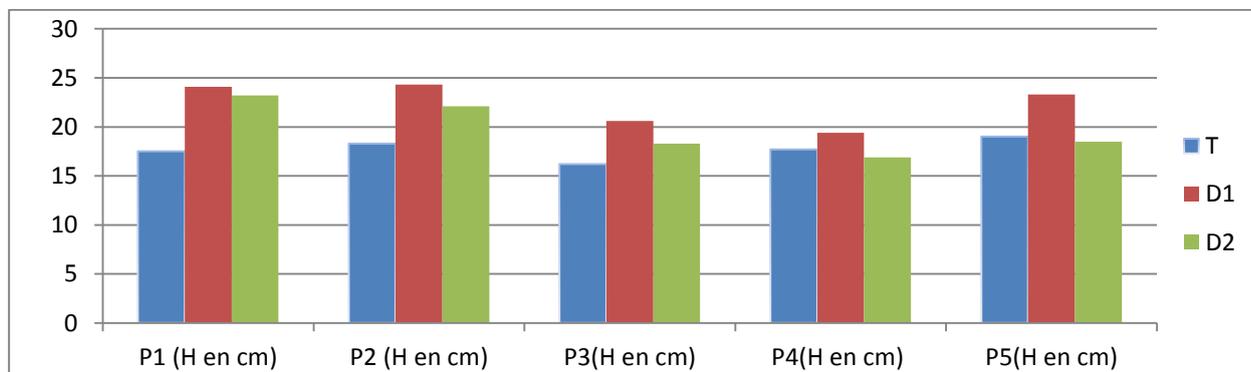


Figure III.01: Les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.

I.1.2. Hauteur Moyen :

Plants/ Dose	T	D1	D2
Moy hauteur des tiges	17,74	22,34	19,8

Tableau III.02: Les résultats représentent la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.

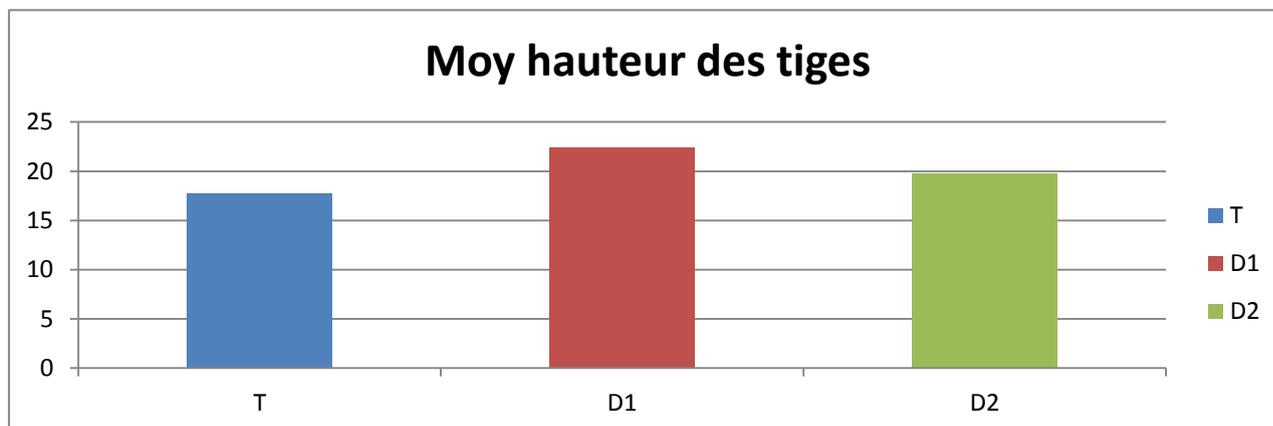


Figure III.02 : Les résultats représentent la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.

I.1.3. Observation 01 :

L'hauteur des tiges pour D1, D2 et le témoin est presque la même car on est au début de l'activité de la plante

I.2. Deuxième mesure n du 01/06/2021:

I.2.1. Hauteur de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents:

Plants /Dose	T	D1	D2
P1 (H en cm)	24,5	36,1	32,2
P2 (H en cm)	26,2	36,9	32,1
P3 (H en cm)	23,6	32,4	28,2
P4 (H en cm)	25,7	30,6	25,8
P5 (H en cm)	27,6	35	28,8

Tableau III.3 : les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure

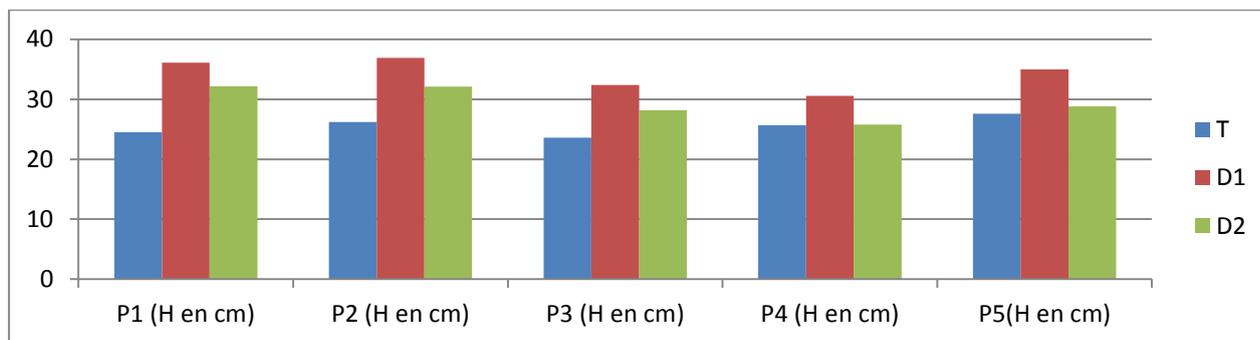


Figure III.03: les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure

I.2.2. Hauteur Moyen :

Plants /Dose	T	D1	D2
Moy hauteur des tiges en cm	25,52	34,2	29,42

Tableau III.04 : Les résultats représentant la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure

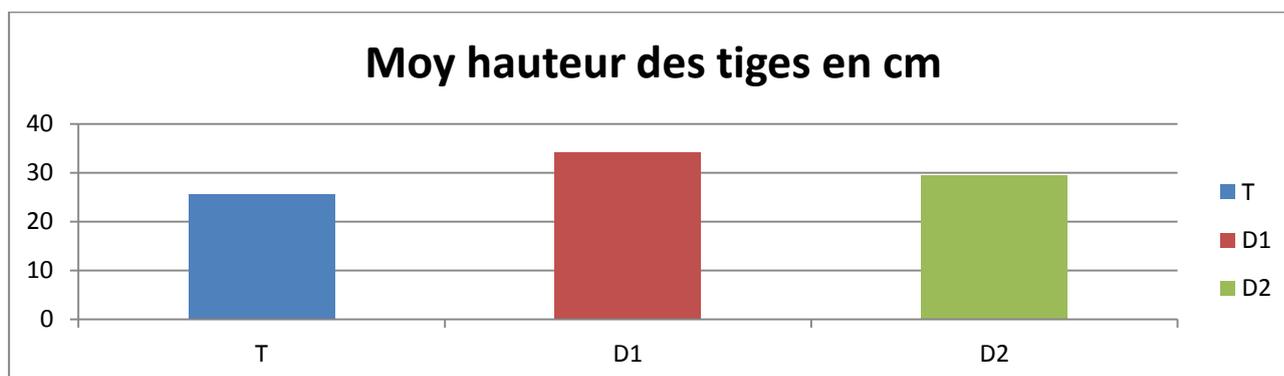


Figure III.04: Les résultats représentant la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure

I.2.3. Observation 02 :

Au cours de cette 2ème mensuration une nette différence excite entre les 03 blocs, en effet D1 sa hauteur est très important par rapport au témoin quant à D2 sa hauteur est assez bien développé par rapport à témoin mais inferieur à D2.

I.3. Troisième mesure du 16/06/2021:

I.3.1Hauteur de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents

Plants /Dose	T	D1	D2
P1 (H en cm)	43,6	64,3	55,6
P2 (H en cm)	45,8	65,2	55,5
P3 (H en cm)	42,6	60,2	51,4
P4 (H en cm)	45,5	58,4	48,7
P5 (H en cm)	47,7	63,1	52,4

Tableau III.05 : les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure

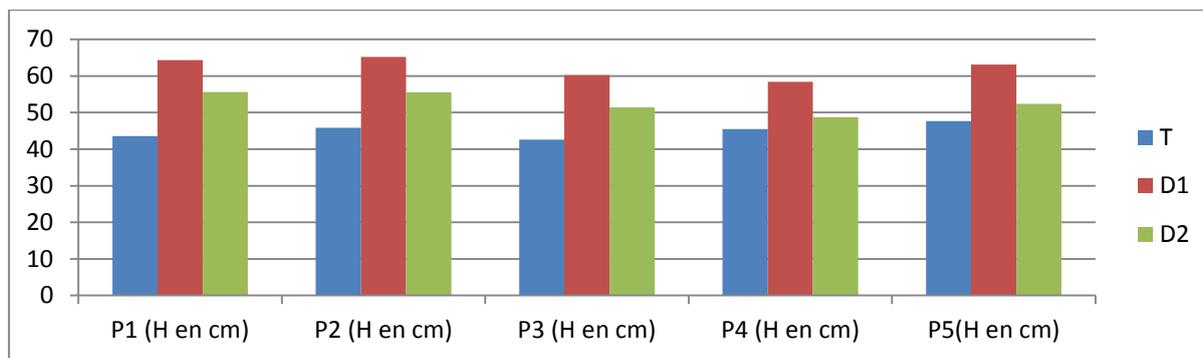


Figure III.05: les résultats représentant les mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure.

I.3.2. Hauteur Moyen :

Plants /Dose	T	D1	D2
Moy hauteur des tiges en cm	45,04	62,24	52,72

Tableau III.06 : Les résultats représentant la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure

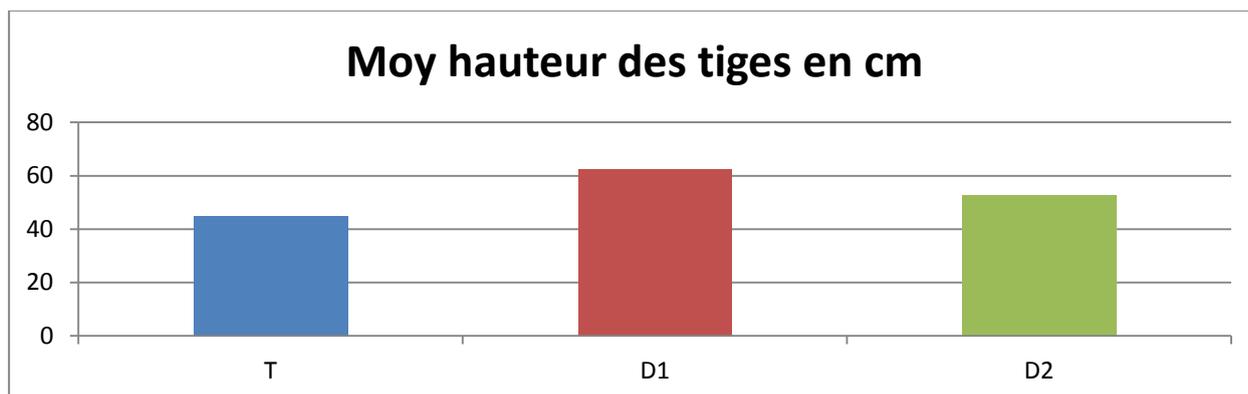


Figure III.06: Les résultats représentant la moyenne des mesures de hauteur des tiges de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure.

I.3.3.Observation 03:

L'effet du compost affairait clairement sur D1 et D2 par rapport au témoin.

I.4. Vitesse de croissance:

Dose/ plants	T	D1	D2
Vitesse de croissance (semaine 01)	7,78	11,86	9,62
Vitesse de croissance (semaine 02)	19,88	28,04	23,3

Tableau III.07: Les résultats représentant la vitesse de croissance

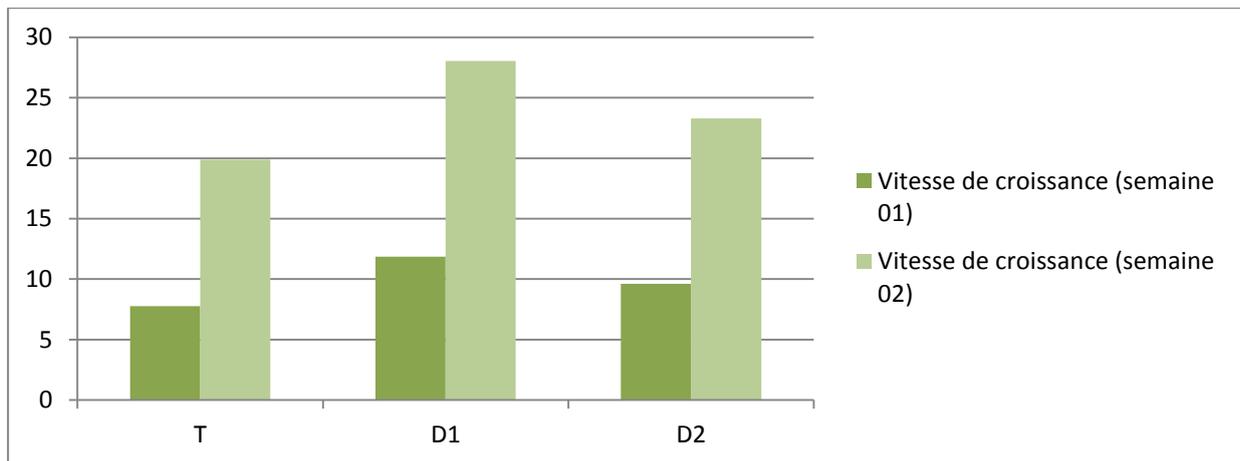


Figure III.07: graphe représentant de la vitesse de croissance

I.5. Conclusion partielle 01:

De ce qui précède (les trois observations) ainsi que la vitesse de développement de la culture au cours de deux semaines, il apparaît clairement que le compost a un effet important sur l'évolution de la culture de tomate notamment sur D1 qui s'est développé à 100% par rapport au témoin T alors que D2 a vu sa croissance augmentée à 70%. Pour cela on peut avec certitude que le compost agit positivement au développement de la culture.

II. Partie 02: Les effets des composts sur les des plantes du Tomate (les feuilles) :

Dans cette expérience, nous allons faire trois mesures de la hauteur des feuilles ; ou la première mesure a été effectuée quinze jours après la plantation.

Nous avons pris des mesures pour les cinq plantes au hasard dans chaque bloc, ce qui équivaut à quinze mesures par application, puis nous comparerons les trois résultats qui sont consignés dans les figures et les tableaux suivants :



Photo III.2.Mesure le nombre des feuilles

II.1. Première mesure du 15/05/2021:

II.1.1. Nombre de feuilles de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents :

Plants / Dose	T	D1	D2
P1 (U)	4	6	6
P2 (U)	5	6	5
P3 (U)	4	5	4
P4 (U)	4	5	5
P5 (U)	5	5	4

Tableau III.08 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.

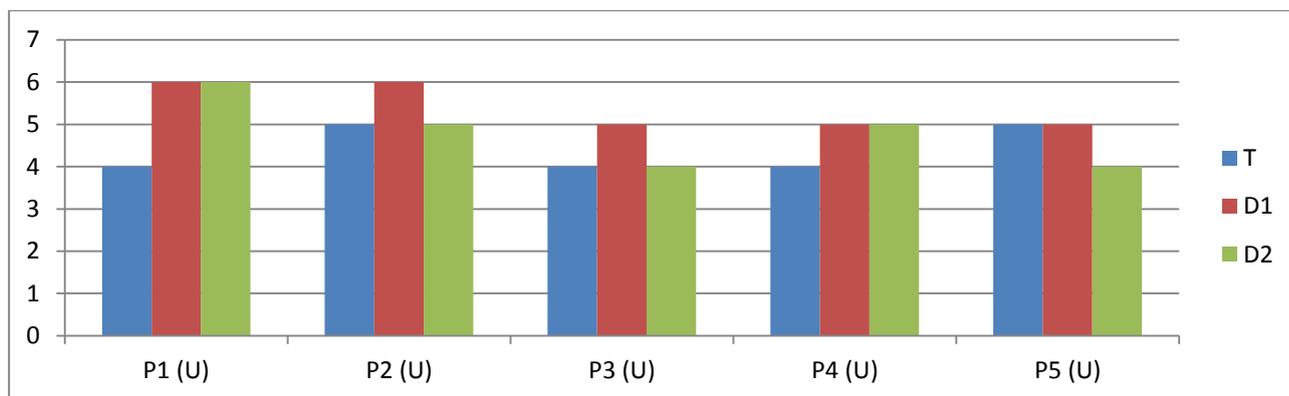


Figure III.08 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.

II.1.2. Nombre de feuille moyen :

Plants / Dose	T	D1	D2
Moy nombre des feuilles (U)	4,4	5,4	4,8

Tableau III.09: Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.

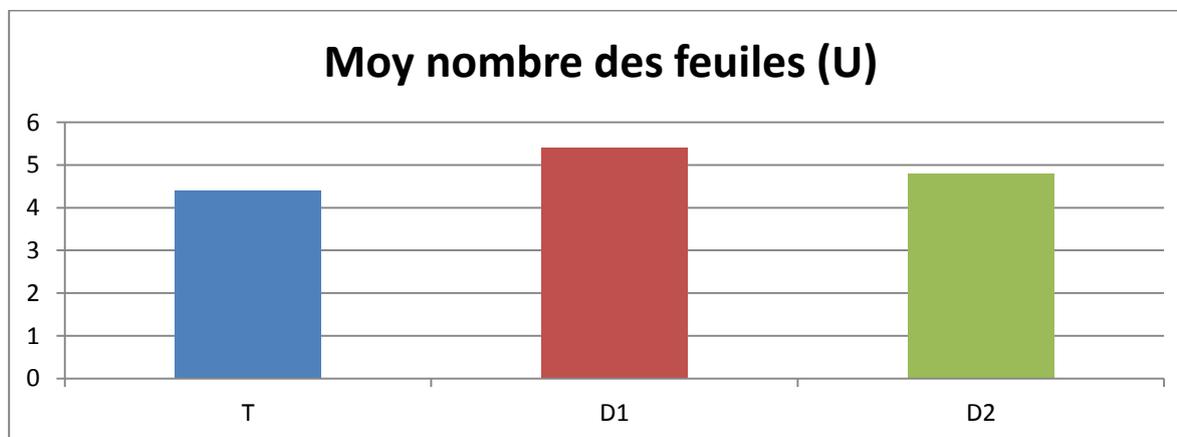


Figure III.09: Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la première mesure.

II.1.3. Observation 01 :

Le nombre de feuilles est presque le même car on est début du développement de la culture, néanmoins on a signalé une légère différence pour D1 et D2

II.2. Deuxième mesure du 01/06/2021:**II.2.1. Nombre de feuilles de 05 plants/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents :**

Plants / Dose	T	D1	D2
P1 (U)	6	9	9
P2 (U)	8	10	7
P3 (U)	6	8	6
P4 (U)	6	8	8
P5 (U)	7	9	7

Tableau III.10 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure.

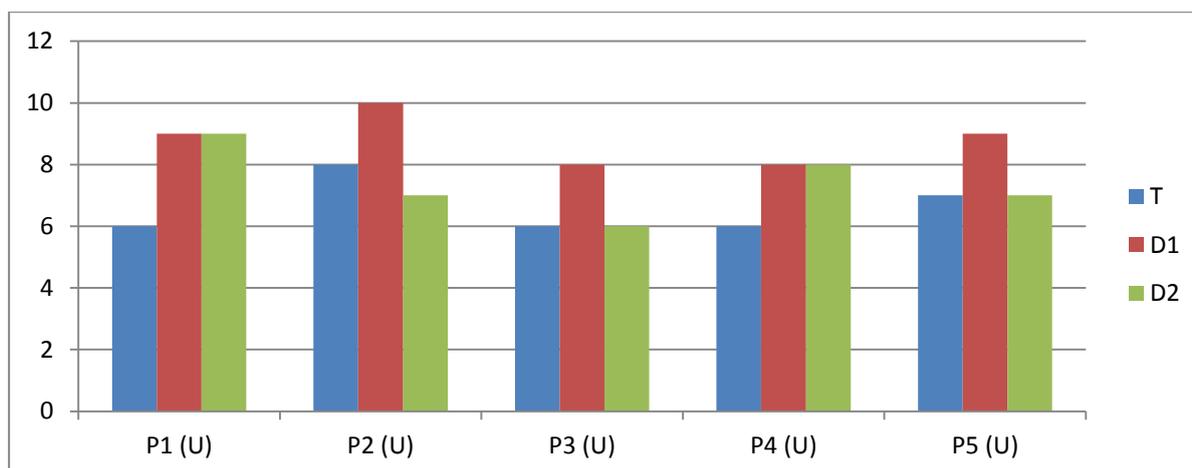


Figure III.10 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure.

II.2.2. Nombre de feuille moyen :

Plants / Dose	T	D1	D2
Moy nombre des feuilles (U)	6,6	8,8	7,4

Tableau III.11: Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure

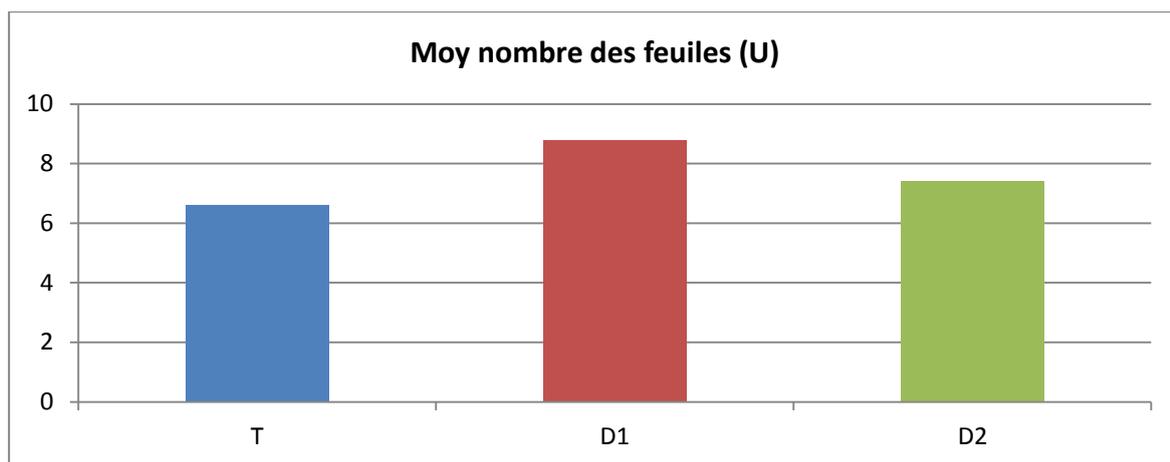


Figure III.11: Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la deuxième mesure.

II.2.3. Observation 02 :

Un accroissement signification du nombre des feuilles pour D1 et D2 est a signalé par rapport au témoin T cela est du l'activité de la culture.

II.3. troisième mesure du 16/06/2021:

II.3.1. Nombre de feuilles de 05 plant/01 bloc pour 01 témoin et deux doses différents :

Plants / Dose	T	D1	D2
P1 (U)	13	21	19
P2 (U)	15	22	18
P3 (U)	14	20	16
P4 (U)	14	20	17
P5 (U)	16	21	17

Tableau III.12 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure.

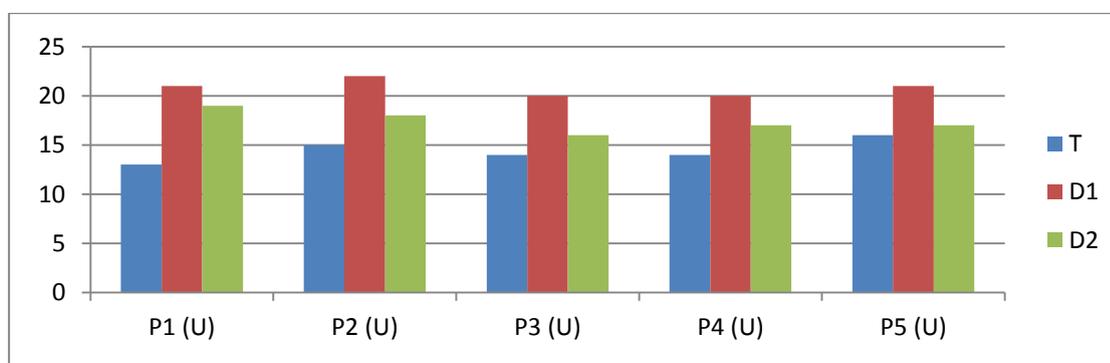


Figure III.12 : les résultats représentant les mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure.

II.3.2. Nombre de feuille moyen :

Plants / Dose	T	D1	D2
Moy nombre des feuilles (U)	7,8	12	4,8

Tableau III.13: Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure.

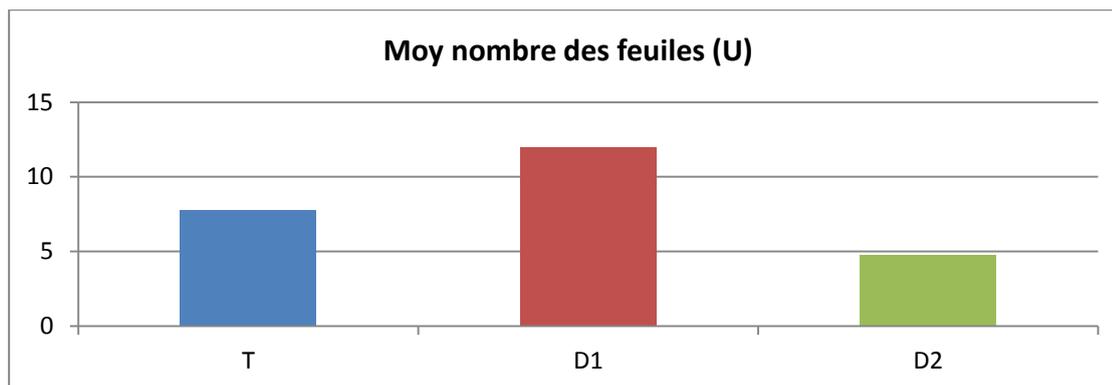


Figure III.13: Les résultats représentant la moyenne des mesures de nombre de feuilles de 05 plants sur les 03 blocs au cours de la troisième mesure

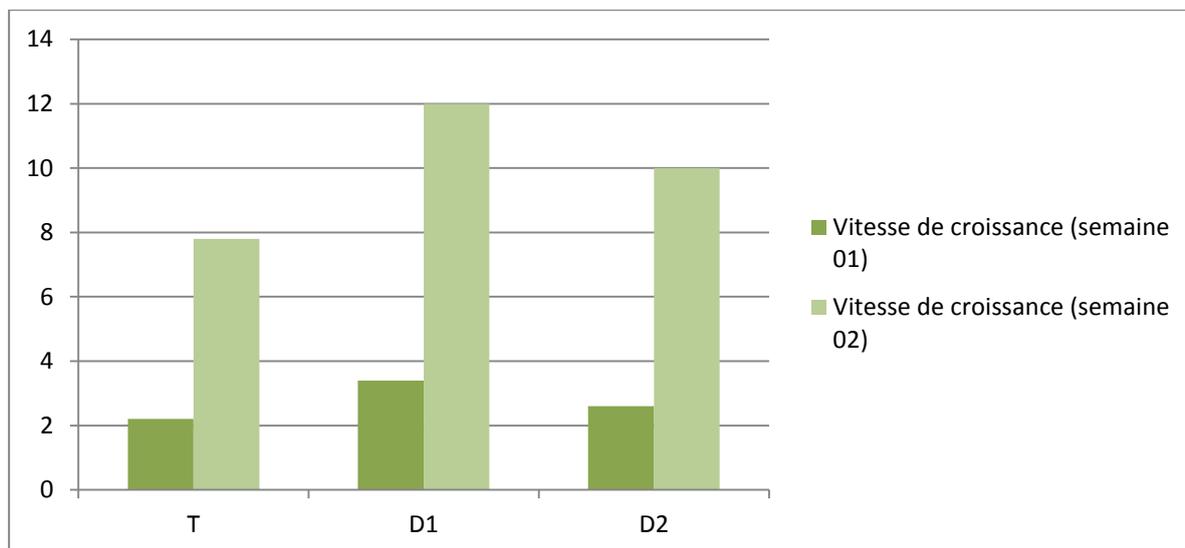
II.3.3. Observation 03 :

On constaté un bon développement de D1 et D2 par rapport au témoin.

II.4. Vitesse de croissance:

Dose	T	D1	D2
Vitesse de croissance (semaine 01)	2,2	3,4	2,6
Vitesse de croissance (semaine 02)	7,8	12	10

Tableau III.14: Les résultats représentant la vitesse de croissance



Figurer III.14: graphe représentant la vitesse de croissance

II.5. Conclusion partielle 02:

Des observations et la vitesse de croissance de la plante durant les deux premières semaines du cycle de tomate, le compost a un effet important sur le développement et la croissance des feuilles.

Cela nous permet de conclure que le compost a un bon effet sur le développement de la culture de tomate.

III. les grappes :

Afin de connaître les attentes de production et de rendement, nous avons calculé les grappes de trois plantes de chaque parcelle, nous les avons choisies au hasard, et résultat est dans le tableau suivant :



Photo III.3. Calcule nombre des grappes

Plants / Dose	T	D1	D2
nombre des grappes (U)	7	17	11

Tableau III.15 : le tableau représentant le nombre des grappes

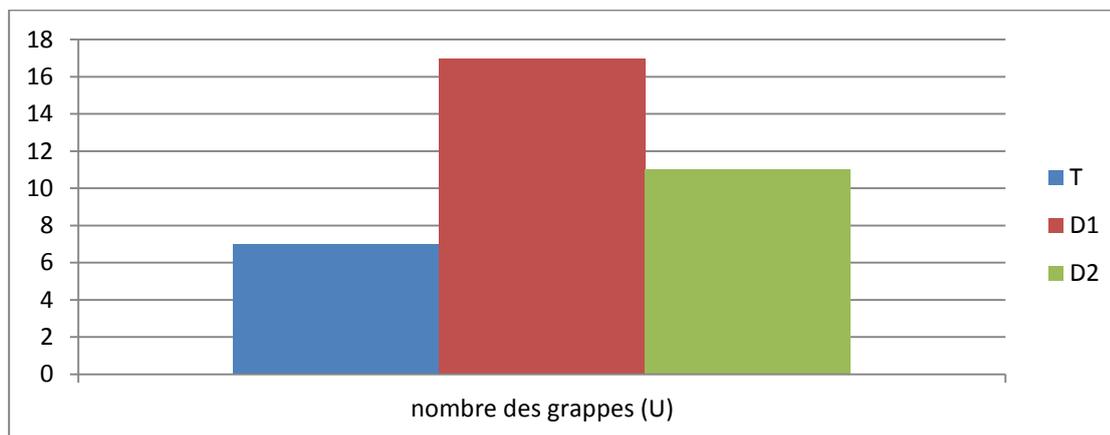


Figure III.15: graphe représentant le nombre des grappes

Observation :

Trois comparant le nombre de grappes dans les 03 cas, ce qui constitue un indice de rendement, on constaté que le rendement sera de 100% plus en D1 par rapport au témoin T alors que il sera que de 60% pour D2 comparativement à T.

IV. les Racines :

En comparant le système racinaires (voir les photos en dessous) on déduit qu'il est très développé pour D1 et assez bien développé pour D2 comparativement au témoin T.

Cela s'explique par l'effet de compost sur les différents constituants du sol en favorisant sa perméabilité et son aération ce qui crée un climat propre pour le développement du système racinaire de la culture et par conséquent augmentation de la production.



Photo.III.4. Le système racinaire

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Nul ne peut ignorer les bienfaits du compost tel que l'amélioration des quantités physiques, chimiques et biologiques du sol, qui permet d'augmenter la rétentions des eaux pour les sols légers et améliore la structure des sols lourds en les rendant plus aérée.

Tous les avantages du compost permettent d'augmenter les rendements des produits agricoles à faible coût tout en respectant le milieu environnemental (recyclage des déchets industriels, ménagers).

Pour qu'une stratégie soit couronnée de succès, il est important de prendre en considération les aspects économiques, écologiques et culturels. C'est dans cette optique qu'on a redise ce modeste travail ou nous avons met en exergue l'effet du compost sur l'élongation des types et le nombre de feuilles pour la culture de tomate, ces indices à eux seuls ne permettent pas de prédire s'il y'aura augmentation de rendements. Pour cela d'autres études devant être menées pour déterminer l'effet le nombre direct du compost sur les rendements telle que les bosquets floraux et par conséquent le nombre de fait, calibre de ce dernier.

Afin d'apprécier la juste valeur de ce produit sur les cultures agricoles ils faut multiplier les essais et les exceptionnels tout en quantifiant d'autres permanentes à long, moyen et court terme.

A court terme déterminer avec exactitude l'effet du compost sur le rendement qualitatives et quantitativement.

A moyen terme il faut procéder à l'analyse du sol pour apprécier les transformations que subit un sol soumis à l'effet du compost.

A long terme c'est l'aspect économique et environnemental qui sera ciblé. En effet le recyclage des différents déchets permet de lutter contre la pollution aux agriculteurs du milieu et diminue les quantités des déchets à traiter, économiques l'utilisation raisonnée du compost permet un gain supplémentaire, non négligeable, aux agriculteurs.

Ce qui se répercute sur le coût à la production ce qui contribue des citoyens à l'amélioration du pouvoir d'achat qui ne cesse de dégringoler.

Références bibliographiques

Adem Daci ; Nesreddine Bedida : Valorisation du compost sur la culture du poivron (*Capsicum annuum L.*) sous serre (2020)

AFNOR, 2005. Le compost : Dénominations, spécifications et marquage ; Eds AFNOR, 16p.
Agassi M., Kirsten W. F. A., Looock A.H., Fine P., 1998. Percolation and leachate composition in a disturbed soil layer mulched with sewage biosolids. *Soil Till. Res.*, 45:359-372.

Agassi M., Kirsten W. F. A., Looock A.H., Fine P., 1998. Percolation and leachate composition in a disturbed soil layer mulched with sewage biosolids. *Soil Till. Res.*, 45:359-372.

Albaladejo J., Lopez J., Boix-Fayos C., Barbera G.G., Martinez-Mena M., 2008. Longterm effect of a single application of organic refuse on carbon sequestration and soil physical properties. *J. Environ. Qual.*, 37:2093-2099.

Alloway B.J., 2004. Contamination of soils in domestic gardens and allotments: a brief overview. *Land Contam. Reclam.*, 12 (3) : 179-187.

Amir S., 2005. Contribution à la valorisation de boues de station d'épuration par compostage: Devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 341p.

Annabi M., Houot S., Francou C., M., Poitrenaud M., Le Bissonnais, 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:413-423.

Antonious G. F., Kochhar T. S., Coooolong T., 2012. Yield, quality and seven heavy metals in cabbage and broccoli grown in sewage sludge and chicken manure amended soil. *J. Environ. Sci. Health, Part A, Toxic/hazardous substances and environmental engineering*, 47 (13): 1955-1965.

Attrasi B., Mrabet L., Douira A., Ounine K., El Haloui N., 2005. Etude de la valorisation agronomique des composts des déchets ménagers. *Biotechnol. Et Envir.* , Atelier "Biotechnologies" au Maroc, Setat du 6 Mai 2005.

Azarmi R., Giglou M.T., Hajieghrari B., 2009. The effect of sheep-manure vermicompost on quantitative and qualitative properties of cucumber (*Cucumissativus L.*) grown in the greenhouse. *Afr. J. Biotechnol.*, 8 (19): 4953-4957.

Bahrampour T., Ziveh P. S., 2013. Effect of Vermicompost on Tomato (*Lycopersicume sculentum*) Fruits. *Intl. J. Agron. Plant. Prod. Four* (11): 2965-2971.

Baldock J.A., Nelson P.N., 2000. Soil organic matter, p. 25-84. In *Handbook of soil science*. M.

E. Sumner (Eds.), CRC Press, USA.

Balesdent J., and Arrouays D., 1999. Usage des terres et stockage de carbone dans les sols de territoire français. Une estimation des flux nets annuels pour la période 1900-1999. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 85:265-277.

Beare M.H., Hua S., Coleman D.C., and Hendrix P. F., 1997. Influences of mycelial fungi on soil aggregation and organic matter storage in conventional and no-tillage soils. *Appl. Soil Ecol.* 5:211-219.

- Bélaïr G., 2003** : Essai de contrôle des nématodes par l'utilisation du millet perlé comme engrais vert, AGRI-VISION .2002-2003
- Berg A., de Noblet-Ducoudré N., Sultan B., Lengaigne M., Guimberteau M., 2013.** Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions. *Agr. Forest Meteorol.*, 170: 89-102.
- Berthe C. 2006.** Etude de la Matière Organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés. Thèse de doctorat, Université de Limoges.
- Berthe C., Redon E., Feuillade G., 2008.** Fractionation of organic matter contained in leachate resulting from two modes of land filling an indicator of waste degradation. *J. Hazard. Mater.*, 54: 262-271.
- BisimwaKayeye D., MasilyaMulungula P., Gisèle J., 2013.** Essai de compostage comme voie de valorisation des déchets ménagers solides dans la ville de Bukavu au sud-Kivu (RD Congo). *DST*, 65: 30-38.
- Bonnal A., 1981** : Formation de charge de gestion de domaine auto-géré. Outils et maraîchages.
- Bouabdellah H., Benaoula H., 2019.** Etude Et Evaluation Des Différents Matières Organiques par compostage. Mémoire de mastère. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.
- Boualem M., 2009.** Etude bioécologique de *Phyllocnistiscitrella* Stainton (Lépidoptera : Gracillaridae) et de son complexe parasitaire dans la région de Mostaganem. Thèse de doctorat. Discipline : Protection des végétaux, Université de Mostaganem, 142 pages.
- Bouchiba Siham et Bouguetouche Yasmina., 2014.** Mémoire de mastère, Effet de compost sur l'évolution de la rétention en eau à la capacité au champ d'un sol argileux.
- Boukhari, H et Belmiloud, K, 2019** .Etude et Valorisation du Fumier Ovin par Compostage. Université Abdel-Hamid Ibn Badis De Mostaganem.
- Bresson, L.M., Koch, C., Le Bissonnais, Y., Barriuso, E., Lecomte, V., 2001.** Soil surface structure stabilization by municipal compost application. *Soil Sci. Soc. Am.*, 65: 1804-1811.
- Bresson, L.M., Koch, C., Le Bissonnais, Y., Barriuso, E., Lecomte, V., 2001.** Soil surface structure stabilization by municipal compost application. *Soil Sci. Soc. Am.*, 65: 1804-1811.
- Brevedan P. E., Egli D. B., 2003. Short periods of water stress during seed filing, leaf senescence, and yield de soybean. *CropSci.*, 43: 2083-2088.
- Caci.dz, 2020**, (<http://monographies.caci.dz/index.php?id=242>).
- CEFREPADE, 2008.** Compostage des déchets ménagers dans les pays en développement : Modalités de mise en place et de suivi d'installations décentralisées pérennes, 65p.
- Chantou T., 2012.** Identification des indicateurs de stabilisation des déchets solides urbains et validation sur un site de PTMB français, pour une application en Tunisie. Mémoire de thèse de Doctorat de limoges en co-tutelle avec l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de sfax, 238p.
- Chapman S.C., Edmeades G.O., 1999.** Selection improves drought tolerance in tropical maize populations. II. Direct and correlated responses among secondary traits. *Crop Sci.*, 39 (5): 1315-1324.

- Charnay F., 2005.** Compostage des déchets dans les pays en développement : élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost. Thèse de doctorat, université de Limoge (France), 448 p.
- Chaux., Cl et Foury., Cl., 1994 :** Fiche technique : Productions légumières. Tome 3, Agriculture d'aujourd'hui. Tec et Doc Lavoisier.
- Chen Y. 2003.** Nuclear magnetic resonance, infra-red and pyrolysis: Application of spectroscopic methodologies to maturity determination of composts. *Compost Sci. Util.*, 11(2): 152-168.
- Chenu C., Le Bissonnais Y., and Arrouays D., 2000.** Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1479-1486.
- Chica A., Mohedo J.J., Martin M.A., Martin A., 2003.** Determination of the stability of MSW compost using a respirometric technique. *Compost Sci. Util.*, 11:169-175.
- Claassen N., Syring K.M., Jungt G.O., 1986.** Verification of mathematical model by simulating potassium uptake from soil. *Plant Soil*, 95:209-220.
- Compaoré E., Nanema L.S., Bonkougou S., Sedogo M.P., 2010.** Evaluation de la qualité de composts de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso pour une utilisation efficiente en agriculture. *J... Appl. Biosci.*, 33: 2076-2083.
- Cornic G., Fresneau C., 2002.** Photosynthetic carbon reduction and carbon oxidation cycles are the main electron sinks for photosystem II activity during a mild drought. *Annl. Bot.*, 89: 887-894.
- Couplan. F, Marmy.f., 2009-** Jardinez au naturel : jardin bio facile. Edition : Sang de la terre et groupe Eyrolles. 314 p.
- Csizinszky A.A., Schuster D.J., Jones J.B. ET Van Lenteren J.C., 2005:** Tomatoes: Edited by Ep. Heuvelink. *Crop production science in horticulture (13): CABA Publishing is a division of CAB International.*
- Degens B.P., 1997.** Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Aust. J. Soil. Res.*, 35: 431-459.
- Dorioz J.M., Robert M., and Chenu C., 1993.** The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. *Geoderma*, 56:179-194.
- Ducreux., 1975 :** Les nouvelles techniques en Agronomie.
- Ellatir H., Skidedj A., Alfadl A., 2003 :** Fiche technique V : La tomate, L'aubergine, le poivron et gambo. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA N°100. Ministère de l'agriculture et de développement rural. Royaume de Maroc.
- Eriksen G., Coale F., Bollero G., 1999.** Soil nitrogen Dynamics and maize production in municipal solid waste amended soil. *Agron. J.*, 91:1009-1016.
- Fandi M., Al-Muhtaseb J.A., Hussein M.A., 2008.** Yield and Fruit Quality of Tomato as Affected by the Substrate in an Open Soilless Culture. *JJAS*, 4 (1): 65-72.
- Fang M., Wong J.W.C., Ma K.K., Wong M.H., 1999.** Co-composting of sewage sludge and coal fly ash: nutrient transformations. *Bioresour. Technol.*, 67:19-24.

- FAO, 1988.** Aménagement du sol : Production et usage du compost en milieu tropical et subtropical. Bulletin Pédologique, N° 56, 165p.
- Fonseca A. B., Wesgate M. E., 2005.** Relationship between desiccation and viability of maize pollen. *Field Crops. Res.*, 94: 114-125.
- François V., Feuillade G., Skhiri N., Lagier T, Matejka G. 2006.** Indicating the parameters of the state of degradation of Municipal Solid Waste. *J. Hazard. Mater.* 137(2): 1008-1015.
- Francou C., 2003.** Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets Urbains : influence de la nature des déchets et du procédé de compostage-recherche D'indicateurs pertinents- thèse de doctorat de l'institut national agronomique paris-grignon, Décembre 2003, 242p.
- Francou C., 2003.** Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets Urbains : Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage – Recherche D'indicateurs pertinents, Thèse de Doctorat, Institut national agronomique Paris-Grignon, 289p.
- Francou C., 2003.** Stabilisation de la matière organique au cours du compostage : influence de la nature du déchet et du procédé de compostage, recherche d'indicateurs pertinents. Thèse de l'Institut national Agronomique de Paris-Grignon, 288p.
- Gates R. D., Baghdasarian G., Muscatine L., 1992.** Temperature shock causes host cell detachment in symbiotic cnidarians: implications for coral bleaching. *Biol. Bull.*, 182: 324- 332.
- Ghelamallah A., 2016.** Etude des pucerons des cultures maraîchères et leurs complexes parasitaires dans la région de Mostaganem (Nord Ouest Algérien) l'université Abou bekrbelkaid de Tlemcen
- Gladden L. A., Wang Y., Hsieh C., Tsou I., 2012.** Using deficit irrigation approach for evaluating the effects of water restriction on field tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Afr. J. Agri. Res.*, 7 (14): 2083-2095.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 1998.** Le sol vivant. Bases de la pédologie. Biologie des sols. 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.
- Golueke C. G., 1977.** The biological approach to solid waste management. *Compost Sci.*, 18: 4-9.
- Guittonny-Larchevêque M., 2004.** Valorisation d'un compost de boues urbaines en garrigue pour le reboisement, comportement des jeunes arbres d'une plantation et modification de la dynamique de la végétation naturelle après amendement. Thèse de Doctorat, université de Provence, 227p.
- Guo WL., Chen RG., Du XH., Zhang Z., Yin YX., Gong ZH., and Wang GY., 2014:** Reduced tolerance to abiotic stress in transgenic Arabidopsis over expressing a Capsicum annum multiprotein bridging factor 1. *BMC Plant Biol.* 2014 May 20: 14 (1):138.
- Hadas A., Portnoy R., 1997.** Rates of decomposition in soil and release of available nitrogen from cattle manure and municipal waste composts. *Compost Sci. Util.*, 5: 48-54.

- Han-Song C., Qiao-Yun H., Li-Na L., Peng C., Wei L., Ming L., 2010.** Poultry manure compost alleviates the phytotoxicity of soil cadmium: influence on growth of pakchoi (*Brassica chinensis* L.). *Pedosphere*, 20: 63-70.
- Hargreaves J. C., Adl M.S., Warman P.R., 2008.** A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* 123: 1–14.
- Hinsinger P., Schneider A., Dufey J.E., 2005.** Le sol : ressource en nutriments et biodisponibilité. Dunod (Eds), Paris, Pp 285-305.
- Houot S., Francou C., Vergé-Leviel C., Michelin J., Bourgeois S., Linères M., Morel P., Parnaudeau V., Le Bissonnais Y., Dignac M.-F., Dumat C., Cheiab A. et Poitrenaud M. 2003.** Valeur agronomique et impacts environnementaux de composts d'origine urbaine : variation avec la nature du compost. *Les Dossiers de l'environnement de l'INRA*, 25:107- 125.
- Iannotti D. A., Pang T., Toth B. L., Elwell D. L., Keener H. M., Hoitink H. A. J., 1993.** A quantitative respirometric method for monitoring compost stability. *Compost Sci. Util.*, 1:52-65.
- Invuflec B., 1968 :** Piments à gros fruits.
- Kolani L., 2007.** Effets de différents types de composts élaborés à base de coques de grains de coton sur le rendement en grain de maïs ; mémoire d'Ingénieur agronome, 91p.
- Koledzi K. E., 2011.** Valorisation des déchets solides urbains dans les quartiers de Lomé (Togo) : Approche méthodologique pour une production durable de compost. Mémoire de Thèse de Doctorat, 224p.
- Kolev., 1976 :** Les cultures maraichères en Algérie : Légumes, fruits, Ed. J .Bailliere. Paris .V.I
- Kovacik J., Klejdus B., Hedbavny J., Stork F., Gruz J., 2012.** Modulation of copper uptake and toxicity by abiotic stresses in *Matricaria chamomilla* plants. *Agri. Food. Chem.*, 60: 6755- 6763.
- L. Chen, W. A. Dick, J. G. Streeter, and H. A. Hoitink, Ryegrass Utilization of Nutrients Released from Composted Biosolids and Cow Manure, Compost Science & Utilization, vol.24, issue.1, pp.73-83, 1996.**
- Lagier T., 2000.** Etude de macromolécules de lixiviat : caractérisation et comportement vis-à-vis des métaux. Thèse. Université de Poitiers, 189 p.
- Lal R., 2004.** Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123:1-22.
- Laumonier R., 1979 :** Cultures maraichères, tome 3 .Ed . J.B. Bailliere.
- Le Bissonnais Y., Cros-Cayot S., Gascuel-odoux C., 2002.** Topographic dependence of aggregate stability, overland flow and sediment transport. *Agronomie*, 22: 489-501.
- Le Gouée P., Cantat O.L., Bensaïd A.L., Savouret E., 2010.** La sensibilité des systèmes de production agricole en normandie face au changement climatique (2000-2100). 23ième Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes 2010, Pp 331 -336.
- Leclerc B., 2001.** Guide des matières organiques. eds guide technique de l'ITAB.

- Lepengue A. N., Mouaragadja I., Ibrahim B., Ake S., M'batchi B., 2012.** Réponse du maïs (*Zeamays* L. var. LG 60) au stress salin : étude de la synthèse de quelques composés biochimiques. *JAPS*. 14 (1): 1866-1872.
- Mata-González, R., Sosebee R.E., Wan C. 2002.** Physiological effects of biosolids application in desert grasses. *Environ. Exp. Bot.*, 48:139-148.
- Morel J. L., 1998.** Dynamique des éléments traces dans les sols : mobilité et transfert vers les eaux souterraines et les plantes. Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion. Académie des sciences, Rapport n°42 : 67-126.
- Movahedi S. A. R., Cook H. F., 2010.** Influence of municipal compost on temperature, water, nutrient status and the yield of maize in temperate soil. *Soil Use manage.*, 16 (3): 215-221.
- Mulot M. A. 1984 : Secret d'une herboriste. Eds du Dauphin, p 275.
- Mustin M., 1987.** Le Compost, Gestion de la Matière Organique, F. Dubusc, Paris.
- Mustin M., 1987.** Le compost : gestion de la matière organique. Eds François Dubusc, 954p.
- Nadia RAMDANI :** Transformation de la matière organique au cours du co-compostage de boues de station d'épuration et de déchets verts : Approche expérimentale pour une production durable de compost (2015)
- Nakaya N., Yokoi H., Motomura S., 1977.** The method for measuring of water repellency of soil. *Soil. Sci. Plant. Nutr.*, 23: 417-426.
- Nicola K., 1970 :** Les cultures maraichères en Algérie tome 1.
- OuténdéToundou., 2016.** Evaluation des caractéristiques chimiques et agronomiques de cinq composts de déchets et étude de leurs effets sur les propriétés chimiques du sol, la physiologie et le rendement du maïs (*Zeamays* L. Var. Ikenne) et de la tomate (*Lycopersicume sculentum* L. Var. Tropimech) sous deux régimes hydriques au Togo. Thèse de doctorat, Ecole doctorale Sciences pour l'Environnement Faculté des Sciences & Techniques Groupement de Recherche Au Sol Environnement.
- Pagliai M.N., Vignozzi N., Pellegrini S., 2004.** Soil structure and the effect of management practices. *Soil Till. Res.*, 79: 131-143.
- Parodi A., Feuilleade G., Mansour A., (2010).** Impact de nouveaux modes de gestion sur l'accélération de la dégradation de déchets ménagers : approche multiparamétrique et multi-échelle, thèse de doctorat, Université de Limoges.
- Parodi A., Feuilleade-Cathalifaud G., Pallier V., Mansour A. A., 2011.** Optimization of municipal solid waste leaching test procedure: assessment of the part of hydrosoluble organic compounds. *J. Hazard. Mater.* 186: 991-998.
- Pedra F., Polo A., Ribeiro A., Domingues H., 2007.** Effects of municipal solid waste compost and sewage sludge on mineralization of soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, 39: 1375- 1382.
- Pervez M. A., Ayub C. M., Khan H. A., Shahid M. A., Ashraf I., 2009.** Effect of drought stress on growth, yield and seed quality of tomato (*Lycopersicume sculentum* L.). *Pak. J. Agric.Sci.*, 46: 174-178.
- Petruzzelli G., 1989.** Recycling wastes in agriculture: heavy metal bioavailability. *Agric. Ecosyst. Environ.* 27: 493-503.

- Piccolo A., 1996.** Humus and Soil conservation. In Humic Substances in Terrestrial Ecosystems. Piccolo A. (Ed), 225-264 p.
- Pigozzo A. T. G., Lenzi E., Junior J. L., Scapin C., Da Costa A. C. S., 2006.** Transition metal rates in latosol twice treated with sewage sludge. Brazil. Arch. Biol. Technol., 49 (3): 515– 526.
- Poss R., Fardeau J. C., Saragoni H., 1997.** Sustainable agriculture in the tropics: The case of potassium under maize cropping in Togo. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 46: 205-213.
- Rai V.K., Singh G., Thakur P.S., Banyal S., 1983.** Protein and amino acid relationship during water stress in relation to drought resistance. *Plant Physiol. Biochem.* (Suppl), 10: 161.
- Raviv M., Medina S., Krasnovsky A., Ziada H., 2004.** Organic matter and nitrogen conservation in manure compost for organic agriculture. *Compost Sci. Util.*, 12:6-10.
- Rendek E., Ducom G., Germain P. 2007.** Assessment of MSWI bottom ash organic carbon behavior: A biophysicochemical approach. *Chemosphere*, 67 (8), 1582-1587.
- Robert F.J., Carbon B.A., 1972.** Water repellence in sandy soils of South-Western Australia: II. Some chemical characteristics of the hydrophobic skins. *Aust. J. soil. Res*, 10: 35-42.
- Robert, M. 1996.** *Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement*, Masson, pp. 241, Paris.
- Said-Pullicino D., Gigliotti, G., 2007.** Oxydative biodegradation of dissolved organic matter during composting. *Chemosphere*, 68: 1030-1040.
- Saint L., Daly P., Desvals I., Brinon I., Micoleau E., 2001 :** Institut Agronomique néoCalédonien, Programme Cultures Maraîchères et Horticoles, guide de la culture dupoivron en nouvelle-Calédonie.
- Schoeneau J., 2005.** Impacts of repeated manure additions on soil fertility. *Proceedings of the Soils and Crops*, University de Saskatchewan, Extension Press, Saskatoon, Pp. 95–100.
- Segbeaya K. N., Feuillade-Cathalifaud G., Baba G., Koledzi E. K., Pallier V., Tchangbedji G., Matejka G., 2012.** How the origin of fresh household waste affects its ability to be biodegraded: An assessment using basic tools and its application to the city of Kara in Togo. *Waste Manage.*, 32: 2511-2517.
- 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 soil borne pathogens. Cité par ITAB (2001). *Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001.*
- Shao Z. H., He P. J., Zhang D. Q., Shao L. M., 2009.** Characterization of water extractable organic matter during the biostabilization of municipal solid waste. *J. Hazard. Mater.* 164: 1191-1187.

- Skiredj A., Elattir H., ElFadl A., 2005 :** Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Département d'horticulture. Site Interna : www.legumes-fruits-maroc.com, 2005. Consulté le 30 mai 2007.
- Smeester. E., 1993-** Le compostage domestique : comment transformer vos déchets organiques en mine d'or pour le jardin. Ed : Versicolores INC, bibliothèque nationale du Québec. 44p.
- Some P.P., Hien E., Tozo K., Zombre G., Dianou D., 2014.** Effets de six composts sur les réponses physiologiques, biochimiques et agronomiques du niébé *Vigna unguiculata* L. Walp var. K VX. 61.1. Au déficit hydrique. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 8 (1) : 31-45.
- Soudi B., 2001.** Compostage des déchets ménagers et valorisation du compost : cas des petites et moyennes communes au Maroc, ed Actes, 104p.
- Soudi B., 2009.** Le compostage des déchets de culture sous serre et du fumier, (MADRPM/DERD Eds), 89p.
- Sterckeman T., 2008.** Origine et devenir des éléments en trace dans le système Sol-Plante. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 146p.
- Stevenson F.J., 1994.** Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. Ed Wiley & Sons, Inc., 350 P.
- Tejada M., Hernandez M. T., Garcia C., 2009.** Soil restoration using composted plant residues: effects on soil properties. *Soil Util. Res.*, 102: 109-117.
- Tejada M. and Gonzalez J.L., 2008.** Influence of two organic amendments on the soil physical properties, soil losses, sediments and runoff water quality. *Geoderma*, 145(3-4):325- 334.
- Thibault, 2020,** (<https://www.gerbeaud.com/reponses-experts/mon-compost-est-il-mur,1.html>).
- Tisdall J.M., 1991.** Fungal hyphae and structural stability of soil. *Aust. J. soil. Res.*, 729-743.
- Todorova T., Neykov S., and Todorova Y., 1997:** Evaluation of local pepper accessions (*capsicum annum* L) in sadovo, Bulgaria. *Plant genetic resources news letter*, N°111 :75-76.
- Toudert D.J., 1991 :** Etude agropédologique détaillée de l'atelier agricole et évaluation de la stabilité structurale, sous l'influence du couvert végétal et du port organique (fumier) Mémoire de fin d'étude INFSA, Mostaganem.
- Toundou O., 2010 :** Etude de l'effet fertilisant du sol par *Cassia occidentalis* L. utilisée sous forme de compost et de plante de couverture. Mémoire de DEA, Gestion de L'environnement, Université de Lomé, Faculté Des Sciences, 106 p.
- 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.
- Triboi E., 1990.** Model d'élaboration du poids de grain chez le blé tendre. *Agronomie*, 10: 191-200.
- tutempo.net 2020,** (<https://fr.tutempo.net/climat/ws-604570.html>).
- Tzortzakis N. G., Economakis C. D., 2008.** Impacts of the substrate medium on tomato yield and fruit quality in soilless cultivation. *Hort. Sci.*, 35 (2): 83-89.
- Valdez V.S., 1994 :** CultivodeAji, Edition : Centro d'Information de FDA.

- Vieira S. L., Penz J.A., Le-Boute E.M., Corteline J., 1992.** A nutritional evaluation of a high fiber sunflower meal. *J. Applied. Poult. Res.*, 1: 382-388.
- Walker A., Jurado-Exposito M., Bending G. D., Smith V.J.R., 2003.** Spatial variability in the degradation rate of isotoproturon in soil. *Environ. Pollut.* 111: 407-415.
- Wang W. X., Vinocur P., Altman A., 2003.** Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218: 1-4.
- Wierzchos J.C., Ciria A., Garcia-Gonzalez., 1992.** Changes in microstructure of soils following extraction of organically bonded metals and organic matter. *J. Soil. Sci.* 505-515.
- Wolkowski R., 2003.** Nitrogen management consideration for land-spreading municipal solid waste compost. *J. Envir. Qual.*, 32: 1844-1850.
- Wong J.W.C., Li G.X., Wong M.H., 1996.** The growth of *Brassicachinensis* in heavy metal contaminated sewage sludge compost from Hong Kong. *Bioresour. Technol.*, 58: 309-313.
- Zerrad W., Maataoui, B.S., Hilali, S., El-Antri, S., Hmyene, A., 2008.** Etude comparative des mécanismes biochimiques de résistance au stress hydrique de deux variétés de blé dur. *Lebanese Sci. J.*, 9 (2): 27-36.
- Zmora-Nahum S., Markovitch O., Tarchitzky J., Chen Y., 2005.** Dissolved Organic Carbon (DOC) as a parameter of compost maturity. *Soil Biol. Biochem.* 37: 2109-2116.
- Zuccooni F., Forte M., Monaco A., De Bertoldi M., 1981.** Biological evaluation of compost maturity. *Biocycle*, 22 (2) : 27-29. cument actif.