

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla



Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés

Thèse

Présentée par

Monsieur Abdelmadjid HABCHI

Pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT en sciences

Spécialité : Génie des Procédés

Thème

Étude des caractéristiques physico-chimiques et spectroscopiques (UV-visible et FT-IR) des composts à base de déchets des palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera L.*) de la commune d'Adrar, Algérie

Soutenue le 17 / 11 / 2021 devant les membres du jury composé de :

Mr : SEGNI Ladjel	Professeur	Université d'Ouargla	Président
Mr. KALLOUM Slimane	Professeur	Université d'Adrar	Rapporteur
Mr : BRADAI Lyès	Professeur	Université d'Ouargla	Co-Rapporteur
Mr : IDDOU Abdelkader	Professeur	Université d'Adrar	Examineur
Mme : BABAAMER Zohra	MCA	Université de Ghardaïa	Examinatrice
Mr : SELLOUM Djamel	MCA	Université d'Ouargla	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

ملخص

قد تشكل مخلفات نخيل التمر بعض المشاكل على البيئة نتيجة استعمالها اليومية المحدودة، ولاسيما في المجالات الزراعية كمصدر بيولوجي. تعتبر عملية التسميد من أكثر الأساليب كفاءة لاستغلال هذه النفايات وإزالة التلوث من البيئة. يهدف هذا البحث إلى تتبع تطور تهافت المادة العضوية لمخلفات نخيل التمر لمدة 90 يوماً. في هذا العمل، بالإضافة إلى خليط نفايات نخيل التمر التي أخذت كشاهد (100% ن ن ت)، قمنا بإعداد أربعة خلانات إنطلاقاً من خلط نفايات نخيل التمر (ن ن خ) مع نسب مختلفة من نبات *مديكاكو ساتيفا* ل، المسمى؛ 1د (80% ن ن ت + 20% مديكاكو ساتيفا ل)، 2د (70% ن ن ت + 30% مديكاكو ساتيفا ل)، 3د (60% ن ن ت + 40% مديكاكو ساتيفا ل)، و 4د (50% ن ن ت + 50% مديكاكو ساتيفا ل). تم تقييم عملية التسميد من خلال العوامل مثل؛ درجة الحرارة، درجة الحموضة، الناقلية الكهربائية (ن ك)، الكربون العضوي الكلي (ك ع ك)، إجمالي نيتروجين كجالدال (ا ن ك)، نسبة كربون/نيتروجين (ك/ن)، المادة الدبالية، التحليل الطيفي المرئي للأشعة فوق البنفسجية، والتحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن درجة حرارة نفايات نخيل التمر (ن ن ت) ارتفعت إلى 34.5 درجة مئوية ثم انخفضت لتستقر عند 21.5 درجة مئوية، بينما ارتفعت درجات حرارة المخاليط إلى 40.3 درجة مئوية، 40.8 درجة مئوية، 42.5 درجة مئوية و 45.7 درجة مئوية، ثم انخفضت لتستقر عند 22.7 درجة مئوية، 22.7 درجة مئوية، 21.5 درجة مئوية و 21.2 درجة مئوية لـ 1د، 2د، 3د، و 4د على التوالي. تميزت الأسمدة العضوية النهائية برائحة التربة الطبيعية واللون البني، ماعدا سماء نفايات النخيل (ن ن ت) الذي تميز باللون البني الفاتح. كانت نسبة (ك/ن) المسجلة النهائية 47.52 ل (ن ن ت)، 20.69 ل (1د)، 16.03 ل (2د)، 14.98 ل (3د)، و 13.82 ل (4د). بلغ فقدان الكربون العضوي 7.34% (ن ن ت)، 8.81% (1د)، 10.30% (2د)، 10.39% (3د)، و 10.46% (4د). تم تأكيد هذه النتائج من خلال تحليلات التحليل الطيفي للأشعة فوق البنفسجية المرئية و التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء والتي أظهرت أن نطاقات الامتصاص يمكن أن تتغير من خليط إلى آخر، كما أن شدة الامتصاص لهذه النطاقات يمكن أن تختلف في نفس السماد. من بين جميع المعلمات المدروسة، تعكس معاملات الخليط 4د أفضل نضج للسماد.

الكلمات المفتاحية: التسميد، تلوث البيئة، التحليل الطيفي للأشعة المرئية وفوق البنفسجية، التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء، مخلفات نخيل التمر.

Résumé

Les déchets de palmiers dattiers peuvent présenter des problèmes sur l'environnement dû à leurs utilisations quotidiennes limitées, et notamment dans les champs agricoles comme une source biologique. Le processus de compostage est considéré comme la technique la plus efficace pour exploiter ces déchets et pour éliminer la pollution de l'environnement. Cette recherche a visé de caractériser l'évolution de la matière organique lors du compostage de déchets des palmiers dattiers pendant 90 jours. Dans ce travail, en plus du mélange de déchets des palmiers dattiers qu'a pris comme un témoin (100 % DPD), nous avons préparé quatre mélanges à partir de mélanger des déchets des palmiers dattiers (DPD) avec différentes quantités de luzerne (*Medicago sativa* L), nommés ; C1 (80 % DPD + 20 % *Medicago sativa* L), C2 (70 % DPD + 30 % *Medicago sativa* L), C3 (60 % DPD + 40 % *Medicago sativa* L) et C4 (50 % DPD + 50 % *Medicago sativa* L). Le processus de compostage a évalué à travers les propriétés physico-chimiques telles que ; la température, le pH, la conductivité électrique (CE), le carbone organique total (COT), l'azote Kjeldahl total (TKN), le rapport C/N, la substance humique, la spectroscopie UV-visible et la spectroscopie infrarouge (FT-IR).

Les résultats obtenus ont montré que la température de déchets des palmiers dattiers (DPD) a augmenté à 34,5 °C puis a diminué pour se stabiliser à 21,5 °C, tandis que les températures des mélanges ont augmenté à 40,3 °C, 40,8 °C, 42,5 °C et 45,7 °C, puis ont diminué pour se stabiliser à 22,7 °C, 22,7 °C, 21,5 °C et 21,2 °C pour C1, C2, C3 et C4 respectivement. Les composts organiques finaux se distinguaient par l'odeur naturelle de sol et de couleur brune, sauf le compost de (DPD) qui a une couleur brun clair. Le rapport C/N final enregistré a été 47,52 pour le DPD, 20,69 pour C1, 16,03 pour C2, 14,98 pour C3, 13,82 pour C4. La perte en carbone organique a atteint 7,34 % (DPD), 8,81 % (C1), 10,30 % (C2), 10,39 % (C3), et 10,46 % (C4). Ces résultats sont confirmés par les analyses spectroscopies UV-visible et FT-IR qui ont montré que les bandes d'absorption peuvent se changer d'un mélange à l'autre, et que l'intensité d'absorption de ces bandes peut se varier dans le même compost. Parmi tous les paramètres étudiés, les paramètres du mélange C4 reflètent la meilleure maturité du compost.

Mots clés : Compostage, pollution de l'environnement, spectroscopie UV-vis, spectroscopie IR, déchets des palmiers dattiers.

Abstract

Date palm can present environmental problems on the environment due to its limits daily uses, especially in agricultural fields as a biological source. The composting process is considered as the most effective technique for exploiting these wastes and to eliminate environmental pollution. This research aims to characterize the evolution of organic matter during composting of date palm waste for 90 days. In this work, as well as to the mixture of date palm waste that took as a witness (100 % DPW), we prepared four mixtures from mixing date palm waste (DPW) with different amounts of alfalfa (*Medicago sativa* L), named; C1 (80 % DPW + 20 % *Medicago sativa* L), C2 (70 % DPW + 30 % *Medicago sativa* L), C3 (60 % DPW + 40 % *Medicago sativa* L) and C4 (50 % DPW + 50 % *Medicago sativa* L). The composting process evaluated through the parameters such as; temperature, pH, electrical conductivity (EC), total organic carbon (TKN), total Kjeldahl nitrogen (TKN), C/N ratio, humic substance, UV-visible spectroscopy and infrared spectroscopy (FT-IR).

The obtained results showed that the temperature of date palm waste (DPW) increased up to 34.5 °C and then decreased to stabilize at 21.5 °C, while the mixtures temperatures increased up to 40.3 °C, 40.8 °C, 42.5 °C and 45.7 °C, then decreased to stabilize at 22.7 °C, 22.7 °C, 21.5 °C and 21.2 °C for C1, C2, C3 and C4 respectively. The final organic composts distinguished by a natural soil odor and brown color, except for the DPW compost which had a light brown color. The final C/N ratio recorded was 47.52 for DPW, 20.69 for C1, 16.03 for C2, 14.98 for C3, 13.82 for C4. The loss in organic carbon reached 7.34 % (DPW), 8.81 % (C1), 10.30 % (C2), 10.39 % (C3), and 10.46 % (C4). These results were confirmed by UV-visible and FT-IR spectroscopy analyzes which showed different absorption bands from one mixture to another, as well as variable absorption ratios at the same compost level. Among all the studied parameters, the mixture C4 parameters reflected the best compost maturity.

Keywords : Composting, environment pollution, UV-vis spectroscopy, IR spectroscopy, date palm waste.

Remerciement

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de l'Énergie, Environnement et Système d'Information (LEESI), à Université d'Adrar.

Je remercie profondément mon Directeur de thèse Monsieur Slimane KALLOUM, Professeur à Université Ahmed Draia Adrar, pour la confiance et la disponibilité qu'il m'a accordées, pour faire avancer ce travail. Je souhaiterais ici lui témoigner ma sincère reconnaissance pour tous les conseils et les remarques objectives qu'il m'a apportées.

Je tiens également à remercier mon Co-encadrant Monsieur Lyès BRADAI, Professeur à Université Kasdi Merbah Ouargla pour ses orientations et ses remarques fructueuses.

Je suis très honneur que m'ont fait Monsieur Abdelkader IDDOU, Professeur à Université Ahmed Draia Adrar, Madame Zohra BABAAMER Maître de Conférences classe A à Université Ghardaïa, et Monsieur Djamel SELLOUM, Maître de Conférences classe A à Université Kasdi Merbah Ouargla, pour m'avoir honoré de leur présence en acceptant d'être examinateurs de ce travail et de le juger.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Ladjel SEGNI, Professeur à Université Kasdi Merbah Ouargla pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail en acceptant d'être président et de le juger.

Je ne pourrai terminer ces remerciements sans y associer ma famille et mes amis qui m'ont toujours apporté tout leur soutien et leur appui afin d'arriver au terme de ce travail.

Je veux de remercier les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail soit au niveau scientifique mais aussi personnel, et sans qui, mon travail n'aurait pu aboutir.

Liste des abréviations

Abs : Absorbance

AFNOR : Association Française de Normalisation

AF : Acide Fulvique

AH : Acide Humique

CE : Conductivité Électrique

CO : Carbone Organique

COT : Carbone Organique Total

C/N : Rapport Carbone/ Azote

DPD : Déchets des Palmiers Dattiers

FT-IR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

H : Humidité

Hu : Humaine

INPV : Institut National de la Protection des Végétaux

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

LRZA : Laboratoire de Recherche des Zones Arides

MO : Matière Organique

MOT : Matière Organique Totale

MS : Matière Sèche

NTK : Azote Total Kjeldahl

Q : Rapport d'absorbance

UV-vis : Spectroscopie Ultraviolet-Visible

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition géographique des cultivars de palmiers dattiers dans l'Algérie.....	9
Tableau 2: Répartition géographique de cultivars de palmiers dattiers dans la wilaya d'Adrar	10
Tableau 3: Classification des palmiers dattiers.....	12
Tableau 4: Les différentes utilisations des sous-produits des palmiers dattiers	21
Tableau 5: Rapport C/N de certains substrats.....	40
Tableau 6: Paramètres de stabilité et de maturité	50
Tableau 7: Classification de la luzerne	59
Tableau 8: Pourcentages des mélanges préparés	62
Tableau 9: Les principaux paramètres des substrats à composter	69
Tableau 10: Les rapports HA/FA de déchets des palmiers dattiers	85
Tableau 11: Les rapports AH/AF des mélanges C1- C4.....	89

Liste des figures

Figure 1: Répartition géographique des palmiers dattiers dans le monde	7
Figure 2: La forme géométrique de spathe	15
Figure 3: Schéma simplifié du processus de compostage	26
Figure 4: Courbe théorique d'évolution de la température au cours de compostage.....	27
Figure 5: Les quatre voies du processus d'humification.....	43
Figure 6: Structure simplifiée d'un acide humique.....	44
Figure 7: Structure simplifiée d'un acide fulvique	45
Figure 8: Représentation de l'Andain	60
Figure 9: L'évolution de température de déchets des palmiers dattiers (DPD).....	71
Figure 10: L'évolution de pH de déchets des palmiers dattiers (DPD).....	72
Figure 11: L'évolution de CE de déchets des palmiers dattiers (DPD).....	72
Figure 12: L'évolution d'humidité de déchets des palmiers dattiers (DPD).....	73
Figure 13: L'évolution de COT de déchets des palmiers dattiers (DPD).....	74
Figure 14: L'évolution de NKT de déchets des palmiers dattiers (DPD).....	74
Figure 15: L'évolution de rapport C/N de déchets des palmiers dattiers (DPD).....	75
Figure 16: L'évolution de la température en fonction des jours pendant le processus de compostage pour les mélanges C1-C4.....	77
Figure 17: L'évolution de pH en fonction des jours de compostage pour les mélanges C1-C4	78
Figure 18: L'évolution de conductivité électrique (CE) en fonction des jours de compostage pour les mélanges C1- C4.....	79
Figure 19: L'évolution d'humidité en fonction des jours de compostage pour les mélanges C1-C4.....	80
Figure 20: L'évolution de carbone organique total en fonction de temps du compostage pour les mélanges C1- C4	81
Figure 21: L'évolution de l'azote total en fonction des jours de compostage pour les mélanges C1-C4.....	82
Figure 22: L'évaluation de rapport C/N en fonction des jours de compostage pour les mélanges C1-C4.....	83
Figure 23: L'évolution de la substance humique (AH, AF) de déchets des palmiers dattiers (DPD).....	84

Figure 24: L'évolution de l'humification de la matière organique de déchets des palmiers dattiers par la spectroscopie UV-visible pendant le processus du compostage	86
Figure 25: Les rapports d'absorbance : $Q_{2/4}$ (A_{280}/A_{472} nm), $Q_{2/6}$ (A_{280}/A_{664} nm), $Q_{4/6}$ (A_{472}/A_{664} nm) d'une solution 0.5M NaOH pour le DPD.....	86
Figure 26: L'évolution de la matière organique de déchets des palmiers dattiers (DPD) par la spectroscopie IR pendant le processus du compostage.....	87
Figure 27: L'évolution de la substance humique (AH, AF) lors de compostage des mélanges C1-C4.....	89
Figure 28: L'évolution de l'humification de la matière des mélanges (C1, C2, C3, et C4) par la spectroscopie UV-visible pendant le processus du compostage.....	93
Figure 29: Les rapports d'absorbance : $Q_{2/4}$, $Q_{2/6}$, et $Q_{4/6}$ d'une solution 0.5M NaOH pour les mélanges C1- C4.....	95
Figure 30: L'évolution de la matière organique des mélanges C1-C4 par la spectroscopie IR pendant le processus du compostage	99
Figure 31: L'évolution de la température de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4.....	101
Figure 32: L'évolution de pH de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4.....	102
Figure 33: L'évolution de CE de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4.....	103
Figure 34: L'évolution d'humidité de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4.....	103
Figure 35: L'évolution de COT de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4.....	104
Figure 36: L'évolution de NKT de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4.....	105
Figure 37: L'évolution de rapport C/N de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4.....	105
Figure 38: L'évolution de substance humique de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4.....	106
Figure 39: L'évolution de l'humification de la matière organique de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4 par la spectroscopie UV-visible	108
Figure 40: Les rapports d'absorbance : $Q_{2/4}$, $Q_{2/6}$, et $Q_{4/6}$ d'une solution 0.5M NaOH pour les déchets de palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4	109

Figure 41: Comparaison de l'évolution de la matière organique de déchets de palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4 par la spectroscopie IR..... 110

Liste des photos

Photo 1: La description morphologique du palmier dattier.....	14
Photo 2: L'utilisation traditionnelle de bois du stipe	22
Photo 3: L'utilisation traditionnelle des palmes.....	23
Photo 4: Compostage en andain	34
Photo 5: Compostage en récipients clos.....	35
Photo 6: La taille du tas.....	36
Photo 7: Les déchets des palmiers dattiers (DPD)	59
Photo 8: La plante de luzerne (<i>Medicago sativa</i> L)	60
Photo 9: Les étapes de préparation des mélanges	61

Sommaire

ملخص.....	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Remerciement	iv
Liste des abréviations.....	v
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Liste des photos.....	x
Introduction générale.....	1
Partie I : Étude bibliographie	4
Chapitre I : Les palmiers dattiers et leurs déchets	5
I.1 Introduction	4
I.2 Historique et origine	4
I.3 Terminologies.....	6
I.4 Répartition géographique des palmiers dattiers dans le monde	6
I.5 Répartition géographique des palmiers dattiers en Algérie.....	7
I.6 Répartition géographique des palmiers dattiers dans la wilaya d'Adrar	9
I.7 La culture des palmiers dattiers	11
I.7.1 La multiplication par semis	11
I.7.2 La multiplication par rejet	11
I.7.3 La multiplication in vitro	11
I.8 Classification	12
I.9 Morphologie	12
I.9.1 Organes végétatifs	14
I.9.2 Organes floraux	15
I.9.3 Organes de fructification	16

I.9.4	Les racines (les radicaux)	17
I.10	Les raisons qui conduisent à la mort du palmier dattier	17
I.11	Les déchets des palmiers dattiers.....	18
I.11.1	Collecte.....	18
I.11.2	Taux de collecte.....	18
I.11.3	Mode de collecte et stockage des déchets	19
I.11.4	Moyens de transport	19
I.12	Gestion des déchets	20
I.13	Utilisation générales des sous-produits des palmiers dattiers	21
I.14	Transformation des déchets de dattes	21
I.15	Quelques usages techniques des déchets de palmiers dattiers.....	22
I.15.1	Usage des bois dans la construction	22
I.15.2	Usage des palmes en lutte contre la désertification	23
I.15.3	Transformation des déchets en aliment de bétail.....	23
I.16	Conclusion.....	23
Chapitre II : Généralités sur le compostage		25
II.1	Introduction	26
II.2	Définition du compostage.....	26
II.3	Les différentes phases du compostage.....	27
II.3.1	La phase mésophile	28
II.3.2	La phase thermophile.....	28
II.3.3	La phase de refroidissement	28
II.3.4	La phase de maturation.....	29
II.4	Définition du compost	29
II.5	Avantages du compost.....	29
II.5.1	L'amélioration de la structure et de la stabilité du sol.....	29
II.5.2	Effet sur les caractéristiques physico-chimiques du sol	30

II.5.3	La rétention d'eau.....	30
II.5.4	L'influence sur la chimie du sol	30
II.5.5	L'effet phytosanitaire	30
II.5.6	Exploitation des déchets et réduire l'effet de pollution.....	31
II.5.7	Amélioration de la croissance des végétaux et racines.....	31
II.6	Types de compostage.....	31
II.6.1	Compostage aérobie	31
II.6.2	Compostage anaérobie.....	32
II.7	Les déchets compostables.....	32
II.8	Le choix des intrants.....	33
II.9	Préparation du substrat	33
II.9.1	Broyage (Granulométrie).....	33
II.9.2	Lavage	34
II.9.3	Mise en composteur (andain)	34
II.10	Les différents procédés de compostage	35
II.10.1	Taille du compost	35
II.10.2	Ventilation	36
II.10.3	Retournement.....	36
II.11	Principaux paramètres du compostage	36
II.11.1	Température.....	37
II.11.2	Valeur du pH	37
II.11.3	Conductivité électrique (CE).....	38
II.11.4	Teneur en humidité.....	38
II.11.5	Teneur en matière organique totale et carbone organique totale.....	39
II.11.6	Teneur en azote Kjeldahl total.....	39
II.11.7	Rapport Carbone/Azote (C/N).....	39

II.12	L'évolution de la matière organique et de la substance humiques au cours du compostage.....	40
II.12.1	La perte de matière et la réduction du volume	41
II.12.2	La stabilisation de la matière organique	41
II.12.3	L'évaluation et la transformation de la matière organique au cours de compostage	41
II.12.4	La formation de substance humique.....	42
II.12.5	Structure des substances humiques.....	43
II.13	Méthodes spectroscopies	45
II.13.1	Spectroscopie ultraviolet visible (UV-vis)	45
II.13.2	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR).....	45
II.14	Microbiologie de compost.....	46
II.14.1	Les diversités micro-organismes du compost.....	46
II.14.2	Macro-organismes	47
II.14.3	Populations microbiennes impliquées dans les différentes phases du compostage	48
II.15	Qualité et maturité du compost.....	49
II.15.1	Définition de la qualité d'un compost	49
II.15.2	Maturité et stabilité du compost	49
II.16	Critères d'évaluation de la maturité et de stabilité d'un compost	50
II.16.1	Méthodes empiriques.....	50
II.16.2	Critères physiques.....	51
II.16.3	Critères chimiques	51
II.16.4	Critères spectroscopiques et analytiques	51
II.16.5	Critères biologiques.....	51
II.17	Valeurs agronomiques du compost (tests sur plantes).....	51
II.17.1	Valeur amendante du compost	51
II.17.2	Les tests du compost.....	52

II.17.3	Le compost et les engrais chimiques	53
II.18	Mise en forme du produit	53
II.18.1	La commercialisation	53
II.18.2	La financier et économique	54
II.18.3	Conditionnement et stockage.....	54
II.19	Conclusion	54
Partie II : Étude expérimentale.....		61
Chapitre III : Matériels et méthodes analytiques		62
III.1	Introduction	58
III.2	La zone d'étude	58
III.3	L'origine des substrats à composter	58
III.3.1	Les déchets des palmiers dattiers (source de carbone).....	59
III.3.2	La luzerne (source d'azote)	59
III.4	Protocole de compostage	60
III.4.1	Description de l'Andain.....	60
III.4.2	Préparation des mélanges	61
III.4.3	Procédé de compostage	62
III.5	Les paramètres d'analyses	62
III.5.1	Les paramètres du compostage.....	62
III.5.2	Teneur en substance humique.....	65
III.5.3	Les analyses spectroscopies.....	65
III.6	Conclusion	67
Chapitre IV : Résultats et discussions		68
IV.1	Introduction	69
IV.2	Les principaux paramètres des substrats à composter	69
IV.3	Évaluation des paramètres au cours du compostage	70
IV.3.1	Les paramètres de déchets de palmiers dattiers (DPD)	70

IV.3.2	Les paramètres des mélanges (C1, C2, C3, et C4) de déchets des palmiers dattiers (DPD)	75
IV.4	Caractérisation de la substance humique et de la matière organique par spectroscopies UV-visible et FTIR	83
IV.4.1	Caractérisation de la substance humique et de la matière organiques des déchets des palmiers dattiers (DPD)	83
IV.4.2	Caractérisation de la substance humique et de la matière organiques des mélanges C1-C4.....	88
IV.5	Étude comparative entre le compostage de déchets de palmiers dattiers (DPD) et leurs mélanges : C1-C4	101
IV.5.1	Étude comparative entre les paramètres de compostage	101
IV.5.2	Étude comparative entre la caractérisation de la substance humique et de la matière organique.....	106
IV.6	Conclusion.....	111
	Conclusion générale	113
	Références	118
	Annexe	132

Introduction générale

Les déchets solides ont toujours été l'un des problèmes auxquels le monde est confronté depuis l'antiquité. Mais, avec l'évolution démographique et l'accélération de l'urbanisation, les problèmes d'élimination, de traitement et en général de gestion des déchets solides dans les pays en développement (P.E.D) demeurent cruciaux. Plusieurs filières existent pour l'élimination de ces déchets, mais le choix doit être tributaire du coût d'installation, de la valeur ajoutée du produit qui en résulte et de l'impact que pourrait avoir la filière retenue sur l'environnement. L'incinération et la mise en décharge (appelée aussi stockage) s'avèrent une technique peu valorisante et sont légalement interdites dans de nombreux pays.

Les déchets des palmiers dattiers sont considérés parmi les déchets organiques solides les plus répandus dans la nature, et les moins exploités, où chaque saison, des millions de tonnes de déchets sont collectées, et s'éliminent généralement par le brûlage, un processus qui pose des problèmes liés à l'impact de gaz toxiques sur l'environnement tel que celui de la dioxine. Dans le monde arabe et au nord de l'Afrique, la culture des palmiers dattiers représente la plus grande part par rapport aux autres arbres. L'Algérie est l'un de ces pays qui a un nombre massif de palmiers dattiers estimé à environ 18 millions, où elle couvre une superficie plus de 169 mille hectares avec 378 mille tonnes de déchets [1]. Au Sahara algérien, la gestion des déchets de palmiers dattiers constitue un grand problème dû au large nombre de palmiers dattiers qui existent dans ces zones, où ces déchets sont devenus une préoccupation environnementale majeure.

Récemment, un grand intérêt a été donné aux nouvelles technologies qui traitent de l'aspect environnemental. De nos jours, les déchets des palmiers dattiers présentent un risque sur l'environnement dû à leurs utilisations limitées, où ils sont largement utilisés dans :

- Les cordes et les matériaux de rembourrage des meubles ont été fabriqués des fibres,
- Les paniers, les gabions, les chapeaux et les meubles légers tels que les chaises et les lits ont été fabriqués des feuilles,
- Les huiles ont été extraites de noyaux des dattes, et le reste utilisé comme alimentation animale, tandis que le tronc de palmier a été utilisé pour la toiture des maisons et comme un pilier [2].

En plus de ses propriétés physiques et chimiques limitées, le sol aride se caractérise par un appauvrissement en matières organiques dues à leur exposition à des conditions environnementales difficiles telles que l'érosion et la désertification entraînant une diminution

de la capacité agricole. Par conséquent, l'utilisation du compost comme un milieu nutritif est nécessaire pour améliorer l'état destructif de ce sol [2].

La dégradation des résidus agricoles dans le sol peut avoir des effets positifs et négatifs sur le rendement de production agricole et sur l'environnement [3]. Afin que la plante s'accroît et se développe naturellement et correctement, il doit y avoir une absorption adéquate aux éléments nutritifs en plus à la disponibilité d'une quantité significative d'eau et d'oxygène, ce qui nous permet d'utiliser les différents substrats organiques et inorganiques [4]. La décomposition de la matière organique par les micro-organismes est considérée comme une pierre angulaire de la conversion des déchets organiques au cours du processus de compostage [5].

Le compostage est l'opération de dégradation de la matière organique par l'intervention des micro-organismes en présence d'une humidité et d'une aération suffisantes. Le produit obtenu à la fin du processus est appelé compost organique [6, 7]. La première étape du compostage est appelée la phase mésophile, où l'activité de l'organisme mésophile atteint son niveau le plus élevé, conduisant à une élévation rapide de la température [8, 9]. La deuxième étape, appelée phase thermophile, est caractérisée par une diminution progressive de la température accompagnée par une diminution dans l'activité microbienne et une augmentation de la durée. La dernière étape du compostage est connue sous le nom de la phase de refroidissement et de maturation [10, 11], qui nous permet finalement d'obtenir un produit organique mûr.

Le compost obtenu après le processus de compostage doit être mature pour tenir en compte à la fois des risques de croissance des plantes et le problème de rendement réduit de production [12, 13]. Le compost immature peut conduire à l'échec de la croissance des plantes et donc à une diminution dans la production due aux fortes concentrations d'acides organiques instables qui interfèrent avec la fonction racinaire et conduisent ainsi à leur destruction ou à leur faiblesse [14, 15] ont observé que, quand le temps de compostage augmente, les rendements augmentent et la croissance des plantes s'améliore. Cette amélioration a été attribuée à la diminution de la concentration d'acides organiques dans le matériau, ce qui est indiqué par le rapport carbone/ azote plus faible.

L'objectif de ce travail consiste en l'étude de la faisabilité de l'utilisation de *Medicago sativa* L comme une source d'azote en suivant l'évolution des paramètres physico-chimiques

et spectroscopiques au cours d'un cycle de compostage de déchets des palmiers dattiers et la relie par la maturité du compost, et pour éliminer la pollution de l'environnement.

Le travail présenté dans cette thèse se divise en deux grandes parties : une partie bibliographique et une partie pratique avec une conclusion générale :

La première partie, qui se compose de deux chapitres, est destinée à l'étude bibliographique sur les palmiers dattiers, le traitement des problématiques des déchets et leurs éliminations, ainsi que les aspects liés au processus de compostage des déchets.

La deuxième partie, comprend également deux chapitres, où le premier chapitre est consacré aux matériaux utilisés dans la préparation du compost, ainsi qu'aux méthodes d'analyse utilisées dans le diagnostic de la qualité du compost, tandis que le deuxième chapitre comprend la discussion des résultats de l'ensemble des paramètres obtenus durant le processus de compostage.

Enfin, dans la conclusion générale nous présentons une synthèse sur l'ensemble des résultats trouvés.

Partie I : Étude bibliographie

Chapitre I : Les palmiers dattiers et leurs déchets

I.1 Introduction

Le palmier dattier est l'une des plus anciennes plantes ou arbre cultivés pour l'humanité dans les zones arides, où la culture du palmier s'est propagée aux nombreux pays depuis les temps anciens. Environ 62% de l'ensemble des palmiers dattiers dans le monde, et dont 100 millions de palmiers estimés se trouvent en Afrique du Nord et au Moyen-Orient [16]. Les dattes sont considérées comme une source alimentaire majeure depuis 6000 ans, elles jouent un rôle important dans l'économie, la société et l'environnement dans ces régions. Alors que ; les autres parties du palmier étaient utilisées à des objets différents, chaque partie du palmier dattier est utile [17].

I.2 Historique et origine

Les palmiers les plus anciens remontent au miocène. L'étude de l'origine géographique et historique du dattier cultivé nécessite de connaître la distribution naturelle de cette espèce au temps de sa domestication. L'histoire de l'origine des palmiers dattiers reste incertaine malgré l'importance économique et socioculturelle de cette espèce. Nombreuses des études indiquent que la région de la Mésopotamie (sud de l'Irak) est la première origine du palmier dattier vers 4500 ans avant J.C, où la culture de la datte en Irak a été établie dès 3000 avant JC, avec tout ça mais il reste toujours l'origine inconnue et peu claire [18].

La culture des dattes s'est répandue, où il est cultivé et exploité dans la péninsule arabique, en Afrique du Nord et au Moyen-Orient depuis plusieurs millénaires s'étend aux moins de 5000 ans. En Afrique, le palmier dattier n'est plus confiné au nord seulement, il a été propagé en XX^e siècle au reste de l'Afrique comme Madagascar, les Comores, l'archipel des Mascareignes, et l'Afrique du Sud. La même chose a été notée en Australie, il a été introduit pour la première fois au XIX^e siècle par des sucettes importées des États-Unis, d'Irak et d'Algérie, ce qui a permis le développement de grandes palmeraies dédiées à l'écotourisme [19].

La culture du palmier dattier en Égypte s'était propagée au milieu du deuxième millénaire avant JC. La propagation de l'islam s'accompagner avec l'expansion de la culture des dattes où elle a atteint à l'Espagne et le Pakistan. Les Espagnols ont été les premiers qui ont introduit les palmiers dattiers en Europe et en Amérique. En Nouvelle-Calédonie, la

culture des palmiers a été introduite par la déportation des Algériens lors de la lutte contre le colonialisme en 1871 [20]. En Ligurie (Italie) les palmiers dattiers ont été introduits au moyen âge à travers les rituels du judaïsme et chrétiens. Le palmier dattier peut atteindre un âge de 100 ans [21].

Les palmiers dattiers sont trouvés en abondance dans les régions arides et semi-arides au Monde. C'est une plante pérenne pollinisée à la main. Pour les peuples du Moyen-Orient, la culture des palmiers dattier a une influence très importante, où ils sont considérés comme une source multi usages ; elle fournit les dattes, consommées fraîches, sèches ou sous forme de produits dérivés (sirop, pâte, farine...) et le reste s'oriente au bétail. L'importance du palmier dattier pour les peuples du Moyen-Orient a été incarnée dans leur culture, où les palmiers dattiers sont décrits dans les anciennes tablettes assyriennes et babyloniennes, y compris le célèbre Code de Hammurabi, qui a contenu des lois relatives à la culture et aux ventes de dattes. Toutes les autres parties de l'arbre sont utilisées : le stipe comme matériau de construction, les feuilles pour couvrir les toits ou fabriquer des clôtures ainsi que pour la vannerie. Le dattier apparaît également essentiel dans les agro-systèmes oasiens en créant des conditions climatiques locales plus fraîches et humides, permettant ainsi la culture d'arbres fruitiers, de céréales ou de légumineuses [19].

La longue histoire de sa culture au Moyen-Orient et dans le nord de l'Afrique ayant probablement contribué à la distribution de cette espèce loin de son aire originelle, qui est caractérisée par les conditions climatiques et écologiques que la culture du dattier requiert, où il nécessite des températures élevées et une faible hygrométrie mais une humidité édaphique constante. Un effort conjoint de l'archéologie, de la paléoécologie et de la phylogéographie pourrait permettre d'identifier la distribution originelle du dattier ouvrant ainsi de nouvelles perspectives d'étude sur les origines géographiques du dattier [18].

Dans le passé, la culture des palmiers dattiers a été limitée dans les régions chaudes arides et semi-arides situées, entre 15 °N et 35 °N, sa culture est restée longtemps confinée dans ces régions désertiques. Aujourd'hui, la culture ne se limite plus à ces régions seulement, elle s'étend à certains pays des zones arides et semi-arides dans la période moderne, grâce au forage de puits artésiens et à l'aménagement de l'irrigation [18].

I.3 Terminologies

Les palmiers dattiers ont été nommés *Phoenix dactylifera* par Linné en 1734 et qui a présenté la description morphologique complète de cette espèce. *Phoenix dactylifera* L est le nom scientifique du palmier dattier, qui se compose de deux mots ; le premier mot est *Phoenix* qui signifie dattier chez les phéniciens et le deuxième mot est *dactylifera* est un terme grec (*dactulos*) signifiant doigt, faisant allusion à la forme du fruit. Une autre étude dit que les Grecs appelaient le *phénix* l'oiseau renaissant de ses cendres et qu'il était attribué au dattier en raison de sa capacité à survivre après avoir été partiellement brûlé tandis que "*dactylis*" ou "Datte" dérivée du mot "Daguel" ou "Dachel" origine hébraïque, signifiant doigts [22].

Phoenix dactylifera appartient à la famille des *Palmaceae* et à la sous-famille des *Coryphoideae*. La famille des *Palmacées* compte environ 235 genres et 4000 espèces. Le palmier est un élément essentiel dans l'écosystème oasien à cause de son adaptation aux conditions climatiques, de la valeur nutritionnelle de ses fruits et l'usage multiples de ses produits [23].

Les espèces *Phoenix* sont généralement proches morphologiquement les unes des autres, il est donc parfois difficile de les distinguer. Le genre *Phoenix* constitue un groupe complexe d'espèces qui peuvent s'hybrider entre elles. Deux nouvelles espèces récemment décrites sont *Phoenix iberica* et *Phoenix chevalieri* qui sont situées dans le sud de l'Espagne, à Barrancos (ruisseau intermittent) et les ravins du bassin de la rivière Chicamo (province de Murcie) et cultivées à Elche et Fortuna (province d'Alicante, Espagne) [24].

I.4 Répartition géographique des palmiers dattiers dans le monde

Le palmier dattier était connu dans la deuxième période de l'ère secondaire, à la fin du Jurassique. La culture du palmier se propage dans les déserts chauds de l'hémisphère nord entre les parallèles nord de 9° 18' (Cameroun) à 39° 44' (Elche en Espagne). Les palmiers sont un symbole de la présence humaine dans les régions désertiques chaudes. Les palmiers sont restés à une grande limite dans les régions arides du Moyen-Orient, puis se sont étendus à l'Afrique du Nord et à l'Asie en sud de l'Iran, entre les latitudes 35° Nord et 15° Sud. L'Espagne est considérée comme le seul pays européen qui s'intéresse largement par la culture du palmier et la production de dattes. En Amérique du Nord et exactement aux États-Unis

d'Amérique, la culture de dattes a été introduite au XVIII^e siècle, mais sa culture a commencé à environ de XX^e siècle lors de l'importation des variétés algériennes (Deglet-Nour) et des variétés irakiennes. En Amérique latine et en Australie, la culture du palmier dattier a connu un intérêt limité, où le Mexique et l'Argentine ont considéré comme des premiers pays producteurs aux dattes en Amérique latine. La culture du palmier dattier a propagé avant le XV^e siècle sur les côtes de l'Afrique orientale, aux XVII^e et XVIII^e siècles sur les îles Comores, Mascareignes et Madagascar, et enfin au XIX^e siècle en Afrique du Sud [25] (Fig.1).

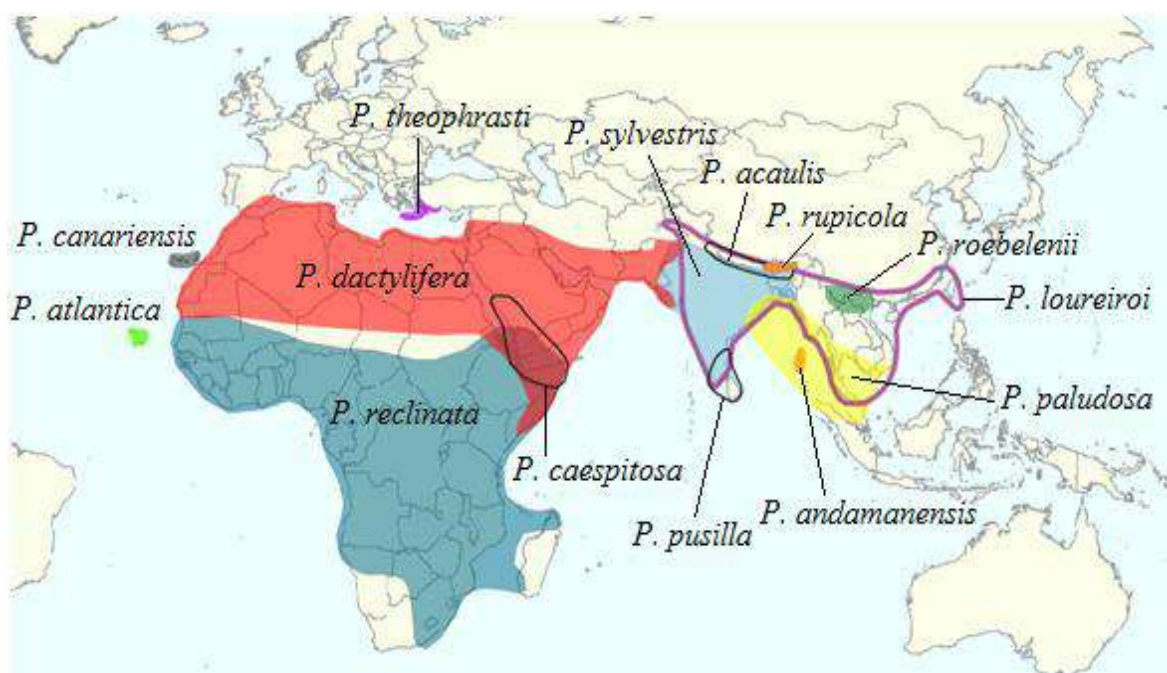


Figure 1: Répartition géographique des palmiers dattiers dans le monde [18]

Les zones situées entre le 24° et le 34° de latitude nord (Maroc, Algérie, Tunisie, Libye, Égypte, Irak, etc.) ont considéré les zones les plus favorables à la disponibilité des palmiers. Aux États-Unis d'Amérique, la culture du palmier s'étend du 33^e aux 35^e parallèles. Dans l'hémisphère sud (Australie, Amérique du Sud ...) il note qu'il n'existe que des petits espaces pour les palmiers [18].

I.5 Répartition géographique des palmiers dattiers en Algérie

L'Algérie est classée au premier rang dans le Maghreb et au sixième rang dans le monde avec une surface cultivée de 160 000 hectares et plus de deux millions de jardins et sa production annuelle moyenne de dattes est de 500 000 tonnes. Dans un passé lointain, en plus

du système des Foggaras, la culture du palmier dattier était une source essentielle de subsistance, où environ 4 500 000 palmiers étaient exploités. Avec le temps, les surfaces consacrées à la culture des palmiers ont augmenté (6 700 000 palmiers), les techniques de cultures ont amélioré et leurs utilisations sont développées. Par exemple, Deglet Nour est devenue le cultivar le plus répandu dans le pays et le plus exporté à l'étranger [26].

Pendant les années quatre-vingt, la plantation des palmiers dattiers à la wilaya de Tindouf, Béchar et Tamanrasset a expansée, où le nombre total des palmiers dattiers a dépassé 8 000 000 palmiers. Dans les années quatre-vingt-dix, le nombre a dépassé 9 000 000 grâce au soutien des investisseurs qui a permis la création de vastes zones à Biskra, El Oued, Guerrara, Adrar, et In Salah. À partir de l'année 2000, on a observé un rajeunissement de la palmeraie algérienne qui a atteint d'abord 13 500 000 palmiers sur 120 830 ha, pour arriver aujourd'hui à 17 000 000 des individus sur 160 000 ha. Le système goutte à goutte est généralisé, les études sur la diversité génétique et les approches biotechnologiques sont développées par les équipes de recherche de l'INRA, INPV et du LRZA [26].

La répartition géographique du palmier dattier en l'Algérie comprend toutes les zones situées sous l'Atlas saharien (la zone saharienne), où le climat est chaud et sec. La surface destinée à la plantation est estimée de 6000 hectares s'étendant de la frontière Marocaine à l'ouest jusqu'à la frontière tuniso-libyenne à l'est et depuis l'Atlas Saharien au nord jusqu'à Reggane (sud-ouest), Tamanrasset (centre) et Djanet (sud-est). Proche d'un millier de cultivars a été inventorié [26].

A l'Est saharien, la variété Deglet Nour représente environ 50% de la population des palmiers dattiers plantés, où elle a considéré le cultivar le plus exporté vers les pays européens et asiatiques.

Les palmiers dattiers représentent le pilier essentiel des écosystèmes dans les oasis du désert algérien, car ils contribuent grandement à fournir les diverses formes de vie indispensables pour le maintien et la survie des populations. Les palmiers dattiers jouent également un rôle protecteur contre le rayonnement solaire et les dégâts causés par l'ensablement [26].

Le tableau ci-dessous (Tab.1) représente la répartition géographique des cultivars de palmiers dattiers en l'Algérie.

Tableau 1: Répartition géographique des cultivars de palmiers dattiers dans l'Algérie [26]

Région	Nombre de cultivars	Cultivars les plus courants
<u>Quest</u>		
Atlas	70	Ghares, Asyan, Feggus
Saoura	80	Feggus, Hartan, Cherka, Hmira, Deglet Talmine
Adrar	480	Hmira, Tinnaser, Taqerbuch, Tgazza, Aghamu, Cheddakh, Aggaz, Jdir
<u>Centre</u>		
El-Ménia	70	Timjuhart, Ghars, Timedwel
M'Zab	140	Azerza, Ghars, Deglet Nour, Taddela
<u>Est</u>		
Ouargla	70	Ghars, Deglet Nour, Degla Beida
Oued Righ	130	Deglet Nour, Ghars, Degla Beida
Souf	70	Deglet Nour, Ghars, Degla Beida, Mich Degla
Zibans	140	Deglet Nour, Ghars, Degla Beida, Mich Degla
Aurès	220	Buzrur, Alig, Buhles, Mich Degla
Tassili	180	Tanghimen, Tabanist, Khadaji

I.6 Répartition géographique des palmiers dattiers dans la wilaya d'Adrar

La wilaya d'Adrar est considérée comme une zone agricole de première classe, car elle est riche en ressources naturelles qui lui ont permis de devenir un pionnier dans ce domaine. Ces ressources sont représentées dans le sol fertile et l'abondance d'eau, sans oublier le climat favorable qui permet la croissance d'un grand nombre de cultures, notamment les palmiers dattiers. La direction de l'agriculture de la wilaya d'Adrar confirme que la superficie totale destinée aux processus de plantation de palmiers dattiers est estimée à 2754 hectares, sachant que le nombre total de palmiers dans la wilaya est plus de trois millions et 900 mille palmiers. La culture du palmier dattier est répartie dans la wilaya d'Adrar entre ses trois régions, Gourara Touat et Tidikelt, dans des proportions variables ([Annexe 1](#)).

Le tableau ci-dessous ([Tab.2](#)) représente la répartition géographique de cultivars de palmiers dattiers dans la wilaya d'Adrar.

Tableau 2: Répartition géographique de cultivars de palmiers dattiers dans la wilaya d'Adrar
(Annexe 1)

Commune	Hmira	Tinacer	Aghamou	Teggaza	Takarbouche	Autres	Total
Adrar	136,100	11,520	40,060	7,140	9,400	14,880	219,100
Timmi	152.611	25.090	72.940	33.850	20.297	91.785	396.573
Bouda	46.295	12.020	28.820	18.005	9.850	20.000	134.990
Fenoughil	67.610	5.620	8.640	21.600	2.970	6.230	112.670
Tamest	64.240	7.020	1.500	24.510	6.840	30.190	134.300
Tamentit	46.660	17.150	880	12.960	4.290	3.780	85.720
Z. Kounta	74.490	12.940	7.640	55.070	4.750	33.300	188.190
Inzegmir	64.225	7.220	700	113.496	1.200	18.869	205.710
Reggane	115.660	37.460	10.000	98.480	9.240	17.130	287.970
Sali	143.730	44.750	-	131.650	11.020	27.167	358.317
Aoulef	4.990	6.720	-	43.950	1.920	28.210	85.790
Timokten	5.285	11.180	-	68.680	3.935	42.120	131.200
Tit	500	3.990	40	11.240	-	3.730	19.500
Akabli	1.050	2.485	35	14.920	1.250	8.830	28.570
Tsabit	72.885	18.645	3.845	8.197	2.135	20.590	126.297
Sbaa	44.310	13.000	2.075	4.610	1.120	12.830	77.945
Timimoun	146.909	50.440	-	-	7.600	56.000	260.949
Ouled said	39.680	9.500	-	6.140	2.440	19.050	76.810
Tinerkouk	58.550	46.550	410	4.050	13.350	11.350	134.260
K. Kaddour	19.327	10.120	-	1.240	1.550	7.840	40.177
Aougrout	135.830	61.720	-	3.690	10.770	12.690	224.700
Deldoul	68.520	24.760	2.420	3.390	6.360	13.820	119.270
Metarfa	43.339	52.970	7.630	8.430	6.175	15.340	133.884
Charouine	45.974	24.400	8.790	5.160	11.950	20.676	116.950
Talmine	65.860	17.580	1.340	1.360	17.970	61.340	165.450
Ouled aissa	24.910	23.540	200	-	25.940	38.918	113.508

I.7 La culture des palmiers dattiers

Le palmier dattier est l'une des plus anciennes plantes cultivées. Dans les zones entre le fleuve et le Nil ; la culture du palmier a commencé tôt, où les plus anciens documents écrits sur le palmier dattier ont été trouvés en Babylone qui remonte à 4000 ans avant J.C [27].

Il existe plusieurs méthodes pour multiplier les nombres de palmiers dans la nature, nous mentionnons par exemple les méthodes les plus courantes et les plus utilisées en nos jours :

I.7.1 La multiplication par semis

C'est une méthode de multiplication végétative bien connue par laquelle les palmiers se propagent en plantant les noyaux du fruit. Le palmier dattier est une plante dioïque, sa multiplication par le noyau peut ne pas être efficace et donne généralement des palmiers mâles, ce qui limite considérablement le produit fruitier. Cette méthode n'est pas bonne et n'est pas recommandée par les agriculteurs. Selon des statistiques précédentes menées par sur un groupe de graines de palmier plantées, environ de 50% d'elles sont des palmiers mâles [27].

I.7.2 La multiplication par rejet

C'est la méthode de multiplication végétative la plus répandue et la plus efficace, car elle permet de garder pleinement les caractéristiques de la plante mère en matière de genre et de qualité des fruits. Les semis sont séparés de la mère par une machine à main tranchante appelée « hache ». Le processus de séparation des semis effectuée avec toute prudence afin que la hache n'atteigne pas la pulpe des semis et par suite conduit à sa mort, pour cela le processus de séparation s'effectue par des personnes qualifiées. Il est préférable de séparer les semis de la mère à partir de l'âge de 2 ans ou plus, ou bien de poids de 15 kg ou plus [28].

I.7.3 La multiplication in vitro

La multiplication in vitro est également une autre méthode de multiplication végétative, qui doit respecter la conformité variétale des caractères végétatifs et productifs. Il existe trois types de multiplication in vitro :

- La prolifération par bourgeonnement axillaire, qui est depuis 1989, la seule méthode ayant prouvé la conformité des plants produits,
- La réversion des ébauches florales encore,
- L'embryogenèse somatique [27].

I.8 Classification

Le genre *Phoenix* comporte au moins douze espèces, dont la plus connue est *dactylifera* et ses fruits "dattes" sont un sujet d'un commerce international important [29]. L'espèce *dactylifera* L se distingue des autres espèces du même genre par un tronc long et grêle et par des feuilles glauques [30].

Le genre *Phoenix* appartient à la famille des *Areaceae* (anciennement, *Palmaceae*) comprend environ 2500 espèces [31] (Tab.3).

Tableau 3: Classification des palmiers dattiers [32]

Le classement	Le nom
Groupe	<i>Spadiciflores, Phoenocoides</i>
Ordre	<i>Palmales</i>
Famille	<i>Palmacées, Areaceae, Areacaceae (Palmaceae)</i>
Sous-famille	<i>Coryphoïdées, Coryphoideae</i>
Tribu	<i>Phoenicées, Phoenicea</i>
Genre	<i>Phoenix</i>
Espèce	<i>Phoenix dactylifera L</i>
Embranchement	<i>Phanérogames, Angiospermes</i>
Sous-embranchement	<i>Angiospermes</i>
Classe	<i>Monocotylédones</i>

I.9 Morphologie

Le palmier dattier est une plante sans branches, sans rameaux et très proches des herbes dont sa hauteur peut être comprise entre 15 et 25 m, avec un rayon de 20 à 40 cm. Le tronc est synthétisé à partir de fibres de cellulose qui peuvent être utilisées dans la fabrication de contreplaqué. Normalement la limite d'âge utile est moins de 100 ans et par conséquent la

taille ne sera pas au maximum plus de 2-15 m. Les fruits sont des drupes qui forment de longues grappes ou régimes [17].

L'arbre de palmier dattier est un plant monocotylédone de la famille des *Palmales* non ramifié à tronc monopodique, sa graine n'a qu'un cotylédon. Le stipe contient des faisceaux libéroligneux qui relient directement chaque racine à une palme bien déterminée composée avec une série de folioles de chaque côté d'un pétiole commun, provenant d'un point croissant sur le tronc [33].

En début de vie du palmier dattier, le cambium contribue de manière significative à accélérer la multiplication des cellules du tronc qui fait cette dernière de croissance en âge très jeune en donnant finalement la taille réelle de l'arbre. Le cambium disparaît à la fin, mais le palmier peut avoir des bourgeons terminaux ou des zones de croissance à le long du tronc. Les palmes (djerid) sont insérées dans le palmier sur le stipe sous forme d'hélices proches les uns des autres par une gaine pétiolaire bien développée (cornaf) enterrée dans un fibrillium (lif), à vie, leur pétiole (rachis) sont semi-cylindriques, épineux vers la base (chouque) et constamment dur [33].

Le palmier dattier est une plante dioïque et caractérisée par des fleurs réparties le long d'un axe sous la forme d'un escalier en branche. L'ensemble est trouvé à l'intérieur d'une gaine appelée : la spathe. Les fleurs mâles contiennent six étamines internes, tandis que les fleurs femelles contiennent l'ovaire, qui se compose généralement de trois carpelles libres, dont chacun d'eux comprend un ovule anatrope. Un seul ovule est fécondé par fleur et un seul carpelle se développe. Les fleurs mâles ont une odeur caractéristique rappelant un peu l'anis. Les fleurs femelles sont inodores [33] (Phot.1).

Le botaniste Linné a été le premier qui a signalé la description du palmier dattier, en 1753, attribue le nom botanique de *Phoenix dactylifera*. Par ailleurs, plusieurs scientifiques ont décrit la description morphologique de cette espèce [34, 30].

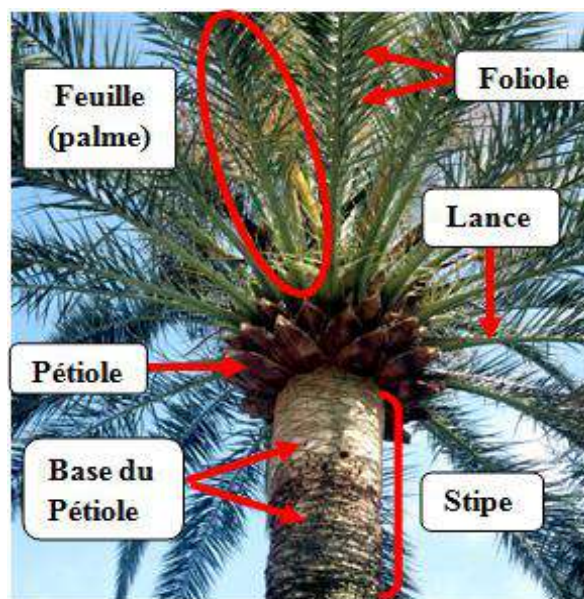


Photo 1: La description morphologique du palmier dattier

I.9.1 Organes végétatifs

I.9.1.1 Le stipe

Le stipe est considéré comme une colonne cylindrique, non ramifiée, de couleur marron brun, d'une hauteur peut atteindre plus de 30 mètres, de diamètre de 45 à 55 cm, et situer au-dessus de sa région basale avec une couche de taille variable selon les variétés et les espèces des palmiers, il peut également varier selon les conditions environnementales pour la même variété. Le stipe a une structure très spéciale et constituée de tissus disposés sous forme de parenchyme fibreux. Certains facteurs naturels, tels que les sécheresses et les vents, peuvent provoquer des distorsions sur le stipe en raison de la longueur excessive de certaines variétés [35].

Le stipe est recouvert par les bases des palmes qu'on appelle « cornaf ». Le stipe n'a pas d'écorce, il est recouvert à sa surface par la base des palmes coupées (cornafs) à cause de l'élagage saisonnier, et recouvertes leur tour par un fibrillium " lif " [36].

I.9.1.2 Les feuilles (palmes)

Les feuilles de palmier dattier sont appelées palmes (djerids), elles sont placées sur le stipe sous forme hélice par ce qu'on appelle « cornaf ». Les palmes ont une forme pennée très

proche les uns aux autres. La qualité et le nombre des palmes sont également variés d'un type à l'autre, où les meilleurs palmiers contiennent de 50 à 200 palmes [34].

Les feuilles sont toujours très longues et constituées de pétiole, épine, rachis et foliole. Les folioles sont dures et très pointues, elles sont disposées régulièrement en position oblique le long de rachis. Les folioles inférieures se transforment en épines, et plus les folioles sont proches des épines, plus elles sont longues et vice-versa. La longueur des palmes peut aller de 2 à 6 mètres, tandis que la longueur des folioles varie de 15 cm à 1 m avec une largeur de 1 à 6,5 cm [37].

I.9.2 Organes floraux

I.9.2.1 Les spathes ou inflorescences

Les organes de reproduction de palmier sont composés d'inflorescences mâles ou bien femelles portées par la spathe. Les inflorescences sont différentes selon le sexe et le cultivar. Elles se caractérisent par une couleur vert-jaunâtre et se composent de bourgeons développés à l'aisselle des palmes. Les inflorescences du dattier naissent du développement de bourgeons axillaires situés à l'aisselle des palmes de l'année précédente, dans la région coronaire du tronc. Le palmier mâle porte de 10 à 30 spadices tandis que la femelle porte de 6 à 20 spadices chaque année [34].

La forme géométrique de spathe (Fig.2) nous permet de connaître le sexe des inflorescences avant leur ouverture " s'il est mâle ou bien femelle ", où la spathe femelle est sous forme allongée, tandis que la spathe mâle est plus courte et plus renflée avec une légère dépression dans sa partie supérieure [34].

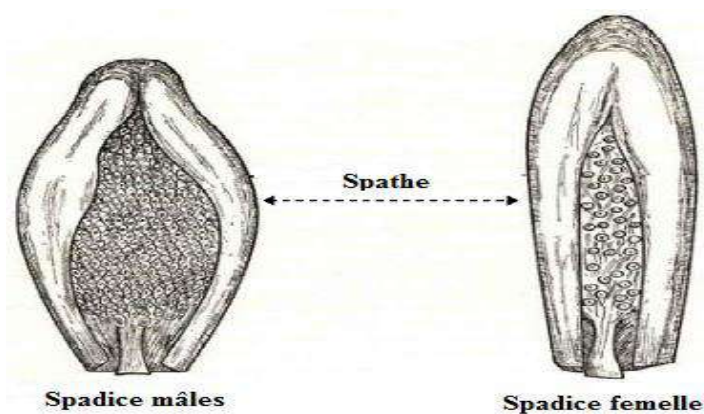


Figure 2: La forme géométrique de spathe [34]

I.9.2.2 Les fleurs

Les fleurs sont unisexuées (ou monosexuées), petites, et varient selon le sexe, le cultivar, ou la variété. Les fleurs sont portées par des pédicelles, ou des épillets qui sont à leur tour portés par un axe charnu, la hampe ou spadice. L'ensemble est enveloppé dans une grande bractée membraneuse close - la spathe - [1], on distingue :

- **Les fleurs femelles** sont globulaires, d'un diamètre de 3 à 4 mm. Elles sont constituées d'un calice court, de trois sépales soudés et d'une corolle, formée de trois pétales ovales et de six étamines avortées ou staminoïdes. Le gynécée comprend 3 carpelles indépendants à un seul ovule. La sortie des fleurs « Talâa » a lieu de la fin Janvier jusqu'au début Mai selon les variétés et l'année.
- **Les fleurs mâles** sont légèrement allongées et constituées d'un calice court composé de trois sépales soudés par leurs bases, et d'une corolle formée de trois pétales et de six étamines à déhiscence interne et trois pseudo-carpelles. Les fleurs mâles sont généralement, de couleur blanc crème, à odeur caractéristique de pâte de pain.

Les pieds mâles donnant le pollen et les pieds femelles produisant les fruits (les dattes). Au moment de la pollinisation, un seul ovule est fécondé, il se porte par des pédicelles rassemblés en épi composé. La spathe s'ouvre d'elle-même, ce qui, à son tour, évolue pour donner à maturité, le fruit appelé datte. Les autres ovules avortent et tombent après la pollinisation. Les fleurs du dattier sont, pratiquement sessiles, à pédoncule très court [34].

I.9.3 Organes de fructification

I.9.3.1 Le fruit « la datte ; Tmar »

Le fruit (la datte) du palmier dattier est une baie oblongue « Tmar en arabe », contenant une seule graine « noyau » et une pulpe sucrée. La datte est également prise la forme allongée, oblongue ou arrondie, ovoïde, parfois sphérique. Après fécondation et pendant la croissance, l'ovule se transforme de la taille d'un pois puis d'un fruit de raisin jusqu'à la taille normale " fruit de couleur verte et immature " [22].

Les dimensions et la couleur de la datte varient selon les variétés, où leurs dimensions vont de 2 à 8 cm de longueur et d'un poids de 2 à 60 grammes, quant à la couleur, elle se va

du blanc jaunâtre au noir en passant par les couleurs ambre, rouges, brunes plus ou moins foncées [22].

I.9.3.2 La graine

La graine est un noyau a un poids et un volume plus petit que la datte, avec une forme allongée [34].

I.9.4 Les racines (les radicaux)

Les palmiers ont trois types de racines, à savoir : la racine de respiration, de nutrition et d'absorption. Selon leurs profondeurs et leurs fonctions, ses performances peuvent varier d'un palmier à l'autre. Les racines ne se ramifient pas et n'ont relativement que des radicelles ; où le bulbe ou plateau racinaire est relativement volumineux [34].

I.10 Les raisons qui conduisent à la mort du palmier dattier

Au niveau national, le nombre de superficies destinées à la phoeniciculture a augmenté pour atteindre 170 000 hectares en 2008. Le nombre de palmiers dattiers a atteint 9 millions de palmiers en 2005 puis passe à 15 millions de palmiers, pour arriver en 2008 à environ de 16 millions de palmiers. Le palmier dattier en Algérie est affecté par les facteurs suivants, qui peuvent détruire cette composante essentielle de l'écosystème oasien.

- L'effet de l'érosion génétique causée par la maladie du bayoud, en particulier sur la vie de la variété Deglet Nour (en tant que la variété la plus sensible),

- L'étalement urbain dû à l'augmentation de la population dans les zones sahariennes, où la densité de population a quadruplé entre 1956 et 1999 à environ de 5 000 000,

- Les facteurs naturels tels que la désertification et la sécheresse, en plus de la salinisation du sol et de l'eau due à mauvaise gestion du drainage,

- Le vieillissement des palmiers dattier. Ce problème est résolu par la recréation des nouvelles zones agricoles [26].

I.11 Les déchets des palmiers dattiers

I.11.1 Collecte

La saison de culture départ toujours en mois d'octobre de chaque année. Avant de commencer dans le processus d'agriculture, les cultivateurs font une série de travaux qui commencent premièrement par le nettoyage total de la zone agricole de différents types de déchets, en plus de réparation et de purification du sol de restes de plantes précédentes et de mauvaises herbes. Ces travaux sont également accompagnés par le nettoyage des palmiers de tout ce qui obstrue le processus de labour, cet élagage des palmiers dattiers peut conduire à la fourniture de grandes quantités de déchets. L'élagage des palmiers dattiers se fait soit manuellement à l'aide d'un outil tranchant s'appelle " la faucille ", ou bien avec la tronçonneuse électrique. La faucille est un outil en fer avec des dents pointues, égales et régulièrement positionnées.

La taille propre au palmier dattier fait de son stipe comme un escalier pour arriver aux palmes et pétioles (kornaf) sèches qui sont loin du niveau humain, ainsi que pour couper les bouquets de fruits. Les fruits et les déchets de chaque palmier tombent près de lui, où les fruits sont collectés et placés dans des sacs, quant aux déchets tels que les palmes, cornaf, spathe, et ...etc., l'agriculteur les assemble sous forme de faisceaux moyens. Ensuite, les faisceaux moyens déplacent l'un après l'autre vers une zone dehors de la zone de labour.

I.11.2 Taux de collecte

La quantité de déchets obtenus après le processus d'élagage varie d'un palmier à l'autre, et cela est principalement dû à plusieurs facteurs, nous mentionnons d'eux ce qui est lié au palmier lui-même, par exemple ;

- **Le sexe** : nous constatons que la quantité des déchets que nous obtenons des palmiers mâles est plus grande que celle des palmiers femelles.
- **L'âge du palmier** : joue un rôle très important, où plus le palmier s'approche du vieillissement, plus il perd des déchets beaucoup plus que lorsqu'il est en début de sa vie ou en milieu de son âge.

- **L'emplacement du palmier dans la zone agriculture** : le lieu du palmier dattier par rapport au réservoir d'eau ou qui l'on appelle (Al-Majan) peut contribuer à réduire ou à augmenter le nombre des espèces sèches et par conséquent, la quantité de déchets, où on observe que les palmiers dattiers qui sont proches de la source d'eau produisent une quantité des déchets moins que les palmiers dattiers qui sont loin de la source d'eau ou qui sont dans l'extrémité de jardin.
- **Les maladies microbiennes** : le bayoud conduit à la destruction de nombreuses parties de palmiers dattiers, ce qui contribue également à l'obtention de grandes quantités de déchets.

Il existe d'autres facteurs en dehors de la gamme des palmiers, qui sont représentés dans des facteurs environnementaux tels que la sécheresse et la désertification. Ils peuvent contribuer grandement à la mort de nombreux palmiers et donc à l'émergence d'une quantité importante de déchets.

I.11.3 Mode de collecte et stockage des déchets

Après la taille, les déchets dispersés à côté des palmiers sont triés en parties sèches et en parties vertes (non sèches). Les déchets secs sont posés les uns sur les autres, et les déchets verts regroupent dans l'endroit spécial si elles sont nombreuses. Les déchets qu'ils soient secs ou non secs, sont placés dans des endroits ouverts exposés au soleil et à la ventilation.

I.11.4 Moyens de transport

À nos jours, les moyens de transport sont devenus disponibles par comparaison à ce qu'ils étaient dans le passé, où l'homme et l'animal ont considéré le seul moyen de transférer ou de transporter un déchet d'un endroit à un autre. Dans le passé, la personne a été dépend sur lui-même ou bien sur son animal pour transporter les déchets à leur emplacement, qu'il s'agisse leur transport a été fait à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone agriculture, ce que furent pris beaucoup de temps et d'efforts pour évacuer tous les déchets vers des grands espaces pour d'éviter l'endommager à cause de l'accumulation de plusieurs années.

L'exploitation extensive des déchets des palmiers dattiers, en plus de la disponibilité des moyens de transport modernes comme les camions et les tracteurs peuvent contribuer par une

grande forme dans l'élimination de déchets de manière positive qui conduit à fournir un environnement propre soit au niveau agricole, ou soit au niveau de la population dans les villages et les quartiers résidentiels.

I.12 Gestion des déchets

La gestion des déchets forme un défi social, écologique et économique majeur. Ce défi dépend de la qualité de vie, de la disponibilité des ressources naturelles et du développement global du pays. L'augmentation de la production de déchets au cours des prochaines décennies sans trouver des solutions efficaces invite plusieurs questions sur les meilleures méthodes de les traiter et de les gérer [38].

L'accumulation des déchets de palmiers dattiers provenant des cornaf, palmes, feuilles et racines constituent un grand fardeau chez les cultivateurs, car avec le temps l'accumulation de ces déchets va conduire à une pollution environnementale apparente, ce qui nous invite à trouver des solutions alternatives pour les exploiter d'un point de vue économique ou commerciale ; comme la fabrication de chaises, de tables et de lits avec des tailles différentes, ou d'un point de vue agricole ; comme des engrais.

Les déchets représentent une forme de pollution d'où la nécessité de protéger l'environnement. Jadis, les déchets de palmiers étaient éliminés principalement par enfouissement ou par incinération. Actuellement, les déchets ont le potentiel de recyclage le plus élevé.

Le recyclage permet de réduire l'impact néfaste de ces déchets sur l'environnement, en procédant à la collecte et le tri de ces déchets, qui constituent les premières étapes pour leurs recyclages, la gestion vise à minimiser les effets de ces déchets sur la santé humaine, l'environnement et l'environnement résidentiel. Ainsi, la mise en disposition des nouvelles sources de matériaux, permet de réduire le degré de consommation de la matière première et l'épuisement des ressources naturelles. Les déchets de palmiers sont considérés comme des déchets non toxiques et peuvent donc être utilisés par une grande partie de la société, notamment les agriculteurs.

I.13 Utilisation générales des sous-produits des palmiers dattiers

En plus de sa production de dattes à l'alimentation humaine, le palmier dattier offre aussi une large gamme de sous-produits (les déchets) pour l'exploitation par la population saharienne [39]. Les bénéfices des déchets de palmier dattier ne se sont pas seulement limités à ses citoyens, ils se sont également étendus dans la plupart des régions du monde. Différentes parties des déchets de palmier dattier ont été utilisées dans de nombreuses applications dans la vie quotidienne, comme les cordes et les paniers. Le stipe (la tige) du palmier est recouvert avec une maille faite de fibres simples. Habituellement, ces fibres créent un tapis tissé naturel de fibres croisées de différents diamètres. Traditionnellement, le tapis est retiré chaque année des arbres et nettoyé pour faire des cordes [21]. Le tableau ci-dessous (Tab.4) résume les différentes utilisations des nombreux sous-produits à base du palmier dattier.

Tableau 4: Les différentes utilisations des sous-produits des palmiers dattiers [21]

Organes végétatifs	Utilisations
Tronc (Stipe)	Utilisé dans l'ébénisterie traditionnelle, bois de chauffage et charpentes de bâtiments ; portes, ...
Palmes	Palmes sèche, utilisées comme clôtures, brises vent, dans la confection de couffins, de chapeau, etc., ils peuvent même servir en industrie de papier.
Régimes	Comme balais traditionnels et comme combustibles.
Lif	Pour la confection des semelles de sandales.
Sève (lagmi)	Boisson très recherchée par la population locale, représentant la sève qui s'écoule du stipe.

I.14 Transformation des déchets de dattes

Le palmer dattier possède deux types de dattes ; les dattes consommables et les dattes non consommables. Les dattes non consommables sont les dattes qui présentent des anomalies pour ne pas pouvoir être vendues comme des dattes consommables, elles peuvent employer à de nombreux usages.

- La production de vinaigre, d'alcool et de levures, par fermentation microbiologique,
- Production de la farine de dattes utilisées dans la panification et les gâteaux,

- Production de sirop de datte, par extraction, utilisé comme sucrerie [38].

Un mauvais stockage des dattes peut les faire impropres à la consommation, et les utiliser enfin comme aliment pour animaux. Parfois, les noyaux servent au bétail directement, mais, plus souvent, ils les broient et les mélangent avec d'autres aliments.

Les déchets des dattes constituent au moins en Algérie, un apport important d'aliments du bétail, surtout pour combler les périodes de rupture d'approvisionnement [38].

I.15 Quelques usages techniques des déchets de palmiers dattiers

I.15.1 Usage des bois dans la construction

Les troncs de palmiers à la fin de sa vie ou s'il est abattu peuvent servir de bois de construction, comme poutres ou comme bois de toiture. Les bases des rachis foliaires ou le rachis même sont généralement joints pour couvrir la toiture et permettre la transition entre deux stipes. Le bois est traité par son trempage plusieurs jours dans l'eau (au moins une semaine) et cela a considéré un traitement efficace contre les insectes foreurs qui peuvent se cacher sous forme d'œufs ou larves dans le bois (Phot.2) [38].

Le bois du stipe et les bases du rachis foliaires sont également utilisés comme bois de chauffe pour les boulangeries et les Hammams mais également dans les ménages comme bois de cuisson [38].



Photo 2: L'utilisation traditionnelle de bois du stipe [38]

I.15.2 Usage des palmes en lutte contre la désertification

La désertification est un phénomène très dangereux dans les régions sahariennes. Rien qu'en Algérie, au moins de 40 millions d'hectare est menacé par la désertification, selon les chiffres de la direction générale des forêts.

Les palmes sont utilisées en lutte contre la désertification comme brise vents pour permettre la régénération de la végétation sur les dunes stabilisées. L'usage de palmes en lutte contre la désertification est un usage peut consommer beaucoup de tonnes de déchets des palmes sèches (Phot.3) [38].



Photo 3: L'utilisation traditionnelle des palmes [38]

I.15.3 Transformation des déchets en aliment de bétail

La méthode du traitement consiste à ramasser les palmes sèches de l'année ainsi que le bois de taille ou même des branches cassées et les broyer à l'aide d'un broyeur habituel comme celui utilisé actuellement pour la fabrication du compost. Ensuite, ces déchets broyés sont traités par une solution d'urée sous forme de pulvérisation liquide et les tous sont mis sous couverture en plastique, et on laisse pendant une durée de 3 à 6 semaines (en fonction de la température ambiante extérieure) [38].

I.16 Conclusion

Au cours des dernières années, les palmiers dattiers ont joué comme une source d'énergie carbonique alternative, où les fibres naturelles ont présenté dans de nombreux secteurs industriels et leurs applications se multiplient de jour en jour dans l'ameublement, la construction, etc. [40].

Le bois a également joué un rôle important dans l'ingénierie. Mais récemment, la pression sur l'environnement a augmenté en raison de l'énorme quantité de restes de ces palmiers, ce qui conduit à trouver d'autres solutions alternatives aux matériaux ligneux [16]. Ces déchets sont souvent laissés sur les terres agricoles où ils se brûlent, ce qui peut poser un problème environnemental et sanitaire.

Chapitre II : Généralités sur le compostage

II.1 Introduction

La technique du compostage est considérée comme prometteuse, car elle permet non seulement de ramener la matière organique, mais elle permet aussi de diminuer les risques de pollution environnementale liés à l'accumulation de ces déchets. L'enjeu principal de cette technique est la transformation de substances initiales en produits stables et humifiés, renfermant une source nutritionnelle nécessaire à la croissance des plantes et la stimulation du sol [41]. Les déchets, tels que les résidus de culture, les déchets animaux, les restes alimentaires, certains déchets urbains et les déchets industriels appropriés peuvent être appliqués au sol en tant que fertilisant, une fois le processus de compostage terminé [42]. Le compostage est une technique proposée afin de valoriser les déchets organiques des palmiers dattiers dans les zones sahariennes de l'Algérie.

II.2 Définition du compostage

Le compostage est un processus naturel de dégradation ou de transformation biologique des déchets organique dans des conditions bien définies [42]. Le compostage est qualifié comme un procédé biologique par l'intervention de populations microbiennes diversifiées évoluant en milieu aérobie [43] (Fig.3). Différentes micro-organismes, qui sont déjà présents dans tous les substrats destinés à être compostés, se réussissent lors du compostage. Ils sont constitués majoritairement de Bactéries, d'Actinomycètes, de Moisissures (Mycètes), de Protozoaires ou d'Algues [44, 45].

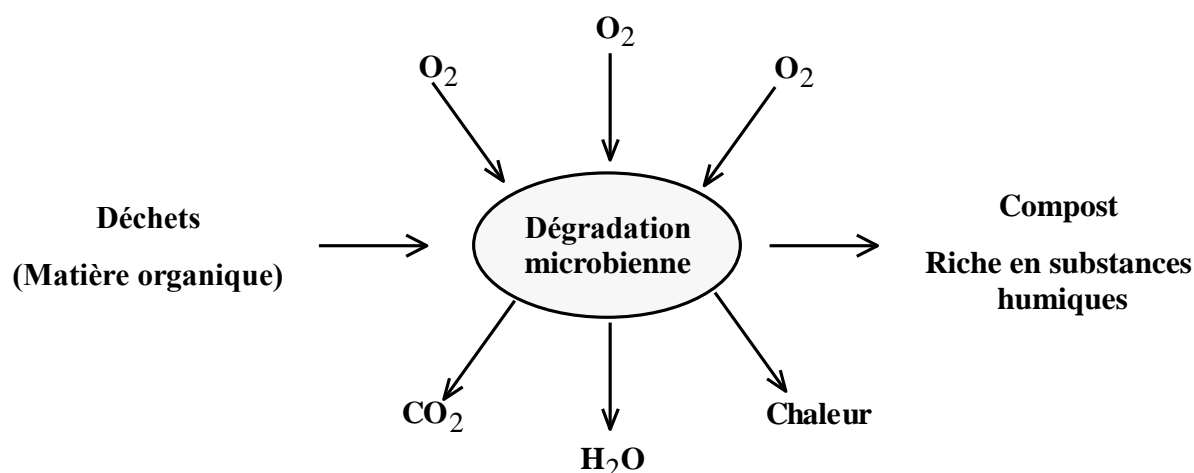


Figure 3: Schéma simplifié du processus de compostage

Les mauvaises odeurs émises pendant le processus du compostage sont fortement réduites car les composés organiques qui restent après le processus sont relativement stables avec de faibles taux de décomposition [46].

Biochimiquement, le compostage est un processus dans lequel différentes réactions se produisent parallèlement et consécutivement en présence des enzymes. Les enzymes permettent la biodégradation de macromolécules facilement décomposables par des réactions de dépolymérisations et d'oxydations [44, 47, 48].

II.3 Les différentes phases du compostage

Le processus de compostage se réalise en deux phases essentielles ; la première est la fermentation, qui est 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. Les produits formés au cours du compostage sont essentiellement le dioxyde de carbone (CO_2), de la vapeur d'eau et la matière organique dégradée riche en composés humiques (le compost) (Fig.4) [49].

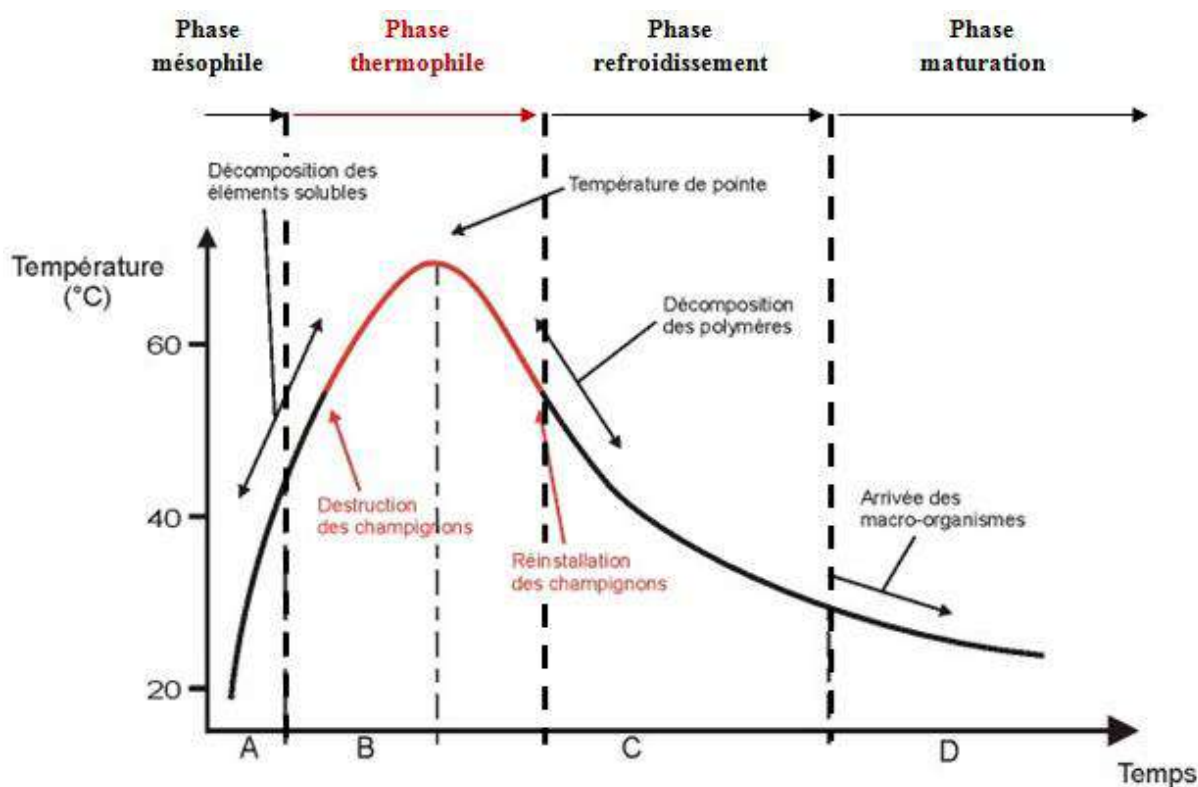


Figure 4: Courbe théorique d'évolution de la température au cours de compostage [49]

La biodégradation des déchets est accompagnée par la production de chaleur entraînant une élévation de la température [50]. La courbe d'évolution théorique de la température au cours du compostage permet de distinguer les différentes phases liées à l'activité biologique des différentes populations microbiennes [51, 52, 53, 54].

II.3.1 La phase mésophile

Est la phase initiale de décomposition. C'est l'étape lente du processus, où durant les premiers jours, la matière organique fraîche est facilement et rapidement dégradée par les microorganismes qui colonisent le milieu. Cette forte activité microbienne engendre une hausse de la température proche de 40°C, un dégagement de dioxyde de carbone (CO₂) et une consommation de dioxygène (O₂) importants [55]. Au cours de cette phase, la production d'acides organiques entraîne une diminution du pH [56].

II.3.2 La phase thermophile

La matière organique est fortement dégradée et une part importante de l'eau est évaporée [55]. Dans cette phase, les réactions d'oxydation se produisent ensuite et seulement les microorganismes thermorésistants (essentiellement des bactéries) peuvent survivre à ces hautes températures et permettre la dégradation des polymères [56].

Les phases mésophile et thermophile sont des phases de dégradation des substances organiques et sont regroupées sous le nom de fermentation aérobie, elles correspondent à une étape de dégradation intensive de la matière organique [57, 58, 59, 60].

II.3.3 La phase de refroidissement

Se produit après la diminution de la dégradation des matières organiques facilement biodégradables. Cette phase est marquée par un pH qui se stabilise et prend fin au retour à la température ambiante. Les micro-organismes dégradent les constituants non dégradés en phase thermophile. Le ralentissement de l'activité biologique est marqué par la diminution de la quantité de matières organiques biodisponibles [55, 56].

II.3.4 La phase de maturation

Est la dernière phase de dégradation de matière organique, c.-à-d. la phase de l'obtention d'un compost mature. Les processus d'humification sont dominés et les composés résistants sont également lentement dégradés [55]. La stabilisation du compost se fait au cours de la phase de maturation, formation de complexes organo-humiques, stabilisation de la matière organique, transformation des éléments [49].

II.4 Définition du compost

Le compost est un produit contient des nutriments incluant le carbone, l'azote, le phosphore et les oligo-éléments essentiels [46] pour améliorer les propriétés biologiques et physico-chimiques du sol. L'ajout du compost au sol lui permet d'acquérir une résistance contre la sécheresse, les maladies et la toxicité, en améliorant par la suite ses propriétés physico-chimiques et biologiques [42]. La valeur du contenu nutritionnel du compost est liée généralement à la qualité des substrats organiques de départ. Les éléments fertilisants sont mieux incorporés dans le complexe humique et sont progressivement mis à la disposition de la plante par décomposition biologique de la matière organique, de sorte qu'ils sont moins susceptibles de s'infiltrer dans la nappe phréatique. Grâce à l'obtention d'un compost mature riche en substances humiques très polymérisées [61] et en plus de ses caractéristiques chimiques, le compost peut assurer en même temps la fertilité et l'équilibre du sol [62]. Le compost combat efficacement le lessivage des éléments fertilisants et l'érosion du sol en restaurant la structure du sol grâce à sa composition en humus qui lui confère la fonction d'amendement organique et d'engrais minéraux [63, 64].

II.5 Avantages du compost

II.5.1 L'amélioration de la structure et de la stabilité du sol

Les différents éléments minéraux présents dans le sol s'associent avec la matière organique de l'humus et les micro-organismes pour former sous l'action stabilisatrice du calcium, le complexe argilo-humique. Le complexe argilo-humique est un véritable réservoir d'éléments nutritifs : Ca^{2+} , K^+ , H^+ , Na^+ ... etc. La concentration des fertilisants permet de réduire les carences nutritionnelles chez certains végétaux [41]. La formation d'agrégats

stables rend ainsi le sol plus résistant à l'influence éolienne et hydrique, par conséquent, moins soumis à l'érosion [49].

II.5.2 Effet sur les caractéristiques physico-chimiques du sol

La matière organique du compost améliore les propriétés du sol et augmente son pouvoir tampon, tandis que le compost en se minéralisant fournit progressivement les nutriments essentiels à la plante [65]. Le compost est également conduit à l'augmentation de la conductivité hydrique, diminution de la densité du sol [66], et la lutte contre la dégradation de la surface du sol [67]. L'ajout de compost mature au sol modifie l'acidité du sol et réduit ainsi les risques d'exportation des minéraux vers la plante [68].

II.5.3 La rétention d'eau

L'utilisation du compost possède d'autres propriétés comme ; la disponibilité de l'eau pour les végétaux, l'augmentation de la capacité de rétention en eau par le sol minéral, et l'amélioration des échanges gazeux [41]. La quantité d'eau est proportionnelle avec le taux d'humus, où 0,2 % d'humus correspond 0,5 % quantité d'eau disponible pour la plante et 1% dans la porosité du sol. L'utilisation du compost améliore également l'aération du sol et le développement de l'activité biologique [69].

II.5.4 L'influence sur la chimie du sol

la substance humique et la basicité du compost sont considérées magnifiques contre l'acidification et la stabilisation chimiquement du sol [49].

II.5.5 L'effet phytosanitaire

D'une manière générale, le compost contient beaucoup de substances qui donnent plus de vigueur aux plantes et même, il augmente leur résistance vis-à-vis de certains pathogènes [49, 70].

II.5.6 Exploitation des déchets et réduire l'effet de pollution

- **Écotecnologie** : le procédé de compostage permet de réduire les masses et les volumes de déchets.
- **Biotechnologique** : le procédé de compostage utilise les différentes potentialités microbiennes pour transformer les déchets organiques en un compost stable et mature. Les mauvaises odeurs émises au cours du procédé de compostage reviennent généralement à la transformation de l'azote ammoniacal en azote organique par les micro-organismes [41].

II.5.7 Amélioration de la croissance des végétaux et racines

L'ajout de compost au sol améliore la croissance des plantes et augmente le rendement des cultures. Le compost ajoute non seulement de la matière organique au sol, mais aussi des éléments fertilisants tels que : N, P, K⁺, Ca²⁺, et des oligo-éléments tels que ; le fer, le manganèse, le cuivre, le zinc, et le bore indispensables à la croissance des plantes [65].

II.6 Types de compostage

Selon la nature du processus de décomposition des substances d'origine, le compostage peut être divisé en deux catégories : compostage aérobie et anaérobie [42].

II.6.1 Compostage aérobie

Le compostage aérobie a lieu en présence d'une appropriée quantité d'oxygène. Les micro-organismes aérobies décomposent, au cours de processus, la matière organique produisant le gaz carbonique (CO₂), l'ammoniac NH₃, l'eau, la chaleur et l'humus qui donne finalement un produit organique relativement stable. La dégradation aérobie de la matière organique passe par une succession de transformations intermédiaires aux composés organiques comme certains acides organiques, ceux-ci sont ensuite décomposés par des micro-organismes aérobies. La chaleur générée accélère la décomposition des protéines, des graisses et des sucres complexes tels que ; la cellulose et l'hémicellulose, réduit la durée du processus, et détruit de nombreux micro-organismes qui sont des pathogènes pour les humains ou les plantes ainsi que les graines d'adventices. Bien que le compost aérobie

manque de certains éléments nutritifs, le compostage aérobie est considéré comme plus efficace et bénéfique que le compostage anaérobie pour la production agricole [42].

II.6.2 Compostage anaérobie

Dans un compostage anaérobie, la décomposition de matière organique se fait en absence d'oxygène ou en présence d'une quantité limitée. Dans ce processus, les microorganismes anaérobies sont le plus dominants et dégradent la matière organique aux composés intermédiaires comme le méthane, les acides organiques, le sulfure d'hydrogène, et d'autres substances. Ces composés, en l'absence d'oxygène, s'accumulent et donc ils ne sont pas métabolisés. Les grands nombres des composés formés au cours du compostage anaérobie ont des odeurs plus fortes que dans le cas aérobie, et certains d'entre eux présentent une phytotoxicité. Le compostage anaérobie est un processus s'effectuant à basse température, les graines d'adventices et les pathogènes ne sont pas affectées, et la perte limitée d'éléments nutritifs au cours du processus. Le processus anaérobie nécessite des jours de compostage beaucoup plus que le compostage aérobie [42].

II.7 Les déchets compostables

Les méthodes de compostage utilisées et les conditions d'obtention du compost sont variées dues aux origines des matières initiales à composter [71]. Surtout dans l'agriculture où le compost a une valeur agronomique très importante [51].

- **Les déchets verts** : comprennent tous les résidus d'arbres, de palmiers et de plantes résultent de l'entretien des vergers et jardins [72].
- **Les boues de station d'épuration** : proviennent du traitement des eaux usées domestiques ou industrielles. Les boues de station d'épuration contiennent une teneur d'humidité très élevé, ce qui nécessite de les mélanger avec un agent structurel (déchets verts, sciure de bois) pour être transformé en compost [51].
- **Les déchets ménagers** : Les déchets ménagers sont les déchets issus des activités ménagères de la maison, qui contiennent un pourcentage suffisant de matière organique, telle que ; restes de cuisine, déchets verts, produits alimentaires non consommés, épiluchures des légumes et fruits, carton ... etc. [72].

II.8 Le choix des intrants

La biodégradation du substrat est fortement liée à la nature des intrants qui le composent. Les intrants sont les différentes matières premières nécessaires au bon déroulement des activités bactériennes au cours de la biodégradation [73, 74].

Le rapport C / N est un indicateur qui permet de juger le degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire de suivre sa capacité à se décomposer. Il est donc généralement admis que, plus le rapport C/N du produit est faible, plus sa décomposition est rapide et bonne. Et donc : [75, 76, 77].

- $C/N < 15$: production d'azote (NH_3), la vitesse de décomposition s'accroît ; elle est à son maximum pour un rapport $C/N = 10$,
- $15 < C/N < 30$: besoin une source d'azote pour permettre une bonne décomposition de la matière organique,
- $C/N > 30$: pas assez d'azote pour permettre la décomposition du carbone. La minéralisation est lente.

Pour obtenir une bonne dissociation et un rapport C/N optimal en fin de processus du compostage, il faut choisir en début de processus les meilleures proportions des intrants.

II.9 Préparation du substrat

La qualité du compost obtenu est principalement liée à la qualité des matériaux organiques à composter et leur état physique.

II.9.1 Broyage (Granulométrie)

L'objectif principal du broyage est de réduire le volume de déchets de base pour donner aux micro-organismes un large champ d'action possible. Cette étape contribue à accélérer le processus de biodégradation et par suite diminue la durée du traitement [49]. Si la granulométrie est trop fine, l'espace créé entre les particules est donc étroit et ne permet pas de passer suffisamment d'oxygène « réduit et diminue la circulation de l'air », si la granulométrie est trop élevée, donc l'air passe librement, le compost s'assèche, et la montée en température se réalisera difficilement. Plus la surface spécifique du substrat est élevée, plus

la zone de contact avec les micro-organismes est étendue et meilleure pour la fermentation aérobie. Au cours du processus de compostage, la granulométrie initiale du substrat évolue par la fragmentation des grosses molécules vers des petites molécules (ou bien éléments fins) [42].

II.9.2 Lavage

Pour se débarrasser de la saleté déposée sur les déchets, il faut d'abord les couper et les laver. Cette deuxième étape de la préparation des déchets préparés pour le compostage est mise en œuvre en plaçant les déchets dans des bassins d'eau pendant une durée allant d'une semaine à dix jours.

II.9.3 Mise en composteur (andain)

Le placement des déchets à l'intérieur du composteur (l'andain) est considéré comme la dernière étape de la préparation des déchets. Après la filtration des déchets de bassins d'eau, ils sont mélangés avec des sources azotées puis placés régulièrement et de manière homogène à l'intérieur de l'andain.

- **Compostage en andains** : L'andain est une construction simple dirigée au compostage des déchets, dans l'andain les déchets sont placés et rangés de façon uniforme et sont retournés périodiquement. L'andain peut prendre plusieurs formes selon la conception du constructeur et le système de compostage choisi, où ils possible être sous forme d'andain arrondi, triangulaire, trapézoïdal ...etc. [42] (Phot.4).



Photo 4: Compostage en andain

- **Compostage en récipients clos :** Le compostage en récipient clos est l'ensemble de méthodes qui confinent les matières à composter dans un container ou un récipient (Phot.5). Cette méthode est basée sur une aération forcée et un retournement mécanique pour accélérer le processus de compostage [42].



Photo 5: Compostage en récipients clos

II.10 Les différents procédés de compostage

Le compost est un ensemble de particules solides qui comprennent des vides et d'interstices de différentes tailles, qui sont généralement remplies d'air et/ou d'eau [78].

II.10.1 Taille du compost

La taille du tas est un caractère important au processus du compostage. Quand le volume du tas est trop grand, des zones anaérobies peuvent se former à proximité du centre et en bas du tas, ce qui ralentit la dégradation aérobie de matière organique dans ces zones. Contrairement aux tas qui ont un volume trop petit, des zones anaérobies sont négligeables, perdent rapidement la chaleur et ne vont pas atteindre une température suffisamment élevée pour permettre l'évaporation de l'eau et l'élimination des pathogènes et des graines d'adventices [42].

La porosité est un paramètre physique constitue la forme du tas. Plus le tas est poreux, donc cette porosité permet de créer des espaces intermoléculaires et par suite augmente le volume total de tas et le poids. Le climat est aussi un facteur à prendre en compte, où dans les climats froids les tas de grandes dimensions sont appropriés afin de minimiser les pertes de chaleur, cependant, dans les climats plus chauds, ces tas peuvent surchauffer [42] (Phot.6).



Photo 6: La taille du tas

II.10.2 Ventilation

La possibilité de ventiler est visée sur l'optimisation de taille du tas. Les méthodes de ventilation sont variées selon le processus du compostage, où la méthode la plus simple est de faire des trous dans le tas à plusieurs endroits. L'aération est permise de transporter de l'air à la base du tas, où l'insuffisance en oxygène est fréquente [42].

II.10.3 Retournement

Le retournement des déchets est indispensable, en raison de la descente de maille granulométrique pendant le compostage. Le retournement successif aide d'améliorer l'aération en repartant l'air dans tout le tas, mais il permet d'éviter la surchauffe en éliminant les micro-organismes dans le tas et met fin à la décomposition. Les équipements utilisés pour le retournement varient avec la taille de l'andain [42].

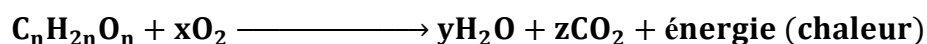
II.11 Principaux paramètres du compostage

L'étude de la caractérisation et de la valorisation d'un n'importe quel déchet par la technique de compostage possède plusieurs paramètres à identifier [49]. Il est donc nécessaire de connaître parfaitement les différents paramètres physico-chimiques du compostage pour optimiser puis améliorer l'efficacité de ce procédé. Les paramètres physico-chimiques du compostage sont les facteurs qui permettent de suivre l'état de décomposition des substrats au cours du processus de biodégradation [56]. Deux principales catégories de paramètres interviennent lors du procédé de compostage ; la première catégorie est les paramètres qui sont liés directement par la nature et la composition du substrat comme : la teneur en eau, le pH, le rapport Carbone/Azote (C/N) ainsi que la granulométrie, et la deuxième catégorie sont

les paramètres de suivi du procédé comme : la température, la présence d'oxygène (ventilation) et également l'humidité. Certains paramètres comme la teneur en matière organique totale, la valeur agronomique, la quantité et l'accessibilité des nutriments, et la toxicité du compost dépendent par la qualité du compost. Au cours du compostage, le suivi de ces paramètres principaux permet non seulement de connaître les étapes de dégradation du compost mais aussi permet de donner une prédiction sur le déroulement du processus [49].

II.11.1 Température

La température est le premier paramètre qui reflète la dégradation du substrat et l'activité microbienne [41]. L'évolution de la température d'un compost est considérée comme un bon critère d'évaluation de l'activité microbienne [79], étroitement reflète la chaleur générée par la biodégradabilité de substrat au cours du compostage et de sa composition en nutriments. La chaleur libérée au cours de la dégradation des substrats organiques se fait selon la réaction suivante [80] :



L'homogénéité totale de la température au sein du milieu au cours du processus de compostage est difficile, ce qui peut permettre aux germes pathogènes comme : *Salmonella*, *E.coli*, *Coliformes fécaux*...etc., d'échapper au processus thermique [81, 82]. L'élévation de la température, et notamment durant de la phase thermophile, permet d'assainir le milieu [83] de l'action de certains pathogènes en état de résistance [84] par destruction de ces germes, par favoriser la biodégradation, et par d'améliorer la diversité des micro-organismes [85]. Cependant, à une température trop élevée (supérieure à 80 °C) peut conduire à l'inhibition de l'activité bactérienne, au dessèchement excessif du compost et par conséquent affecte négativement sur le processus du compostage [86, 87]. Une température située entre 40 et 70 °C mène au bon compostage de la matière organique sur tous les déchets [88, 89]. Après la fin du compostage, on dit un compost est mûré, si la température de la phase de maturation est restée stable et voisine de la température ambiante extérieure [41].

II.11.2 Valeur du pH

Le pH est un bon indicateur de l'état d'évolution de la matière organique. L'évolution du pH est la responsable de la décomposition biologique et biochimique des déchets initiaux

[90, 62]. Elle dépend de la nature des déchets initiaux et de la mise en œuvre du procédé [85]. Le pH optimal de déchets à composter se situe généralement vers la neutralité en fonction de la nature du substrat entre 5,5 et 8,0 [64, 91].

Au cours du compostage, le pH peut subir beaucoup de modifications : la phase acidogène est la phase difficilement observable [92, 90], qui se produit au début du processus par l'intervention des bactéries acidogènes, où il voit la formation de certains acides organiques liés à la dégradation des sucres simples et la production de dioxyde de carbone (CO₂) [93], décomposeurs du matériel carbone complexe, provoquant ainsi une diminution du pH initial. La seconde phase correspond à l'alcalinisation soit par l'hydrolyse bactérienne de l'azote formé à partir de la dégradation des protéines pour produire le gaz ammoniac (NH₃), ou bien par la décomposition des acides organiques. Enfin, à maturité, la valeur du pH est généralement proche de 8 [85].

II.11.3 Conductivité électrique (CE)

La définition de conductivité électrique est directement liée par la salinité du milieu, et reflète donc, l'évolution de la concentration du sel et le potentiel de phytotoxicité. La minéralisation de la matière organique pendant le compostage entraîne une augmentation de la concentration en sels, et donc, une augmentation de la conductivité [51].

II.11.4 Teneur en humidité

La teneur en humidité (H %), ou bien en eau, du substrat organique est un paramètre majeur du compostage, car l'eau est nécessaire à la vie des micro-organismes et leur métabolisme [94]. La teneur optimale d'humidité dépend de la densité du substrat, son état physique, et sa nature [49]. En général, les déchets à composter devraient avoir une teneur en eau située généralement entre 50 et 70 % du poids humide selon la nature des déchets [42, 95, 96, 54, 96].

L'évolution de l'humidité au cours du compostage est variable [97] selon les caractéristiques des matériaux compostés et les conditions de compostage [41], et sensible à la dégradation de la matière organique provoquant une libération d'eau qui s'évapore sous l'effet de l'aération et de l'énergie calorifique libérée lors du compostage conduisant à l'assèchement du compost [55]. Lorsque la teneur en humidité devient trop faible (en dessous

de 20 %) [95] seuls les champignons restent en activité. En revanche, dans le cas d'une humidité trop élevée (au-dessus de 70 %), l'eau commence à remplir les espaces lacunaires des déchets, étouffe les micro-organismes et empêche les échanges d'oxygène, provoquant des conditions favorables à l'anaérobiose [98].

II.11.5 Teneur en matière organique totale et carbone organique totale

La teneur en matière organique totale (MOT) est un facteur très important pour suivre le processus de compostage. Au cours de la dégradation biologique du substrat, la matière organique totale diminue, tandis que la matière minérale augmente. Cette diminution dépend ; du rapport Carbone/Azote, des conditions de réalisation du processus, de la nature du substrat, et de la durée du procédé. Les pertes en matière organique totale au cours du compostage sont comprises entre 20 et 60 % de la matière organique initiale [99].

II.11.6 Teneur en azote Kjeldahl total

La majeure partie de l'azote du compost est organique et se présente sous forme de protéines ou de peptides simples. Une petite quantité d'ions nitrate sont minéralisés en ions ammonium par la réaction d'ammonification résultant du développement de l'activité bactérienne. Selon la nature des déchets à composter, les ions formés lors du compostage interagissent différemment, où ils sont arrêtés par les microorganismes, convertis en azote organique ou volatil, et puis évacués lorsque la température augmente [90].

L'azote organique d'un compost stable se minéralise lentement de façon similaire au sol avec une vitesse (0,26 mg N/kg/j), tandis que l'azote d'un compost moins stable, la vitesse de minéralisation est supérieure (0,4 mg N/kg/j) [49].

II.11.7 Rapport Carbone/Azote (C/N)

Les éléments de carbone et de nitrogène sont considérés comme l'une des sources essentielles dans la nutrition des micro-organismes au cours de leurs fonctionnements, où les bactéries utilisent le carbone comme une source d'énergie et l'azote comme une source pour synthétiser les protéines. Le rapport carbone sur azote, noté C/N, est un facteur indispensable à l'activité biologique exprime la proportion entre le carbone et l'azote biodisponible, et sa

valeur est très variable et dépend de la composition intrinsèque du substrat à compostier. Le [tableau 5](#) montre les rapports C/N de certains substrats [42].

Tableau 5: Rapport C/N de certains substrats [42]

Matières	Rapport C/N	Matières	Rapport C/N
Urines	0,8	Papiers-cartons	70
Gazon coupé	12	Branches arbres	70
Tabac	13	Paille de blés	128
Légumes	12-30	Sciure de bois	200
Ordures ménagères	25	déchets urbains	35
déchets verts	30		

D'une façon générale, le rapport C/N est utilisé pour définir la qualité d'un substrat. Quand le rapport C/N est trop élevé, c'est-à-dire, une teneur faible en azote et un excès en carbone, la croissance ou l'activité microbienne sera ralentie ou limitée et le processus du compostage devient lent. En revanche, si le rapport C/N est très bas, c'est-à-dire, une teneur forte en azote susceptible de se perdre dans l'atmosphère soit par volatilisation sous forme azote ammoniacal (la dégradation des acides aminés) [100, 101].

La dégradation de la matière organique pendant le compostage correspond à une consommation de l'azote et du carbone, ce qui explique la diminution de son rapport C/N. En pratique, pour produire un mélange optimal et pour assurer une dégradation idéale et homogène le long du processus, il est nécessaire de connaître la valeur initiale C/N des déchets. En ajustant ce rapport par l'ajout des quantités d'éléments déficitaires pour avoir un C/N dans les limites. La valeur C/N final d'un compost mûré est exprimée entre 10 et 15 [102, 103, 104].

II.12 L'évolution de la matière organique et de la substance humiques au cours du compostage

La transformation de la matière organique initiale en composés humiques est un indice important pour suivre la stabilité et la maturité du compost [105, 106]. La teneur et la structure de substances humiques contribuent dans la qualité agronomique d'un compost [107].

II.12.1 La perte de matière et la réduction du volume

Le compostage perd au cours de dégradation une quantité importante de la matière brute. Cette perte de matière faite à travers d'eau évaporée sous l'effet de la chaleur, à travers l'humidité d'ordre de 50 % [92], et la grande part de perte est due à la minéralisation de la matière organique, avec un taux peut atteindre de 20 % à 60 % de la matière organique initiale [108, 109]. Le volume du tas peut atteindre à 60 % de la quantité initiale [78].

II.12.2 La stabilisation de la matière organique

La stabilisation de la matière organique [51], peut expliquer par la diminution dans la quantité de carbone organique total (TOC) minéralisée. Le contrôle de cette stabilisation est suivi généralement par la quantité de CO₂ dégagée. La stabilisation de la matière organique dépend essentiellement par la nature des déchets organiques initiaux, la durée de compostage [75] et la méthode de compostage choisi [110].

II.12.3 L'évaluation et la transformation de la matière organique au cours de compostage

La matière organique (MO) se compose généralement de molécules diverses et complexes [62]. La transformation de la matière organique initiale au cours du compostage peut être décrite en deux étapes [110, 111] :

- **La première étape** comprend la phase de biodégradation intense des substances organiques facilement dégradables. Initialement, sous l'effet des micro-organismes, ces substances se décomposent en libérant des composés simples [47]. Les molécules facilement biodégradables comme les sucres, les acides aminés, ...etc. subissent une minéralisation complète en donnant des composés minéraux solubles ou gazeux [112, 113].
- **La deuxième étape** correspond la phase de maturation, dans laquelle la partie de la matière organique la plus résistante ou moins biodégradable telle que la lignine échappe de la minéralisation et après certaines biotransformations sert de matériau de base à l'édification de molécules nouvelles [114], qui se réarrangent sous l'effet d'une activité

microbienne aux composés organiques macromolécules semblables aux substances humiques [55].

II.12.4 La formation de substance humique

La formation de substance humique est issue de la décomposition des déchets organiques. La matière organique se subdivise habituellement en substances non-humiques et substances humiques, où les substances non humiques sont les substances qui incluent les structures facilement biodégradables tels les carbohydrates, protéines, lipides, cires, etc., alors que les substances humiques sont les substances qui constituent la majeure partie de la matière organique des formules chimiques complexes naturelle [115]. L'humification de la matière organique se déroule majoritairement en phase de maturation [116], et se traduit par une diminution de la biodégradabilité des substrats [117]. L'évolution des substances humiques est un indicateur souvent utilisé pour suivre l'évolution de dégradation de la matière organique au cours du compostage [118].

Les substances humiques sont généralement fractionnées en trois grandes classes : acides humiques (AH), acides fulviques (AF) et humines (AH) [119]. La méthode utilisée pour diagnostiquer l'humification de la matière organique au cours du compostage est basée sur l'extraction des acides humiques, fulviques et humines selon leur solubilité différente en milieu de pH acide [120, 62]. Il existe quatre principales voies de formation des substances humiques (Fig. 5) [112, 121, 122, 56] :

- **La voie 1** : est une voie chimique, à température élevée, les acides aminés réagissent avec les sucres pour donner des molécules de composition semblable à l'humus.
- **La voie 2** : attribuée à la synthèse de polyphénols à partir de la cellulose ou d'autres composés non ligneux, les polyphénols sont ensuite oxydés en quinones. Les substances humiques se constituent ensuite dans l'étape de polymérisation.
- **La voie 3** : est une voie enzymatique correspond la transformation des produits de décomposition microbienne de la lignine à une quinone. Avec ou sans composés aminés, les quinones ensuite polymérisent pour donner les substances humiques.
- **La voie 4** : est dite voie ligno-protéinique. Dans cette voie, les lignines se dégradent incomplètement conduisant à la perte des groupes méthoxyles (OCH_3), à la génération

d'hydroxyphénols, et à la formation de groupe COOH à partir de l'oxydation des parties aliphatiques.

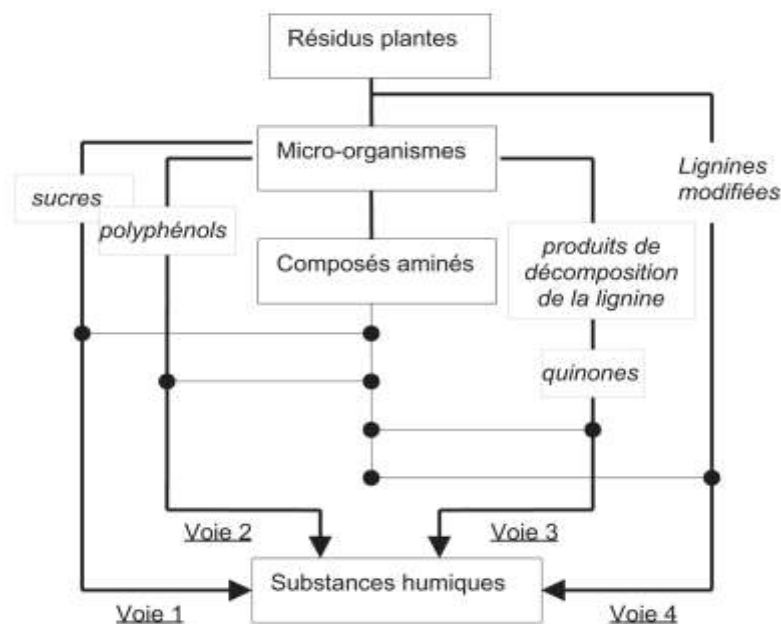


Figure 5: Les quatre voies du processus d'humification [112]

Le rapport CAH/CAF est également utilisé dans l'évaluation de degré d'humification de la matière organique par suivre le degré de polymérisation. Le rapport CAH/CAF est varié généralement de zéro, en début de compostage ou pour les composts très jeunes, à 10 pour les composts à base de déchets verts, et entre 2 et 5 pour des composts très stables [123, 124, 125, 126].

II.12.5 Structure des substances humiques

Les substances humiques sont des composés polymères de poids moléculaire élevé synthétisés naturellement pendant la dégradation de la matière organique. L'identification de la structure chimique des substances humiques et leurs manières de formation pendant le processus de compostage reste un obstacle majeur en raison de l'hétérogénéité des molécules qui les contiennent. L'édifice de substance humique contient une large gamme des molécules composées principalement de composés aromatiques (phénoliques ou quinones) comme une structure de base associée avec des chaînes aliphatiques telles que sucres, peptides..., ou avec des radicales à caractère acide [127, 128, 129, 62].

- **L'humaine (Hu)** : est une substance noire, insoluble dans l'eau quel que soit le pH [56], et définit comme la partie humifiée non extractible [62]. Elle se compose des macromolécules organiques très complexes étroitement liées à la fraction minérale [130]. La substance humine dépend dans sa structure sur les composés aromatiques et les glucides, et possède une partie aliphatique généralement plus considérable que dans l'acide fulvique et humique isolé du même échantillon [131, 132].
- **Les acides humiques (AH)** : sont des polymères complexes solubles dans l'eau en pH supérieur à 2, chargés négativement et caractérisent par un poids moléculaire très élevé, une couleur noire à brun foncé, et une structure moléculaire très hétérogène constituée généralement d'éléments de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, d'azote et parfois de soufre et de phosphore. Ils sont synthétisés à partir de la réaction de condensation oxydative des composés phénoliques avec les acides aminés, les peptides et les polysaccharides. Les acides humiques sont des substances riches en carbone et pauvres en oxygène par rapport aux acides fulviques [133], et ils peuvent considérer comme un réceptacle pour les restes des composés aromatiques et aliphatiques de fonction carboxyliques, phénoliques et alcoylés (Fig.6) [56].

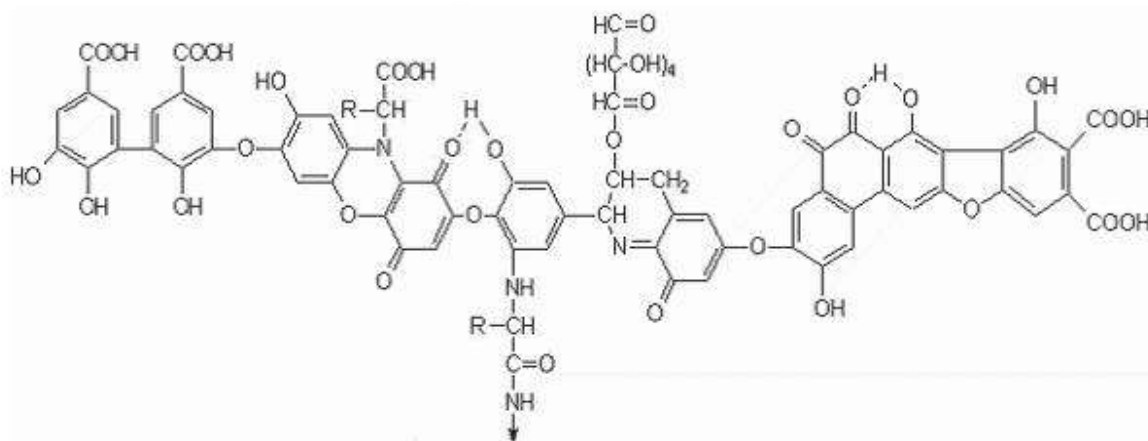


Figure 6: Structure simplifiée d'un acide humique [56]

- **Les acides fulviques (AF)** : sont des polymères de taille plus petite, de couleur jaune clair à jaune-brun, solubles dans les solutions alcalines et dans l'eau quel que soit le pH, et possèdent des noyaux aromatiques (composés phénoliques à faible poids moléculaire) liés avec des chaînes aliphatiques (polysaccharides) et des groupements carboxyliques [134, 62, 135]. Ils sont riches en oxygène sous forme des groupes carboxyliques libres et pauvre

en carbone par rapport aux acides humiques [136]. Les acides fulviques sont séparés après l'acidification de l'extrait alcalin, qui permet les acides humiques de précipiter seulement (Fig.7) [56].

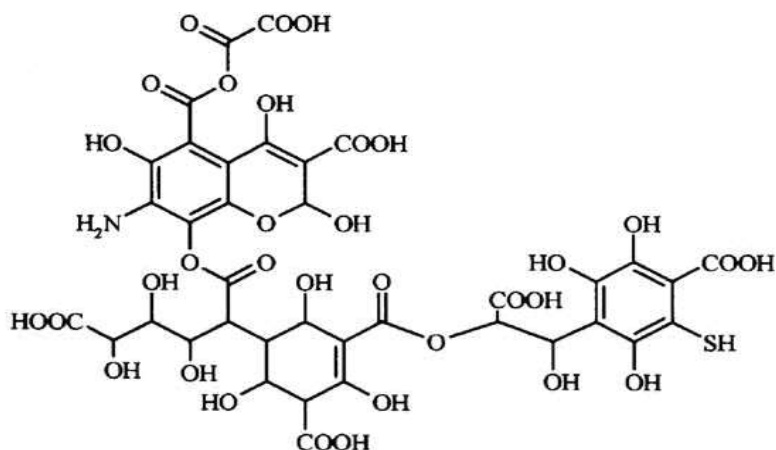


Figure 7: Structure simplifiée d'un acide fulvique [56]

II.13 Méthodes spectroscopies

II.13.1 Spectroscopie ultraviolet visible (UV-vis)

Le principe de cette méthode consiste à étudier l'excitation d'une molécule soumise à un rayonnement UV-visible, i.e. le passage (transition) d'un électron d'une orbitale stable vers une orbitale instable dans la région UV (200 - 400 nm) et visible (400 - 800 nm). Dans la chimie organique, ces transitions électroniques conduisent aux changements d'orbitales moléculaires de groupes fonctionnels spécifiques (chromophores) des composés organiques, qui permettent d'utiliser les spectres d'absorption d'un composé dans sa caractérisation. La spectroscopie UV-visible a été également utilisée dans la caractérisation des substances humiques par de nombreux auteurs [137, 138].

II.13.2 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR) considère l'une des méthodes analytiques utilisées dans le diagnostic de la matière organique dans la région infrarouge (2500 - 25000 nm), qui permet d'identifier le degré de condensation et la nature des groupements fonctionnels des substances humiques [139]. Pendant le processus du compostage, le degré de condensation de la matière organique et la production de composés

organiques aromatiques associée à l'humification des substances humiques sont généralement élevés, tandis que l'abondance des composés aliphatiques ou des polysaccharides est diminuée progressivement [140, 109].

II.14 Microbiologie de compost

Pour favoriser la croissance des micro-organismes et le développement de leurs activités biologiques, il doit tout d'abord créer un environnement approprié (matière première, humidité, aération, C/N,...), ce qui nécessite une surveillance continue pour toutes les étapes et les paramètres majeurs qui interviennent dans la dégradation de la matière organique au long du processus de compostage [141, 93]. Le rapport C/N est considéré comme le premier paramètre qui permet d'évaluer la composition chimique du substrat à composter, notamment en matière d'azote et de carbone, comme les éléments les plus consommés par les microorganismes [142].

II.14.1 Les diversités micro-organismes du compost

Les micro-organismes ont considéré le pilier de décomposition biologique de la matière organique et leur conversion en substances bénéfiques (compost) [41]. Le processus du compostage comprend de nombreux micro-organismes, ces micro-organismes diffèrent selon les différentes phases de compostage, d'une part, et d'autre part, selon la nature du substrat à composter [49]. Cinq types de micro-organismes qui contribuent principalement au processus de compostage : les virus, les bactéries, les parasites, les helminthes et les champignons. La vie de ces organismes est principalement liée à la disponibilité de l'oxygène et de l'eau, ainsi qu'à la présence d'autres organismes organiques, et leurs activités diffèrent selon la valeur de la température [143].

II.14.1.1 Les bactéries

Les bactéries jouent un très grand rôle dans la décomposition de la matière organique et donc dans la qualité de l'engrais obtenu, car elles représentent les microorganismes les plus présents dans les déchets organiques [144]. Les bactéries diffèrent des autres microorganismes tels que les champignons par leur rapport surface/volume très élevé, ce qui leur permet de transférer rapidement des substrats solubles dans la cellule [44].

II.14.1.2 Les champignons

Les champignons se distinguent des autres micro-organismes par leur décomposition de nombreuses sources de carbone telle que : les polymères complexes lignocellulosiques, les composés poly-aromatiques, et le plastique. Ils sont principalement responsables de la maturité du compost [145]. Malgré de certains champignons ont la capacité de croître à des températures élevées (dites thermophiles), comme *Aspergillus fumigatus*, et qui peut se développer dans une plage de températures de 12 à 57 °C [146], mais la température reste toujours représenter le plus grand obstacle contre la croissance des champignons. La plupart des champignons sont mésophiles et se développent entre 5 et 37 °C, avec un environnement acide et riche en azote [41].

II.14.2 Macro-organismes

A côté de ces cinq grands groupes de microorganismes qui assurent l'essentiel de l'activité du compostage, on retrouve également dans le compost les macroorganismes comme les algues, les protozoaires, et les animaux pluricellulaires.

- **Les algues** : se développent en surface en présence de la lumière, mais leur rôle dans l'évolution de la matière organique en milieu aérobie reste toujours faible et incompréhensible.
- **Les protozoaires** : bactériophages possèdent une influence importante selon le nombre de bactéries dans les sols.
- **Les animaux pluricellulaires** : présents dans les composts tels que les microarthropodes (collembolles, acariens et myriapodes), les nématodes (vers ronds), les larves d'insectes (autres que les collembolles), et les annélides (vers de terre), et les animaux supérieurs à 80 mm comme les mollusques (limaces, escargots...) et les crustacés appartiennent à différentes catégories. La plupart de ces animaux multicellulaires se nourrissent de débris végétaux et peuvent jouer un rôle important dans l'homogénéisation du compost [41].

II.14.3 Populations microbiennes impliquées dans les différentes phases du compostage

II.14.3.1 La phase mésophile

Au début du compostage, les bactéries, les champignons, et les actinomycètes dominent généralement en grande partie de la matière organique. Ces dégradeurs primaires consomment les fractures organiques, puis ils convertissent dans les étapes suivantes aux aliments pour les protozoaires, helminthes, arthropodes, etc. [147]. Cette phase est caractérisée par un développement considérable et rapide dans la dégradation de la matière organique, notamment les substances simples dégradables. Dans cette phase, les bactéries et les champignons sont responsables de l'augmentation subite de la température lors des premiers jours de compostage. Quant aux actinomycètes, ils n'interviennent qu'à une étape plus avancée de compostage. Les bactéries mésophiles se forment de début de compostage et se poursuivent jusqu'à la fin, elles sont considérées comme les plus actives et les responsables sur la décomposition des substances simples [52].

II.14.3.2 La phase thermophile

La phase thermophile est caractérisée par une élévation dans la température, par comparaison avec la phase mésophile. Cette augmentation en température entraîne la mort de microorganismes mésophiles, l'augmentation du nombre et de diversité des bactéries, des actinomycètes, des champignons thermophiles, et par suite l'accélération de dégradation biologique de la matière organique [148].

Les champignons thermophiles jouent un rôle important durant la dégradation de la matière organique en décomposant les acides organiques, la cellulose, les hémicelluloses, et dans une faible mesure, la lignine. La lignine se dégrade entre 40 °C et 55 °C, qui est correspond à la température optimale à ces champignons thermophiles. À des températures très élevées (au-dessus de 60 °C), les champignons s'estompent, leur rôle dans la dégradation diminue, et les processus de dégradation sont principalement effectués par les bactéries thermophiles uniquement [149].

II.14.3.3 La phase de refroidissement

Elle se caractérise par une activité microbienne lente et variée [52, 148]. Au cours de cette phase, l'ensemble de microflore (bactéries et champignons) se croissent et reprisent leurs activités dues à la basse température [149].

II.14.3.4 La phase de maturation

Dans cette phase, les populations microbiennes évoluent légèrement par rapport à la phase de refroidissement. La plupart des champignons et des moisissures qui sont principalement actifs pendant la phase de maturation ne résistent pas les hautes températures et la teneur élevée en eau, et sont les responsables de la dégradation des matériaux complexes comme la cellulose et la lignine. Dans cette phase, les actinomycètes consomment les substances les plus grossières comme la cellulose et la lignine [148].

II.15 Qualité et maturité du compost

II.15.1 Définition de la qualité d'un compost

La qualité du compost dépend de la nature des produits primaires et de suivre les paramètres, ainsi que le degré de stabilité de la matière organique [49]. Afin d'obtenir un compost de qualité homogène et efficace, il faut l'ensemble du tas reçoit une quantité suffisante d'oxygène pour que les micro-organismes aérobies croissent de manière uniforme [42].

II.15.2 Maturité et stabilité du compost

La maturation ne signifie pas nécessairement la stabilisation, puisque le compost peut être stable mais a un effet inhibiteur ou phytotoxique sur la croissance de plantes [150]. Fréquemment, le terme maturité du compost est confondu avec le terme stabilité du compost, malgré la différence entre les paramètres correspondant à ces deux indices. Différents paramètres peuvent être utilisés dans la détermination de la stabilité et de la maturité du compost [62] (Tab.6).

Tableau 6: Paramètres de stabilité et de maturité [41]

Les paramètres de stabilité	Les paramètres de maturité
<ul style="list-style-type: none"> - Activité biologique ou respiration - Degrés ou stades de décomposition - Mauvaises odeurs - Consommation d'azote - Disponibilité des nutriments - Phytotoxicité - Carbone disponible ou autres sources - Couleur - Dissolution des métaux lourds - Humidité - Risque environnementaux pour la santé - Texture 	<ul style="list-style-type: none"> - Effets sur les plantes - Degrés de décomposition (C/N) - Activité biologique ou respiration - Bénéfices agraires (texture, rétention en eau ...) - Odeurs - Pathogènes - Couleur

II.16 Critères d'évaluation de la maturité et de stabilité d'un compost

Dans un compost stable et mature, la minéralisation du carbone réduite et par conséquent la libération régulière d'azote organique associé diminue. Contrairement au compost immature qui peut entraîner une augmentation de la consommation d'azote des bactéries du sol en raison de son riche avec un carbone facilement assimilable [151]. De nombreuses études ont proposé un nombre des critères et des paramètres communs au suivi les critères d'évaluation de la maturité et de stabilité d'un compost [152].

II.16.1 Méthodes empiriques

La couleur du compost mûré doit ressembler à la couleur du terreau « noir foncé » sans odeur désagréable [60, 153] possède une touche douce avec une texture friable. Sa température finale doit être stable et proche de la température ambiante extérieure [58].

II.16.2 Critères physiques

Le premier critère physique qui indique l'évolution des substrats est l'élévation de la température au sein de l'andain par rapport à la température ambiante [41], en plus de l'odeur, la couleur, et l'aspect (terreau homogène) [62].

II.16.3 Critères chimiques

Le degré de maturité des composts se base sur l'évolution des paramètres chimiques tels que : le pH, le rapport C/N [49], analyse des substances facilement biodégradables (sucres, acides aminés, phénols etc.) et des fibres, matière ou carbone organique total (MOT ou COT) et azote Kjeldahl total (NKT) [62].

II.16.4 Critères spectroscopiques et analytiques

La plupart méthodes spectroscopiques, tels que : l'analyse UV-visible, l'analyse infrarouge (IR) [154, 155, 156], la résonance magnétique nucléaire (RMN), analyse élémentaire, chromatographie en phase gazeuse (CPG), spectroscopie de masse (SM), rayons X, et ...etc. [62] fournissent beaucoup d'informations sur les composés dégradés au cours du compostage.

II.16.5 Critères biologiques

La bonne ventilation est l'une des principales raisons de l'augmentation de la croissance et de l'activité biologique des organismes. La plupart des microorganismes présents dans le compost sont : les champignons (*Trichoderma* sp et *Pleurotus* sp), les bactéries, les parasites, les helminthes, et les virus. Alors que les macro-organismes sont : les lombrics, les insectes, les acariens, les gastéropodes, les myriapodes, les cloportes, les algues, les protozoaires, et les animaux pluricellulaires [42].

II.17 Valeurs agronomiques du compost (tests sur plantes)

II.17.1 Valeur amendante du compost

La valeur amendante du compost est déterminée par la capacité du compost à augmenter ou à maintenir le stock de matière organique dans le sol. Parmi les applications les plus faciles

utilisées pour estimer cette valeur est l'installation de systèmes de végétation dans les serres [Enda] et celles de dispositifs expérimentaux en champ, ce qui indique l'utilité du compost dans le sol ainsi que dans les cultures [157].

II.17.2 Les tests du compost

L'évaluation de la maturité du compost par les tests biologique varie selon le type de test. Cette différence entre les tests biologique revient principalement au comportement biologique de chacun d'eux, où il peut être basé sur :

- L'existence des différentes formes de la matière organique dans le compost,
- Mesurer les effets nuisibles sur la vie des plantes,
- La détermination de l'activité respiratoire (par mesurer de l'oxygène consommé ou du dioxyde de carbone produit) des micro-organismes dans le compost [49].

II.17.2.1 Tests de phytotoxicité (test sur les plantes)

Le test phytotoxicité est considéré comme la seule technique utilisée dans l'évaluation de la toxicité du compost dans le sol, car le compost non mature peut contenir des produits phytotoxiques tels que : les acides phénoliques ou les acides gras volatils [158]. Le test phytotoxicité est divisé en trois étapes : test de croissance de plantes, tests de germination, et test de développement racinaire [159, 160, 161].

Parmi les raisons qui conduisent à la phytotoxicité sur les plantes, on peut citer : l'immobilisation de l'azote dans le sol, échauffement des racines, présence d'acides organiques, d'agents pathogènes ou des métaux. L'obtention sur un compost stable peut contribuer considérablement dans la diminution de la phytotoxicité [159, 60].

II.17.2.2 Tests respirométriques

L'activité microbienne est basée sur la mesure de l'activité respiratoire des microorganismes présents dans le compost dans une humidité et de température spécifique. Cette activité peut également être un indicateur de la stabilité du compost car un compost

immature demande une forte quantité en O₂ et un taux élevé de production de CO₂, en raison de l'activité microbienne intense causée par la décomposition du substrat [158].

II.17.2.3 Tests d'auto-échauffement

Dégagement de chaleur durant la dégradation de la matière organique est l'un des principaux résultats de l'activité intense des microorganismes. Ainsi, le degré de décomposition du compost peut être évalué par le pourcentage d'élévation de température, ce qui l'on réalise par le test auto-échauffement [162].

II.17.2.4 Test colorimétrique

Le test colorimétrique est une technique basée sur le virage d'indicateurs colorés qui mesurent simultanément la volatilisation d'ammoniac NH₃ et la libération de dioxyde de carbone CO₂ à partir d'un échantillon de compost placé dans une enceinte hermétique, dans des conditions d'humidité spécifiées [51]. Ce test est souvent lié avec les analyses des paramètres tels que : le pH et la teneur ; en eau, en carbone, en azote total, et en ammoniacal [71, 163, 164].

II.17.3 Le compost et les engrais chimiques

L'application du compost seul dans les cultures agricoles ou en combinaison avec des engrais chimiques ou des fumiers considère comme une méthode très complexe et consomme un très long temps et par conséquent, elle est rarement effectuée, mais elle est rentable à long terme pour assurer l'image positive de l'engrais organique [49].

II.18 Mise en forme du produit

II.18.1 La commercialisation

Comme les autres produits commerciaux, le compost est également soumis au marché de l'offre et de la demande. Le compost concurrence les autres engrais chimiques dans le marché, mais il est facile à utiliser et ne présente pas de dommages négatifs sur les plantes. Malgré leur rareté, cependant, la réalisation des études avant l'installation des usines de compostage est considérée comme une idée positive contribuant grandement à rendre l'usine

capable sur la concurrence et sur la production des composts des hautes qualités avec des proportions requises sur le marché [165].

La politique commerciale est également considérée essentielle à la vente et à la promotion du compost, comme les études préliminaires. Pour faciliter son utilisation et son transport, il est préférable de le vendre en sacs plutôt qu'en grande quantité. Une mauvaise commercialisation du produit compost peut conduire à une accumulation de ce produit, et donc arrêter son activité, ce qui peut également conduire à la saturation de l'usine ou à sa fermeture progressive [166].

II.18.2 La financier et économique

Le coût de construction d'une usine de compostage est inférieur au coût d'une usine d'incinération ou d'un centre d'enfouissement technique. Le calcul de coût de production d'un compost est commencé dès le début du processus de compostage, en passant par les coûts d'étude, d'investissement, d'équipement, de bâtiments, de transport des matières premières et jusqu'à l'obtention du composé final (compost), en plus des dépenses d'eau, d'énergie, les frais administratifs, etc. [49].

II.18.3 Conditionnement et stockage

Le compost est stocké dans un hangar abrité qui permet de conserver toutes ses propriétés (humidité, granulométrie et teneur en éléments nutritifs). Il est ensuite conditionné sur la demande dans des sacs pour faciliter leur transport. La fermentation du compost est évitée par l'apport en eau, d'oxygène, et également en augmentant la densité [49].

II.19 Conclusion

La gestion des déchets forme un grand obstacle devant tous les responsables sur l'environnement dans tous les pays. La meilleure technique disponible pour l'élimination de ces déchets est le compostage, et qui conduit à l'obtention d'un composé organiquement modifié appelé " le compost ". Le compost est utilisé directement en agriculture comme un moyen essentiel dans la nutrition et l'amendement du sol. La production d'un compost de haute qualité et non toxique sur le sol nécessite de contrôler tous les paramètres physico-

chimiques qui contribuent de manière significative dans la dégradation de la matière organique [49].

À partir de l'étude bibliographique sur le processus de compostage, nous avons remarqué que la plupart des littératures du compostage ont traité une étude conjointe qui a inclu dans son contenu l'étude des propriétés physiques, chimiques et biologiques utilisées pour suivre l'évolution de la matière organique au cours de processus du compostage jusqu'à l'obtention sur un compost organique.

Partie II : Étude expérimentale

Chapitre III : Matériels et méthodes analytiques

III.1 Introduction

Cette partie décrit les méthodes d'échantillonnage, de caractérisation et d'analyse des déchets compostés qui seront validés par l'étude expérimentale portant sur le compostage des déchets des palmiers dattiers de l'oasis de la commune d'Adrar.

III.2 La zone d'étude

Les travaux ont été réalisés dans le laboratoire de l'énergie, d'environnement et de systèmes informatiques, à l'université d'Adrar.

La wilaya d'Adrar est située dans le sud-ouest de l'Algérie, bordé au nord par la wilaya d'El Bayadh et de Ghardaïa, à l'est par la wilaya de Tamanrasset, à l'ouest par la wilaya de Béchar et de Tindouf, et au sud par le pays du Mali et de la Mauritanie. Elle s'étend sur une superficie considérable de 427 968 km², avec une population avoisinant les 432 193 habitants selon le recensement de 2011, soit une densité de 1 hab./km². La wilaya d'Adrar se compose de 11 daïras, 28 communes et 299 ksars (villages), repartis sur quatre zones géographiques : le Gourara (la région de Timimoune), le Touat (la région d'Adrar), le Tidikelt (la région d'Aoulef), et la Tanezrouft (la région de Bordj Badji Mokhtar).

Deux climats prédominent à Adrar, une saison chaude dans laquelle la température atteint 48°C à l'ombre et une saison froide où la température atteint 0 °C.

Le secteur agricole dans la wilaya d'Adrar est en pleine expansion grâce à l'activité qui se pratique sur de grandes étendues. La surface agricole globale de cette wilaya est de près de 366077 hectares grâce à la politique de mise en valeur des terres agricoles. Seulement 35687 ha de la surface agricole globale est exploitée, dont 28284 ha de surfaces irriguées [167].

III.3 L'origine des substrats à composter

Les déchets des palmiers dattiers (*phoenix dactylifera* L) et la luzerne (*Medicago sativa* L) sont les deux substrats utilisés dans le processus du compostage.

III.3.1 Les déchets des palmiers dattiers (source de carbone)

Les déchets de palmiers dattiers sont les matériaux qui sont taillés périodiquement chaque année de la saison en automne pour donner une image esthétique au palmier et pour qu'il se développe mieux. Ces déchets sont considérés parmi les matériaux riches en carbone. Dans notre étude, nous avons collecté les déchets de palmiers dattiers de jardins situés dans la commune d'Adrar (Phot.7).



Photo 7: Les déchets des palmiers dattiers (DPD)

III.3.2 La luzerne (source d'azote)

La luzerne (*Medicago sativa* L) est une plante connue pour sa haute teneur en azote, appartient aux légumineuses [168]. La plante de luzerne a également été obtenue à partir du même jardin (Phot.8).

Tableau 7: Classification de la luzerne [169]

Classification	
Plante	<i>Dicotylédones</i>
Famille	<i>Fabaceae</i>
Sous famille	<i>Faboideae</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>
Sous classe	<i>Rosidae</i>
Règne	<i>Plantae</i>
Sous règne	<i>Tracheobionta</i>
Ordre	<i>Fabales</i>



Photo 8: La plante de luzerne (*Medicago sativa* L)

III.4 Protocole de compostage

III.4.1 Description de l'Andain

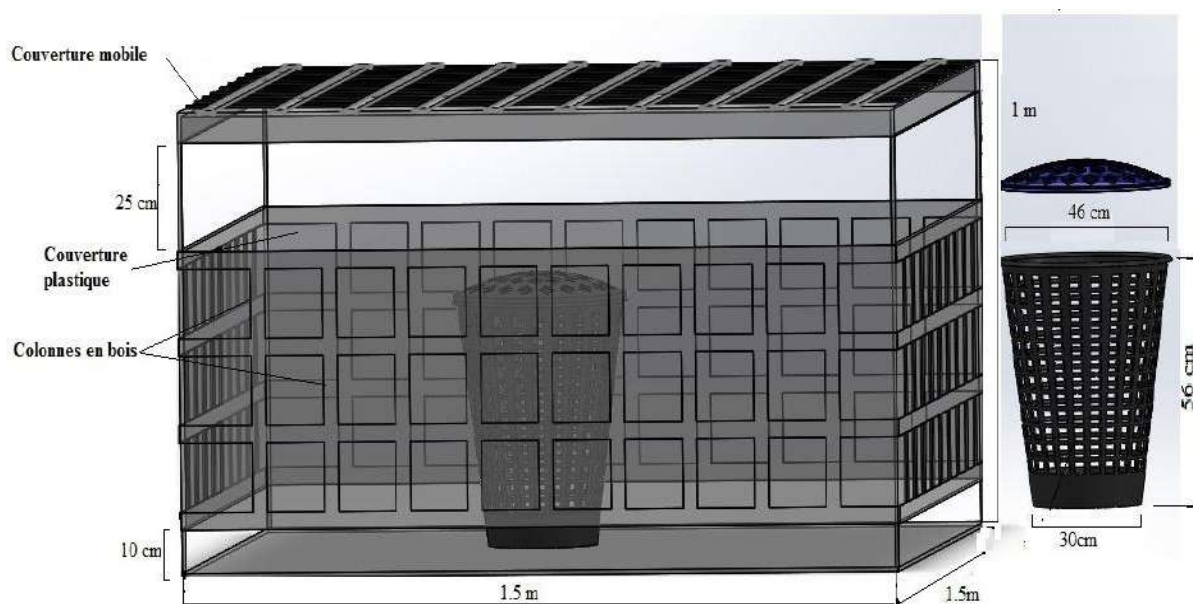


Figure 8: Représentation de l'Andain

L'Andain se compose de cinq paniers en plastique entourés par une serre en plastique avec un cadre en bois, d'une longueur et largeur de 1,5 m et d'une hauteur de 1 m. La serre est levée du sol de 10 cm, et un espace de 25 cm est laissé entre l'extrémité de la serre et sa couverture mobile pour assurer la ventilation, comme illustré dans la [Figure 8](#).

III.4.2 Préparation des mélanges

Les mélanges de déchets des palmiers dattiers ont été préparés à partir de la collecte de différents sous-produits des palmiers dattiers et les coupent aux petits morceaux par un broyeur mécanique. Les petits morceaux broyés sont trempés dans un bassin d'eau pendant une semaine pour faciliter le processus d'humification. Les déchets humides sont ensuite mélangés avec la luzerne (*Medicago sativa* L) broyée précédemment à l'air libre (Phot.9). Finalement, les paniers sont remplis sans tassement selon les rapports indiqués au chaque mélange dans le tableau 8.

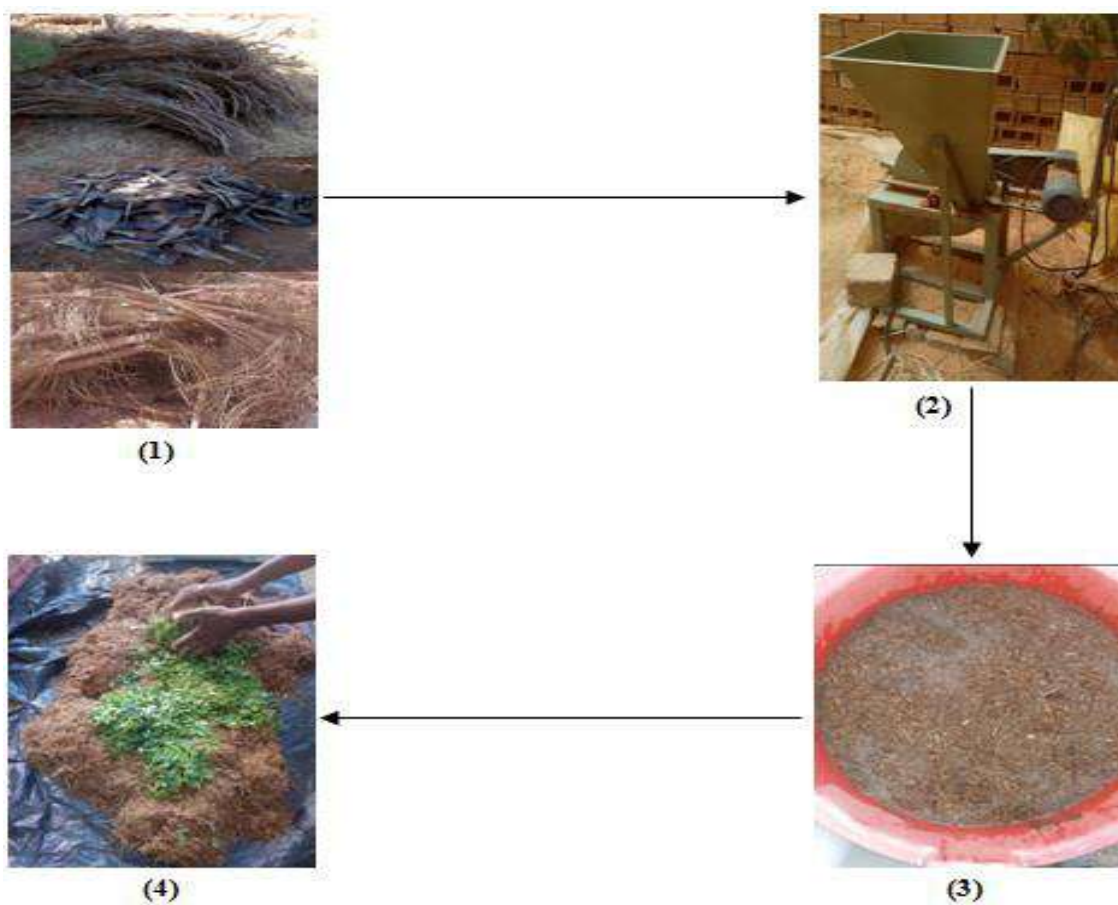


Photo 9: Les étapes de préparation des mélanges

Plus au mélange des déchets des palmiers dattiers (DPD 100 %), nous avons préparé quatre mélanges (C1, C2, C3 et C4) à partir de déchets des palmiers dattiers pour contrôler l'effet de l'addition des quantités différentes de (*Medicago sativa*) sur la dégradation de la matière organique de déchets des palmiers. La masse totale de chaque mélange a été de 6 kg.

Tableau 8: Pourcentages des mélanges préparés

Mélanges	DPD	C1	C2	C3	C4
Déchets des palmiers dattiers (%) (MS)	100	80	70	60	50
Plante de luzerne (<i>Medicago sativa</i> L) (%)	0	20	30	40	50
Volume total de déchets (m ³)	0,044	0,042	0,038	0,035	0,031
Densité (Kg/m ³)	136,3	142,8	157,8	171,4	193,5

III.4.3 Procédé de compostage

Les températures des différents mélanges ont été mesurées chaque jour. Des échantillons représentatifs ont été prélevés à 0, 11^{ième}, 29^{ième}, 52^{ième}, 64^{ième} 78^{ième} et 90^{ième} jours en mélangeant 3 échantillons, d'une masse globale d'environ 200 g. Chaque échantillon a été séché et broyé à 2 mm pour l'analyse. Pendant le jour de prélèvement, nous vidons le contenu des paniers sur une bâche plastique, et nous mélangeons manuellement.

III.5 Les paramètres d'analyses

Au cours du compostage, nous avons suivi les différents paramètres d'analyses qui permettent de contrôler le processus de dégradation, la qualité, et la maturité d'un compost.

L'étude de paramètres permet de contrôler la qualité du compost et sa valeur fertilisante [170].

III.5.1 Les paramètres du compostage

Les principaux paramètres du compostage qui ont été mesurés sont : la température, le pH, la conductivité électrique, la teneur en humidité, la teneur en carbone organique total, la teneur en azote Kjeldahl total, et le rapport C/N.

III.5.1.1 Température

La température est un paramètre principal pour suivre la dégradation aérobie du substrat. Les températures des paniers ont été mesurées quotidiennement au long du processus de compostage, à l'aide d'un thermomètre électronique (HANNA, HI95502) équipé par une sonde de pénétration de 10 centimètres, à trois différents niveaux (haut, milieu et bas) de

l'andain. La valeur donnée pour chaque mélange correspond à la moyenne de 9 mesures effectuées dans la longueur de l'andain (3 mesures à 3 niveaux de chaque endroit).

III.5.1.2 pH

Dans un bécher, on a mélangé 1 g de compost avec 10 mL d'eau distillée à température ambiante. La suspension est homogénéisée par agitation magnétique pendant 30 minutes. Le contenu est laissé au repos pendant 3 minutes avant la prise du pH. La mesure de pH se fait directement par lecture sur un pH-mètre (HANNA, HI3220) à électrode combinée, préalablement étalonnée par des solutions tampons (pH= 7 puis pH= 4).

III.5.1.3 La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) totale est mesurée sur un extrait à 1/10 (masse de compost/volume de solution) à température ambiante à l'aide d'un conductimètre (OHAUS, ST300C).

III.5.1.4 Teneur en humidité (H%)

La détermination de la teneur en humidité permet de connaître la quantité d'eau dans le substrat. Le taux d'humidité est déterminé à partir de la mesure du taux de la matière sèche d'une masse de 200 g mise à l'étuve à 105 °C jusqu'à l'obtention d'un poids constant entre deux pesées (environ 48 heures). L'humidité, notée H, est exprimée en (%) et donnée par la relation suivante : [148, 49, 41, 56, 122, 65].

$$MS(\%) = \frac{[M_0 - M_1] \times 100}{M_0} \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

$$H(\%) = 100 - MS(\%) \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

Avec :

- M_0 : la masse de l'échantillon brute (g) ;
- M_1 : la masse de l'échantillon après passage à l'étuve (g) ;
- $MS(\%)$: pourcentage de la matière sèche contenue dans l'échantillon ;
- $H(\%)$: pourcentage d'humidité contenue dans l'échantillon.

III.5.1.5 Teneur en matière organique totale (MOT) et carbone organique total (COT)

Au cours du compostage, la teneur en matière organique totale décroît de manière importante avant d'obtenir un palier [151]. La teneur en matière organique représente la teneur en matière volatile lors de la combustion. Cette matière volatile correspond à la teneur en matière organique totale (MOT) biodégradable et synthétique, qui est déterminée en calcinant une masse de 0,5 g de chaque mélange dans un four à 600 °C pendant 6 heures [171]. Les analyses ont été répétées trois fois et la valeur retenue est la moyenne des trois valeurs obtenues. La teneur en matière organique totale (MOT) est obtenue par différence de pesée entre la masse de l'échantillon séché à 105 °C et la masse de l'échantillon après calcination. Elle s'exprime par (%) et peut se donner à partir de la relation suivante [49] :

$$MO(\%) = \frac{[M_s - M_c]}{M_s} \times 100 \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

Avec :

- MO (%) : pourcentage de la matière organique dans l'échantillon sec ;
- Ms : masse de l'échantillon après passage à l'étuve à 105 °C ;
- Mc : masse de l'échantillon après calcination.

À partir de pourcentage de la matière organique totale (MOT %), le pourcentage du carbone organique total (COT %) est déterminé en appliquant la relation suivante :

$$COT(\%) = \frac{MO(\%)}{1.724} \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

III.5.1.6 Teneur en azote Kjeldahl total (NKT)

Dans un compost, l'azote total se compose d'un azote ammoniacal et d'un azote organique. Dans un matras on mélange 0,5 g de chaque compost préalablement séché à 105 °C et broyé, avec 15 mL de l'acide sulfurique (H₂SO₄, 36N) et 2 comprimés de catalyseur (chaque comprimé se compose de 3,5 g de sulfate de potassium et 0,1 g de sulfate de cuivre), qui permet de convertir les différentes formes d'azote en sulfate d'ammonium [49]. Le mélange préparé se place dans un minéralisateur à 180 °C pendant 15 minutes puis à 400 °C jusqu'à l'obtention d'un minéralisât limpide (au moins 90 minutes). Les solutions laissent refroidir environ 1 heure.

Après refroidissement, le matras de minéralisât se place dans l'appareil de VELP Automatic Kjeldahl Analyzer UDK 159. Au niveau de l'appareil, le minéralisât est distillé après neutralisation de l'excès d'acide par la lessive de soude, tandis que le dosage est réalisé avec la soude et l'acide borique, qui permet de déterminer les teneurs en azote de l'échantillon. Enfin les valeurs des teneurs sont calculées et affichées sur l'écran d'affichage.

III.5.1.7 Rapport carbone/azote (C/N)

L'évolution du rapport C/N est un indicateur très important pour suivre la biodégradation du substrat organique pendant le processus de compostage. Le rapport C/N est un paramètre sans unité, qui résulte de la division de la teneur en carbone organique total par la teneur en azote Kjeldahl total.

III.5.2 Teneur en substance humique

La méthode utilisée par l'International Humic Substances Society (IHSS) est la méthode couramment utilisée pour extraire la substance humique de compost. Les acides humiques (AH) et fulviques (AF) ont été extraits par agitation, à l'aide d'un agitateur rotatif pendant 4 heures, de 10 g d'échantillon frais de compost (du poids sec) soluble dans 100 mL de solution d'hydroxyde de sodium (NaOH 0,1 M) dans un flacon de 250 mL. Le surnageant a été isolé par centrifugation à 10 000 rpm durant 25 minutes, la procédure a été répétée trois fois avec les résidus. Les extraits combinés ont été filtrés et acidifiés par l'acide chlorhydrique (HCl 6 M) jusqu'à pH 1. La solution a porté à température 4 °C pour une nuit. La fraction qui précipite est appelée « acide humique (AH) », tandis que la fraction qui reste soluble est appelée « acide fulvique (AF) » [93]. Par centrifugation à 10 000 rpm durant 25 min, les acides humiques ont été séparés. Les deux fractions ont été séchées dans une étuve à 105 °C pendant 48 h et pesées. Les acides humiques et fulviques ont été exprimés en mg kg⁻¹ du solide total (TS) [172].

III.5.3 Les analyses spectroscopies

III.5.3.1 Spectroscopie ultra-violet visible (UV-vis)

La spectroscopie UV-Vis est fréquemment utilisée pour refléter les caractéristiques des composés aromatiques ou insaturés, où :

- Le rapport $Q_{2/4}$ reflète le rapport entre les lignines et d'autres matériaux en début de l'humification [116].
- Le rapport $Q_{2/6}$ traduit la relation entre les substances humifiées et non humifiées [116].
- Le rapport $Q_{4/6}$ désigne le degré de condensation et de polymérisation des molécules aromatiques, et peut réaliser la fonction d'indice d'humification [173]. Le rapport $Q_{4/6}$ peut également estimer le poids moléculaire [174].

Un mélange d'un 1g d'échantillon de compost avec 50 ml d'hydroxyde de sodium (NaOH 0,5 M) a été porté à l'agitation pendant 2 heures. Le mélange a été laissé une nuit, après ça, la suspension a été centrifugée à 3000 rpm durant 25 minutes, et suivie par le spectre d'absorption enregistré sur le spectrophotomètre UV-Vis Cary 60 de 200 nm à 800 nm. L'absorbance (A) mesurée à des longueurs d'onde de 280 nm, 472 nm et 664 nm permet de calculer les rapports d'absorbance suivants : $Q_{2/6}$ (A_{280}/A_{664}), $Q_{4/6}$ (A_{472}/A_{664}) et $Q_{2/4}$ (A_{280}/A_{472}).

III.5.3.2 Spectroscopie infrarouge (IR)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une technique d'analyse utilisée pour suivre les bandes caractéristiques de substance organique jusqu'à la fin du processus de compostage [175, 176]. Le principe de la spectroscopie infrarouge est basé sur l'interaction entre les radiations de la source lumineuse et les groupes fonctionnels chimiques de la matière. Malgré de beaucoup d'études effectuées sur la transformation de la matière organique en utilisant la spectroscopie IR [177, 178], cependant, il existe seulement peu d'études concernant la diagnostique de transformation de déchets des palmiers dattiers par la spectroscopie IR, en particulier sur la caractérisation des substances humiques pendant du compostage. Les substances humiques constituent la partie la plus importante de la matière organique due à leur effet sur l'écologie du sol, la structure, la fertilité et la croissance des plantes [179].

Une quantité équivalent de 2 mg d'un échantillon de compost (105 °C, 24 h) est mélangée avec 400 mg de KBr dans un mortier en agate, le mélange a été comprimé sous vide pendant 5 min. Les analyses infrarouges d'échantillons ont été réalisées sur une pastille (échantillon +

KBr) d'un diamètre de 13 mm, à l'aide d'un spectromètre FTIR Cary 660, couvrant une gamme de fréquences comprise entre 4000 et 400 cm^{-1} de nombre d'ondes.

III.6 Conclusion

Dans la partie expérimentale de la thèse, nous avons traité la possibilité de convertir les déchets de palmiers dattiers par la technique du compostage au produit organique riche en matières organique, stable et humifié.

Notre étude dans cette partie était basée sur la préparation de quatre milieux C1, C2, C3 et C4 formés à partir d'un mélange des différentes proportions des déchets de palmiers dattiers avec la luzerne. L'étude comprenait la détermination des paramètres tels que : la température, le pH, la conductivité électronique, la teneur en humidité, la teneur en carbone organique total, la teneur en azote Kjeldahl total, et le rapport C/N.

L'étude comprenait également les méthodes d'extraction de différentes substances humiques ainsi que la description des techniques d'analyse spectroscopie UV-visible et infrarouge utilisées dans le diagnostic de la matière organique et sa stabilité.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté les différents résultats obtenus aux principaux paramètres durant le processus de compostage tels que ; la température, le pH, l'humidité, la teneur en carbone organique, la teneur en azote, et le rapport C/N. Le suivi de ces paramètres avec l'interprétation des résultats obtenus nous a permis de déterminer le degré de maturité et la qualité des composts.

Les autres paramètres tels que : la teneur en substances humiques et les analyses spectroscopiques (UV-visible et infrarouge IR) ont également été traités dans ce chapitre. Le suivi de ces paramètres nous a permis d'interpréter les résultats obtenus en caractérisant la matière organique sur la base de sa composition biochimique, de son degré d'humification, et de la détermination de leurs groupes fonctionnels.

IV.2 Les principaux paramètres des substrats à composter

Les principaux paramètres des substrats à composter sont présentés, ci-dessous, dans le [tableau 9](#).

Tableau 9: Les principaux paramètres des substrats à composter

Les principaux paramètres	Déchets de palmiers dattiers (DPD) (<i>Phoenix dactylifera</i> L)	Plante de luzerne (<i>Medicago sativa</i> L)
L'humidité (H%)	3,5	32,5
pH	6,5	6,8
La conductivité électrique (mS/cm)	6,2	8,3
La matière sèche (MS %)	96,4	67,5
La matière organique totale (MO %)	89,4	77,3
Le carbone organique total (CO %)	52,0	44,9
L'azote total (N %)	0,3	3,8
Le rapport C/N	167,8	11,6

A la lumière de résultats obtenus, il apparaît clairement que les deux substrats sont des substances riches en carbone, où elles ont un taux en matières organiques 88,4 % pour les

déchets de palmiers dattiers et 77,3 % pour la luzerne. Les résultats ont également montré une teneur en azote total 0,3 % pour les déchets de palmiers dattiers et 3,8 % pour la luzerne. Ces résultats ont nous permis de calculer le rapport C/N pour les deux substrats, où nous avons remarqué que le rapport C/N de déchets des palmiers dattiers a été significativement plus élevé par rapport à la norme [180, 181], tandis que la luzerne a révélé un rapport C/N très favorable pour un substrat compostable. Pour cette raison, nous avons proposé de mélanger les déchets de palmiers dattiers avec la luzerne afin de favoriser le processus de compostage.

En plus, les analyses ont également présenté un pourcentage important en matière sèche à atteindre 96,4 et 67,5 % pour les déchets de palmiers dattier et la luzerne respectivement. Les valeurs de la conductivité électrique de deux substrats (6,2 ms/cm aux déchets des palmiers dattiers et 8,3 ms/cm à la luzerne) ont montré un taux de salinité très importants, avec un pH légèrement acide, où nous avons enregistré 6,5 pour les déchets du palmier dattier et 6,8 pour la luzerne.

IV.3 Évaluation des paramètres au cours du compostage

IV.3.1 Les paramètres de déchets de palmiers dattiers (DPD)

Le déchet de palmiers dattiers utilisés dans cette étude se compose principalement d'un mélange de trois sous-produits : 1/3 cornaf (pétiole), 1/3djerid (palmes) et 1/3 ziouane (pédicelle).

IV.3.1.1 La température

L'évolution de la température est le premier indicateur qui reflète l'activité microbienne pendant tout le processus de compostage, cet indicateur peut donc être considéré comme un signal de maturation du compost [141].

De la [figure 9](#), la courbe de l'évaluation de température de déchets des palmiers dattiers (DPW) a montré initialement une élévation dans la température à environ 35 °C due à la dégradation initiale intensive de la matière organique, puis elle a diminué progressivement pour attendre à la température ambiante au 90^{ème} jour.

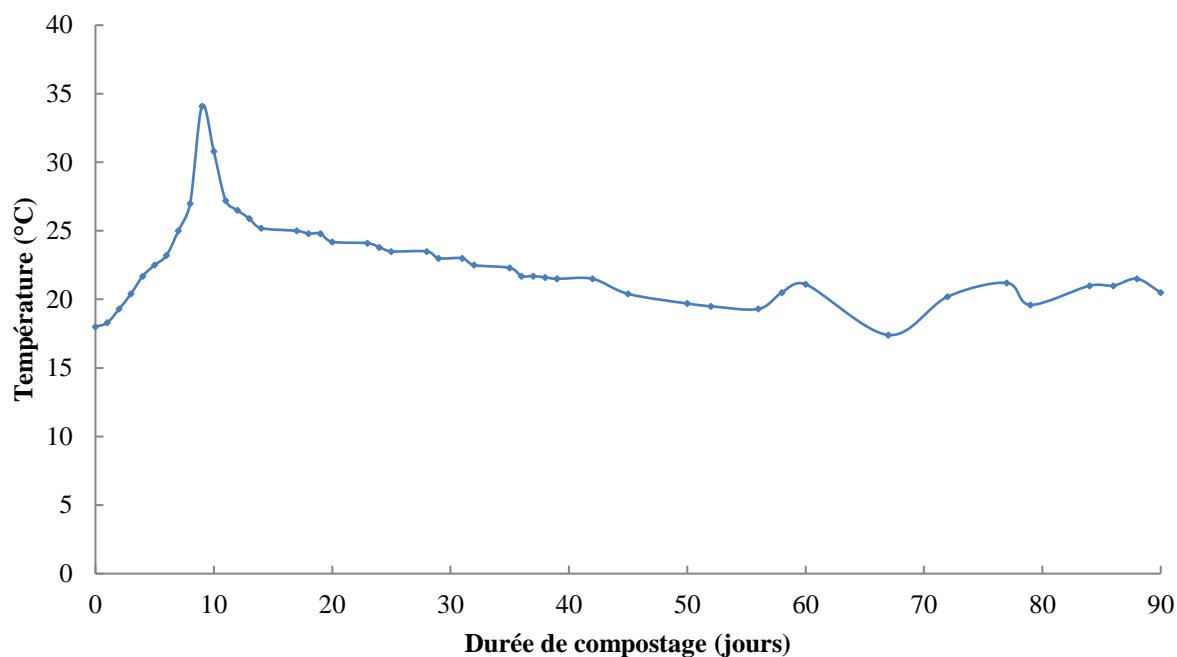


Figure 9: L'évolution de température de déchets des palmiers dattiers (DPD)

IV.3.1.2 Le pH

Le pH est également un indicateur parfait pour contrôler le développement de la biodégradation et l'activité microbienne du processus de compostage [141]. La valeur initiale de pH de déchets des palmiers dattiers (DPD) a été légèrement acide 6,5 à la température ambiante due à la décomposition des composés organiques facilement dégradables par les micro-organismes.

À partir de la [figure 10](#), les valeurs du pH ont montré une légère diminution du 1^{er} jour au 11^{ème} jour suivi par une augmentation progressive jusqu'au 29^{ème} jour, pour atteindre un pH de 7,3. Du 29^{ème} jour à la fin du compostage, les valeurs du pH ont oscillé autour de la valeur 7. Les gammes de pH doivent être compatibles avec la nature et le type de micro-organismes afin de pratiquer leur activité à pleine capacité, où les bactéries nécessitent généralement une gamme de pH de 6-7,5 ; les champignons ont besoin d'une gamme de pH de 5,5 à 8,0 ; et actinomycètes 5,0 à 9,0 [182].

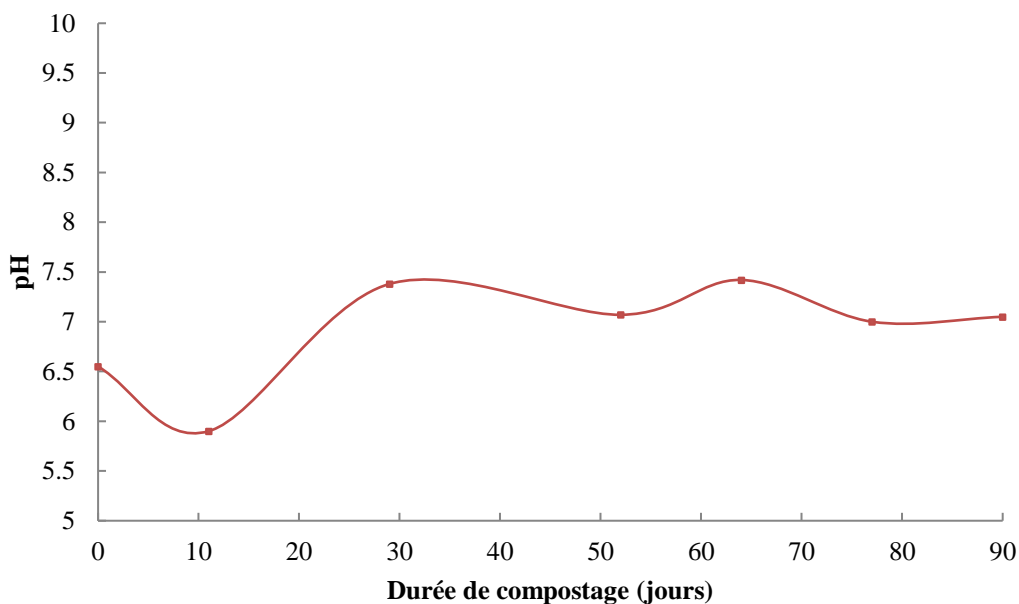


Figure 10: L'évolution de pH de déchets des palmiers dattiers (DPD)

IV.3.1.3 La conductivité électrique (CE)

La mesure de la conductivité électrique (CE) se réfère à l'étude des niveaux du sel dans le compost pour savoir si la teneur du sel dans le compost peut endommager la vie des plantes ou non, en raison de sa salinité ou de son inadéquation avec les exigences des plantes. Les plantes peuvent s'affecter négativement dans le sol qui a une salinité excessive [183].

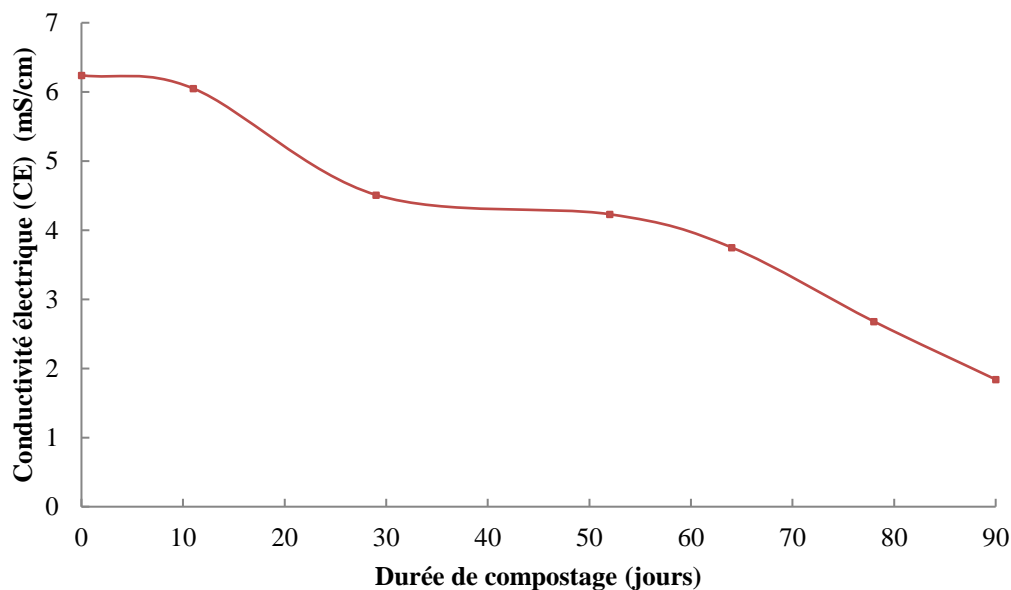


Figure 11: L'évolution de CE de déchets des palmiers dattiers (DPD)

D'après la [figure 11](#), la valeur initiale de la CE des déchets de palmiers dattiers a été 6,2 ms/cm, puis a progressivement diminué jusqu'à la fin du processus de compostage. La valeur CE obtenue après 90 jours n'était pas supérieure à la valeur limite 3 ms/cm [\[183\]](#).

IV.3.1.4 Teneur en humidité (H%)

La teneur en humidité considère parmi les facteurs environnementaux de base qui aident les micro-organismes à dégrader la matière organique. Le taux d'humidité a suivi périodiquement durant le processus de compostage, et la valeur finale obtenue 57,8% a été acceptable au déroulement de compost [\[184\]](#) ([Fig.12](#)).

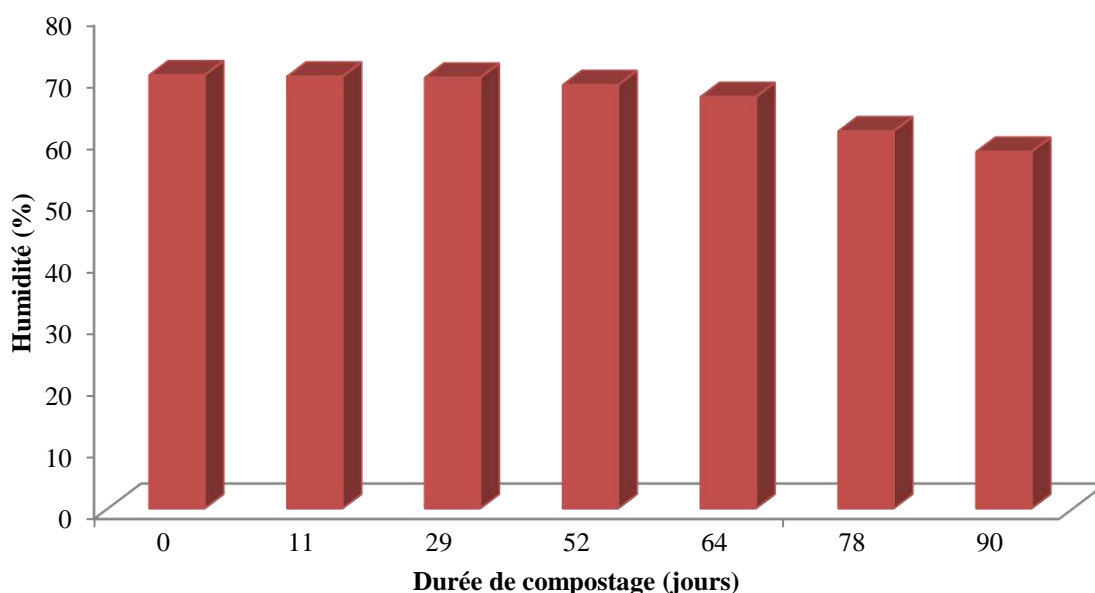


Figure 12: L'évolution d'humidité de déchets des palmiers dattiers (DPD)

IV.3.1.5 Teneur en carbone organique total (COT)

La teneur en carbone organique total est un paramètre chimique important pour suivre les étapes de maturité du compost pendant le processus de compostage et pour vérifier sa stabilité [\[185\]](#).

La courbe de l'évolution de la teneur en carbone organique total ([Fig.13](#)) a montré une diminution progressive variée de 52,0 % à 44,6 %, grâce aux réactions de minéralisation des composés organiques labiles [\[170\]](#), montrant une perte globale supérieure à 7 %.

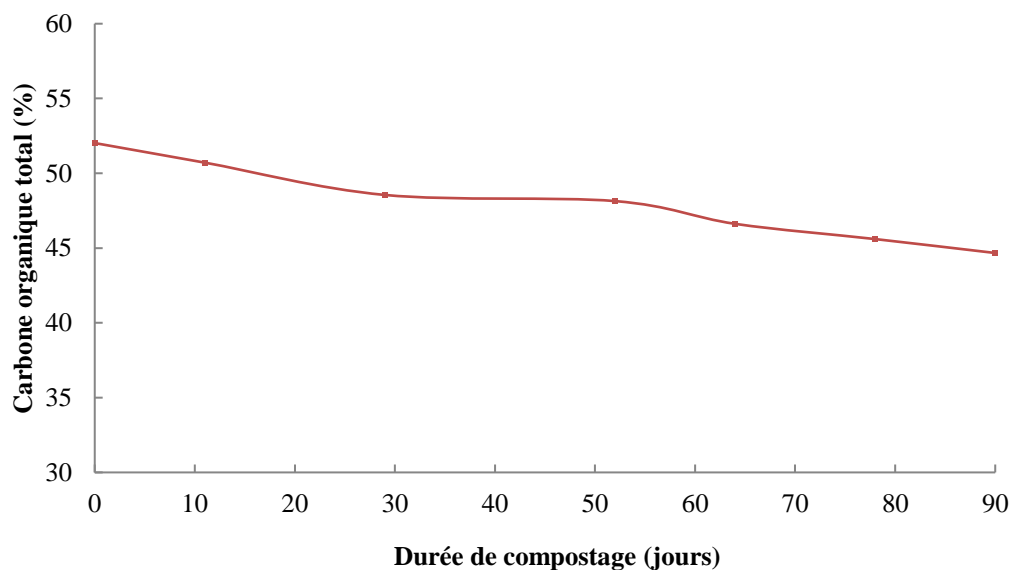


Figure 13: L'évolution de COT de déchets des palmiers dattiers (DPD)

IV.3.1.6 Teneur en azote Kjeldahl total (NKT)

Au cours du processus de compostage, la teneur en azote Kjeldahl total (NKT) a augmenté de 0,3 % (en 1^{er} jour) à 0,7 % (en 11^{ème} jour), pour se stabiliser dans la limite 0,9 % jusqu'à la fin du processus (Fig.14). La faible teneur en azote revient principalement au taux de carbone de déchets le plus élevé.

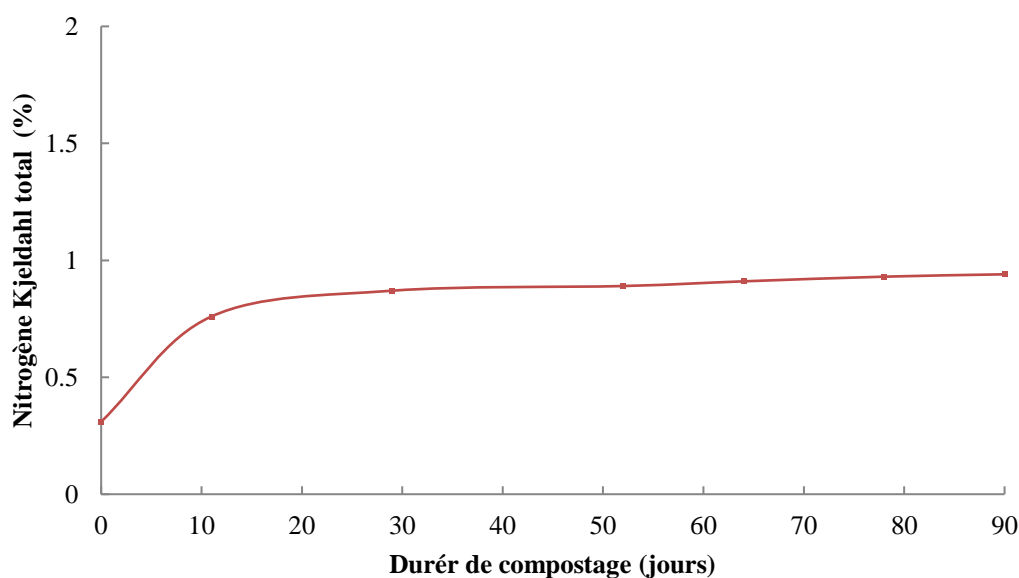


Figure 14: L'évolution de NKT de déchets des palmiers dattiers (DPD)

IV.3.1.7 Le rapport C/N

Le rapport C/N est un paramètre important avant, pendant et après le processus du compostage, car il détermine la capacité d'utiliser d'un compost mature comme une matière d'amendement au sol [181]. Le rapport C/N de déchets de palmiers dattiers a été relativement plus élevé, cette élévation revient principalement au taux de carbone le plus élevé et même temps au taux d'azote le plus faible (Fig.15).

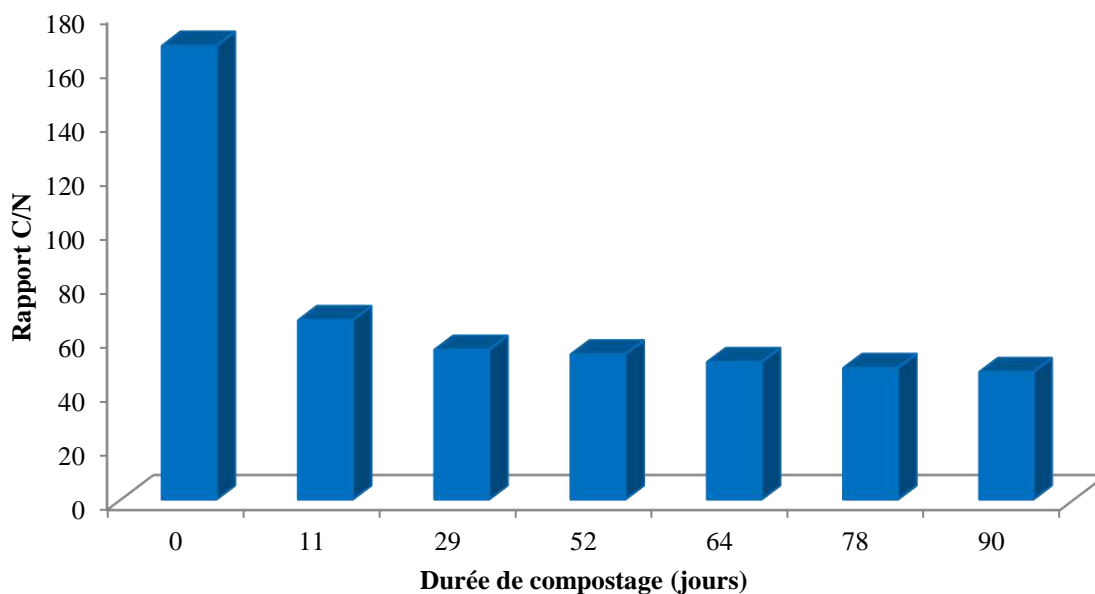


Figure 15: L'évolution de rapport C/N de déchets des palmiers dattiers (DPD)

IV.3.2 Les paramètres des mélanges (C1, C2, C3, et C4) de déchets des palmiers dattiers (DPD)

L'ajout de la source d'azote (*Medicago sativa* L) aux déchets du palmier dattier (DPD) nous a permis de préparer quatre mélanges nommés : C1, C2, C3, et C4.

IV.3.2.1 Température

La figure 16 représente les courbes de température des mélanges : C1, C2, C3, et C4. La courbe de température est caractérisée par deux phases distinguées : une phase thermophile et une phase de maturation [186].

La phase thermophile est caractérisée par une augmentation dans les valeurs de température, qui ont culminé à 40,3, 40,8, 42,5 et 45,7 °C pour les mélanges : C1, C2, C3, et C4 respectivement, cette élévation dans la température peut interpréter par l'existence d'une activité microbienne intensive résultant de la dégradation des molécules simples [187]. L'augmentation dans la température entraîne l'élimination des micro-organismes pathogènes et fait du compost comme une source nutritive saine pour la croissance des plantes [188].

La phase de maturation est caractérisée par une diminution dans les valeurs de température, où la température a baissé régulièrement pour atteindre la température ambiante : 22,2, 22, 21,5 et 21,2 °C pour C1, C2, C3, et C4 respectivement. Cette diminution dans la température est due à la décomposition de plupart molécules simples, et seulement les molécules résistantes à la dégradation qui restent (par exemple, la lignine, la cellulose). Dans cette phase, ce que l'on appelle l'humus est également formé en raison de la polymérisation de composés organiques entre eux pour donner un composé plus stable [189].

La fluctuation de la température peut principalement être due au changement climatique ou à l'effet du chauffage local dû au non-retournement et/ou non-renversement.

La diminution enregistrée au niveau des épaules de la température peut interpréter par le rapport C/N élevé dans les déchets bruts, les faibles quantités de nos substrats utilisés dans le compostage, et la température ambiante, où nous avons enregistré 0 °C pendant la phase thermophile. Le vent, la chaleur et la pluie peuvent également diminuer les épaules de température de déchets de palmiers dattiers accumulés une longue période (2-3 ans et parfois 5 ans ou plus) à travers la décomposition de certaines molécules facilement dégradables ou la rupture de certaines interactions faibles trouvées entre les molécules avant les subissent au processus de compostage, et que l'on peut expliquer par un pH acide de matière première.

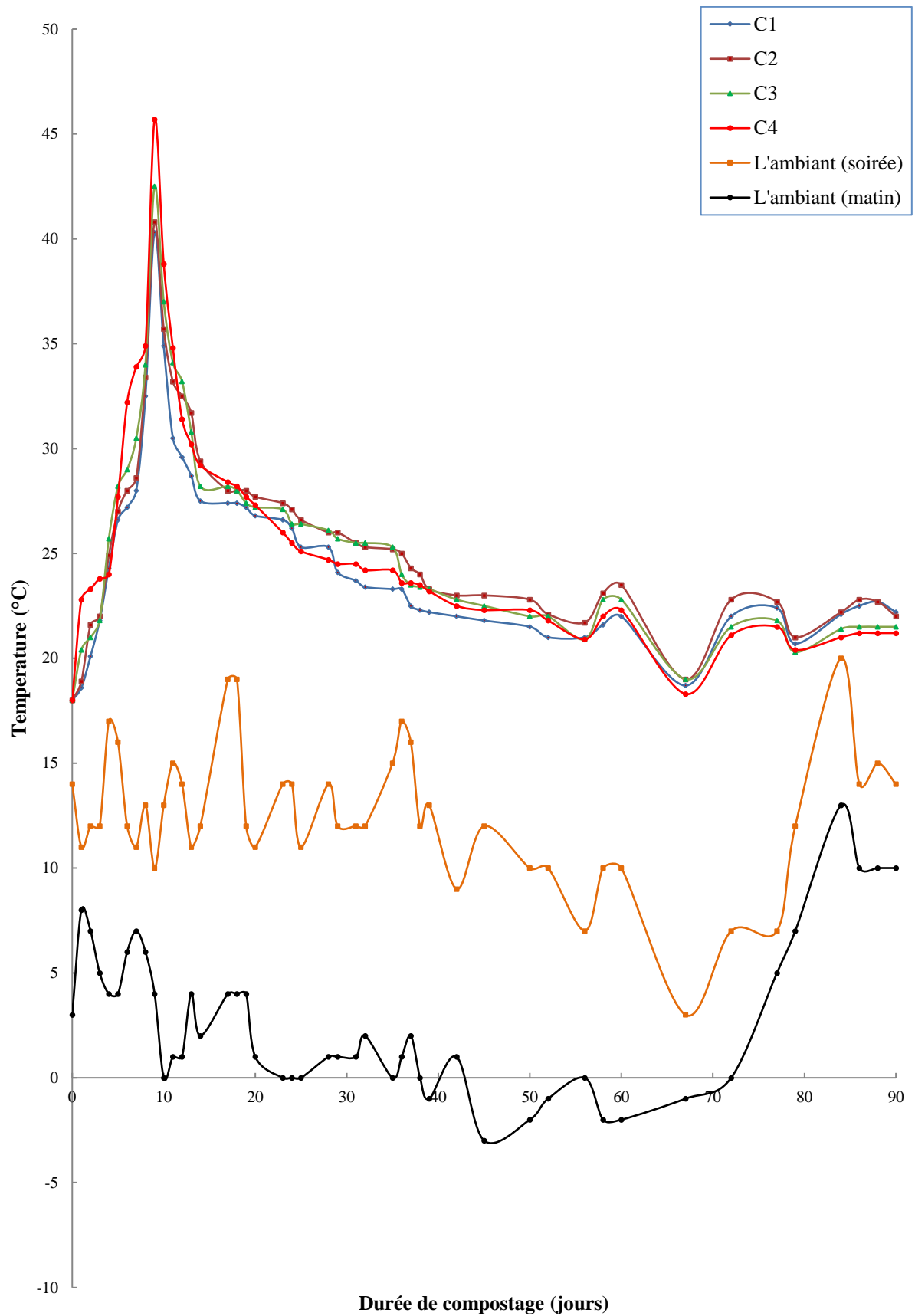


Figure 16: L'évolution de la température en fonction des jours pendant le processus de compostage pour les mélanges C1-C4

IV.3.2.2 Le pH

Le pH est également un facteur important qui influence la plupart des réactions biochimiques catalysées par des enzymes qui permettent la biodisponibilité des nutriments et la solubilité des éléments minéraux pour les micro-organismes [190]. L'évolution du pH en fonction du temps a montré deux phases différentes (Fig.17).

La première phase est appelée la phase acidogène, elle commence du 1^{er} jour au 11^{ème} jour de compostage. Dans cette phase tous les mélanges ont montré une légère diminution par rapport aux valeurs initiales 6,3, 6,4, 6,3 et 6,5 pour C1, C2, C3 et C4 respectivement. Cette diminution peut s'expliquer par la synthèse des acides organiques à partir de la décomposition des composés organiques facilement dégradables tels que ; les monosaccharides, l'amidon, et les lipides [191]. L'accumulation de ces acides conduit à l'acidification du milieu [192, 106].

La deuxième phase est la phase d'alcalinisation, du 11^{ème} jour jusqu'à la fin du compostage. Dans cette phase, les valeurs de pH des mélanges ont présenté un passage rapide du 11^{ème} jour au 29^{ème} jour, en raison de la consommation des acides organiques qui sont synthétisés précédemment [193]. Ensuite, du 29^{ème} jour jusqu'à la fin, les valeurs de pH ont montré un palier dû à la production d'ammonium à partir de la dégradation des protéines, des peptides et des acides aminés au cours du processus d'ammonification, et de la libération de bases préalablement intégrées dans la matière organique [194].

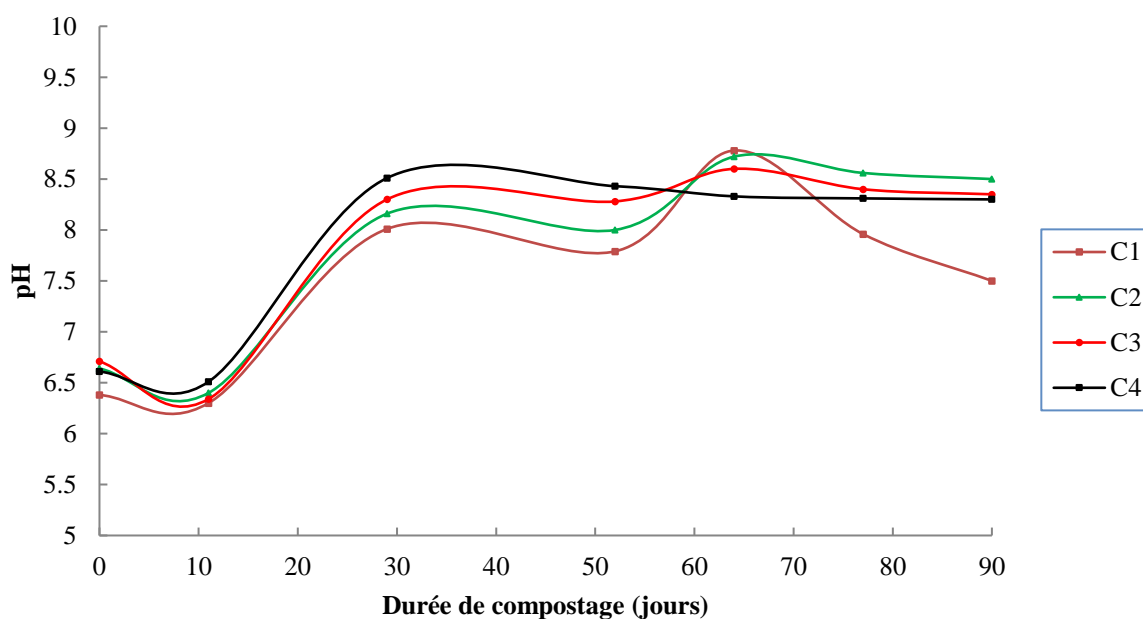


Figure 17: L'évolution de pH en fonction des jours de compostage pour les mélanges C1-C4

Finalement, les valeurs de pH obtenues après 90 jours de compostage ont été légèrement alcalines 7,5, 8,5, 8,3 et 8,3 pour C1, C2, C3, et C4 respectivement, ce qui fait de ces composts un produit sûr pour le sol et les plantes, notamment les composts C2, C3 et C4.

IV.3.2.3 La conductivité électrique (CE)

Les valeurs initiales de la conductivité électrique des composts ont été ; 4,2, 4,3, 4,9 et 5,8 mS/cm pour les mélanges ; C1, C2, C3, et C4 respectivement.

À travers les résultats présentés dans la figure 18, le mélange C1 a atteint sa valeur maximale 5,1 mS/cm dans le 11^{ième} jour, tandis que les mélanges C2, C3, et C4 dans le 52^{ième} jour aux environs 6,4, 6,2 et 7,4 mS/cm, en raison de la dégradation des substrats organiques facilement biodégradables et de l'augmentation de la concentration des ions de certains sels solubles tels que ; l'ammonium et le phosphate [183, 118]. Ensuite, les valeurs de la CE sont progressivement diminuées jusqu'à la fin du compostage à 2,1, 2,0, 2,6 et 2,9 ms/cm pour les mélanges C1, C2, C3 et C4 respectivement, due à la libération d'ions d'ammonium suivies par la réduction des autres groupes basiques. Les valeurs de la CE obtenues après 90 jours de compostage n'étaient pas supérieures à la valeur limite 3 ms/cm [195].

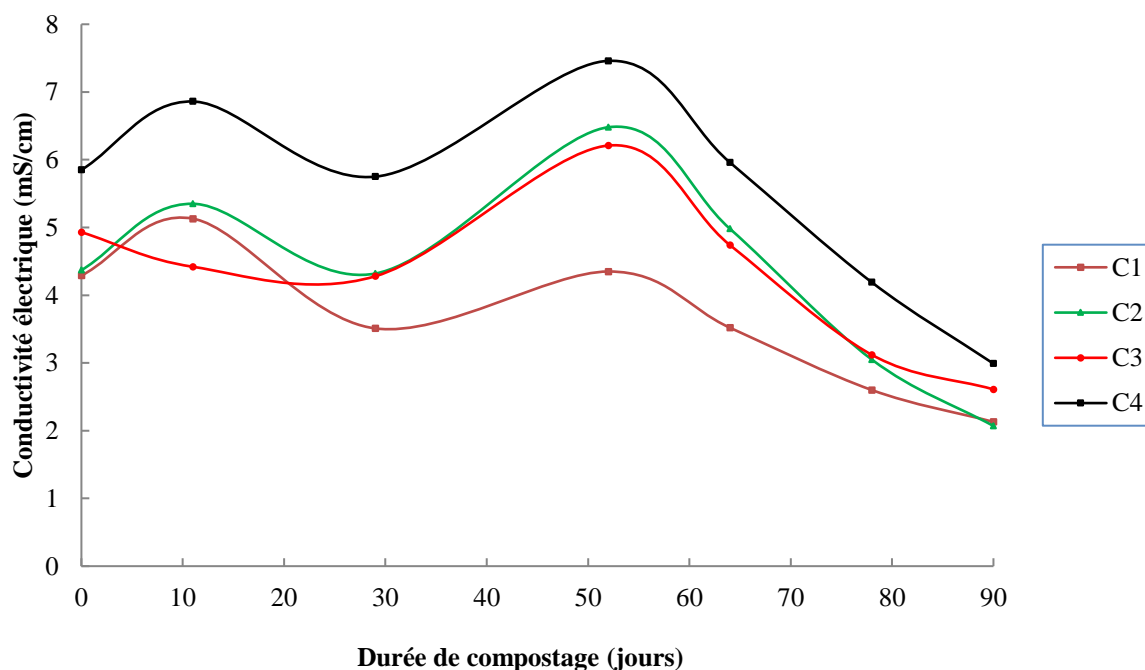


Figure 18: L'évolution de conductivité électrique (CE) en fonction des jours de compostage pour les mélanges C1- C4

IV.3.2.4 Teneur en humidité

Les niveaux d'humidité des mélanges C1- C4 (Fig.19) ont suivi durant le processus de compostage, où les taux finaux d'humidité des mélanges C1, C2, C3, et C4 ont atteint d'environ 48,3, 42,7, 38,5, et 35,6 % respectivement, qui sont considérés comme des valeurs optimales pour assurer un déroulement acceptable à la matière organique. La diminution globale dans les taux d'humidité aux mélanges revient à la ventilation utile résultant de mixage ainsi qu'à l'élévation de température du milieu [184]. La différence entre les taux d'humidité des mélanges est principalement due à la composition quantitative des mélanges comme le montre dans le tableau 8.

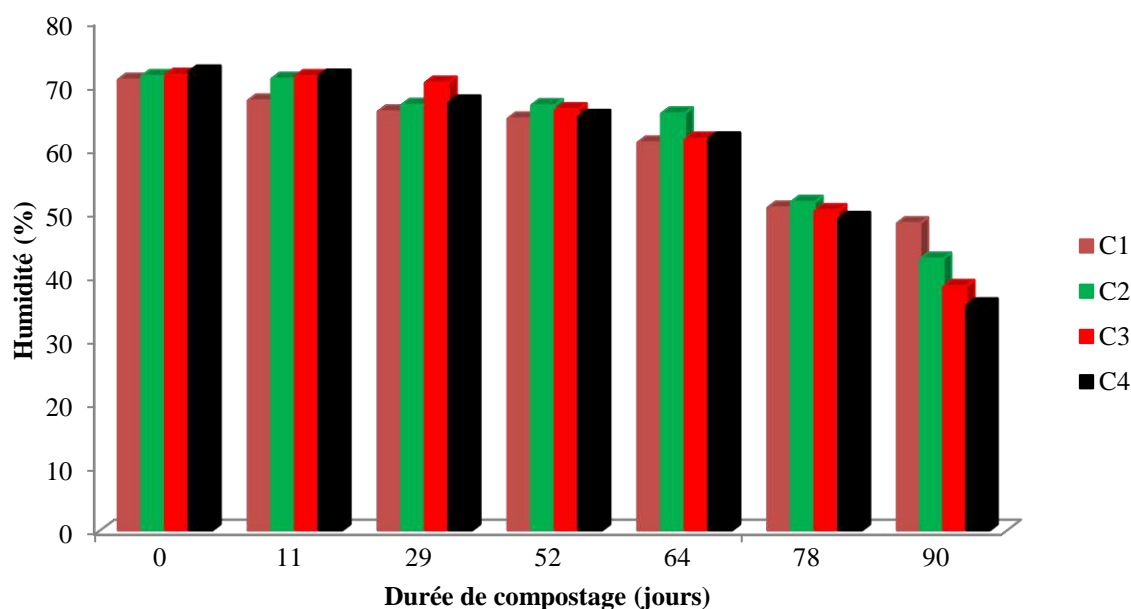


Figure 19: L'évolution d'humidité en fonction des jours de compostage pour les mélanges C1-C4

IV.3.2.5 Teneur en carbone organique total (COT)

La nature du contenu organique obtenu après le compostage donne une bonne impression sur la stabilité ou l'instabilité du compost [196]. La diminution de teneur en carbone organique total pendant le processus du compostage est un signe positif au bon compost et bon indice d'humification [197].

De la figure 20, la teneur en carbone organique total a décliné de 50,6, 49,9, 49,2, et 48,5 % en début de compostage au 48,4, 49,4, 47,7 et 46,4 % en 11^{ème} jour du compostage pour les mélanges ; C1, C2, C3, et C4 respectivement, suivi par une diminution progressive jusqu'à la fin montrant une perte globale supérieure ou est égale à 10 % du carbone organique pour les mélanges ; C2, C3 et C4. Cette diminution dans la teneur en carbone organique total peut s'expliquer par les réactions de minéralisation des composés organiques labiles qui ont lieu pendant la phase thermophile [170], grâce à l'intervention des bactéries thermophiles pour finalement produire l'eau et la chaleur avec libération de dioxyde de carbone [155].

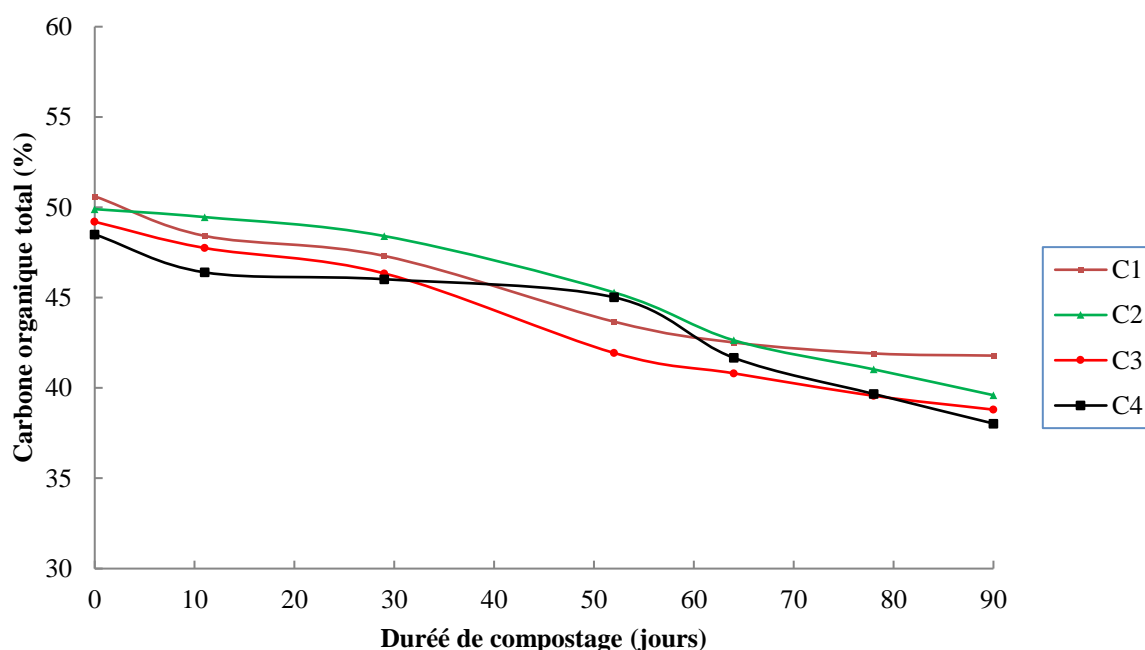


Figure 20: L'évolution de carbone organique total en fonction de temps du compostage pour les mélanges C1- C4

IV.3.2.6 Teneur en azote Kjeldahl total (NKT)

Au cours du processus de biotransformation, la teneur en carbone organique total a diminué, tandis que la teneur en azote total a augmenté. À partir de la figure 21 qui représente l'évolution des teneurs en azote en fonction des jours du compostage, nous avons observé que les mélanges C1 et C2 ont présenté une augmentation de 1,0 % et 1,3 % en 1^{er} jour au 1,8 % et 2,3 en 64^{ème} jour, pour se stabiliser à ces valeurs jusqu'à la fin du compostage. Les mélanges C3 et C4 ont diminué initialement de 1,7 et 2,0 % en 1^{er} jour au 1,2 et 1,6 % en

11^{ème} jour, pour s'augmentent graduellement jusqu'au 64^{ème} jour à environ de 2,4 et 2,6 % respectivement, après ça, ils ont resté presque constant jusqu'à la fin du processus.

Les teneurs en azote total dépendent par les ratios des molécules d'azote résultant de la dégradation des matières organiques durant le processus du compostage et leur capacité de minéralisation [75].

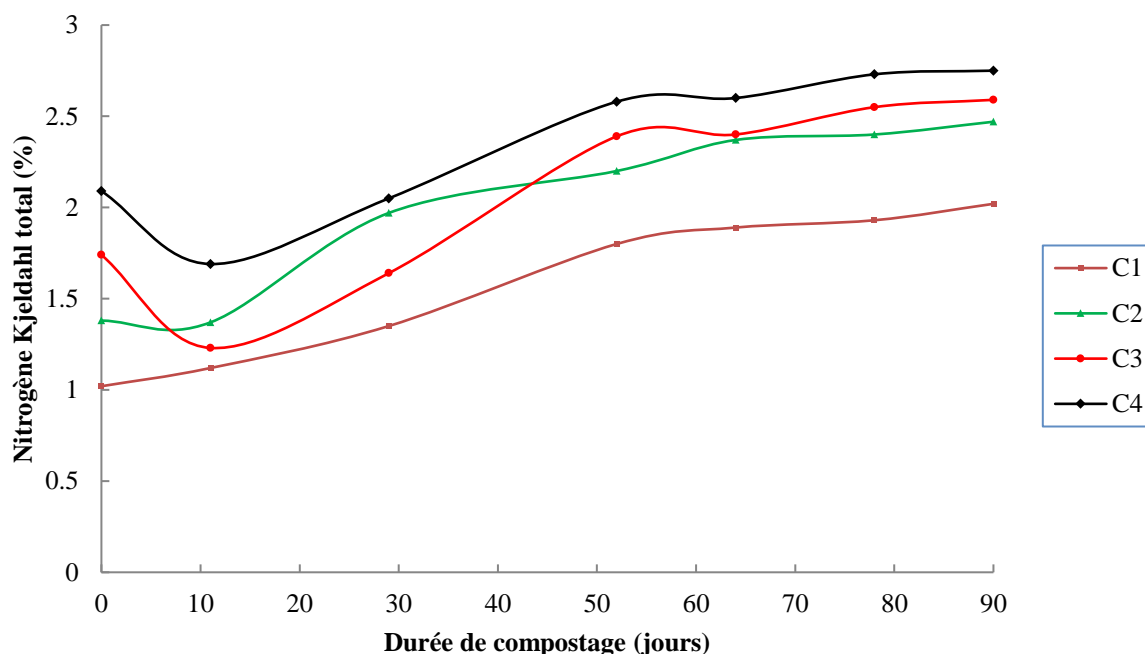


Figure 21: L'évolution de l'azote total en fonction des jours de compostage pour les mélanges C1-C4

IV.3.2.7 Le rapport C/N

Le mélange C1 a montré un rapport C/N significativement plus élevé par rapport aux autres mélanges (C2-C4), et ceci est dû à la teneur élevée en carbone et faible en azote.

Le compost mature est une substance qui a un rapport C/N varie de 10 à 15 [198], de 17,5 à 20 [199], ou bien de 20 à 40 [180]. Cependant, [181] ont trouvé que si le rapport C/N dépasse 20, il peut affecter négativement à la vie de la plante. La matière première utilisée dans le processus de compostage joue un rôle important dans le rapport C/N obtenu. Une partie de carbone est perdue par l'activité biologique des micro-organismes pendant la dégradation sous forme de dioxyde de carbone CO₂ [200]. À partir des données de la figure 22, il est à noter qu'il n'y a pas de différence significative entre les composts C3 et C4 en ce

qui concerne le rapport C/N, et il est également noté que ces composts sont arrivés à la maturité avant les composts C2 et C1.

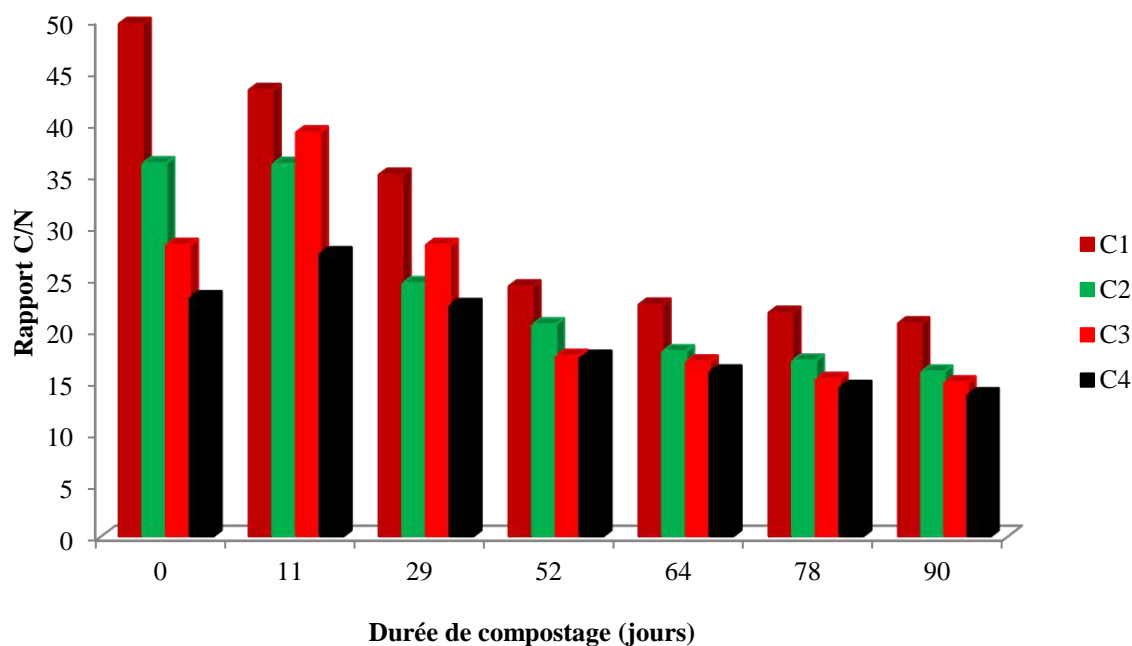


Figure 22: L'évaluation de rapport C/N en fonction des jours de compostage pour les mélanges C1-C4

IV.4 Caractérisation de la substance humique et de la matière organique par spectroscopies UV-visible et FTIR

Les méthodes des analyses spectroscopies UV-visible et FTIR sont majoritaires utilisées dans la caractérisation des substances formées pendant l'humification de la matière organique [201].

IV.4.1 Caractérisation de la substance humique et de la matière organiques des déchets des palmiers dattiers (DPD)

IV.4.1.1 Teneur en substances humiques

L'humification est un processus important lors du compostage de la matière organique, où nous observons une formation des substances humiques et une décomposition des substances non humiques [176, 118]. La substance humique représente la partie la plus importante de la matière organique [116].

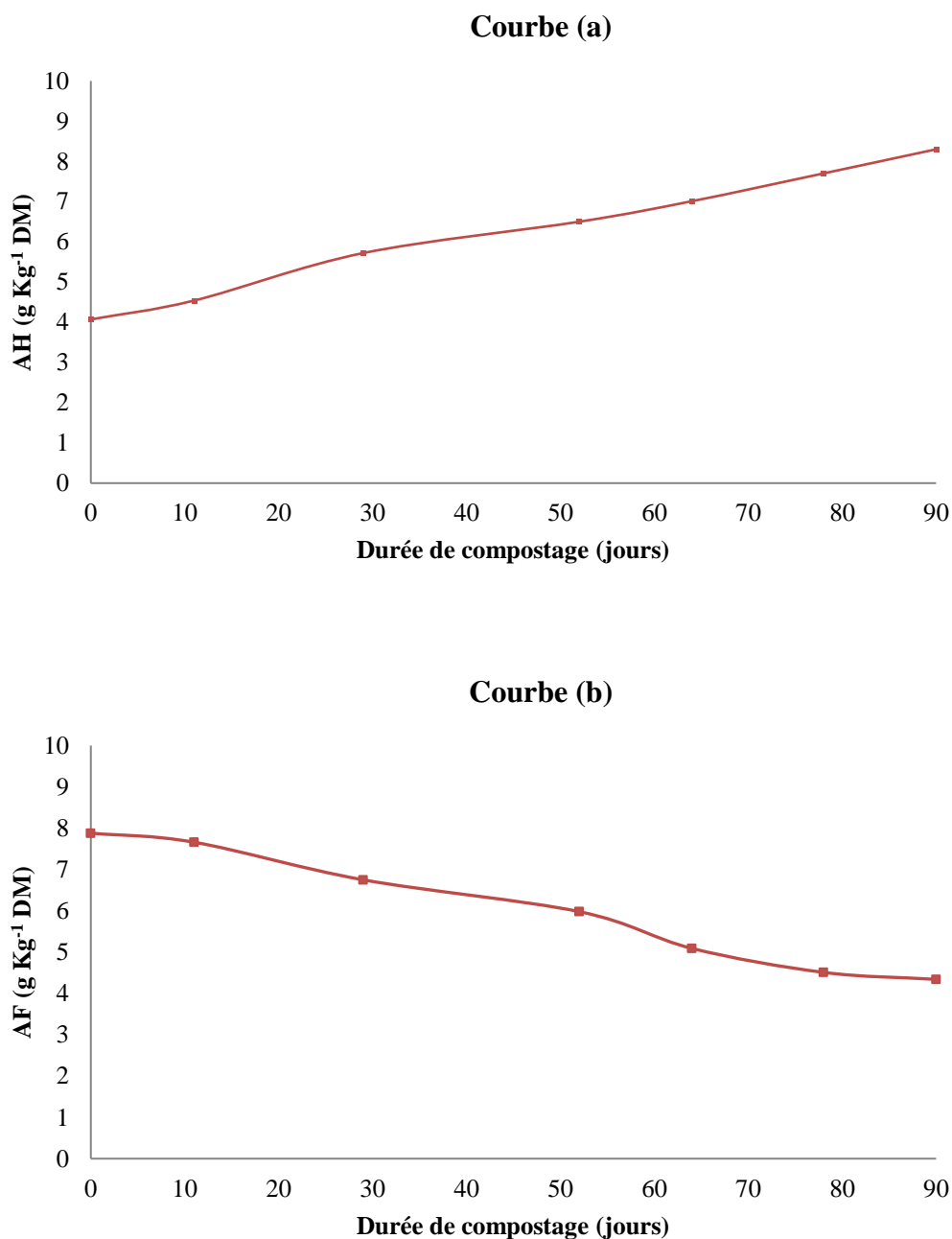


Figure 23: L'évolution de la substance humique (AH, AF) de déchets des palmiers dattiers (DPD)

D'après les résultats présentés dans la figure 23, nous constatons que les valeurs des acides humiques (AH) (Courbe a) ont montré une augmentation progressive durant le processus du compostage de 4,0 à 8,3 dues à l'activité microbienne intensive. Tandis que les valeurs des acides fulviques (AF) (Courbe b) ont montré une diminution progressive de 7,8 à 4,3 jusqu'à la fin du compostage dû à l'absence de formation des nouvelles molécules des acides fulviques ou bien à l'utilisation de ces acides par les micro-organismes.

Tableau 10: Les rapports HA/FA de déchets des palmiers dattiers

Les jours de compostage	HA/FA
	Déchets des palmiers dattiers (DPD)
0	0,5
11	0,5
29	0,8
52	1,0
64	1,3
78	1,7
90	1,9

IV.4.1.2 Caractérisation spectrale de l'évolution et de l'humification de la matière organique

IV.4.1.2.1 L'analyse spectroscopie UV-visible

L'analyse spectroscopie UV-visible est une technique utilisée pour caractériser et étudier l'évolution des substances humiques de compost d'une manière nous permet de comprendre la nature des réactions qui ont lieu durant le compostage [138] et pour déterminer les propriétés moléculaires de substance humique [202].

Le spectre UV-visible de déchets des palmiers dattiers (Fig.24) a montré une diminution au niveau de l'absorbance accompagnée par une augmentation dans la longueur d'onde limitée entre 200 et 800 nm. La forme de spectre a révélé que les épaules les plus élevées ont été à 200, 202, 203, 205 et 207 nm, avec une absorption 1,26, 1,59, 1,63, 1,80, et 1,95 aux jours de compostage 11^{ème}, 29^{ème}, 52^{ème}, 64^{ème} et 90^{ème} jours respectivement.

Le spectre UV-visible comprend trois régions significatives où l'absorbance a été mesurée à $\lambda = 280, 400-500$ nm et au-dessus de 600 nm. L'analyse de l'UV-vis repose principalement sur la conception disant que : l'absorption à 260-280 nm est habituellement revenue au bien départ de la transformation de matière organique, tels que lignine et quinine. L'absorption à 460-480 nm traduit le début de l'humification de la matière organique. L'absorption à 600-670 nm est limitée à l'existence des substances fortement humifiées avec un degré d'aromaticité élevé et des groupes condensés [116].

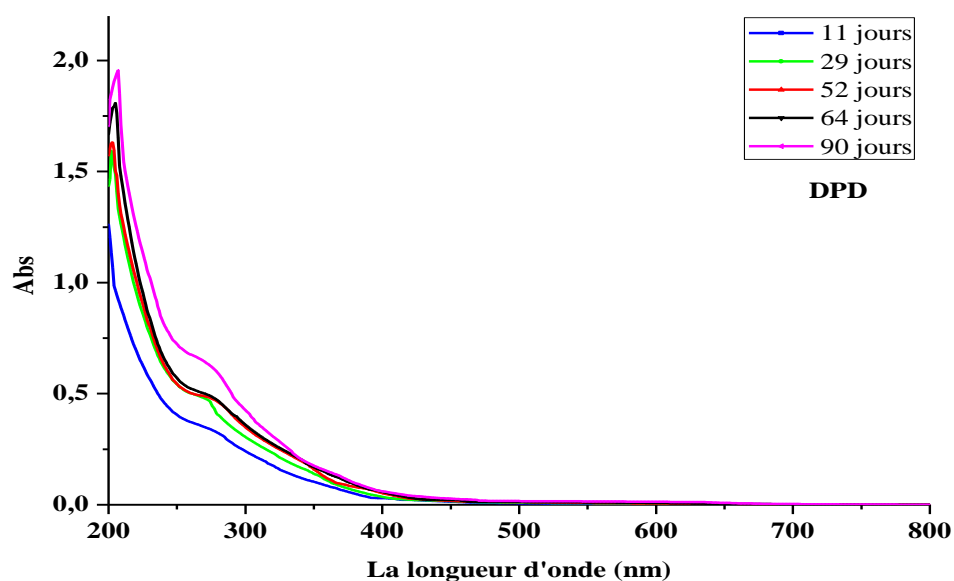


Figure 24: L'évolution de l'humification de la matière organique de déchets des palmiers dattiers par la spectroscopie UV-visible pendant le processus du compostage

En utilisant les rapports d'absorbance $Q_{2/4}$, $Q_{2/6}$ et $Q_{4/6}$, qui peuvent être calculés à partir des relations suivantes : $Q_{2/4} = A_{280}/A_{472}$, $Q_{2/6} = A_{280}/A_{664}$ et $Q_{4/6} = A_{472}/A_{664}$. La diminution dans les rapports $Q_{2/6}$ ou $Q_{4/6}$ dénote un niveau d'humification de la matière organique plus élevé et un degré de condensation aromatique plus élevé [116].

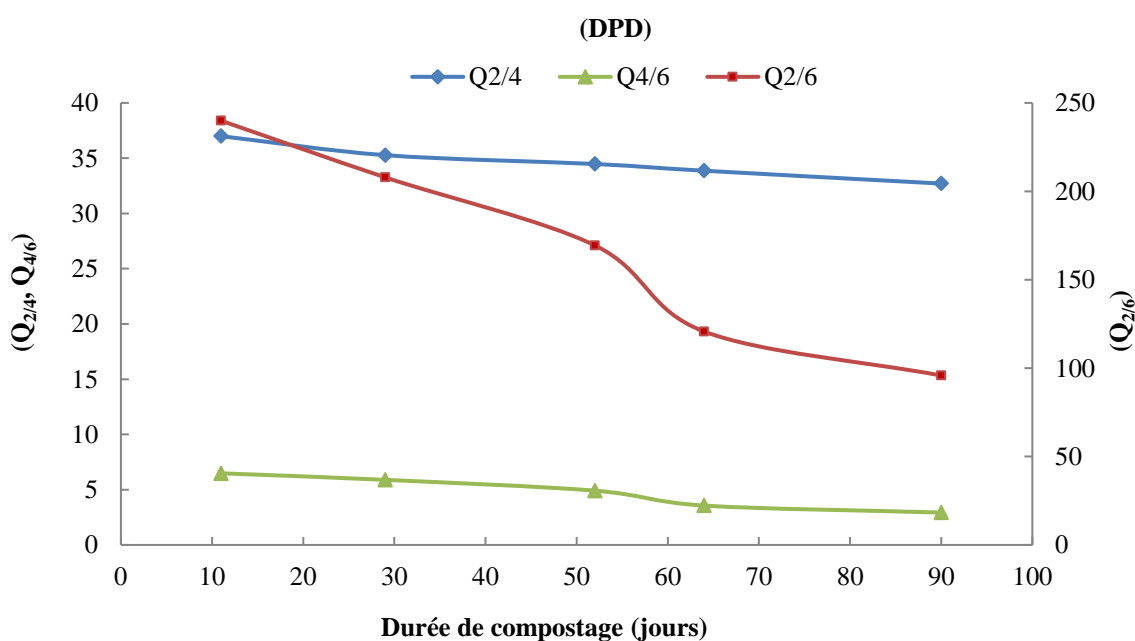


Figure 25: Les rapports d'absorbance : $Q_{2/4}$ (A_{280}/A_{472} nm), $Q_{2/6}$ (A_{280}/A_{664} nm), $Q_{4/6}$ (A_{472}/A_{664} nm) d'une solution 0.5M NaOH pour le DPD

La figure ci-dessus (Fig.25) a montré que les rapports $Q_{2/6}$ ont diminué progressivement jusqu'à la fin du compostage enregistrant une valeur est égale à 95,82. Les rapports $Q_{2/4}$ ont tendu à rester constants à l'absorbance 32,70, tandis que les rapports $Q_{4/6}$ ont diminué légèrement de 6,48 à 2,93. Les rapports $Q_{4/6}$ qui sont inférieurs à 5 indiquent aux acides humiques, tandis que les rapports $Q_{4/6}$ qui sont supérieurs à 5 indiquent aux acides fulviques [116]. La valeur finale $Q_{4/6}$ des déchets des palmiers dattiers a été inférieure à 5, ce qui indique que le compost de déchets des palmiers dattiers possède une teneur de l'acide humique plus grande que de l'acide fulvique.

IV.4.1.2.2L'analyse spectroscopie infrarouge (FT-IR)

Pour obtenir des informations sur les bandes caractéristiques de la matière organique, on utilise la spectroscopie infrarouge [204]. Le spectre IR résume beaucoup d'informations principales pour donner une vue plus holistique sur la complexité de l'échantillon [203].

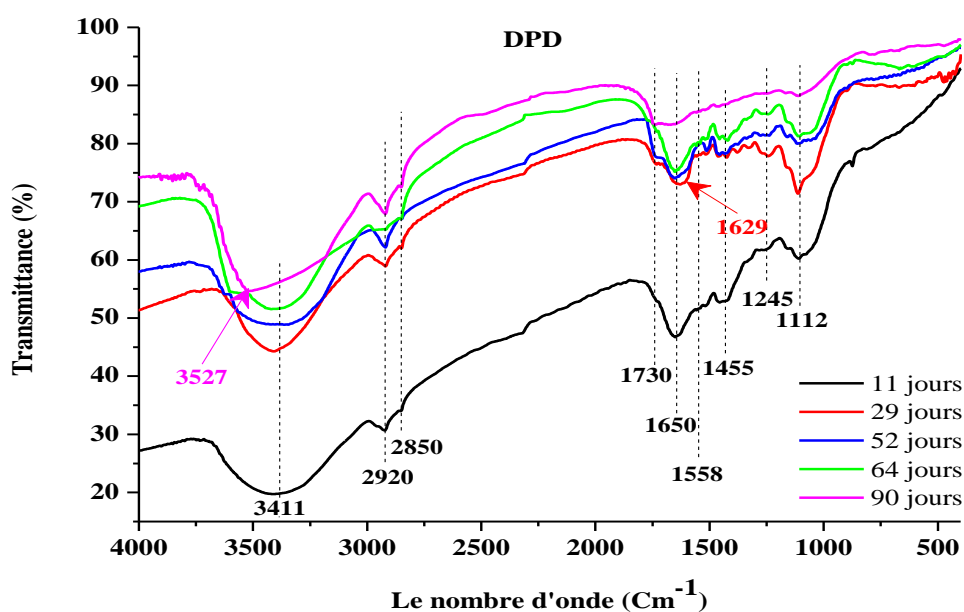


Figure 26: L'évolution de la matière organique de déchets des palmiers dattiers (DPD) par la spectroscopie IR pendant le processus du compostage

La figure 26 représente le spectre infrarouge de l'évolution de dégradation de la matière organique de déchets des palmiers dattiers (DPD) aux différents jours de compostage (11^{ième}, 29^{ième}, 52^{ième}, 64^{ième} et 90^{ième} jour). Le spectre IR a montré que, à l'exception de l'intensité, la plupart des bandes limitées entre 3700 et 2000 cm^{-1} ne montrent aucun changement jusqu'à la

fin du compostage, tandis que la zone confinée entre 2000 et 500 cm^{-1} a présenté un changement léger dans les bandes d'absorption.

IV.4.2 Caractérisation de la substance humique et de la matière organiques des mélanges C1-C4

IV.4.2.1 Teneur en substances humiques

À travers les résultats présentés dans la figure ci-dessous (Fig.27), nous avons vu que, bien que la différence observée entre les mélanges C1-C4 en ce qui concerne les teneurs en fractions humiques, les tendances indiquent clairement que les acides fulviques (AF) diminuent et les acides humiques (AH) augmentent pendant le processus de compostage.

La courbe (a) d'évaluation des acides humiques (AH) a montré une augmentation progressive pendant le processus du compostage à ranger de 10,0 à 23,6 pour C1, de 15,9 à 29,0 pour C2, de 16,8 à 30,7 pour C3, et de 21,8 à 37,2 pour C4. Alors que la courbe (b) d'évaluation des acides fulviques (AF) a présenté une diminution progressive à ranger de 17,4 à 10,4 pour C1, de 18,9 à 11,0 pour C2, de 20,7 à 13,0 pour C3, et de 24,0 à 15,5 pour C4 à la fin du compostage. L'augmentation de la teneur en AH représente un signe important pour indiquer le taux d'humification et la maturité du compost [80].

En début, avec l'activité des microorganismes intensive, les teneurs des acides humiques (AH) ont augmenté progressivement pour atteindre à 21,9 pour C1, 21,6 pour C2, 26,7 pour C3, et 26,5 pour C4. Puis ont diminué à 19,6 pour C1, 20,1 pour C2, 21,4 pour C3, et 25,4 pour C4 due à l'utilisation de certaines petites molécules des acides humiques par les microorganismes comme une source nutritive [205]. Ensuite, les teneurs en acides humiques ont augmenté de nouveau en raison de la formation de ces acides humiques à partir de nombreuses petites molécules [206]. Les niveaux des acides humiques varient généralement en fonction de la quantité et de la qualité des matières premières utilisées, ce qui signifie que les valeurs d'acide humique d'un compost ne peuvent pas être utilisées comme indicatrices de la maturité d'un autre compost [124].

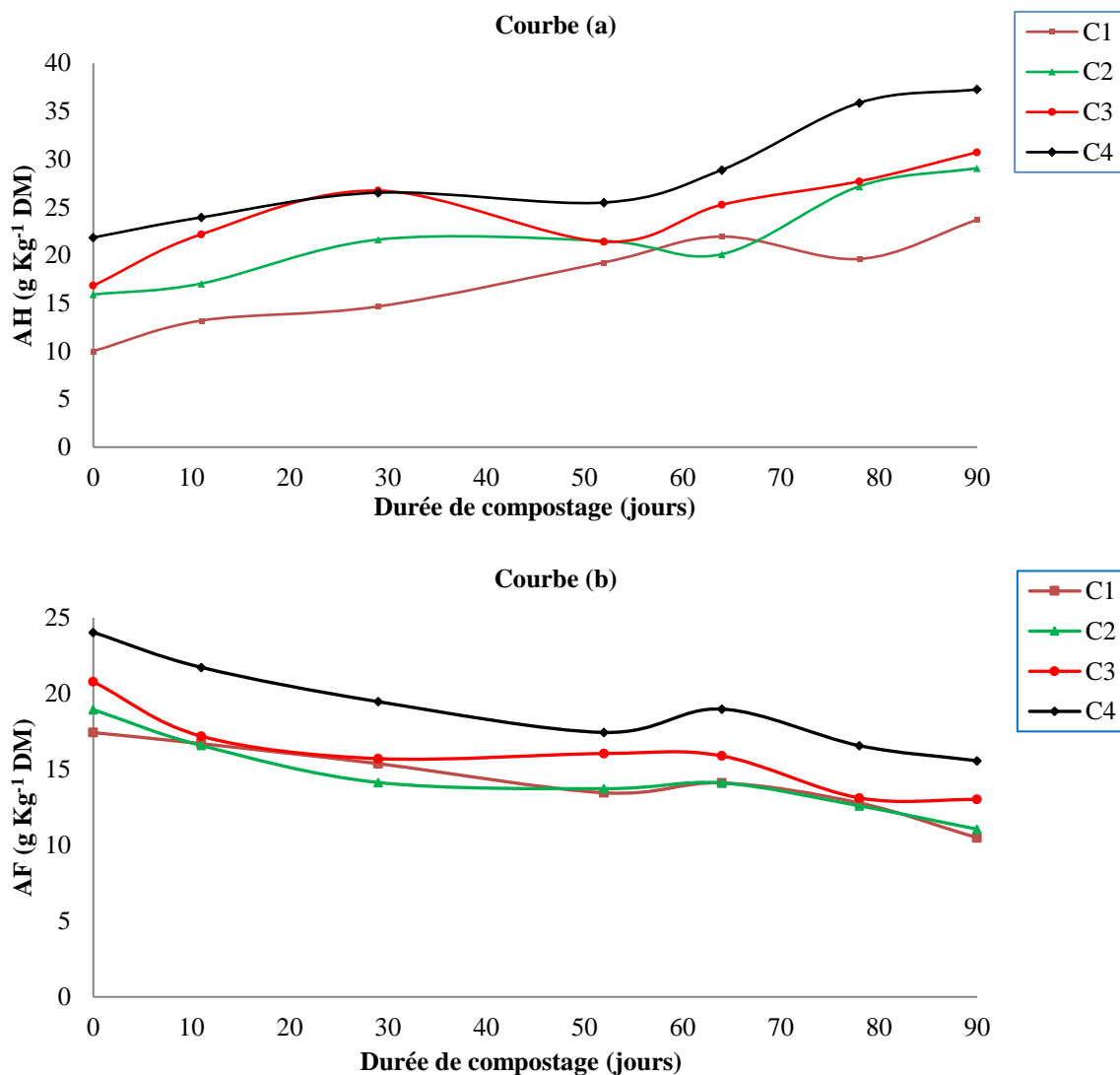


Figure 27: L'évolution de la substance humique (AH, AF) lors de compostage des mélanges C1-C4

Tableau 11: Les rapports AH/AF des mélanges C1- C4

Les jours de compostage	AH/AF			
	C1	C2	C3	C4
0	0,5	0,8	0,8	0,9
11	0,7	1,0	1,2	1,1
29	0,9	1,5	1,7	1,3
52	1,4	1,5	1,3	1,4
64	1,5	1,4	1,5	1,5
78	1,5	2,1	2,1	2,1
90	2,2	2,6	2,3	2,3

IV.4.2.2 Caractérisation spectrale de l'évolution et de l'humification de la matière organique

IV.4.2.2.1 L'analyse spectroscopie UV-visible

L'absorption des radiations électromagnétiques dans la région UV-visible est associée à des transitions électroniques dues à l'excitation d'un électron d'une orbitale stable vers une orbitale instable [207].

La figure 28 représente l'évolution d'humification de la matière organique des mélanges (C1-C4) entre la longueur d'onde 200 et 800 nm. Les spectres UV-visible de tous les mélanges ont montré que ; plus la valeur de la longueur d'onde est élevée, plus la ration d'absorption est faible.

- Pour le mélange C1 ; la forme de spectre a révélé que les épaules supérieures ont été à la longueur d'onde 203, 205, 207, 209 et 210 nm avec un changement dans l'absorption ont atteint à 1,48 au 11^{ième} jour, 1,61 au 29^{ième} jour, 1,70 au 52^{ième} jour, 1,86 au 64^{ième} jour, et 2,01 au 90^{ième} jour.

- Pour le mélange C2 ; un changement significatif a observé au niveau de la longueur d'onde et de l'absorption, où la forme de spectre a révélé que la longueur d'onde a été 205 nm en 11^{ième} jour avec une absorbance 2,10. Elle a changé progressivement son sommet au 209 nm en 29^{ième} jour avec une absorbance 2,15, au 214 nm en 52^{ième} jour avec une absorbance 2,25, et au 215 nm en 64^{ième} jour avec une absorbance 2,40, pour arriver finalement à une longueur d'onde plus longue d'environ 217 nm avec une absorbance est égale à 2,49 au 90^{ième} jour.

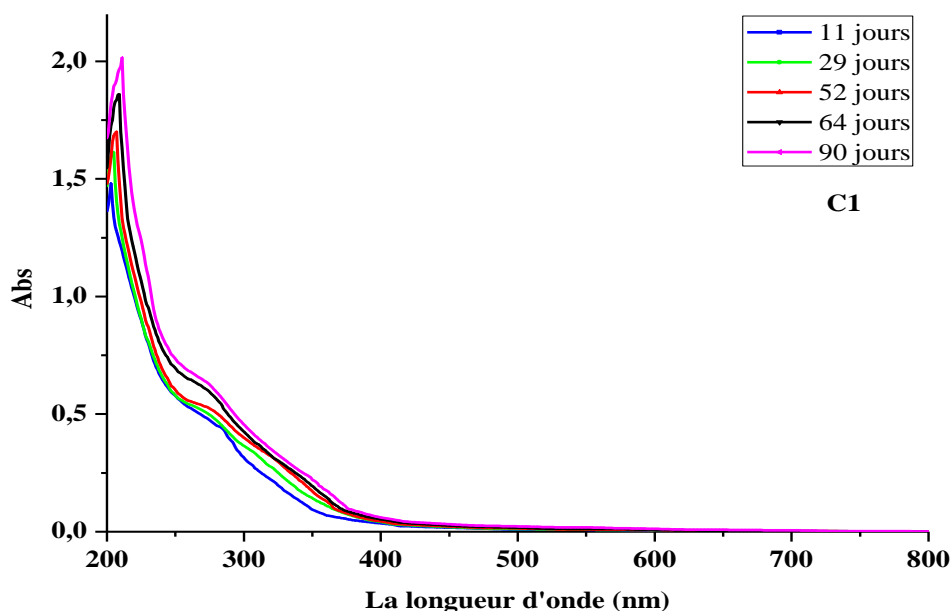
- Pour le mélange C3 ; la forme de spectre a révélé que l'épaule supérieure a été 211 nm au 11^{ième} jour avec d'absorbance est égale à 2,26, pour changer progressivement son sommet :en 29^{ième} jour atteignant à la longueur d'onde 213 nm avec 2,59 d'absorbance, en 52^{ième} jour atteignant à 218 nm avec 2,82 d'absorbance et en 64^{ième} jour à 223 nm avec 3,13 d'absorbance, pour arriver à sa haute valeur 224 nm après le 90^{ième} jour avec 3,28 d'absorbance.

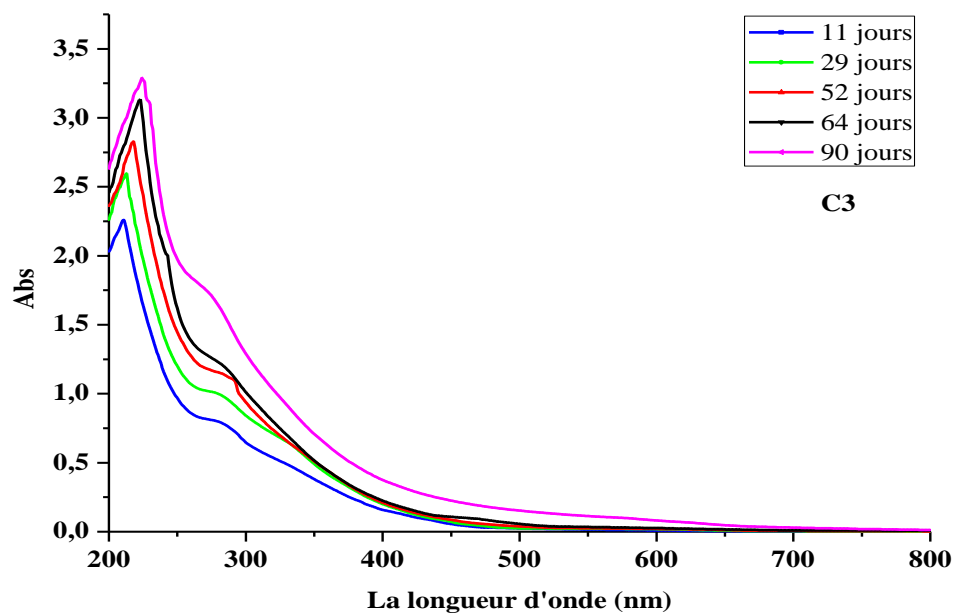
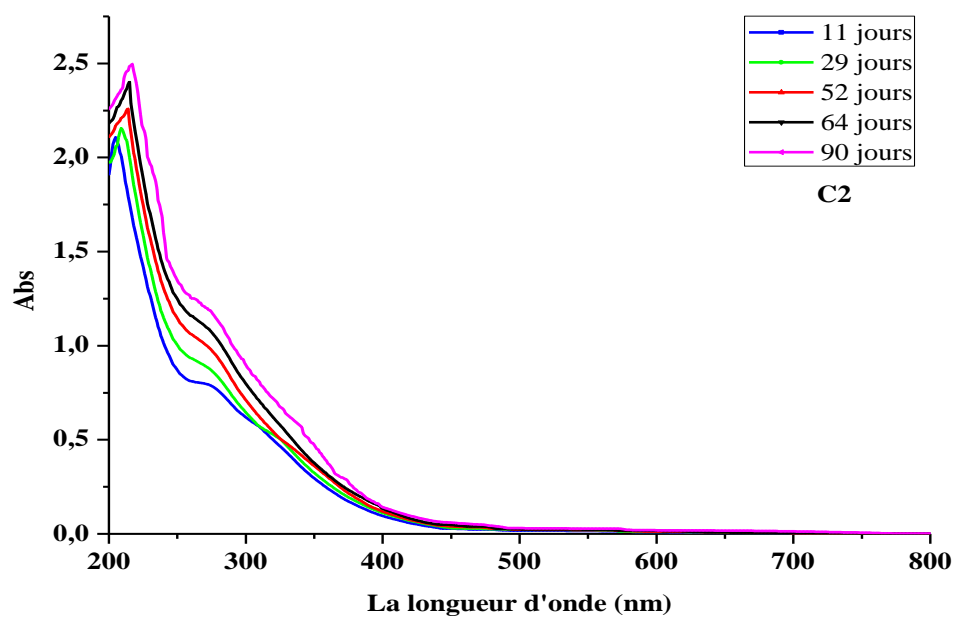
- Pour le mélange C4 ; la forme de spectre a révélé que l'épaule supérieure a été 210 nm en 11^{ième} jour avec 2,44 d'absorbance, puis elle a changé progressivement son sommet vers la longueur d'onde 216 nm en 29^{ième} jour avec 2,73 d'absorbance, vers la longueur d'onde 218

nm en 52^{ème} jour avec 2,92 d'absorbance et vers la longueur d'onde 219 nm en 64^{ème} jour avec 3,25 d'absorbance, pour arriver à la longueur d'onde la plus longue 213 nm après le 90^{ème} jour avec une absorbance est égale à 3,28.

Dans le domaine compris entre 200 et 220 nm, nous avons observé une absorption plus rapide de petites molécules telles que les nitrates et le carboxylate que les molécules aromatiques ou les composés insaturés dont s'absorbent par les doubles liaisons C=C, C=O, et N=N. L'absorption de ces molécules est montrée dans la longueur d'onde comprise entre 250 et 300 nm [138].

Le taux d'absorption varie d'un mélange à l'autre selon le rapport C/N initial ou dans le mélange lui-même selon l'avancement des jours. Lorsque le rapport C/N des matières premières est faible ou lorsque les jours de compostage progressent, le taux d'absorption est plus élevé. L'augmentation et l'élargissement de l'épaule avec l'avancement dans le processus de compostage sont des indicateurs à l'augmentation de la concentration des composés aromatiques ainsi qu'à la modification des groupes fonctionnels de la matière organique, où le phénomène de polymérisation est connu comme l'une des caractéristiques d'humification [208].





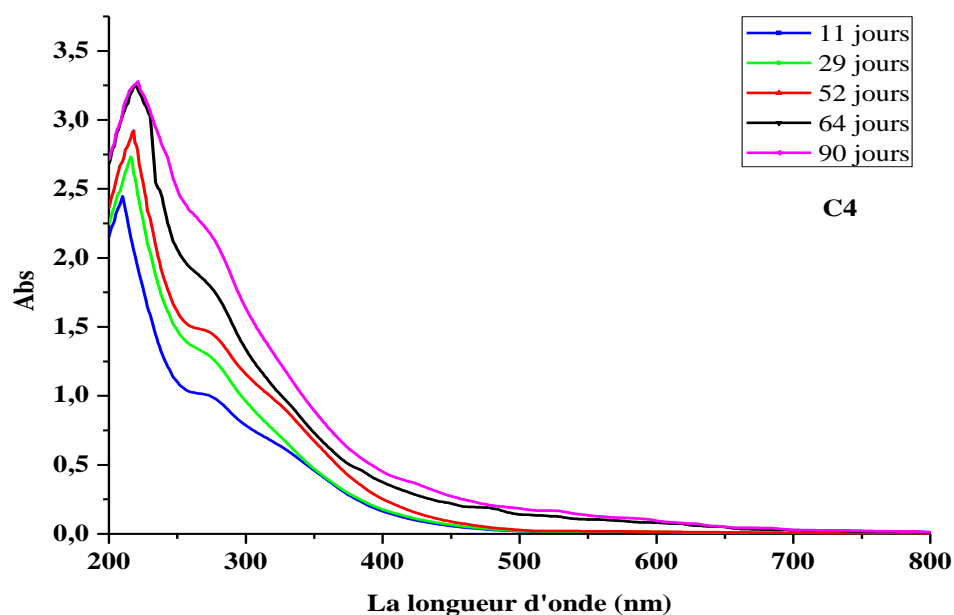
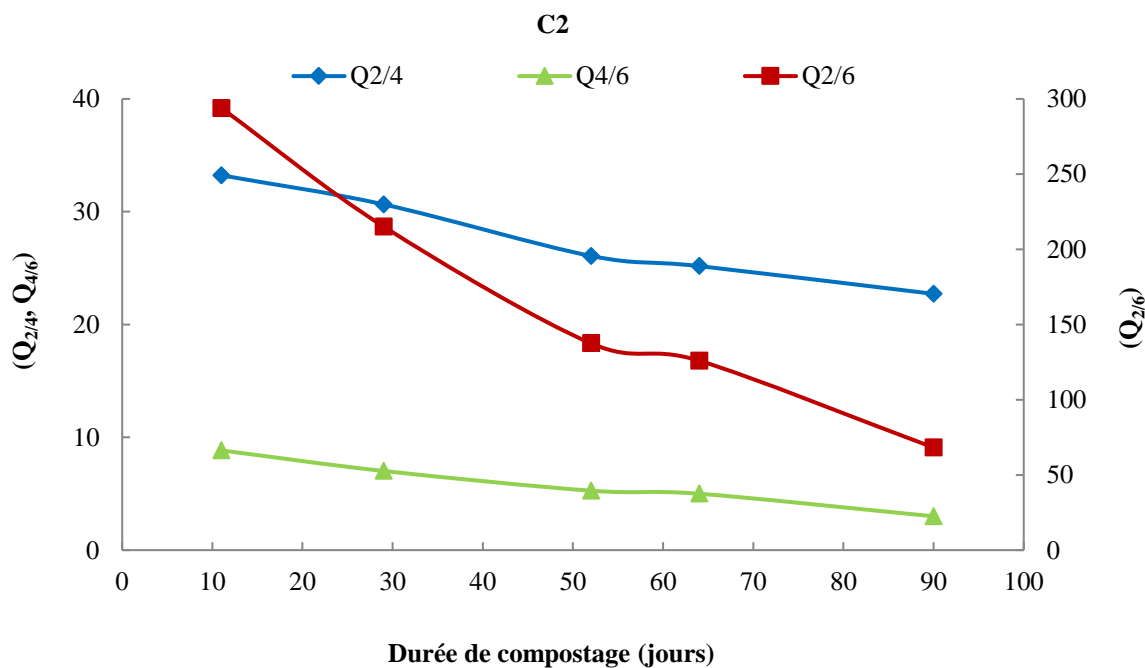
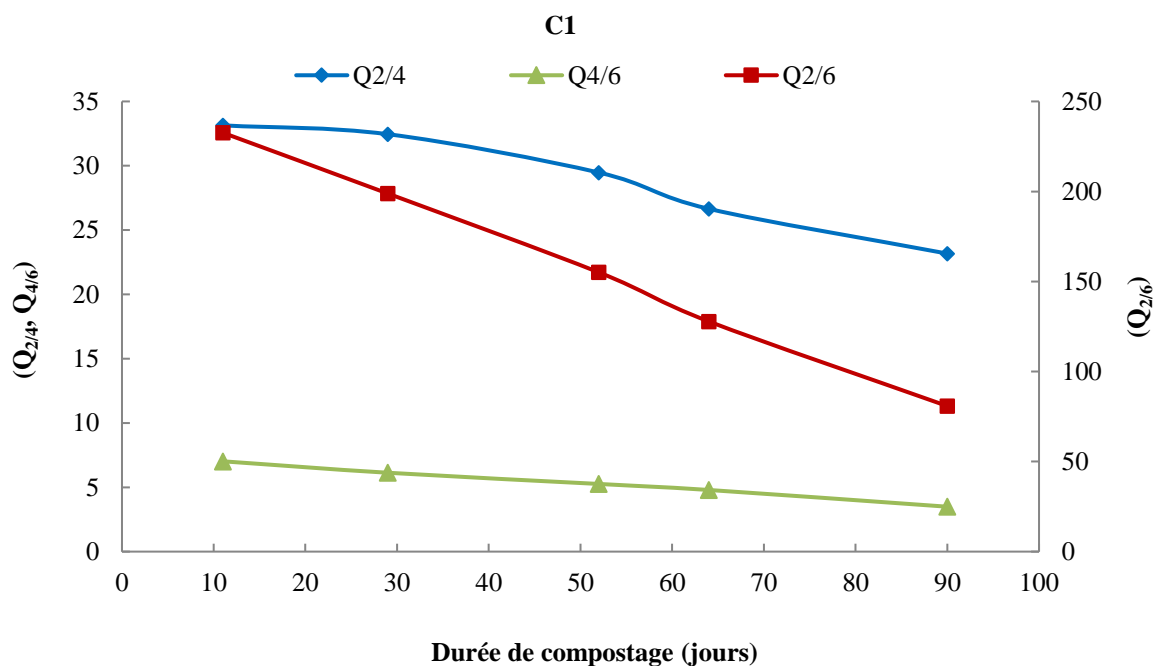


Figure 28: L'évolution de l'humification de la matière des mélanges (C1, C2, C3, et C4) par la spectroscopie UV-visible pendant le processus du compostage

La figure 29 montre que, pour le mélange C1, les rapports $Q_{2/6}$ ont diminué progressivement jusqu'à la fin du compostage avec une valeur finale égale à 80,8, tandis que la valeur finale de $Q_{2/4}$ a été 23,1. Les rapport $Q_{2/6}$ des mélanges C2-C4 ont présenté une diminution drastique du 11^{ième} jour au 52^{ième} jour, où le mélange C2 a diminué du 293,9 au 137,5, le mélange C3 du 274,3 au 126,9, et le mélange C4 du 277,8 au 144,6, cette diminution peut s'expliquer par la décomposition rapide des protéines et des lipides - qui sont des composés facilement dégradables - [208]. Ensuite, suivie par une diminution ordinaire jusqu'à la fin du compostage avec un taux d'absorbance est égal à 68,1, 41,6 et 47,2 pour les mélanges C2, C3, et C4 respectivement. Les rapports $Q_{2/4}$ ont montré une légère diminution jusqu'à la fin du compostage avec une distinction dans les rapports d'absorbance à atteindre 22,7, 10,2 et 9,4 pour les mélanges C2, C3 et C4 respectivement.

Dans cette étude, les rapports $Q_{4/6}$ de tous les mélanges ont tendu à diminuer légèrement, où les taux d'absorbance ont changé de 7,0 à 3,4 pour C1, de 8,8 à 3,0 pour C2, de 10,6 à 4,7 pour C3, et de 10,2 à 5,0 pour C4. A la fin du compostage, les valeurs des rapports $Q_{4/6}$ ont été inférieures à 5 pour le mélange C1, proche à 5 pour les mélanges C2 et C3 et égale à 5 pour le mélange C4. Les rapports $Q_{4/6}$ qui sont proches ou dépassent à 5 sont

considérées parmi les caractéristiques des acides humiques mûrs [116] et indiquent l'avancement dans le processus de maturité [209].



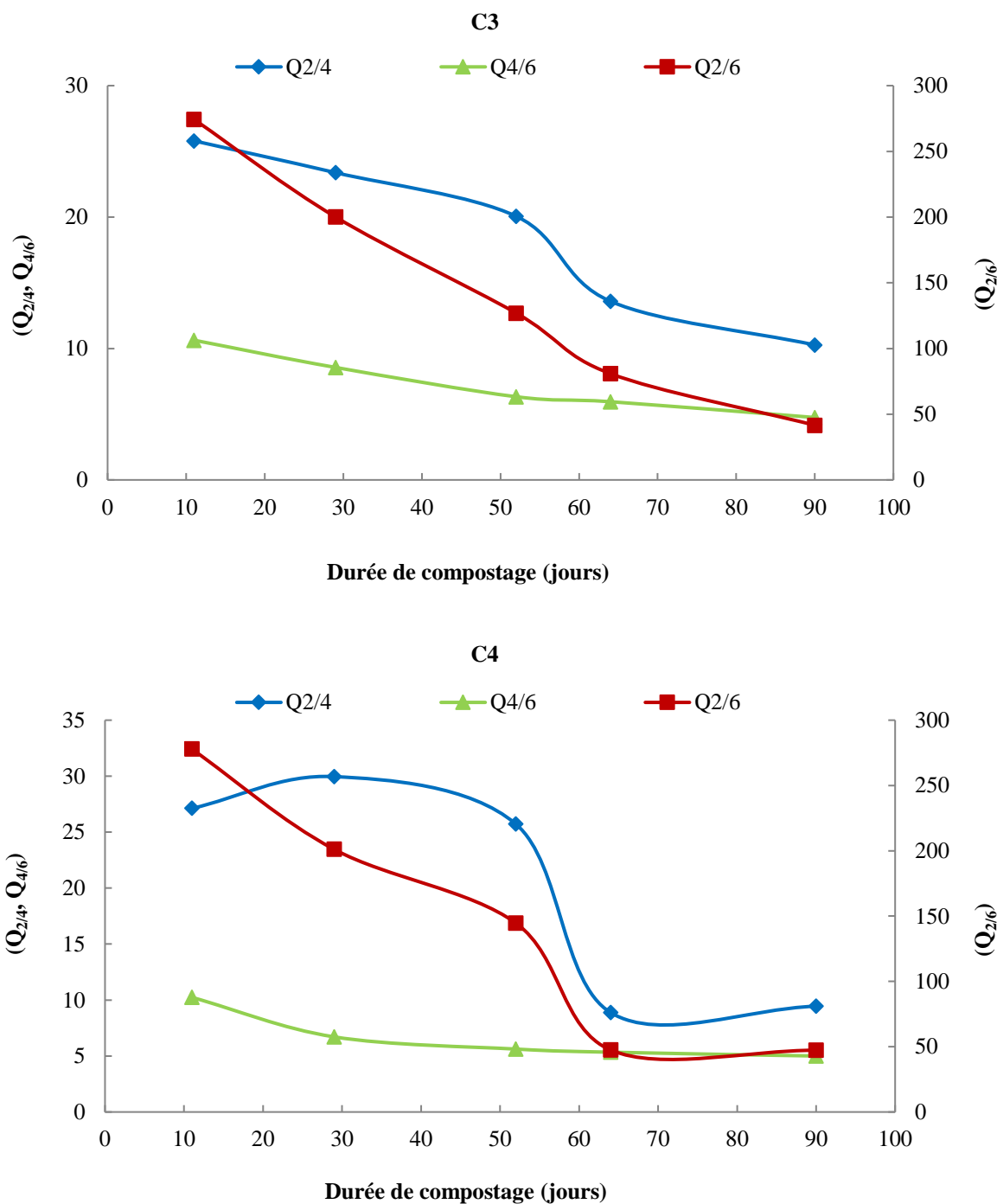


Figure 29: Les rapports d'absorbance : Q_{2/4}, Q_{2/6}, et Q_{4/6} d'une solution 0.5M NaOH pour les mélanges C1- C4

IV.4.2.2.2L'analyse spectroscopie infrarouge (FT-IR)

La figure 30 représente les spectres infrarouges (IR) de l'évolution des bandes d'absorption des mélanges C1- C4 à différentes étapes du processus de compostage (11^{ème},

29^{ème}, 52^{ème}, 64^{ème} et 90^{ème} jour). Au cours du compostage, toutes les bandes qui représentent les groupes fonctionnels organiques ou inorganiques subissent aux changements dans leur intensité. Ces changements d'intensité d'absorption peuvent se traduire par la formation de nouveaux produits à partir des déchets à composter [210], ou par la modification structurelle et chimique qui se survient lors du compostage.

Les bandes qui comprennent des groupes fonctionnels organiques tendent à diminuer due à la décomposition de la matière organique, tandis que les bandes des groupes inorganiques tendent à augmenter due à l'élévation des concentrations de composés inorganiques [211].

Les spectres IR ont présenté une bande très large centrée à 3400 cm^{-1} , qui peut être attribuée à la vibration d'élongation de groupe hydroxyle (OH) et de l'eau. Sa forme et sa position indiquent que ce groupe hydroxyle est occupé par une formation d'une liaison hydrogène. Cette bande a été consacrée à la vibration d'élongation de groupe hydroxyle des phénols et des acides carboxyliques [106], et également à la vibration d'élongation de N-H amides [212].

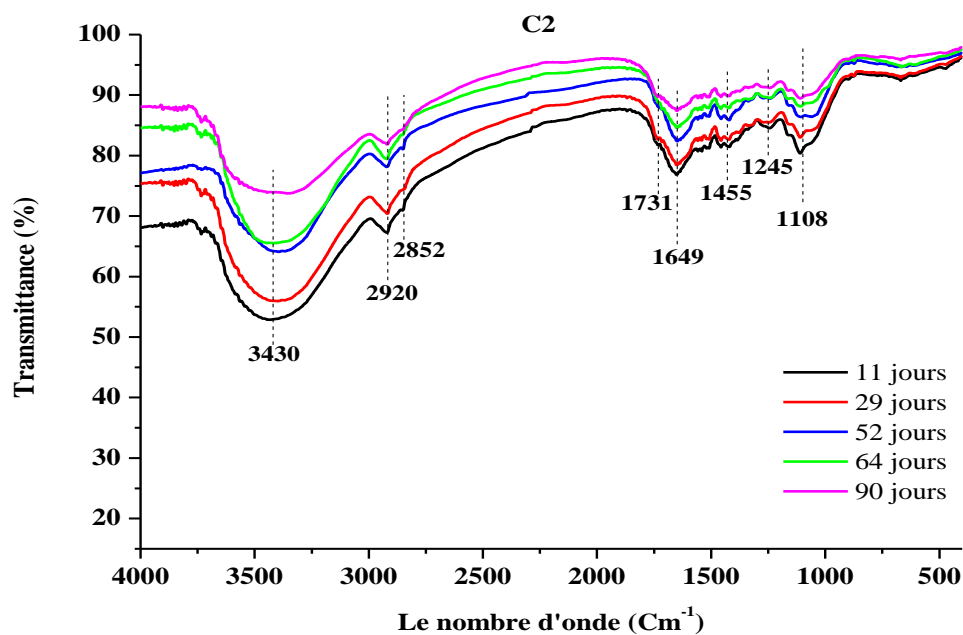
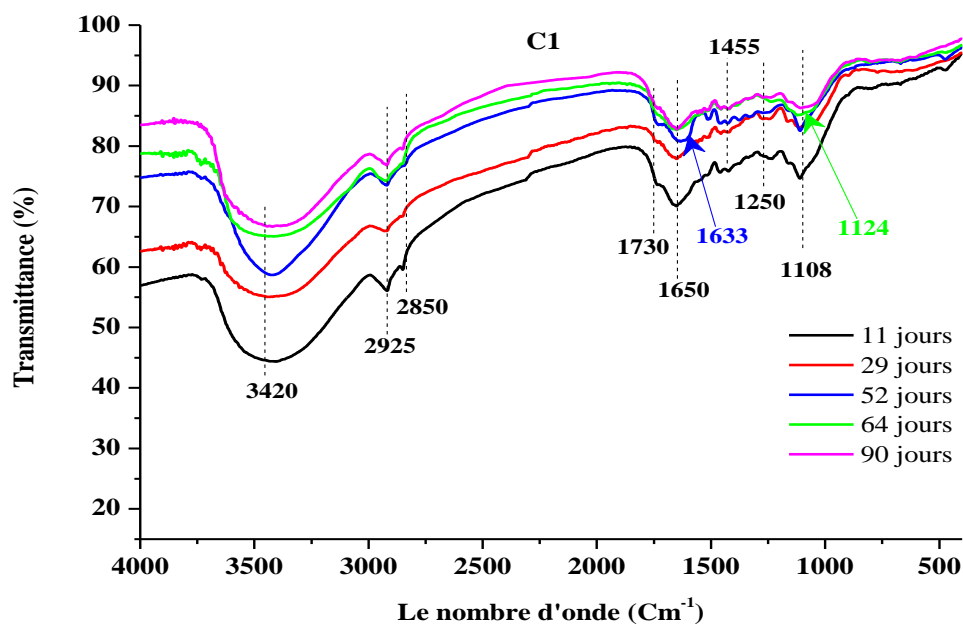
La région comprise entre 3000 et 2800 cm^{-1} reflète les propriétés hydrophobes des substances organiques. Les bandes à 2925 cm^{-1} et 2850 cm^{-1} reviennent aux vibrations d'élongation des groupes C-H aliphatiques, la bande à 2850 cm^{-1} revient également à la vibration d'élongation du groupe CHO (aldéhyde) [213], ces bandes sont très utiles pour le processus du compostage [214]. En raison de l'oxydation microbienne des chaînes carbonées aliphatiques et des composés peptidiques, l'intensité de ces bandes tend à diminuer, ce qui fournit certaines informations sur la décomposition de la matière organique au cours de l'avancement dans le processus de compostage [215, 188].

Les bandes à 1730 cm^{-1} et 1650 cm^{-1} donnent des informations sur la nature de la double liaison existant dans la matière organique [216]. La bande à 1650 cm^{-1} a été attribuée à la vibration d'élongation de double liaison C=C aromatique, la vibration antisymétrique de COO^- [211, 217], ainsi qu'à la vibration de déformation de la liaison N-H de l'amide primaire [213] et la vibration de déformation de l'hydroxyle OH de l'eau [214]. Un petit épaulement à environ 1730 cm^{-1} indique la vibration d'élongation du groupe carboxylique (C=O) d'acides, de cétones, et d'aldéhydes. La faible intensité de cette bande dans les spectres signifie une diminution dans la forme non ionisée [186]. Dans la région comprise entre 1750 - 1600 cm^{-1} , le

nombre d'ondes de bandes varie par la variation de groupes fonctionnels contenus dans la matière organique (aldéhyde, cétone, ester, acide) [217]. En effet, le processus d'humification conduit à la formation d'acides humiques, qui sont composés de plusieurs constituants organiques. L'acide humique (AH) qui est composé de plusieurs constituants organiques, présente une bande forte à 1640 cm^{-1} qui monte pendant les jours de compostage. La libération d'acides carboxyliques à partir de lipides décomposés conduit à la formation de carboxylates, qui contribue également à l'élévation [211]. Les conditions d'humification et le comportement des matières premières durant le processus de compostage contribuent grandement dans la formation de la teneur en acides humiques [186].

Dans la région située entre 1455 et 1380 cm^{-1} , nous avons observé une bande évolue pendant les jours de compostage d'une bande évidente à une bande mince à la fin du compostage notamment dans les mélanges C2, C3 et C4. Cette bande peut être interprétée par la vibration de déformation de groupe hydroxyle (OH) des alcools aromatiques [218], par la vibration d'élongation des cycles aromatiques, et également par la vibration de déformation du groupe CH_2 des structures aliphatiques (alcanes) [219]. Certains composts riches en azote peuvent posséder une bande d'absorption à 1540 cm^{-1} , qui peut être attribuée à l'amide secondaire [139], cette bande ne se trouve pas chez le compost de déchets de palmiers dattiers et leurs mélanges. Nos spectres ont présenté une bande à $1240\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$ attribuée à la vibration de la liaison C-O d'éthers et d'esters aromatiques, et au groupe C-N des amides [219]. Une légère diminution dans l'intensité de cette bande pour les mélanges C2, C3 et C4 tandis qu'elle est restée constante pour le mélange C1.

Les polysaccharides (c.-à-d. l'élongation de C-O) absorbent entre les bandes 1170 et 1050 cm^{-1} . La bande de l'élongation asymétrique de Si-O-Si est trouvée à environ 1112 , 1108 , 1060 cm^{-1} , qui présentent des bandes très proéminentes en raison de leurs augmentations relatives durant le processus de compostage [219]. Le phosphate a montré une absorption entre 600 et 500 cm^{-1} [220]. En début du compostage, plusieurs bandes sont visibles dans la région d'empreinte à 1600 et 900 cm^{-1} , ces bandes peuvent être attribuées à la cellulose et aux produits de décomposition précoce avec de courtes chaînes carboniques [221].



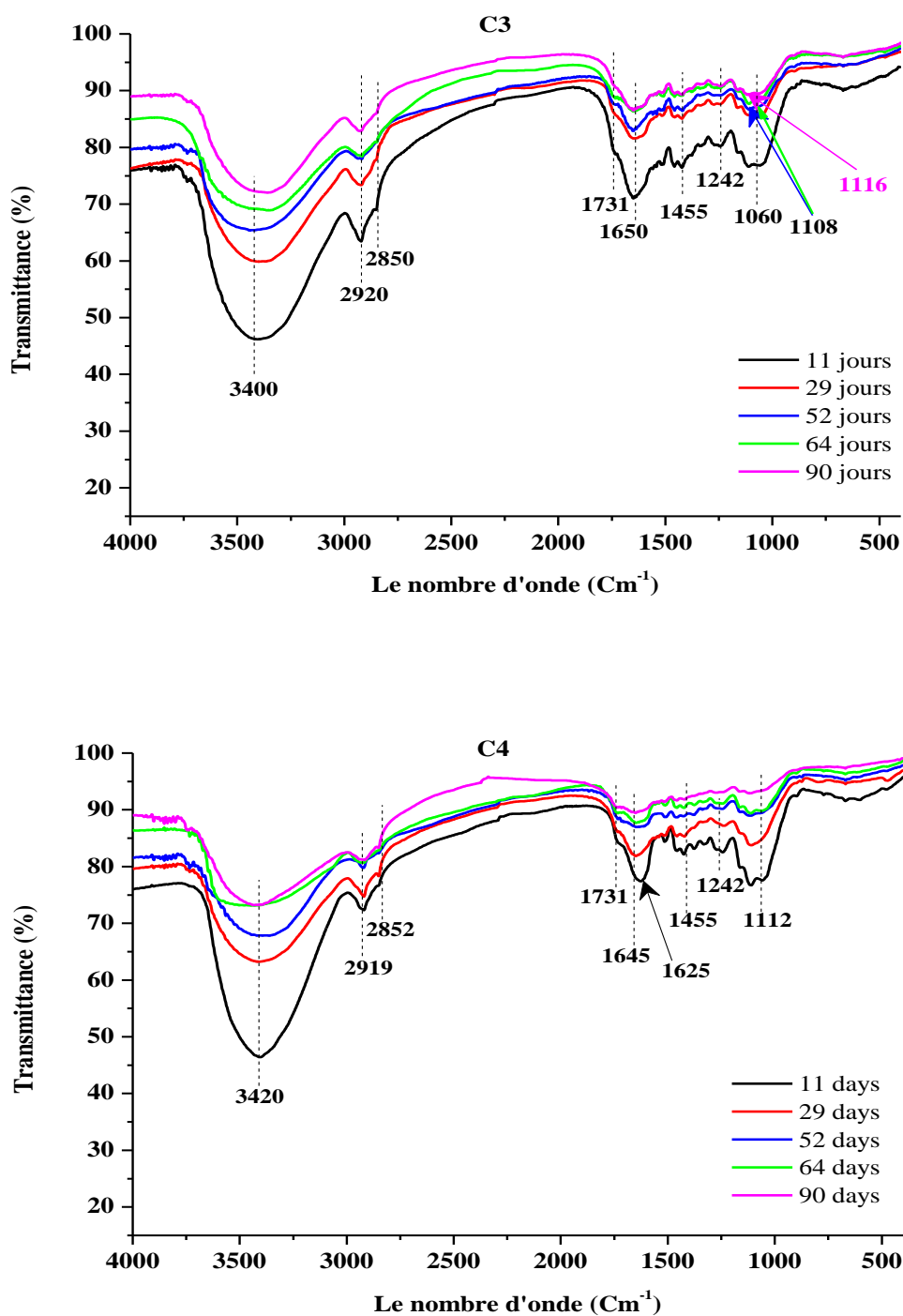


Figure 30: L'évolution de la matière organique des mélanges C1-C4 par la spectroscopie IR pendant le processus du compostage

La discussion des résultats obtenus par l'analyse spectroscopie IR au cours de dégradation de la matière organique des mélanges C1-4 a présenté que :

- Le spectre infrarouge de mélange C1 a montré que les bandes des groupes fonctionnels limitées entre 3700 et 2000 cm^{-1} ne montrent aucun changement jusqu'à la fin du compostage, tandis que la zone limitée entre 2000 et 500 cm^{-1} a présenté un changement léger, où les niveaux des bandes d'absorption ont stabilisé après le 52^{ième} jour.

- Le spectre infrarouge de mélange C2 a montré une augmentation par rapport au mélange C1 au niveau de l'intensité d'absorption. Le mélange C2 a présenté une diminution progressive dans l'abondance des structures absorbées à 3400, 2926, 2850, 1650, 1100 cm^{-1} , avec des niveaux d'absorption inférieurs aux mélanges C3 et C4, où les niveaux des bandes d'absorption ont stabilisé après le 52^{ième} jour.

- Le spectre infrarouge des mélanges C3 et C4 ont été qualitativement similaires l'un à l'autre, avec une légère différence au niveau de l'intensité d'absorption. Comme le mélange C2, ces mélanges ont présenté également une diminution progressive dans l'abondance des structures absorbées à 3400, 2926, 2850, 1650, 1100 cm^{-1} , où les niveaux des bandes d'absorption ont stabilisé après le 29^{ième} jour.

La diminution progressive dans l'intensité de bandes des structures absorbées à 3400, 2926, 2850, 1650, 1100 cm^{-1} , peut être interprétée par l'utilisation des structures aliphatiques, des peptides et des glucides tels que les polysaccharides, la cellulose et l'hémicellulose par les micro-organismes pour répondre à leurs besoins énergétiques [139]. L'augmentation observée dans la zone de 1645 cm^{-1} à 1650 cm^{-1} indique l'augmentation du degré de l'humification de la matière organique, la diminution des glucides, et la déplétion protéique [213], tandis que la diminution dans l'intensité d'absorption de cette bande indique que les substances protéiques peuvent être incorporées dans la molécule du compost organique durant l'avancement dans le processus du compostage. De plus, la diminution de l'intensité des bandes d'absorption 1170-1050 cm^{-1} est une référence à la diminution de la teneur des glucides [126]. L'intensité d'absorption de ces bandes est principalement liée par l'effet ; de concentration, de disparition des composants les plus facilement dégradés, et de l'augmentation des dérivées de lignines oxydées qui sont engagées dans le processus d'humification [139].

La spectroscopie infrarouge FT-IR a montré qu'elle peut être utilisée comme un outil utile pour caractériser les processus de décomposition des déchets d'arbres.

IV.5 Étude comparative entre le compostage de déchets de palmiers dattiers (DPD) et leurs mélanges : C1-C4

IV.5.1 Étude comparative entre les paramètres de compostage

IV.5.1.1 Au niveau de la température

L'évolution de la température des mélanges C1-C4 a relativement montré des changements similaires aux déchets des palmiers dattiers (DPD) (Fig.31), mais avec un niveau des épaules élevé que le DPD, cette élévation est principalement due à la présence de la source d'azote représentée en la luzerne (*Medicago sativa* L).

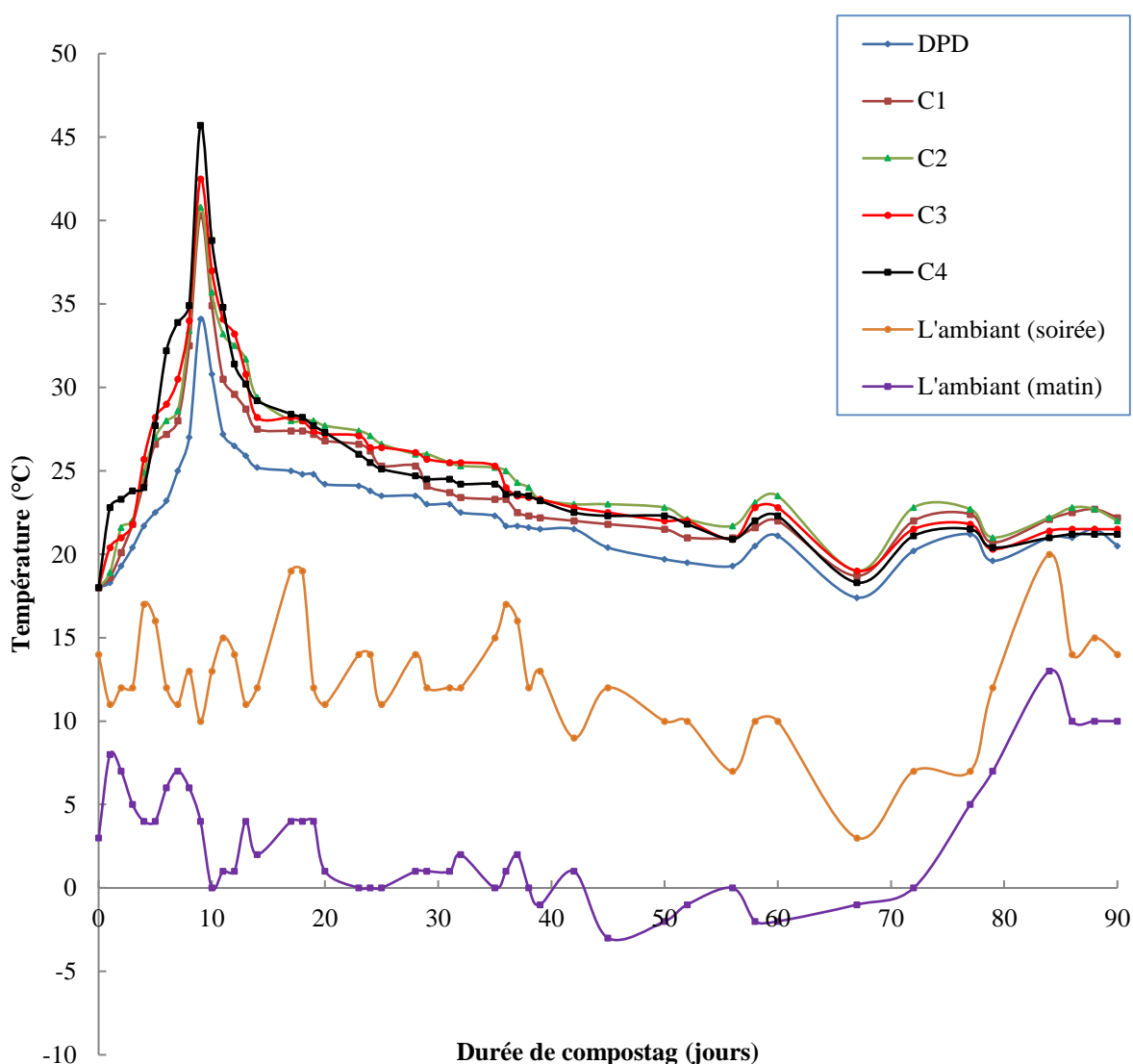


Figure 31: L'évolution de la température de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4

L'ajout de la luzerne aux déchets de palmiers dattiers (DPD) contribue à faciliter le processus de dégradation biologique de la matière organique dans un sens positif et compatible avec les besoins nécessaires des microorganismes, tels que l'azote et le carbone.

IV.5.1.2 Au niveau du pH

Au niveau du pH, le DPD et les mélanges C1-C4 ont montré une diminution du 1^{er} jour au 11^{ème} jour, suivie par augmentation jusqu'au 29^{ième} jour. Ensuite les valeurs de pH restent presque constantes jusqu'à la fin de processus du compostage (Fig.32).

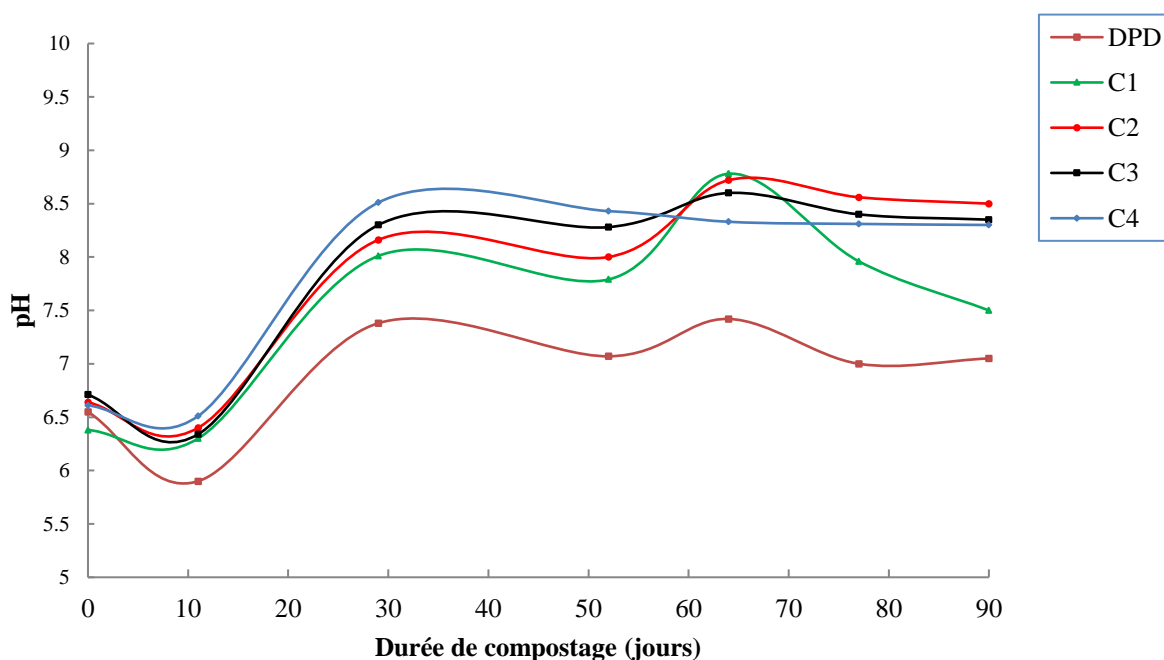


Figure 32: L'évolution de pH de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4

IV.5.1.3 Au niveau de la conductivité électrique (CE)

D'après les résultats présentés dans la figure 33, les valeurs de conductivité électrique (CE) de déchets des palmiers dattiers (DPD) ont montré une diminution progressive jusqu'à la fin de processus du compostage, tandis que les valeurs des mélanges C1-C4 ont oscillé jusqu'au 52^{ième} jour, puis ont diminué jusqu'à la fin du compostage.

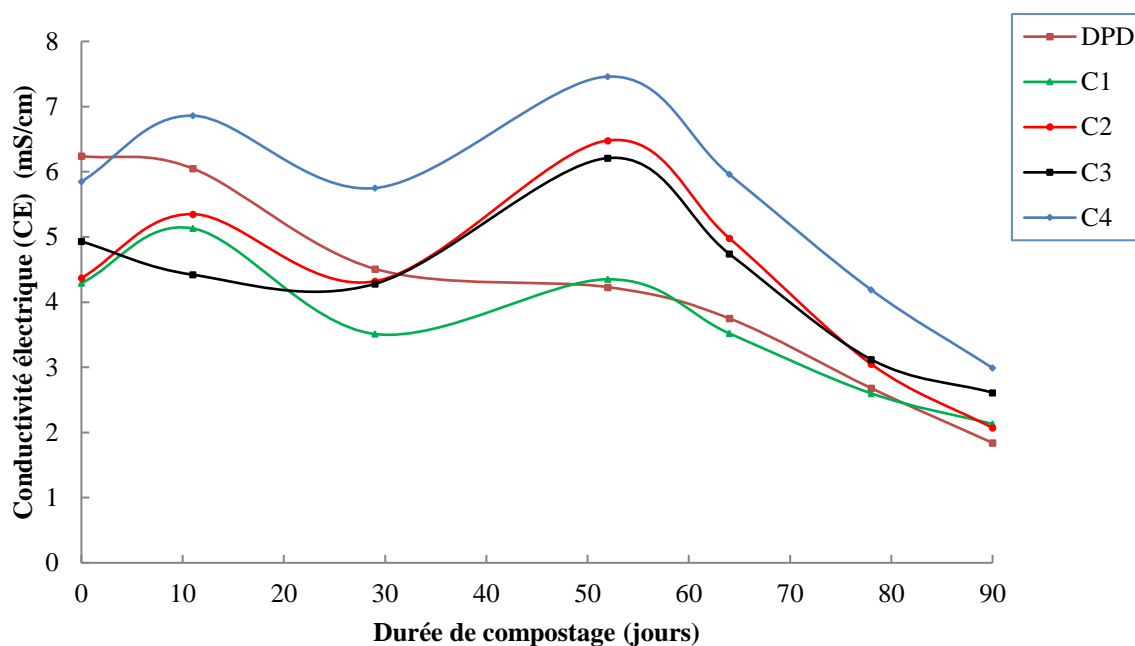


Figure 33: L'évolution de CE de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4

IV.5.1.4 Au niveau de la teneur en humidité (H%)

Comme la teneur en humidité de déchets des palmiers dattiers (DPD), les niveaux d'humidité des mélanges C1-C4 ont tendu à diminuer progressivement durant le processus de compostage jusqu'à la fin (Fig.34).

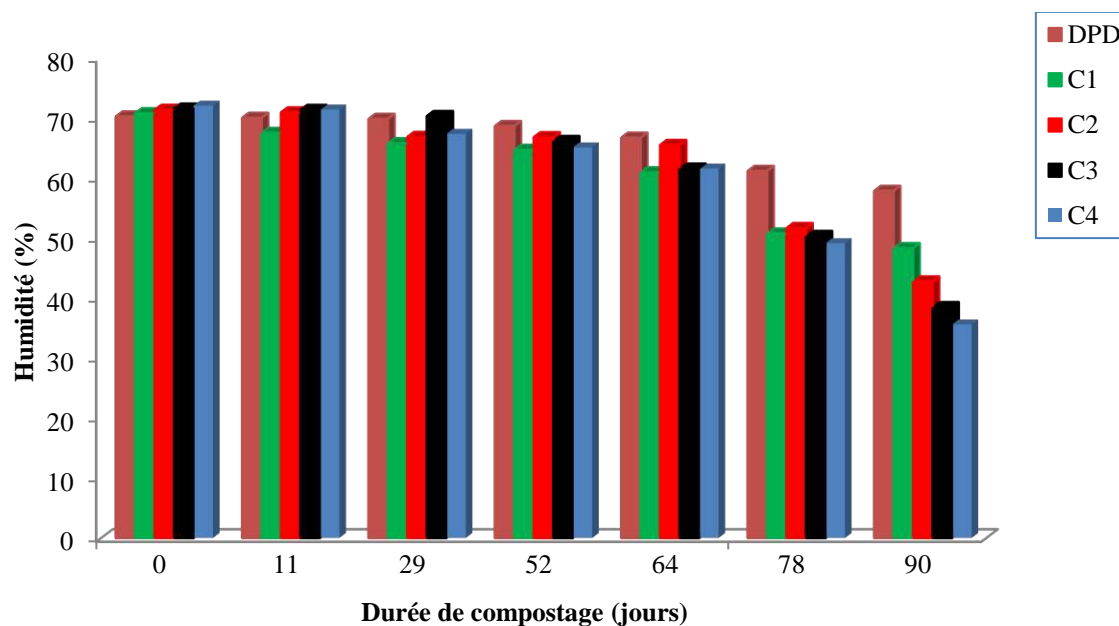


Figure 34: L'évolution d'humidité de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4

IV.5.1.5 Au niveau de la teneur en carbone organique total (COT)

L'évolution de la teneur en carbone organique total (COT) des mélanges C1-C4 a montré la même variation que la teneur en carbone organique total de déchets des palmiers dattiers (DPD), mais avec une perte globale supérieure aux déchets des palmiers dattiers (Fig.35).

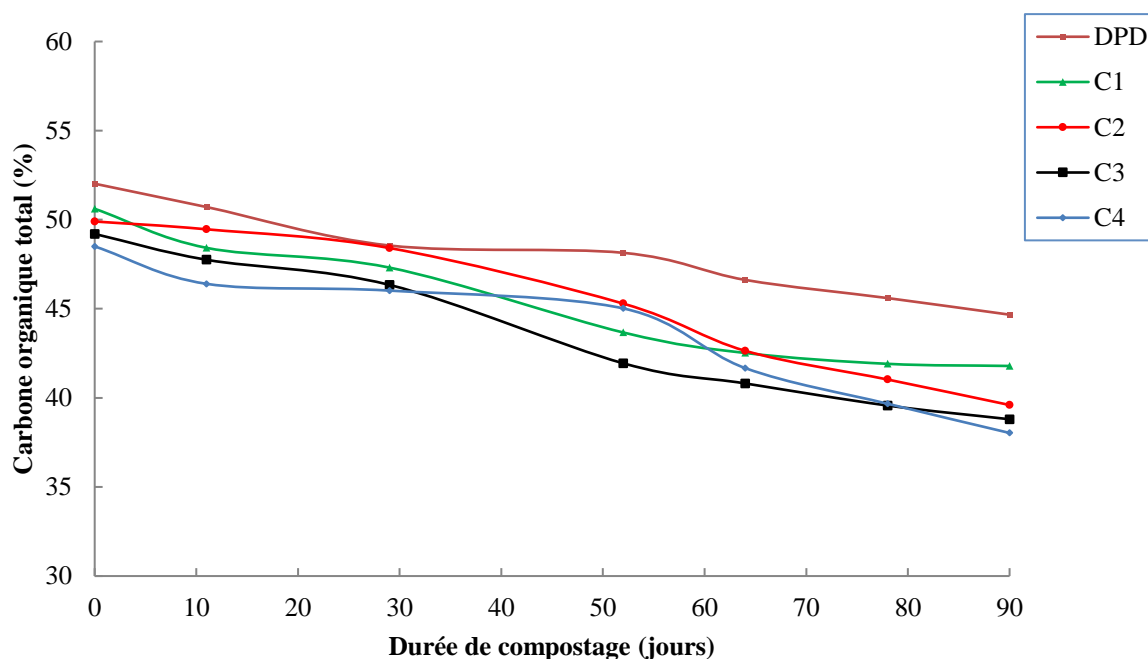


Figure 35: L'évolution de COT de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4

IV.5.1.6 Au niveau de la teneur en azote Kjeldahl total (NKT)

Au cours du processus de compostage, les teneurs en nitrogène Kjeldahl total (NKT) des mélanges C1-C4 ont montré une diminution suivie par une augmentation jusqu'au 64^{ème} jour, après ça, elles sont restées constantes jusqu'à la fin du processus. Contrairement à la teneur en azote de déchets des palmiers dattiers (DPD) qui a montré une augmentation du 1^{er} au 11^{ème} jour pour se stabiliser jusqu'à la fin du processus (Fig.36).

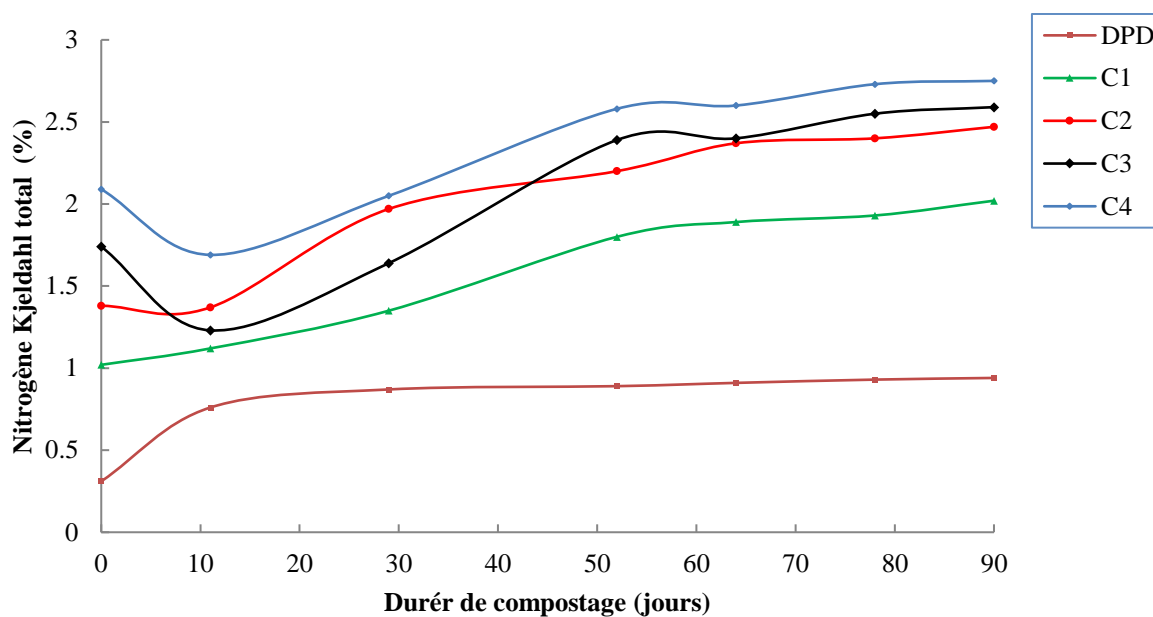


Figure 36: L'évolution de NKT de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4

IV.5.1.7 Au niveau du rapport C/N

Le rapport C/N de déchets des palmiers dattiers (DPD) a été significativement plus élevé par rapport aux rapports des mélanges C1-C4, dus au taux de carbone élevé et au taux d'azote faible dans les déchets (Fig.37).

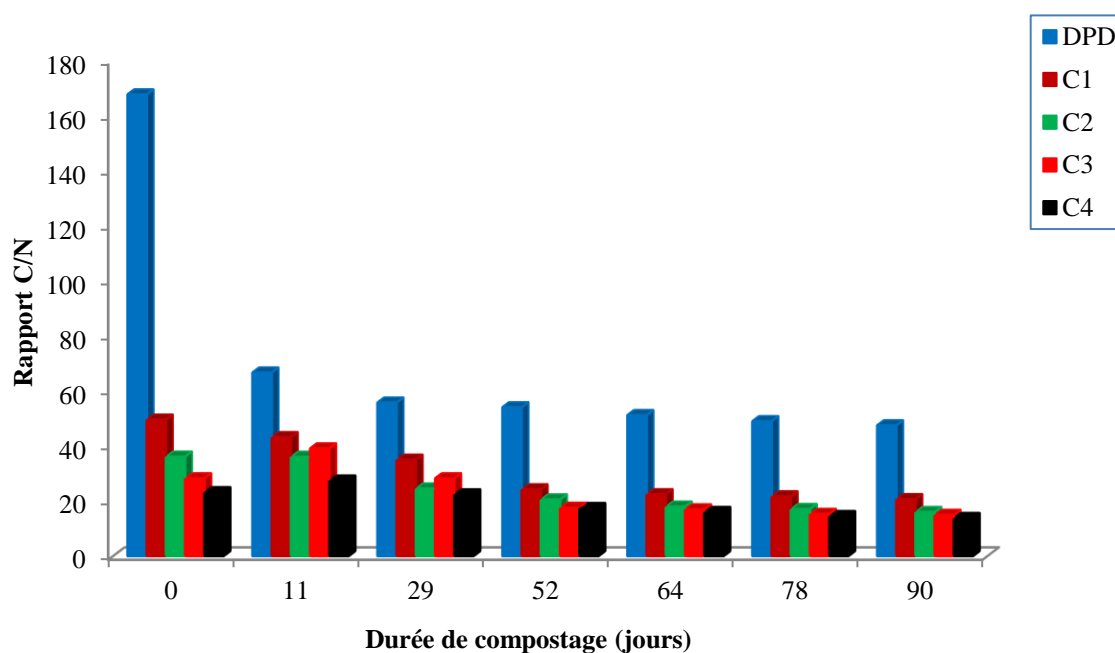


Figure 37: L'évolution de rapport C/N de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4

IV.5.2 Étude comparative entre la caractérisation de la substance humique et de la matière organique

IV.5.2.1 Au niveau de la substance humique

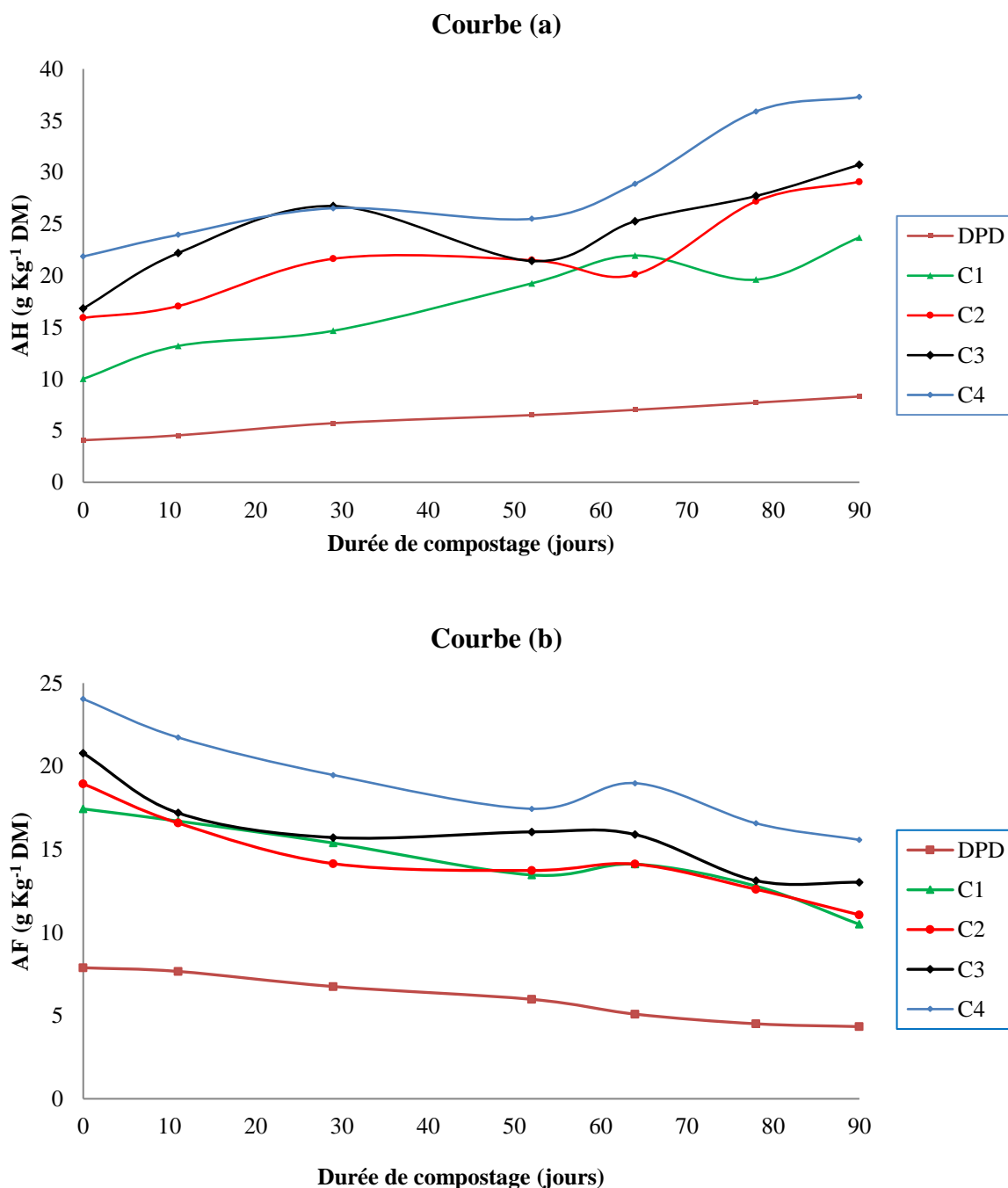


Figure 38: L'évolution de substance humique de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4

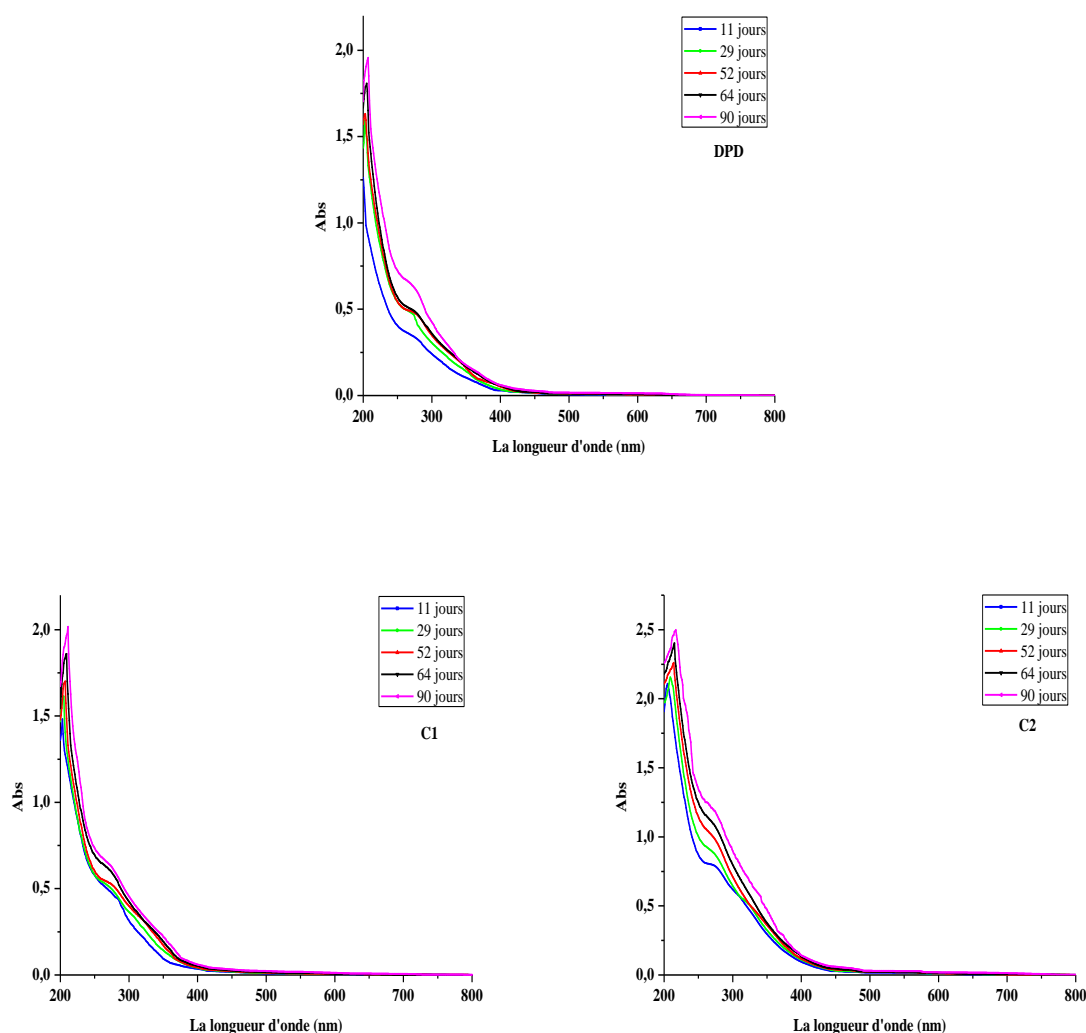
D'après la figure ci-dessus, on observe que les déchets des palmiers dattiers (DPD) ont présenté une augmentation progressive dans les teneurs des acides humiques (AH), et une

diminution progressive dans les teneurs des acides fulviques (AF) jusqu'à la fin du compostage. Tandis que les mélanges C1-C4 qui ont montré une augmentation (diminution) dans les teneurs des acides humique AH (les acides fulvique (FA)) suivie par une diminution (augmentation) puis s'augmentent (se diminuent) de nouveau jusqu'à la fin du compostage (Fig.38, a et b).

IV.5.2.2 Au niveau de caractérisation spectrale de l'évolution et de l'humification de la matière organique

IV.5.2.2.1 Au niveau de l'analyse spectroscopie UV-visible

À l'exception de l'abondance d'absorption et de la position des épaules supérieures, le spectre UV-visible de déchets des palmiers dattiers (DPD) a montré la même approche que les autres mélanges (Fig.39).



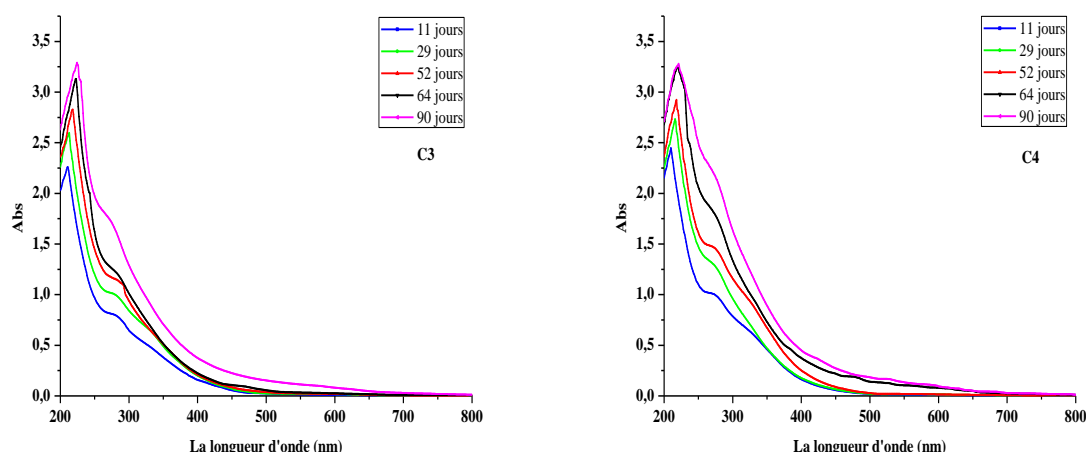
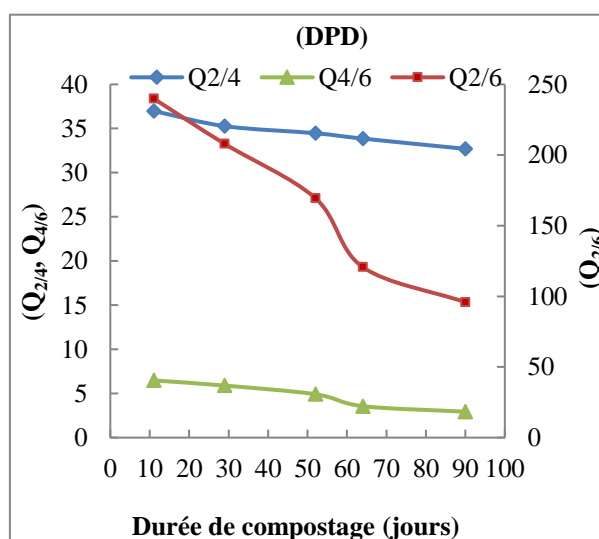


Figure 39: L'évolution de l'humification de la matière organique de déchets des palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4 par la spectroscopie UV-visible

Les déchets de palmiers dattiers (DPD) ont montré que les rapports $Q_{2/6}$ ont diminué progressivement jusqu'à la fin du compostage, tandis que les rapports $Q_{2/4}$ ont tendu à rester constants, la même chose a été observée au mélange C1. Les mélanges C2, C3 et C4 ont présenté une diminution drastique au niveau des rapports $Q_{2/6}$ suivie par une diminution ordinaire jusqu'à la fin du compostage, et une légère diminution dans les rapports $Q_{2/4}$ jusqu'à la fin du compostage.

Concernant au rapport $Q_{4/6}$, les valeurs $Q_{4/6}$ des déchets de palmiers dattiers (DPD) et des mélanges C1-C4 ont tendu à diminuer légèrement jusqu'à la fin du compostage. La valeur finale de $Q_{4/6}$ de déchets de palmiers dattiers (DPD) a été proche au mélange C1, et inférieur aux mélanges C2, C3, et C4 (Fig.40).



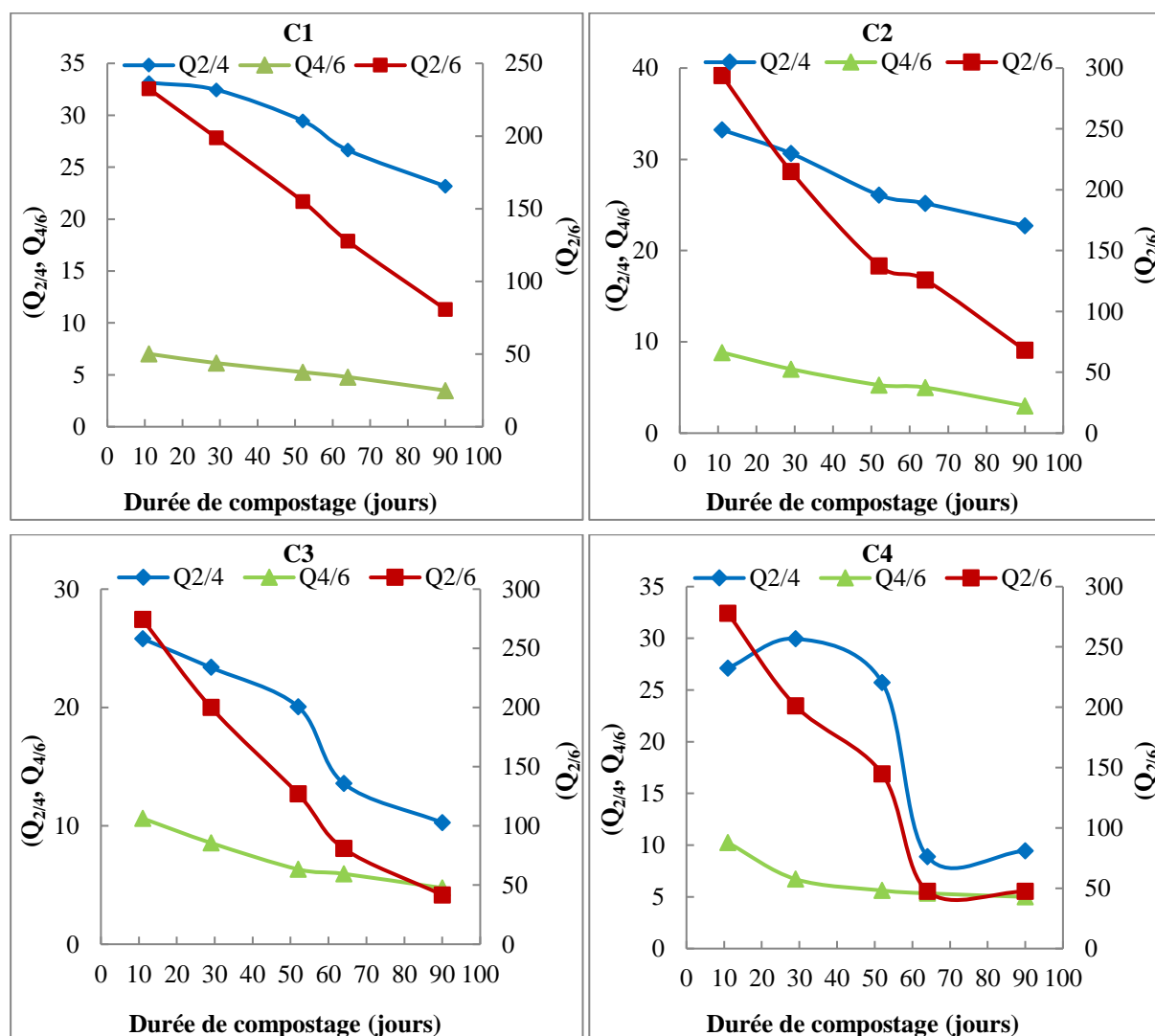


Figure 40: Les rapports d'absorbance : $Q_{2/4}$, $Q_{2/6}$, et $Q_{4/6}$ d'une solution 0.5M NaOH pour les déchets de palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4

IV.5.2.2.2L'analyse spectroscopie infrarouge (FT-IR)

Le spectre infrarouge de mélange C1 a montré les mêmes résultats que le spectre IR de déchets des palmiers dattiers (DPD), mais avec une légère diminution au niveau de l'intensité des bandes d'absorption 2925 et 2850 cm^{-1} . Tandis que, les mélanges C2, C3 et C4 ont montré un changement considérable au niveau de l'intensité de toutes les bandes d'absorption suivi par une diminution progressive dans les bandes 3400 , 2926 , 2850 , 1650 , 1100 cm^{-1} .

Le spectre IR de déchets des palmiers dattiers n'a aucune absorption dans la région située entre 1455 et 1380 cm^{-1} , contrairement aux mélanges C2, C3, et C4 qui ont présenté une bande évolue durant les jours de compostage d'une bande évidente à une bande mince.

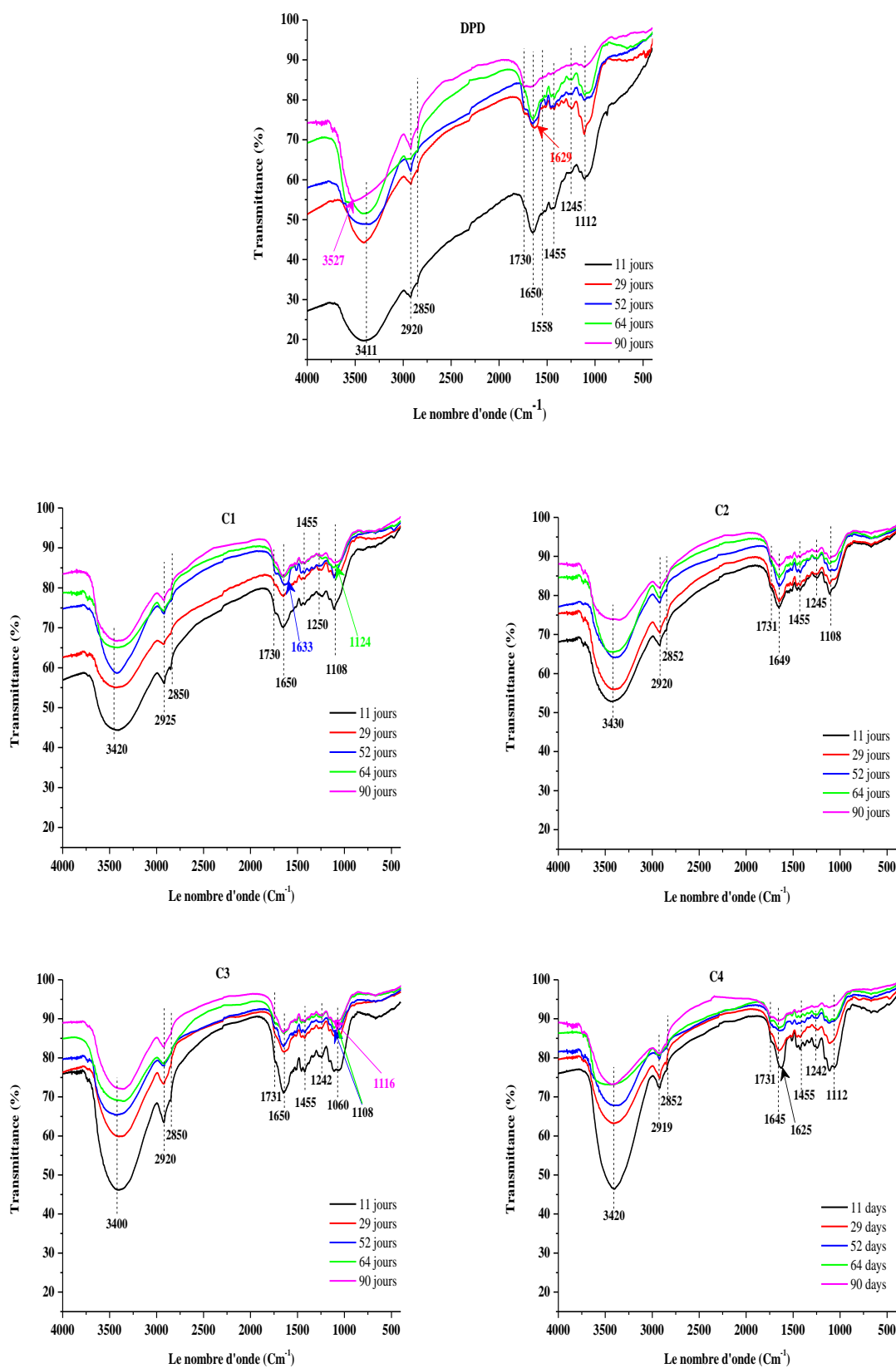


Figure 41: Comparaison de l'évolution de la matière organique de déchets de palmiers dattiers (DPD) avec les mélanges C1-C4 par la spectroscopie IR

Comme nous avons vu aux déchets des palmiers dattiers, la bande d'absorption à 1240-1250 cm^{-1} est restée également constante dans le mélange C1, au contraire les mélanges C2, C3 et C4 qui ont présenté une légère diminution dans l'absorption de cette bande (Fig.41).

IV.6 Conclusion

Le but de ce travail a été sur la préparation d'un compost organique à partir de déchets des palmiers dattiers. La luzerne (*Medicago sativa* L) a été utilisée comme une source d'azote à des proportions différentes, et l'ensemble paramètres de processus du compostage ont été mesurés durant le processus de compostage.

La différence majeure entre les paramètres du compostage des mélanges est principalement due à la variation de composition quantitative qui constitue chaque mélange.

Au cours du processus de compostage, qui a duré 90 jours, nous avons observé que la température de tous les mélanges a augmenté progressivement dans la période comprise entre le 1^{er} et le 15^{ième} jour, où la valeur la plus élevée a été 45,7, 42,5, 40,8, 40,3, et 34,1 °C pour le C4, C3, C2, C1, et les déchets (DPD) respectivement, puis a diminué progressivement jusqu'à la fin du compostage.

Concernant le pH, nous avons enregistré que toutes les valeurs de pH des mélanges et de DPD ont montré une diminution progressive dans les dix premiers jours accompagnée par une augmentation progressive jusqu'au 64^{ième} jour, puis ont devenu presque stable jusqu'à la fin du compostage dans la frontière 7 à 7,5 pour les mélanges DPD et C1, et 8 à 8,50 pour les mélanges C2, C3 et C4.

D'après les résultats obtenus, les valeurs CE obtenues après 90 jours n'étaient pas supérieures à la valeur limite de 3 ms/cm.

Le rapport C/N de déchets des palmiers dattiers (DPD) a été significativement plus élevé que les mélanges C1, C2, C3, et C4. De plus, la teneur en carbone organique total a diminué progressivement et atteint son niveau le plus bas après le 64^{ième} jour de compostage.

À partir de l'étude de ces propriétés, nous avons observé que la différence entre les mélanges dans chacun de pH et de la conductivité électrique s'atténue au cours du

compostage, mais pour les autres propriétés, elles sont restées différentes, où le mélange C4 a donné les meilleurs résultats, suivi par C3, C2, C1 puis les DPD.

L'évolution de la substance humique (les acides humiques et les acides fulviques) de déchets des palmiers dattiers (DPD) ou des mélanges de déchets des palmiers dattiers (C1-C4) pendant le processus de compostage a été suivie en utilisant les deux techniques d'analyses spectroscopiques : spectroscopie UV-visible et spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR).

L'humification de la matière organique a présenté que la substance humique constitue principalement d'une fraction humique (AH) supérieure par rapport à la fraction fulvique (AF), ce que l'on peut observer dans les rapports $Q_{4/6}$.

Les spectres infrarouges FT-IR ont montré une diminution relative aux bandes d'absorption 3400, 2926, 2850, 1650, 1100 cm^{-1} a rangée de légère diminution pour les déchets des palmiers dattiers (DPD) et le mélange C1, à une moyenne diminution pour les mélanges C2 et C3, à une diminution significative pour le mélange C4 durant le processus de compostage.

L'utilisation de compost organique améliore la nature du sol et réduit la salinité du sol. Il augmente également le rendement de récolte. De plus, la transformation de déchets des palmiers dattiers en compost organique peut aider à résoudre les problèmes environnementaux causés par ces déchets. Les résultats de la présente étude indiquent que les mélanges C2, C3 et C4 reflètent mieux maturité que le mélange C1 et les déchets (DPD).

Le retournement périodique au cours du compostage aide à décomposer la matière organique, tandis que l'eau et l'air fournissent les conditions appropriées pour simuler une atmosphère chaude et humide riche en microbes. Selon les déchets à composter, la caractérisation de la matière organique des composts est indispensable, afin de connaître comment s'évolue, notamment au cours du compostage.

Conclusion générale

Le but de ce travail est consisté sur l'élimination des déchets des palmiers dattiers des zones agricoles, notamment les lieux destinés au processus de culture, en les collectant et en les transformant en compost sain et inoffensif pour l'environnement contenant des matières organiques utilisables dans l'agriculture. Le travail a reposé sur l'utilisation de processus du compostage comme l'une des solutions prometteuses conduisant à l'exploitation de ces déchets. En effet les déchets de palmiers dattiers représentent la fraction majorée de déchets végétaux dans la wilaya d'Adrar.

L'élimination des déchets par la méthode actuelle (la combustion) est une méthode non bénéfique et nocive à la nature et à l'environnement. Ces brûlures qui se propagent autour des champs agricoles sont seulement des polluants et surtout sur l'esthétisme de la ville, mais ils sont aussi une source danger sur la santé publique. De plus, la permission à une grande quantité de matière organique d'être brûlée à l'air libre est une grande perte, qui peut largement répondre aux besoins des terres agricoles, en terme d'améliorer le sol et d'augmenter le rendement de récolte.

Notre travail a traité l'étude de transformation des déchets de palmiers dattiers à travers le processus du compostage par préparation de cinq mélanges : déchets des palmiers dattiers (100 % DPD), mélange C1: (80 % DPD + 20 % *Medicago sativa L*), le mélange C2 : (70 % DPD + 30 % *Medicago sativa L*), le mélange C3 : (60 % DPD + 40 % *Medicago sativa L*) et le mélange C4 (50 % DPD + 50 % *Medicago sativa L*). Les mélanges ont été évalués par différents paramètres physiques, chimiques et spectroscopiques.

La méthodologie a également pris en compte toutes les étapes de préparation des mélanges, en commençant de la collecte des déchets, le broyage et la mise en corbeille. La démarche a reposé dans cette méthodologie tout d'abord sur une étude détaillée sur la quantité massive de déchets et les problèmes enregistrés dans les zones agricoles, qui ont été abordés dans la partie bibliographique.

L'opération de compostage a contribué d'évaluer le rendement de conversion des déchets de palmiers dattiers en engrais organique à l'utiliser dans des zones nécessitant une amélioration supplémentaire dans son sol agricole en raison de la faible teneur en matière organique et les éléments nécessaires au développement des plants. L'opération a également permis de réduire ou d'éliminer la pollution, d'améliorer l'image esthétique et de pousser le côté économique de la région.

Le processus du compostage a conduit à l'élévation de température de déchets des palmiers dattiers à 34,5 °C et des mélanges ; C1, C2, C3, C4 aux 40,3 °C, 40,8 °C, 42,5 °C, 45,7 °C respectivement. Cette élévation dans la température fait du compost une source de nutrition saine pour la croissance des plantes et conduit à l'élimination de microorganismes pathogènes. Après 90 jours de compostage, le compost de déchets des palmiers dattiers (DPD) a présenté un rapport C/N est égale à 47,5 et un pH neutre, tandis que les composts des mélanges ont présenté un rapport C/N compris entre 20,6 et 13,8 et un pH légèrement alcalin.

En général, la valeur agronomique du compost est très liée à son degré de maturité. Le niveau de maturité d'un compost est évalué par les substances humiques qu'il contient et surtout par l'aromaticité de leurs structures. Ainsi, l'objectif de la dernière partie de la caractérisation est d'évaluer l'évolution des substances humiques à différents stades du compostage à l'aide de la spectroscopie UV-visible et de la spectroscopie infrarouge (FT-IR). L'avantage d'utiliser ces techniques est d'obtenir le maximum possible de données utiles pour caractériser les transformations biologiques de différents composants organiques et les mécanismes de formation de structures humiques durant le processus du compostage. Les analyses spectroscopiques effectués par l'UV-visible et l'infrarouge (FT-IR) sur les échantillons de déchets (DPD) et les mélanges des déchets (C1, C2, C3, et C4) ont montré que la technique a contribué dans l'évaluation de dégradation de la matière organique et sa transformation en une substance humique formée principalement d'acides humiques et fulviques.

A la lumière de l'ensemble des résultats obtenus, il est apparu que la maturation du compost organique est étroitement liée par le développement de la substance humique, particulièrement dans le cas des acides humiques. Ainsi, l'augmentation des acides humiques pendant le processus du compostage peut être considérée comme un indice de sa maturité.

La continuité dans ce travail ouvre d'autres pistes de recherche. Et par suite, les perspectives futures proposées sont l'utilisation de déchets des palmiers dattiers et leurs mélanges dans le champ agricole à travers d'un test agricole pour savoir clairement leur effet sur le sol et les plantes.

La réussite de ce projet donnera aux maîtres d'ouvrage et aux industriels une nouvelle vision à s'intéresser par le domaine des déchets dans une façon général et le domaine des déchets de palmiers dattiers dans une façon particulière.

Références

Références

- [1] J. M. Al-Khayri, S. M. Jain, and D. V Johnson, Eds., *Date palm genetic resources and utilization*, vol. 1. Springer, New York, 2015.
- [2] N. Koull and M. T. Halilat, “Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d’Ouargla (Algérie),” *Etude Gest. des Sols*, vol. 23, pp. 9–20, 2016.
- [3] K. Kumar and K. M. Goh, “Crop residues and management practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery,” *Adv. Agron.*, vol. 68, pp. 197–319, 1999.
- [4] O. Verdonck and R. Gabriels, “Reference method for the determination of physical properties of plant substrates. II. Reference method for the determination of chemical properties of plant substrates,” *Acta Hortic.*, vol. 302, pp. 169–179, 1992.
- [5] S. P. Mathur, H. Diné, G. Owen, M. Schnitzer, and J. Dugan, “Determination of compost biomaturity. II. Optical density of water extracts of composts as a reflection of their maturity,” *Biol. Agric. Hortic.*, vol. 10, no. 2, pp. 87–108, 1993.
- [6] J. Medina, C. Monreal, J. M. Barea, C. Arriagada, F. Borie, and P. Cornejo, “Crop residue stabilization and application to agricultural and degraded soils: a review,” *Waste Manag.*, vol. 42, pp. 41–54, 2015.
- [7] T. A. Hottle, M. L. Agüero, M. M. Bilec, and A. E. Landis, “Alkaline amendment for the enhancement of compost degradation for polylactic acid biopolymer products,” *Compost Sci. Util.*, vol. 24, no. 3, pp. 159–173, 2016.
- [8] F. C. Miller, “Composting as a process based on the control of ecologically selective factors,” *Microb. Ecol.*, pp. 515–544, 1993.
- [9] M. de Bertoldi, “Composting in the European Union,” *BioCycle J. Compost. Org. Recycl.*, vol. 39, no. 6, pp. 74–75, 1998.
- [10] L. Carpenter-Boggs, A. C. Kennedy, and J. P. Reganold, “Use of phospholipid fatty acids and carbon source utilization patterns to track microbial community succession in developing compost,” *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 64, no. 10, pp. 4062–4064, 1998.
- [11] B. Antizar-Ladislao, K. Spanova, A. J. Beck, and N. J. Russell, “Microbial community structure changes during bioremediation of PAHs in an aged coal-tar contaminated soil by in-vessel composting,” *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 61, no. 4, pp. 357–364, 2008.
- [12] J. T. Sims, “Nitrogen mineralization and elemental availability in soils amended with cocomposted sewage sludge,” *J. Environ. Qual.*, vol. 19, no. 4, pp. 669–675, 1990.
- [13] M. Mamo, C. J. Rosen, T. R. Halbach, and J. F. Moncrief, “Corn yield and nitrogen uptake in sandy soils amended with municipal solid waste compost,” *J. Prod. Agric.*, vol. 11, no. 4, pp. 469–475, 1998.
- [14] E. Jimenes and V. Garcia, “Evaluation of city refuse compost maturity,” *Biol Wastes*, vol. 3, pp. 115–142, 1989.
- [15] M. H. Wong and L. M. Chu, “The responses of edible crops treated with extracts of refuse compost of different ages,” *Agric. Wastes*, vol. 14, no. 1, pp. 63–74, 1985.
- [16] M. Jonoobi, M. Shafie, Y. Shirmohammadli, A. Ashori, H. Z. Hosseinabadi, and T. Mekonnen, “A Review on Date Palm Tree: Properties, Characterization and Its Potential Applications,” *J. Renew. Mater.*, vol. 7, no. 11, pp. 1055–1075, 2019.
- [17] W. Al-Shahib and R. J. Marshall, “The fruit of the date palm: its possible use as the best food for the future?,” *Int. J. Food Sci. Nutr.*, vol. 54, no. 4, pp. 247–259, 2003.
- [18] M. Gros-Balthazard, C. Newton, S. Ivorra, J.-C. Pintaud, and J.-F. Terral, “Origines et

- domestication du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.). État de l'art et perspectives d'étude," *Rev. d'ethnoécologie*, no. 4, 2013.
- [19] C. T. Chao and R. R. Krueger, "The date palm (*Phoenix dactylifera* L.): overview of biology, uses, and cultivation," *HortScience*, vol. 42, no. 5, pp. 1077–1082, 2007.
- [20] M. Ouennoughi and D. Dubost, "Le voyage forcé des dattiers en Nouvelle-Calédonie," *Sci. Chang. planétaires/Sécheresse*, vol. 16, no. 4, pp. 241–246, 2005.
- [21] A. Alawar, A. M. Hamed, and K. Al-Kaabi, "Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement," *Compos. Part B Eng.*, vol. 40, no. 7, pp. 601–606, 2009.
- [22] M. Djerbi, *Précis de phoeniciculture*. Ed. FAO, Rome, 1994.
- [23] J.-C. Pintaud *et al.*, "Species delimitation in the genus *Phoenix* (Arecaceae) based on SSR markers, with emphasis on the identity of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.)," *Divers. phylogeny, Evol. monocotyledons*, pp. 267–286, 2010.
- [24] E. Carreño *et al.*, "Morphological systematics of date-palm diversity (*Phoenix*, Arecaceae) in Western Europe and some preliminary molecular results," *V Int. Symp. Taxon. Cultiv. Plants* 799, pp. 97–104, 2007.
- [25] A. Daher Meraneh, "Détermination du sexe chez le palmier dattier: Approches histocytologiques et moléculaires," Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, France, 2010.
- [26] N. Bouguedoura, M. Bennaceur, and A. Benkhalifa, "Le palmier dattier en Algérie: situation, contraintes et apports de la recherche," in *Biotechnologies du palmier dattier*, F. Aberlenc-Bertossi, Ed. IRD Éditions, Paris, 2010, pp. 16–22.
- [27] P. Gilles, *Cultiver le palmier-dattier*. CIRAD, Montpellier, 2000.
- [28] J. F. Morton, *Fruits of warm climates*. Julia Frances Morton, 1987.
- [29] E. Espiard, *Introduction à la transformation industrielle des fruits*. Editions Tec & Doc, Paris, 2002.
- [30] M. Djerbi, "Biotechnology of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.): Ways of propagating Bayoud Disease resistant, high quality clones," *Options Mediterr. Ser. A, Seininaires Mediterraneens*. 13, vol. 3, pp. 1–37, 1992.
- [31] J. Dransfield, N. W. Uhl, C. B. A. Lange, W. J. Baker, M. M. Harley, and C. E. Lewis, *Genera Palmarum: the evolution and classification of palms*. Royal Botanic Gardens, Kew, London, 2008.
- [32] M. Feldman, "Taxonomic Classification and Names of Wild, Primitive, Cultivated, and Modern Cultivated Wheats. Wheats," *Evol. Crop Plants. Longman, London*, pp. 120–128, 1976.
- [33] F. M. Henderson, "Morphology and anatomy of palm seedlings," *Bot. Rev.*, vol. 72, no. 4, pp. 273–329, 2006.
- [34] P. Munier, *Le palmier-dattier*, vol. 24. Maisonneuve & Larose, Paris, 1973.
- [35] M. Wertheimer, "Recherches et observations sur la plantation des 'rejets' des palmier dattier dans la Ziban (region de Biskra)," *Fruits*, vol. 11, pp. 481–487, 1956.
- [36] R. A. B. de la Perrière and A. Benkhalifa, "Identification des cultivars de dattier (*Phoenix dactylifera* L.) du sud-ouest algérien," *Plant Genet. Resour. Newsl.*, vol. 78, pp. 13–19, 1989.
- [37] W. H. Barreveld, *Date palm products*. FAO, Rome, 1993.
- [38] B. S. Mohamed, "Le recyclage des sous-produits des oasis: acquis et perspectives," Sahara and Sahel Observatory, Tunis, 2014.
- [39] A. Chehma and H. F. Longo, "Valorisation des sous-produits du palmier dattier en vue de leur utilisation en alimentation du bétail," *Rev. des énergies renouvelables*, pp. 59–64, 2001.
- [40] M. Rokbi, H. Osmani, A. Imad, and N. Benseddiq, "Effect of chemical treatment on

- flexure properties of natural fiber-reinforced polyester composite,” *procedia Eng.*, vol. 10, pp. 2092–2097, 2011.
- [41] L. El Fels, “Suivi physico-chimique, microbiologique et écotoxicologique du compostage de boues de STEP mélangées à des déchets de palmier: validation de nouveaux indices de maturité,” Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2014.
- [42] R. V Misra, R. N. Roy, and H. Hiraoka, *Méthodes de compostage au niveau de l’exploitation agricole*. FAO, Rome, 2005.
- [43] V. K. Sharma, M. Canditelli, F. Fortuna, and G. Cornacchia, “Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 38, no. 5, pp. 453–478, 1997.
- [44] M. Tuomela, M. Vikman, A. Hatakka, and M. Itävaara, “Biodegradation of lignin in a compost environment: a review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 72, no. 2, pp. 169–183, 2000.
- [45] A. Hassen, K. Belguith, N. Jedidi, A. Cherif, M. Cherif, and A. Boudabous, “Microbial characterization during composting of municipal solid waste,” *Bioresour. Technol.*, vol. 80, no. 3, pp. 217–225, 2001.
- [46] H. El Haggouji, “Évolution des caractéristiques physico-chimiques, spectroscopiques et éco-toxicologiques des effluents d’huileries d’olive au cours de traitements biologique et chimique,” Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [47] S. M. Tiquia, “Evolution of extracellular enzyme activities during manure composting,” *J. Appl. Microbiol.*, vol. 92, no. 4, pp. 764–775, 2002.
- [48] C. Mondini, F. Fornasier, and T. Sinicco, “Enzymatic activity as a parameter for the characterization of the composting process,” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 36, no. 10, pp. 1587–1594, 2004.
- [49] F. Charnay, “Compostage des déchets urbains dans les pays en développement: élaboration d’une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost,” Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 2005.
- [50] P. D. Bach, K. Nakasaki, M. Shoda, and H. Kubota, “Thermal balance in composting operations,” *J. Ferment. Technol.*, vol. 65, no. 2, pp. 199–209, 1987.
- [51] C. Francou, “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, France, 2003.
- [52] M. Lemunier, “Evaluation de la survie de bactéries pathogènes en composts au cours du compostage et du stockage: rôle de fraction biotique du compost,” Thèse de Doctorat, Université de Dijon, France, 2006.
- [53] J. Célérier, “Caractérisation moléculaire et dynamique de la matière organique de compost (déchets verts, biodéchets) dans un sol,” Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2008.
- [54] M.-P. Som, L. Lemée, and A. Amblès, “Stability and maturity of a green waste and biowaste compost assessed on the basis of a molecular study using spectroscopy, thermal analysis, thermodesorption and thermochemolysis,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 19, pp. 4404–4416, 2009.
- [55] G. Lashermes, “Evolution des polluants organiques au cours du compostage de déchets organiques: approche expérimentale et modélisation,” Thèse de Doctorat, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l’Environnement (AgroParisTech), France, 2010.
- [56] D. Kpogbemabou, “Procédé de fabrication de biocarburants à partir de biomasse lignocellulosique biologiquement déstructurée,” Thèse de Doctorat, Université de

- Poitiers, France, 2011.
- [57] K. Sugahara and A. Inoko, "Composition analysis of humus and characterization of humic acid obtained from city refuse compost," *Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 27, no. 2, pp. 213–224, 1981.
- [58] Y. Harada, A. Inoko, M. Tadaki, and T. Izawa, "Maturing process of city refuse compost during piling," *Soil Sci. plant Nutr.*, vol. 27, no. 3, pp. 357–364, 1981.
- [59] P. Godin, "Fermentation et maturité des composts urbains [Fermentation and maturity of urban composts]," *Compost Inf.*, vol. 6, pp. 2–3, 1981.
- [60] E. I. Jiménez and V. P. Garcia, "Evaluation of city refuse compost maturity: a review," *Biol. wastes*, vol. 27, no. 2, pp. 115–142, 1989.
- [61] M. A. Sanchez-Monedero, C. Mondini, M. De Nobili, L. Leita, and A. Roig, "Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter," *Waste Manag.*, vol. 24, no. 4, pp. 325–332, 2004.
- [62] S. Amir, "Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage: devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost.," Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [63] M. T. Abdelhamid, T. Horiuchi, and S. Oba, "Composting of rice straw with oilseed rape cake and poultry manure and its effects on faba bean (*Vicia faba* L.) growth and soil properties," *Bioresour. Technol.*, vol. 93, no. 2, pp. 183–189, 2004.
- [64] A. A. Zorpas, D. Arapoglou, and K. Panagiotis, "Waste paper and clinoptilolite as a bulking material with dewatered anaerobically stabilized primary sewage sludge (DASPSS) for compost production," *Waste Manag.*, vol. 23, no. 1, pp. 27–35, 2003.
- [65] K. E. Koledzi, "Valorisation des déchets solides urbains dans les quartiers de Lomé (Togo): approche méthodologique pour une production durable de compost," Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 2011.
- [66] J. W. C. Wong, K. K. Ma, K. M. Fang, and C. Cheung, "Utilization of a manure compost for organic farming in Hong Kong," *Bioresour. Technol.*, vol. 67, no. 1, pp. 43–46, 1999.
- [67] L. M. Bresson, C. Koch, Y. Le Bissonnais, E. Barriuso, and V. Lecomte, "Soil surface structure stabilization by municipal waste compost application," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 65, no. 6, pp. 1804–1811, 2001.
- [68] N. S. Bolan, D. C. Adriano, R. Natesan, and B. Koo, "Effects of organic amendments on the reduction and phytoavailability of chromate in mineral soil," *J. Environ. Qual.*, vol. 32, no. 1, pp. 120–128, 2003.
- [69] C. Zurbrugg and R. Ahmed, "Enhancing community motivation and participation in solid waste management," *Sandec News*, vol. 4, pp. 2–6, 1999.
- [70] M. Larbi, "Influence de la qualité des composts et de leurs extraits sur la protection des plantes contre les maladies fongiques," Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel, France, 2006.
- [71] P. Wang, C. M. Changa, M. E. Watson, W. A. Dick, Y. Chen, and H. A. J. Hoitink, "Maturity indices for composted dairy and pig manures," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 36, no. 5, pp. 767–776, 2004.
- [72] N. Tahraoui Douma, "Valorisation par compostage des résidus solides urbains de la commune de Chlef, Algérie," Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 2013.
- [73] G. E. Vallad, L. Cooperband, and R. M. Goodman, "Plant foliar disease suppression mediated by composted forms of paper mill residuals exhibits molecular features of induced resistance," *Physiol. Mol. Plant Pathol.*, vol. 63, no. 2, pp. 65–77, 2003.
- [74] D. Said-Pullicino and G. Gigliotti, "Oxidative biodegradation of dissolved organic matter during composting," *Chemosphere*, vol. 68, no. 6, pp. 1030–1040, 2007.

- [75] M. P. Bernai, C. Paredes, M. A. Sanchez-Monedero, and J. Cegarra, "Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes," *Bioresour. Technol.*, vol. 63, no. 1, pp. 91–99, 1998.
- [76] T. Eggen and Ø. Vethe, "Stability indices for different composts," *Compost Sci. Util.*, vol. 9, no. 1, pp. 19–26, 2001.
- [77] B. Scaglia and F. Adani, "An index for quantifying the aerobic reactivity of municipal solid wastes and derived waste products," *Sci. Total Environ.*, vol. 394, no. 1, pp. 183–191, 2008.
- [78] Y. Inbar, Y. Hadar, and Y. Chen, "Recycling of cattle manure: the composting process and characterization of maturity," *J. Environ. Qual.*, vol. 22, no. 4, pp. 857–863, 1993.
- [79] R. Rynk, "The art in the science of compost maturity," *Compost Sci. Util.*, vol. 11, no. 2, pp. 94–95, 2003.
- [80] A. Veecken, K. Nierop, V. de Wilde, and B. Hamelers, "Characterisation of NaOH-extracted humic acids during composting of a biowaste," *Bioresour. Technol.*, vol. 72, no. 1, pp. 33–41, 2000.
- [81] L. Tønner-Klank, J. Møller, A. Forslund, and A. Dalsgaard, "Microbiological assessments of compost toilets: in situ measurements and laboratory studies on the survival of fecal microbial indicators using sentinel chambers," *Waste Manag.*, vol. 27, no. 9, pp. 1144–1154, 2007.
- [82] A. Bhatia, S. Madan, J. Sahoo, M. Ali, R. Pathania, and A. A. Kazmi, "Diversity of bacterial isolates during full scale rotary drum composting," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 7, pp. 1595–1601, 2013.
- [83] A. Pourcher *et al.*, "Decrease of enteric micro-organisms from rural sewage sludge during their composting in straw mixture," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 99, no. 3, pp. 528–539, 2005.
- [84] G. Hamer, "Solid waste treatment and disposal: effects on public health and environmental safety," *Biotechnol. Adv.*, vol. 22, no. 1–2, pp. 71–79, 2003.
- [85] J. Venglovsky *et al.*, "Evolution of temperature and chemical parameters during composting of the pig slurry solid fraction amended with natural zeolite," *Bioresour. Technol.*, vol. 96, no. 2, pp. 181–189, 2005.
- [86] A. I. Khalil, M. S. Beheary, and E. M. Salem, "Monitoring of microbial populations and their cellulolytic activities during the composting of municipal solid wastes," *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 17, no. 2, pp. 155–161, 2001.
- [87] C. Liang, K. C. Das, and R. W. McClendon, "The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend," *Bioresour. Technol.*, vol. 86, no. 2, pp. 131–137, 2003.
- [88] M. Klamer and E. Bååth, "Microbial community dynamics during composting of straw material studied using phospholipid fatty acid analysis," *FEMS Microbiol. Ecol.*, vol. 27, no. 1, pp. 9–20, 1998.
- [89] A. Hassen, K. Belguith, N. Jedidi, A. Cherif, M. Cherif, and A. Boudabous, "Microbial characterization during composting of municipal solid waste," *Bioresour. Technol.*, vol. 80, no. 3, pp. 217–225, 2001.
- [90] M. A. Sánchez-Monedero, A. Roig, C. Paredes, and M. P. Bernal, "Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures," *Bioresour. Technol.*, vol. 78, no. 3, pp. 301–308, 2001.
- [91] C. Sundberg, S. Smårs, and H. Jönsson, "Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting," *Bioresour. Technol.*, vol. 95, no. 2, pp. 145–150, 2004.
- [92] R. Canet and F. Pomares, "Changes in physical, chemical and physico-chemical

- parameters during the composting of municipal solid wastes in two plants in Valencia,” *Bioresour. Technol.*, vol. 51, no. 2–3, pp. 259–264, 1995.
- [93] M. P. Bernal, A. F. Navarro, A. Roig, J. Cegarra, and D. Garcia, “Carbon and nitrogen transformation during composting of sweet sorghum bagasse,” *Biol. Fertil. soils*, vol. 22, no. 1–2, pp. 141–148, 1996.
- [94] E. Madejón, M. J. Díaz, R. López, and F. Cabrera, “New approaches to establish optimum moisture content for compostable materials,” *Bioresour. Technol.*, vol. 85, no. 1, pp. 73–78, 2002.
- [95] S. M. Tiquia and N. F. Y. TAM, “Composting pig manure in Hong Kong,” *Biocycle*, vol. 39, no. 2, pp. 78–79, 1998.
- [96] T. L. Richard, H. V. M. Hamelers, A. Veecken, and T. Silva, “Moisture relationships in composting processes,” *Compost Sci. Util.*, vol. 10, no. 4, pp. 286–302, 2002.
- [97] Y. Inbar, Y. Chen, Y. Hadar, and O. Verdonck, “Composting of agricultural wastes for their use as container media: simulation of the composting process,” *Biol. Wastes*, vol. 26, no. 4, pp. 247–259, 1988.
- [98] R. Kulcu and O. Yaldiz, “Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes,” *Bioresour. Technol.*, vol. 93, no. 1, pp. 49–57, 2004.
- [99] D. A. Iannotti, M. E. Grebus, B. L. Toth, L. V. Madden, and H. A. J. Hoitink, “Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste,” *J. Environ. Qual.*, vol. 23, no. 6, pp. 1177–1183, 1994.
- [100] S. Barrington, D. Choinière, M. Trigui, and W. Knight, “Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses,” *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 3, pp. 189–194, 2002.
- [101] C. Paredes, M. P. Bernal, J. Cegarra, and A. Roig, “Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes,” *Bioresour. Technol.*, vol. 85, no. 1, pp. 1–8, 2002.
- [102] A. Jouraiphy, “Compostage des boues activées déchets verts, analyse physicochimiques, microbiologiques, toxicologiques, bilan humique et valorisation agronomique.” Thèse de doctorat, Université Caddi Ayyad, Marrakech, 2007.
- [103] R. Hachicha, S. Hachicha, I. Trabelsi, S. Woodward, and T. Mechichi, “Evolution of the fatty fraction during co-composting of olive oil industry wastes with animal manure: Maturity assessment of the end product,” *Chemosphere*, vol. 75, no. 10, pp. 1382–1386, 2009.
- [104] A. Vergnoux, M. Guiliano, Y. Le Dréau, J. Kister, N. Dupuy, and P. Doumenq, “Monitoring of the evolution of an industrial compost and prediction of some compost properties by NIR spectroscopy,” *Sci. Total Environ.*, vol. 407, no. 7, pp. 2390–2403, 2009.
- [105] L. Wu and L. Q. Ma, “Relationship between compost stability and extractable organic carbon,” *J. Environ. Qual.*, vol. 31, no. 4, pp. 1323–1328, 2002.
- [106] G. A. Baddi, J. A. Albuquerque, J. González, J. Cegarra, and M. Hafidi, “Chemical and spectroscopic analyses of organic matter transformations during composting of olive mill wastes,” *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 54, no. 1, pp. 39–44, 2004.
- [107] R. Spaccini, A. Piccolo, P. Conte, G. Haberhauer, and M. H. Gerzabek, “Increased soil organic carbon sequestration through hydrophobic protection by humic substances,” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 34, no. 12, pp. 1839–1851, 2002.
- [108] C. F. Atkinson, D. D. Jones, and J. J. Gauthier, “Biodegradabilities and microbial activities during composting of municipal solid waste in bench-scale reactors,” *Compost Sci. Util.*, vol. 4, no. 4, pp. 14–23, 1996.
- [109] C. Francou, M. Linères, S. Derenne, M. Le Villio-Poitrenaud, and S. Houot, “Influence of green waste, biowaste and paper–cardboard initial ratios on organic matter

- transformations during composting,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 18, pp. 8926–8934, 2008.
- [110] C. Francou, M. Poitrenaud, and S. Houot, “Stabilization of organic matter during composting: influence of process and feedstocks,” *Compost Sci. Util.*, vol. 13, no. 1, pp. 72–83, 2005.
- [111] A. Tremier, A. De Guardia, C. Massiani, E. Paul, and J. L. Martel, “A respirometric method for characterising the organic composition and biodegradation kinetics and the temperature influence on the biodegradation kinetics, for a mixture of sludge and bulking agent to be co-composted,” *Bioresour. Technol.*, vol. 96, no. 2, pp. 169–180, 2005.
- [112] F. J. Stevenson, *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. John Wiley & Sons, New Jersey, États-Unis, 1994.
- [113] I. Kögel-Knabner, “The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter,” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 34, no. 2, pp. 139–162, 2002.
- [114] B. Chefetz, Y. Hader, and Y. Chen, “Dissolved organic carbon fractions formed during composting of municipal solid waste: properties and significance,” *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, vol. 26, no. 3, pp. 172–179, 1998.
- [115] H.-R. Schulten and P. Leinweber, “Characterization of humic and soil particles by analytical pyrolysis and computer modeling,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 38, no. 1–2, pp. 1–53, 1996.
- [116] R. Zbytniewski and B. Buszewski, “Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: Chemical and spectroscopic properties,” *Bioresour. Technol.*, vol. 96, no. 4, pp. 471–478, 2005.
- [117] J. Drbohlav, T. Dyakonov, I. J. Goldfarb, and W. T. K. Stevenson, “Thermolysis of acetylene terminated sulfone resins. I. Volatile products of degradation,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 46, no. 3, pp. 341–355, 1994.
- [118] M. A. Sánchez-Monedero, A. Roig, J. Cegarra, and M. P. Bernal, “Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of different organic wastes during composting,” *Bioresour. Technol.*, vol. 70, no. 2, pp. 193–201, 1999.
- [119] F. Andreux and C. Munier-Lamy, “Genèse et propriétés des molécules humiques,” *Pédologie*, vol. 2, pp. 109–142, 1994.
- [120] P. Gossart, “Contribution à l’étude des interactions de la matière organique des sols avec les métaux lourds: étude structurale et analytique de molécules modèles,” Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, France, 2001.
- [121] M. Annabi, “Stabilisation de la structure d’un sol limoneux par des apports de composts d’origine urbaine: relation avec les caractéristiques de leur matière organique,” Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2005.
- [122] R. Albrecht, “Co-compostage de boues de station d’épuration et de déchets verts: nouvelle méthodologie du suivi des transformations de la matière organique,” Thèse de Doctorat, Université Paul CEZANNE, Marseille, 2007.
- [123] F. Adani, P. Lozzi, and P. Genevini, “Determination of biological stability by oxygen uptake on municipal solid waste and derived products,” *Compost Sci. Util.*, vol. 9, no. 2, pp. 163–178, 2001.
- [124] Y. Inbar, Y. Chen, and Y. Hadar, “Humic substances formed during the composting of organic matter,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 54, no. 5, pp. 1316–1323, 1990.
- [125] J. C. Forster, W. Zech, and E. Würdinger, “Comparison of chemical and microbiological methods for the characterization of the maturity of composts from contrasting sources,” *Biol. Fertil. Soils*, vol. 16, no. 2, pp. 93–99, 1993.

- [126] M. R. Provenzano, N. Senesi, and G. Piccone, "Thermal and spectroscopic characterization of composts from municipal solid wastes," *Compost Sci. Util.*, vol. 6, no. 3, pp. 67–73, 1998.
- [127] N. Hertkorn *et al.*, "Comparative analysis of partial structures of a peat humic and fulvic acid using one-and two-dimensional nuclear magnetic resonance spectroscopy," *J. Environ. Qual.*, vol. 31, no. 2, pp. 375–387, 2002.
- [128] A. Piccolo, "The supramolecular structure of humic substances: a novel understanding of humus chemistry and implications in soil science," *Adv. Agron.*, vol. 75, pp. 57–134, 2002.
- [129] E. Jarde, L. Mansuy, and P. Faure, "Characterization of the macromolecular organic content of sewage sludges by thermally assisted hydrolysis and methylation-gas chromatography–mass spectrometer (THM-GC/MS)," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 68, pp. 331–350, 2003.
- [130] G. Almendros, M. E. Guadalix, F. J. Gonzalez-Vila, and F. Martin, "Preservation of aliphatic macromolecules in soil humins," *Org. Geochem.*, vol. 24, no. 6–7, pp. 651–659, 1996.
- [131] J. A. Rice, E. Tombácz, and K. Malekani, "Applications of light and X-ray scattering to characterize the fractal properties of soil organic matter," *Geoderma*, vol. 88, no. 3–4, pp. 251–264, 1999.
- [132] C. Guignard, "Etude structurale de la matière organique de tourbes. Utilisation en traitement de dépollution," Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 2001.
- [133] F. J. González-Vila, A. Amblès, J. C. del Río, and L. Grasset, "Characterisation and differentiation of kerogens by pyrolytic and chemical degradation techniques," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 58, pp. 315–328, 2001.
- [134] F. De Paolis and J. Kukkonen, "Binding of organic pollutants to humic and fulvic acids: influence of pH and the structure of humic material," *Chemosphere*, vol. 34, no. 8, pp. 1693–1704, 1997.
- [135] F. J. González-Vila, U. Lankes, and H.-D. Lüdemann, "Comparison of the information gained by pyrolytic techniques and NMR spectroscopy on the structural features of aquatic humic substances," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 58, pp. 349–359, 2001.
- [136] S.-W. C. Chien, C.-C. Huang, and M.-C. Wang, "Reactions of refuse compost-derived humic substances with lead, copper, cadmium, and zinc," *Int. J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 137–147, 2003.
- [137] M. Thomsen, P. Lassen, S. Dobel, P. E. Hansen, L. Carlsen, and B. B. Mogensen, "Characterisation of humic materials of different origin: a multivariate approach for quantifying the latent properties of dissolved organic matter," *Chemosphere*, vol. 49, no. 10, pp. 1327–1337, 2002.
- [138] M. Domeizel, A. Khalil, and P. Prudent, "UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost," *Bioresour. Technol.*, vol. 94, no. 2, pp. 177–184, 2004.
- [139] A. Jouraiphy, S. Amir, M. El Gharous, J.-C. Revel, and M. Hafidi, "Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 56, no. 2, pp. 101–108, 2005.
- [140] E. Smidt and K. Meissl, "The applicability of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in waste management," *Waste Manag.*, vol. 27, no. 2, pp. 268–276, 2007.
- [141] E. Iglesias Jiménez and V. Pérez García, "Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 6, no. 1, pp. 45–60, 1991.
- [142] G. F. Huang, J. W. C. Wong, Q. T. Wu, and B. B. Nagar, "Effect of C/N on composting

- of pig manure with sawdust,” *Waste Manag.*, vol. 24, no. 8, pp. 805–813, 2004.
- [143] I. Déportes, J.-L. Benoit-Guyod, and D. Zmirou, “Hazard to man and the environment posed by the use of urban waste compost: a review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 172, no. 2–3, pp. 197–222, 1995.
- [144] C. Chroni, A. Kyriacou, I. Georgaki, T. Manios, M. Kotsou, and K. Lasaridi, “Microbial characterization during composting of biowaste,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 5, pp. 1520–1525, 2009.
- [145] R. C. Minussi, S. G. De Moraes, G. M. Pastore, and N. Duran, “Biodecolorization screening of synthetic dyes by four white-rot fungi in a solid medium: possible role of siderophores,” *Lett. Appl. Microbiol.*, vol. 33, no. 1, pp. 21–25, 2001.
- [146] B. Mouria, A. Ouazzani-Touhami, and A. Douira, “Isolement et identification de la mycoflore du compost des déchets urbains solides,” *Nat. Technol.*, no. 9, p. 13, 2013.
- [147] C. G. Golueke, “Bacteriology of composting,” *Biocycle*, vol. 33, pp. 55–57, 1992.
- [148] J. Ryckeboer *et al.*, “A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes,” *Ann. Microbiol.*, vol. 53, no. 4, pp. 349–410, 2003.
- [149] R. F. Herrmann and J. F. Shann, “Microbial community changes during the composting of municipal solid waste,” *Microb. Ecol.*, vol. 33, no. 1, pp. 78–85, 1997.
- [150] R. F. Herrmann and J. R. Shann, “Enzyme activities as indicators of municipal solid waste compost maturity,” *Compost Sci. Util.*, vol. 1, no. 4, pp. 54–63, 1993.
- [151] M. P. Bernal, M. A. Sanchez-Monedero, C. Paredes, and A. Roig, “Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 69, no. 3, pp. 175–189, 1998.
- [152] A. Ouatmane, “Etude du compostage de quelques déchets organiques: I-Approche physico-chimique, calorimétriques et spectroscopiques de l’étude de l’état de maturation des composts. II-Analyse qualitative et quantitative de la fraction humique,” Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 2000.
- [153] S. E. Mbuligwe, G. R. Kassenga, M. E. Kaseva, and E. J. Chaggu, “Potential and constraints of composting domestic solid waste in developing countries: findings from a pilot study in Dar es Salaam, Tanzania,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 36, no. 1, pp. 45–59, 2002.
- [154] P. Castaldi, G. Alberti, R. Merella, and P. Melis, “Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity,” *Waste Manag.*, vol. 25, no. 2, pp. 209–213, 2005.
- [155] M. Pietro and C. Paola, “Thermal analysis for the evaluation of the organic matter evolution during municipal solid waste aerobic composting process,” *Thermochim. Acta*, vol. 413, no. 1–2, pp. 209–214, 2004.
- [156] G. Ranalli, G. Bottura, P. Taddei, M. Garavani, R. Marchetti, and C. Sorlini, “Composting of solid and sludge residues from agricultural and food industries. Bioindicators of monitoring and compost maturity,” *J. Environ. Sci. Heal. Part A*, vol. 36, no. 4, pp. 415–436, 2001.
- [157] C. Rivero, T. Chirenje, L. Q. Ma, and G. Martinez, “Influence of compost on soil organic matter quality under tropical conditions,” *Geoderma*, vol. 123, no. 3–4, pp. 355–361, 2004.
- [158] M. P. Bernal, A. F. Navarro, M. A. Sanchez-Monedero, A. Roig, and J. Cegarra, “Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil,” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 30, no. 3, pp. 305–313, 1998.
- [159] C. García, T. Hernández, F. Costa, and J. A. Pascual, “Phytotoxicity due to the agricultural use of urban wastes. Germination experiments,” *J. Sci. Food Agric.*, vol. 59, no. 3, pp. 313–319, 1992.
- [160] P. Helfrich, B. Chefetz, Y. Hadar, Y. Chen, and H. Schnabl, “A novel method for

- determining phytotoxicity in composts,” *Compost Sci. Util.*, vol. 6, no. 3, pp. 6–13, 1998.
- [161] L. Wu, L. Q. Ma, and G. A. Martinez, “Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost,” *J. Environ. Qual.*, vol. 29, no. 2, pp. 424–429, 2000.
- [162] I. Körner *et al.*, “Investigation and optimization of composting processes—test systems and practical examples,” *Waste Manag.*, vol. 23, no. 1, pp. 17–26, 2003.
- [163] C. M. Changa, P. Wang, M. E. Watson, H. A. J. Hoitink, and F. C. Michel Jr, “Assessment of the reliability of a commercial maturity test kit for composted manures,” *Compost Sci. Util.*, vol. 11, no. 2, pp. 125–143, 2003.
- [164] L. J. Brewer and D. M. Sullivan, “Maturity and stability evaluation of composted yard trimmings,” *Compost Sci. Util.*, vol. 11, no. 2, pp. 96–112, 2003.
- [165] S. Wahyono and F. L. Sahwan, “Low-tech composting in tropical countries,” *Biocycle*, vol. 41, no. 2, pp. 78–79, 2000.
- [166] Y.-S. Kim, J.-B. Park, S.-S. Choi, and S.-H. Han, “Processing food residuals and sawdust in Taejeon,” *Biocycle*, vol. 40, no. 8, 1999.
- [167] Djazairress, “Adrar : l’agriculture en pleine expansion,” *Algérie Presse Service*, Aug. 10, 2012.
- [168] G. Du Laing *et al.*, “Effect of decomposing litter on the mobility and availability of metals in the soil of a recently created floodplain,” *Geoderma*, vol. 147, no. 1–2, pp. 34–46, 2008.
- [169] A.-H. Le Gall, J. D. Arnaud, P. Guy, H. Bousquet, A. Pflimlin, and P. Plancquaert, *La luzerne: culture, utilisation*. ITEB, Paris, 1991.
- [170] J. Aoun and D. Bouaoun, “Etude des caractéristiques physico-chimiques et contribution à la valorisation agronomique du compost des ordures ménagères,” *Déchets, Sci. Tech.*, no. 50, pp. 17–25, 2008.
- [171] S. Lahsaini *et al.*, “Monitoring of organic pollution and maturity of organic matter from sludge landfilling,” *Sci. Study Res. Chem. Chem. Eng. Biotechnol. Food Ind.*, vol. 17, no. 2, pp. 139–149, 2016.
- [172] C. Garcia, T. Hernandez, and F. Costa, “Changes in carbon fractions during composting and maturation of organic wastes,” *Environ. Manage.*, vol. 15, no. 3, pp. 433–439, 1991.
- [173] H. El Hajjouji *et al.*, “Treatment of olive mill waste-water by aerobic biodegradation: an analytical study using gel permeation chromatography, ultraviolet–visible and Fourier transform infrared spectroscopy,” *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 18, pp. 3513–3520, 2007.
- [174] Y. Chen, N. Senesi, and M. Schnitzer, “Information provided on humic substances by E4/E6 ratios 1,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 41, no. 2, pp. 352–358, 1977.
- [175] G. A. Baddi, M. Hafidi, V. Gilard, and J.-C. Revel, “Review article Methods for studying root colonization by introduced,” *Agronomie*, vol. 23, pp. 407–418, 2003.
- [176] J.-H. Hsu and S.-L. Lo, “Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure,” *Environ. Pollut.*, vol. 104, no. 2, pp. 189–196, 1999.
- [177] P. L. Giusquiani, L. Concezzi, M. Businelli, and A. Macchioni, “Fate of pig sludge liquid fraction in calcareous soil: agricultural and environmental implications,” *J. Environ. Qual.*, vol. 27, no. 2, pp. 364–371, 1998.
- [178] M. C. Gennaro *et al.*, “Multi-method analysis in studies of characterization and degradation of municipal treatment sludges,” *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, vol. 53, no. 2, pp. 101–114, 1993.
- [179] B. B. Huang, G. F., Wu, Q. T., Wong, J. W. C., and Nagar, “Transformation of organic

- matter during co-composting of pig manure with sawdust,” *Bioresour. Technol.*, vol. 97, no. 15, pp. 1834–1842, 2006.
- [180] M. Abad, P. F. Martínez, M. D. Martínez, and J. Martínez, “Agronomic evaluation of substrates,” *Acta Hort*, vol. 11, pp. 141–154, 1993.
- [181] A. M. Ghehsareh, N. Samadi, and H. Borji, “Comparison of date-palm wastes and perlite as growth substrates on some tomato growing indexes,” *African J. Biotechnol.*, vol. 10, no. 24, pp. 4871–4878, 2011.
- [182] M. Gómez-Brandón, C. Lazcano, and J. Domínguez, “The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure,” *Chemosphere*, vol. 70, no. 3, pp. 436–444, 2008.
- [183] M. Soumaré, A. Demeyer, F. M. G. Tack, and M. G. Verloo, “Chemical characteristics of Malian and Belgian solid waste composts,” *Bioresour. Technol.*, vol. 81, no. 2, pp. 97–101, 2002.
- [184] E. Epstein, *The science of composting*. Routledge, 2017.
- [185] A. Ameen, J. Ahmad, and S. Raza, “Determination of total organic matter of mature compost prepared by using municipal solid waste,” *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 6, no. 5, pp. 293–2250, 2016.
- [186] L. El Fels, M. Zamama, A. El Asli, and M. Hafidi, “Assessment of biotransformation of organic matter during co-composting of sewage sludge-lignocelulosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 87, no. 2014, pp. 128–137, 2014.
- [187] H. Knicker, “Stabilization of N-compounds in soil and organic-matter-rich sediments - What is the difference?,” *Mar. Chem.*, vol. 92, pp. 167–195, 2004.
- [188] F. Barje, L. El Fels, H. El Hajjouji, S. Amir, P. Winterton, and M. Hafidi, “Molecular behaviour of humic acid-like substances during co-composting of olive mill waste and the organic part of municipal solid waste,” *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 74, pp. 17–23, 2012.
- [189] S. Dumontet, H. Dinel, and S. B. Baloda, “Pathogen reduction in sewage sludge by composting and other biological treatments: A review,” *Biol. Agric. Hortic.*, vol. 16, no. 4, pp. 409–430, 1999.
- [190] M. Chennaoui, Y. Salama, A. Makan, and M. Mountadar, “Valorisation Agricole D’un Compost Produit À Partir Du Compostage En Cuve Des Déchets Municipaux,” *Eur. Sci. Journal, ESJ*, vol. 12, no. 35, p. 247, 2016.
- [191] L. M. Marra, S. M. de Oliveira-Longatti, C. R. F. S. Soares, J. M. de Lima, F. L. Olivares, and F. Moreira, “Initial pH of medium affects organic acids production but do not affect phosphate solubilization,” *Brazilian J. Microbiol.*, vol. 46, no. 2, pp. 367–375, 2015.
- [192] M. Hafidi *et al.*, “Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of activated sewage sludge with green waste,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 18, pp. 8819–8823, 2008.
- [193] S. Peters, S. Koschinsky, F. Schwieger, and C. C. Tebbe, “Succession of microbial communities during hot composting as detected by PCR–single-strand-conformation polymorphism-based genetic profiles of small-subunit rRNA genes,” *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 66, no. 3, pp. 930–936, 2000.
- [194] D. Said-Pullicino, F. G. Erriquens, and G. Gigliotti, “Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity,” *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 9, pp. 1822–1831, 2007.
- [195] J. W. C. Wong, S. W. Y. Li, and M. H. Wong, “Coal fly ash as a composting material for sewage sludge: effects on microbial activities,” *Environ. Technol.*, vol. 16, no. 6, pp.

- 527–537, 1995.
- [196] M. K. Iqbal, R. A. Khan, A. Nadeem, and A. Hussnain, “Comparative study of different techniques of composting and their stability evaluation in municipal solid waste,” *J. Chem. Soc. Pak*, vol. 34, no. 2, p. 273, 2012.
- [197] D. Y. Huang, W. J. Lu, H. T. Wang, H. Y. Zhou, and Z. C. Wang, “Application of high-efficient cellulose utilization microorganisms in co-composting of vegetable wastes and flower stalk,” *Huan jing ke xue= Huanjing kexue*, vol. 25, no. 2, pp. 145–149, 2004.
- [198] S. Zmora-Nahum, O. Markovitch, J. Tarchitzky, and Y. Chen, “Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity,” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 37, no. 11, pp. 2109–2116, 2005.
- [199] M. Fang, J. W. C. Wong, K. K. Ma, and M. H. Wong, “Co-composting of sewage sludge and coal fly ash: nutrient transformations,” *Bioresour. Technol.*, vol. 67, no. 1, pp. 19–24, 1999.
- [200] M. F. Hamoda, H. A. A. Qdais, and J. Newham, “Evaluation of municipal solid waste composting kinetics,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 23, no. 4, pp. 209–223, 1998.
- [201] J. Polak, M. Bartoszek, and W. W. Sułkowski, “Comparison of some spectroscopic and physico-chemical properties of humic acids extracted from sewage sludge and bottom sediments,” *J. Mol. Struct.*, vol. 924, pp. 309–312, 2009.
- [202] M. Fuentes, G. González-Gaitano, and J. M. García-Mina, “The usefulness of UV-visible and fluorescence spectroscopies to study the chemical nature of humic substances from soils and composts,” *Org. Geochem.*, vol. 37, no. 12, pp. 1949–1959, 2006.
- [203] E. Smidt, P. Lechner, M. Schwanninger, G. Haberhauer, and M. H. Gerzabek, “Characterization of waste organic matter by FT-IR spectroscopy: application in waste science,” *Appl. Spectrosc.*, vol. 56, no. 9, pp. 1170–1175, 2002.
- [204] J. Polak, W. W. Sułkowski, M. Bartoszek, A. Luty, D. Pentak, and A. Sułkowska, “Spectroscopic study of the effect of biological treatment on the humification process of sewage sludge,” *J. Mol. Struct.*, vol. 834, pp. 229–235, 2007.
- [205] M. Benito, A. Masaguer, A. Moliner, N. Arrigo, and R. M. Palma, “Chemical and microbiological parameters for the characterisation of the stability and maturity of pruning waste compost,” *Biol. Fertil. Soils*, vol. 37, no. 3, pp. 184–189, 2003.
- [206] N. Sanmanee, K. Panishkan, K. Obsuwan, and S. Dharmvanij, “Study of compost maturity during humification process using UV-spectroscopy,” *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 80, no. 8, pp. 403–405, 2011.
- [207] J. Roberts, *Chimie organique moderne*. Ediscience, 1968.
- [208] R. Albrecht, R. Joffre, R. Gros, J. Le Petit, G. Terrom, and C. Périssol, “Efficiency of near-infrared reflectance spectroscopy to assess and predict the stage of transformation of organic matter in the composting process,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 2, pp. 448–455, 2008.
- [209] R. Albrecht, J. Le Petit, G. Terrom, and C. Périssol, “Comparison between UV spectroscopy and nirs to assess humification process during sewage sludge and green wastes co-composting,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 6, pp. 4495–4500, 2011.
- [210] M. Ali, A. Bhatia, A. A. Kazmi, and N. Ahmed, “Characterization of high rate composting of vegetable market waste using Fourier transform-infrared (FT-IR) and thermal studies in three different seasons,” *Biodegradation*, vol. 23, no. 2, pp. 231–242, 2012.
- [211] E. Smidt, K. U. Eckhardt, P. Lechner, H. R. Schulten, and P. Leinweber, “Characterization of different decomposition stages of biowaste using FT-IR spectroscopy and pyrolysis-field ionization mass spectrometry,” *Biodegradation*, vol. 16, no. 1, pp. 67–79, 2005.

-
- [212] B. E. Madari, J. B. Reeves III, P. L. O. A. Machado, C. M. Guimarães, E. Torres, and G. W. McCarty, “Mid-and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols,” *Geoderma*, vol. 136, no. 1–2, pp. 245–259, 2006.
- [213] V. Mikki, V. Senesi, and K. Hanninen, “Characterization of humic material formed by composting of domestic and industrial biowastes. Part 2. Spectroscopic evaluation of humic acid structures,” *Chemosphere*, vol. 31, no. 8, pp. 1639–1651, 1997.
- [214] G. Haberhauer, B. Rafferty, F. Strebl, and M. H. Gerzabek, “Comparison of the composition of forest soil litter derived from three different sites at various decompositional stages using FTIR spectroscopy,” *Geoderma*, vol. 83, no. 3, p. 331, 1998.
- [215] S. Amir, M. Hafidi, G. Merlina, and J.-C. Revel, “Structural characterization of fulvic acids during composting of sewage sludge,” *Process Biochem.*, vol. 40, no. 5, pp. 1693–1700, 2005.
- [216] M. Kaiser and R. H. Ellerbrock, “Functional characterization of soil organic matter fractions different in solubility originating from a long-term field experiment,” *Geoderma*, vol. 127, no. 3–4, pp. 196–206, 2005.
- [217] M. G. Pérez *et al.*, “Characterization of humic acids from a Brazilian Oxisol under different tillage systems by EPR, ¹³C NMR, FTIR and fluorescence spectroscopy,” *Geoderma*, vol. 118, no. 3–4, pp. 181–190, 2004.
- [218] N. Senesi, V. D’orazio, and G. Ricca, “Humic acids in the first generation of EUROSOLS,” *Geoderma*, vol. 116, no. 3–4, pp. 325–344, 2003.
- [219] B. C. Smith, *Infrared spectral interpretation: a systematic approach*. CRC press, 2018.
- [220] A. W. Fountain III, “Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach by B. Smith,” *ApSpe*, vol. 53, no. 6, p. 208A, 1999.
- [221] A. Ouattmane, M. R. Provenzano, M. Hafidi, and N. Senesi, “Compost Maturity Assessment Using Calorimetry, Spectroscopy and Chemical Analysis.,” *Compost Sci. Util.*, vol. 8, no. 2, 2000.

Annexe

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTRE DE L'AGRICULTURE,
DU DEVELOPPEMENT RURAL**

**DIRECTION DES SERVICES AGRICOLES
DE LA WILAYA D'ADRAR**

وزارة الفلاحة والتنمية الريفية

مديرية المصالح الفلاحية
لولاية أدرار

N°STAT / DSA / 2021

00001260

A MONSIEUR :

**LE DIRECTEUR DE laboratoire d'énergie environnement et système d'information
Université Ahmed Draia – ADRAR**

Objet :A/S Demande de Données récentes

Suite à votre envoi relatif à l'objet sus cité, J'ai l'honneur de vous transmettre ci-joint les informations demandées existant au niveau de nos services.

Salutations distinguées.

Adrar le :

05 MAI 2021

Le directeur



عن الوزير وبتمويله
مديرية المصالح الفلاحية بالنيابة
صبيحة بلسرة

Nombre de palmier à adrar (total, producteur et non producteur) et production totale par variété et par commune de la comagne 2020/2021

COMMUNE	HAMIYA			TINACER			AGHAMOU			TEGALZA			TAKARBOUCHE			AUTRES			TOTAL		
	Nbre existant	Nbre productif	production (qx)	Nbre existant	Nbre productif	production (qx)	Nbre existant	Nbre productif	production n (qx)	Nbre existant	Nbre productif	production (qx)	Nbre existant	Nbre productif	production (qx)	Nbre existant	Nbre productif	production (qx)	Nbre existant	production (qx)	
ADRAR	136.100	116.610	37.480	11.520	9.280	2.757	40.060	34.410	9.758	7.140	6.050	1.653	9.400	7.750	2.338	14.880	8.410	2.659	219.100	192.510	56.665
TINMI	152.611	87.875	22.698	25.090	16.615	3.426	72.940	48.150	11.787	33.850	21.740	5.893	20.297	13.390	3.723	91.785	31.440	7.845	396.573	219.210	55.351
BOUDA	46.295	39.344	11.185	12.020	9.430	2.445	28.820	26.255	6.948	18.005	15.556	4.201	9.850	7.840	2.115	20.000	11.650	3.221	134.990	109.075	30.116
	336.006	243.829	71.373	48.630	35.325	8.628	141.820	107.815	28.474	58.994	43.346	11.757	39.547	26.980	8.175	126.665	51.500	13.725	750.663	510.795	142.132
FENOUGHIL	67.610	57.140	17.144	5.620	4.496	1.355	8.640	5.890	1.738	21.600	18.190	5.607	2.970	2.340	940	6.230	4.455	1.353	112.670	92.511	28.038
TAMEST	64.240	55.301	19.203	7.020	5.585	1.900	1.500	-	-	24.510	21.815	8.721	6.940	5.710	2.085	30.190	24.330	8.028	134.300	112.741	39.916
TAMENITT	46.660	35.280	8.684	17.150	11.250	3.008	880	630	199	12.960	9.400	2.842	4.290	3.200	1.338	3.780	2.270	837	85.720	62.030	16.908
	178.510	147.721	45.031	29.790	21.331	6.262	11.020	6.520	1.937	59.070	49.405	17.170	14.100	11.250	4.242	40.200	31.055	10.217	332.690	267.282	84.860
Z. KOURITA	74.450	63.660	19.438	12.940	8.868	2.690	7.640	6.082	2.005	55.070	43.412	13.024	4.750	3.322	1.020	33.300	26.846	8.664	188.190	152.190	46.800
INZEGAIR	64.225	59.545	17.246	7.220	4.395	1.330	700	-	-	113.695	111.285	35.134	1.200	-	-	18.869	12.680	4.010	205.710	187.915	58.020
	138.715	123.205	36.744	20.160	13.263	4.020	8.340	6.082	2.005	168.569	154.707	48.458	6.950	3.322	1.020	52.169	39.526	12.574	393.900	340.105	104.820
REGGANE	115.650	83.851	31.937	37.450	26.040	8.694	10.000	-	-	98.480	72.375	28.487	9.240	6.175	2.633	17.130	13.156	4.339	287.970	201.637	76.100
SALI	143.730	103.239	35.195	44.750	29.488	9.043	-	-	-	131.690	94.523	34.478	11.020	7.828	2.950	27.167	17.438	3.931	358.317	252.516	85.667
	259.390	187.090	67.103	82.210	55.528	17.737	10.000	-	-	230.130	166.898	62.975	20.260	14.003	5.582	44.297	30.634	8.271	646.287	454.153	161.667
AOULEF	4.990	1.987	937	6.720	3.102	1.098	-	-	-	43.950	20.948	8.488	1.920	795	352	28.210	14.218	5.226	85.790	41.050	16.100
TINOKTEN	5.295	2.450	907	11.180	6.930	2.642	-	-	-	68.682	43.290	16.244	3.935	1.760	588	42.120	31.620	9.999	131.200	86.050	30.280
ITI	500	-	-	3.990	2.885	909	40	-	-	11.240	7.985	2.634	-	-	-	3.730	3.060	1.063	19.500	13.930	4.607
AKKABLI	1.050	-	-	2.485	1.180	590	35	-	-	14.920	1.470	823	1.290	180	36	8.830	5.980	1.831	28.570	8.610	3.280
	11.825	4.437	1.844	24.375	14.097	5.139	75	-	-	138.730	73.593	28.188	7.105	2.735	976	82.890	64.878	18.119	285.060	149.740	54.266
TSABIT	72.895	59.910	19.298	18.645	15.120	4.526	3.845	3.045	1.001	8.187	6.340	2.083	2.135	1.360	418	20.590	15.715	4.438	126.297	101.490	31.744
SBAVA	44.310	30.750	8.540	13.000	8.672	2.382	2.075	800	271	4.610	1.010	297	1.120	600	203	12.830	5.780	2.021	77.945	45.792	13.714
	117.195	90.660	27.838	31.645	21.992	6.908	6.920	3.845	1.272	12.807	7.350	2.380	3.285	1.960	621	33.420	21.475	6.459	204.212	147.282	45.458
TINMOUN	146.909	74.930	21.920	50.440	18.767	5.887	-	-	-	-	-	-	7.600	2.003	641	56.000	21.900	7.366	260.948	117.600	38.834
OULED SAID	39.680	28.547	10.630	9.500	6.610	1.703	-	-	-	6.140	4.500	1.283	2.440	1.760	616	19.050	14.983	5.248	76.810	56.600	19.480
	186.589	103.477	35.550	59.940	25.677	7.990	-	-	-	6.140	4.500	1.283	10.040	3.763	1.257	76.050	36.883	12.634	337.759	174.200	58.314



TINERKOUK	58.550	40.110	12.268	46.550	30.780	9.025	410	-	-	4.050	2.730	825	13.350	8.780	2.340	11.350	7.856	2.182	134.260	90.256	26.630
K. KADDOUR	19.327	12.770	3.956	10.120	7.020	2.722	-	-	1.240	820	420	1.650	1.085	400	7.840	5.055	1.652	40.177	28.760	9.360	
	77.877	62.880	16.224	66.670	37.810	11.757	410	-	5.280	3.550	1.255	15.000	9.885	2.740	19.190	12.911	4.034	174.437	117.016	36.010	
AOURROUT	136.830	94.900	20.504	61.720	47.285	13.924	-	-	3.690	2.520	668	10.770	6.760	2.024	12.690	9.815	3.072	224.700	161.410	49.201	
DELDOL	68.520	60.160	16.052	24.760	21.200	5.078	2.420	1.655	3.290	2.905	644	6.260	5.120	1.508	13.820	10.850	2.776	119.270	101.900	26.460	
METARFA	43.399	37.313	11.797	52.970	47.662	13.258	7.630	5.560	8.430	5.850	1.858	6.175	4.080	1.248	15.240	13.205	4.748	133.894	113.730	34.641	
	247.689	192.373	67.363	139.450	116.247	32.259	10.050	7.235	2.028	15.510	11.285	3.170	23.205	15.980	4.888	41.660	33.930	10.898	477.854	377.040	110.301
CHAROUMINE	45.974	32.202	17.522	24.400	17.798	9.115	8.790	6.300	3.006	5.160	3.220	1.639	11.950	9.650	5.720	20.676	17.390	8.628	116.950	86.560	46.830
TALMINE	65.860	45.876	30.037	17.580	13.167	7.914	1.340	200	1.260	1.255	609	17.970	13.658	6.487	61.340	48.154	34.473	165.450	122.390	81.758	
OLLEDAISSA	24.910	20.330	8.256	23.540	19.290	5.945	200	-	-	-	-	25.940	14.230	7.115	28.918	29.420	12.580	113.508	83.270	33.895	
	136.744	98.408	55.814	65.520	50.255	22.974	10.230	6.680	3.157	6.529	4.475	2.227	55.860	37.538	21.321	120.934	94.964	55.881	395.908	292.220	161.483
11 / 12	1.689.540	1.244.080	414.884	558.390	391.425	123.274	197.965	138.067	38.869	701.818	519.109	178.953	194.422	129.396	50.823	636.665	407.756	152.608	3.978.800	2.829.833	959.311

dont exportation (troc):

Hmira : 491,7 T
 Aghmou : 12,5 T
 Deglet Talmn : 116,5 T
 Tlaser : 406 T

