



Université Mohammed Premier
Faculté Des Sciences
OUJDA



N° d'ordre : 95/06

THÈSE

présentée à la Faculté pour obtenir le grade de :

Docteur

UFR : Biochimie Appliquée aux Sciences Agro-alimentaires et à la Santé

Spécialité : Biochimie et Biologie Cellulaire

**VALORISATION DES SOUS-PRODUITS
ORGANIQUES DU PALMIER DATTIER (*PHOENIX
DACTYLIFERA L.*) PAR COMPOSTAGE.
CONTRIBUTION A LA LUTTE CONTRE LA
FUSARIOSE VASCULAIRE (BAYOUD)**

Par :

Khadija CHAKROUNE

soutenue le 25 Décembre 2006 devant la commission d'examen :

Présidente :

Mme Hana SERGHINI CAID : Pr. A la Faculté des Sciences-Oujda

Membres :

MM.

Mohammed BAAZIZ : Pr. A la Faculté des Sciences Semlalia – Marrakech

Mohammed BOUAKKA : Pr. A la Faculté des Sciences-Oujda.

Mohammed EL YAAGOUBI : Pr. A la Faculté des Sciences-Oujda.

Abdelkader HAKKOU : Pr. A la Faculté des Sciences-Oujda

Hassane LATRACHE : Pr. A la Faculté des Sciences et Technique-Beni Mellal.

RESUME

La palmeraie de Figui, d'une superficie de 700 hectares, produit une biomasse des sous produits de 8.000 tonnes chaque année dont 30% sont générés par les palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera* L) détruits par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. Ces sous-produits ont été compostés en présence des taux différents du fumier bovin, de l'urée ou de l'azote ammoniacal. Le maintien d'une humidité adéquate de 60 à 70%, nécessaire au bon déroulement du processus de compostage, a nécessité l'apport de 11,4 litres d'eau par kg des sous-produits secs. Au cours du processus de compostage et quel que soit le taux du fumier ou de l'azote dans les andains, le pH reste stable et relativement basique de 8,2 à 8,7. A l'inverse, le rapport C/N et la granulométrie diminuent progressivement et la conductivité électrique chute de 25 à 30%. L'évolution des températures internes dans les différents andains dépend du volume de fumier ajouté au mélange : une phase mésophile caractérisée par une augmentation rapide de la température, suivie d'une phase thermophile, qui dure 30 jours où la température reste élevée entre 50 et 70°C pour les andains riches en fumier. L'ajout des composés azotés, l'urée ou l'azote ammoniacal n'a rien changé dans l'évolution de ces températures.

Dans les andains contenant du fumier, l'agent pathogène *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*, responsable de la fusariose vasculaire du palmier dattier (Bayoud) a été complètement éliminé pendant la phase thermophile et des fréquences élevées de retournement accélèrent relativement sa disparition. A l'inverse, la présence de l'azote ammoniacal favorise la prolifération de l'agent pathogène d'environ 62%. Les expérimentations réalisées sur des morceaux des rachis des palmes infectées par *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*, montrent bien qu'il suffit d'incuber les sous-produits infectés pendant 6 heures à 70°C ou pendant 12h à 60°C pour détruire complètement l'agent pathogène logé dans ces sous-produits.

L'évaluation de la qualité du compost a été réalisée par la détermination des paramètres physico-chimiques et biologiques du compost mûr. Ce compost homogène et stable est caractérisé par un pH neutre de 7,5, une conductivité électrique de 9,6 mS/cm, un rapport C/N de 20 et une faible granulométrie. Sa capacité de rétention en eau (75%), sa porosité totale (78%) et sa densité réelle (1600 g/l) sont supérieures à celles de la tourbe. Par contre, son taux de matière organique (38%) est inférieur à celui de la tourbe et cette matière organique est composée essentiellement de l'hémicellulose (23%), cellulose (24%), lignine et cutine (28) et éléments solubles (25%). Ses teneurs en macro-éléments (Na, Mg, K, Ca, P₂O₅) et en micro-éléments nutritifs (Cr, Cu, Ni, Zn, Pb) sont importantes. Cependant, les teneurs de ces éléments traces métalliques sont beaucoup plus inférieures à celles autorisées par les normes des pays producteurs du compost.

La maturité du compost a été confirmée par un indice de minéralisation du carbone de 3% et par un indice de stabilité biologique de 59%. Le compost ne montre aucune phytotoxicité, le taux de germination des graines de cresson (*Lepidium sativum*) atteint 95%. L'absence de phytotoxicité est confirmée aussi par la bonne croissance des plants de tomate, de courgette et du palmier dattier dans des mélanges de substrat contenant le compost et il semblerait que le compost pourra avoir des effets synergiques avec la tourbe sur la croissance des plantes.

La présence du compost mûr dans le substrat de culture protège le palmier dattier sensible contre l'attaque de l'agent pathogène *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*. Cette protection est due à l'effet antagoniste de la microflore du compost constituée principalement par des champignons appartenant aux genres *Penicillium* et *Aspergillus* et par des bactéries du genre *Bacillus*. L'utilisation de ce compost comme amendement organique a montré également une amélioration du rendement des cultures tests.

Mots clés :

Oasis de Figui, palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) – *Fusarium oxysporum* f.sp. *Albedinis*, Bayoud, sous-produits, compostage, compost, maturité, potentialité agronomique, antagoniste, paramètres physico-chimiques, indice biologique, phytotoxicité, qualité du compost.

ABSTRACT

Figui date palm grove, with 700 hectares of the surface, produces an important biomass of 8.000 tons each year, 30% of which are contaminated with *Fusarium f.sp oxysporum albedinis*, causal agent of the vascular wilt (Bayoud) of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.). These by-products were composted with different rates of bovine manure, urea or ammoniacal nitrogen. The maintenance of an adequate humidity of 60% to 70%, necessary to the good progress of the composting process, required the contribution of 11.4 litres of water/kg of the dried residues. During the process of composting, the pH remains stable and relatively alkaline of about 8.2 to 8.7. In the Contrary, C/N ratio, particle size and electrical conductivity decrease from 25 to 30%. The evolution of intern temperature in the piles depends on the volume of bovine manure added to the mixture: a mesophile phase characterized by a fast increase in the temperature, a thermophile phase, characterized by a high temperature ranging from 50 to 70°C in the piles rich in bovine manure. The temperature remained the same when urea or ammoniacal nitrogen was added. In the piles containing the bovine manure, the *Fusarium oxysporum fsp albedinis*, was completely eliminated during the thermophile phase, and the high frequencies of returning accelerate its degradation. But, the presence of ammoniacal nitrogen enhances the proliferation of the pathogenic agent by 62%. Experiments on the rachis of the palms infected by *Fusarium oxysporum f.sp. albedinis*, show that its incubation during 6 hours at 70°C or during 12h at 60°C destroy completely the pathogenic agent. Quality assessment of the date palm by-products compost was carried out by the determination of the physicochemical and biological parameters. This compost is characterized by a neutral pH of 7.5, an electrical conductivity of 9.6 mS/cm, a C/N ratio of 20 and low particle size. Its water retention capacity (75%), its porosity (78%) and its density (1600 g/l) are higher than those of the peat. On the other hand, its organic matter rate (38%) is lower than that of the peat and this organic matter is primarily made up of hemicellulose (23%), cellulose (24%), lignin and cutin (28%) and soluble elements (25%). Its contents of macronutrients (Na, Mg, K, Ca, P₂O₅) and of micronutrients (Cr, Cu, Ni, Zn, Pb) are important. However, the heavy metal contents are much lower than the standard limits authorized by the countries producing compost. The maturity of the compost was confirmed by mineralisation index of the carbon (3%) and by a biological index of stability of 59%. The compost does not show any phytotoxicity, indeed, the rate of germination of cress seeds (*Lepidium sativum*) reached 95%. The absence of phytotoxicity is also confirmed by the good growth of the tomato and courgette seedlings, and of the date palm in mixtures of substrate containing the compost. It seem that compost have synergistic effects with the peat vis-à-vis the growth of plants. The presence of the ripe compost in the substrate of culture protects the sensitive date palm against any attack from the pathogenic agent *Fusarium oxysporum fsp albedinis*. This protection is due to the antagonistic effect of the microflora of the compost made up mainly by fungi (*Penicillium* and *Aspergillus*) and by *Bacillus* bacteria. The use of this compost as organic soil conditioner also showed an improvement of the yield of the tested cultures.

Key words :

Figui date palm grove, compost, palm date, *Fusarium oxysporum f.sp. albedinis*. Bayoud, by-products, phytotoxicity, maturity, biological index, antagonistic effect, agronomic potentiality, physicochemical and biological parameters, quality of the compost.

ملخص

تمتد واحة فجيح على مساحة 700 هكتار تنتج سنويا حوالي 8000 طن من نفايات النخيل 30% منها مصاب بالبايوض . قمنا بعمليات التحلل التركيبي لهذه النفايات (تحويلها إلى سماد) ذلك بخلطها مع نسب مختلفة من فضلات الأبقار أو الاوريا ، أو الأزوت الأمونياكي؛ و لضمان تطور جيد لعملية التحلل التركيبي استوجب الحفاظ على رطوبة ملائمة 60 إلى 70% ، لذا وجب علينا إضافة 11,4 لتر من الماء لكل كيلوغرام من النفايات الجافة.

خلال عملية التحلل التركيبي ، كيف ما كان مصدر الأزوت في المحصلة ، فان ن/هـ بقيت مستقرة و قاعدية نسبيا ، تراوحت بين 8,2 و 8,7 . أما معدل الكربون على الأزوت وحجم الحبيبات فقد أظهر تناقضا باستمرار ، و التوصيلية الكهربائية انخفضت بنسبة 25 إلى 30% . إن تطور الحرارة الداخلية للمحصلة ارتبط بحجم فضلات الأبقار التي أضيفت إلى الخليط :

- مرحلة التحلل الوسطية ، تميز تمثل تطور الحرارة في المحصلة المغناة بنفايات الأبقار ، بارتفاع سريع لدرجة الحرارة خلال الأيام الأولى ، تلاها استقرار لهذه الحرارة ما بين 50° و 70° لمدة 30 يوما أما المحصلة التي تم خلطها الاوريا أو الأزوت الأمونياكي ، فإنها لم تشهد أي تطور في درجة الحرارة .

- في هذه المحصلة التي تم خلطها بفضلات الأبقار ، تم القضاء على الفطر المسبب لمرض البايوض(الفيزاريوم) ، كما أن كثافة عمليات القلب لهذا الخليط سرعت القضاء على هذا الفطر، على العكس من ذلك فإن وجود الأزوت الأمونياكي في المحصلة ساعد على تكاثره بنسبة 62% .

أظهرت التجارب التي قمنا بها على أجزاء من عمود جريدة النخل المصاب بالبايوض ، أن إخضاع هذه الأجزاء لدرجة الحرارة 70 مئوية خلال 6 ساعات أو لدرجة الحرارة 60° مئوية خلال 12 ساعة كاف للقضاء على الفطر المتواجد داخل هذه النفايات .

اعتمد عملنا لتقييم جودة السماد المحصل عليه على مجموعة من المعايير الفيزيائية الكيميائية والبيولوجية ، هذه المعايير بينت أن السماد الناضج المحصل عليه متجانس ومستقر و يتميز ب. ن/هـ محايدة 7,5 ، و توصيلية كهربائية تقدر ب 9,6ms/cm ، ومعدل الكربون بالنسبة للأزوت يساوي 20 كما يتميز بحبيبات دقيقة ، أما قدرته على الاحتفاظ بالماء فتصل إلى 75% ، و المسامية الكاملة تمثل 78% ، و كثافته الحقيقية حوالي 1600g/L. هذه الخصائص المذكورة أعلاه مرتفعة بالمقارنة مع مثيلاتها في التراب العضوي ، في حين تمثل المادة العضوية نسب 38% ، و هي نسبة منخفضة عن نسبتها في التراب العضوي .

تتكون المادة العضوية في السماد المحصل عليه أساسا من 23% من الهيميسيلوز و 24% من السيلولوز و 28% من اللينين والكتين و 25% من العناصر القابلة للذوبان ، كما أن مكوناته من المواد الأساسية لنمو النباتات مهمة كالصوديوم الماغنيزيوم البوتاسيوم الكالسيوم ، في حين تكون مكوناته من العناصر المعدنية الفلزية مثل الكروم النحاس النيكل الزنك الرصاص منخفضة عن السقف المحدد في المعايير المعمول بها لدى الدول المنتجة للسماد.

تم التأكد من نضج السماد بقياس نفلز الكربون ب.3% و الاستقرار البيولوجي ب.59% ، و لم يبين هذا السماد أي تسمم نباتي ، بحيث أن نسبة إنبات بذرات الحرف (بقلة نباتية) وصلت 95% ، غياب التسمم النباتي تم تأكيده أيضا من حسن نمو فسائل الطماطم و القرع والنخيل باستعمال هذا السماد ، كما اتضح أن هذا السماد يمكن أن يكون له مفعول مدعم للتربة العضوية لنمو النباتات .

إن إضافة السماد الناضج المحصل عليه عن طريق التحلل التركيبي لنفايات النخيل لتخصيب التربة أو التراب العضوي ، حمى شتائل النخيل الحساس من مرض البايوض ، و هذا راجع إلى غناه بكائنات حية دقيقة مضادة للفطر المسبب للبايوض ، و المتكونة أساسا من الفطريات المنتمة إلى صنف بينيسيليوم واسبريجيلوس و البكتيريات من صنف باسيلوس ، واستعمال هذا السماد كمخصب عضوي حسن إنتاج الزراعات التي تمت تجربتها .

الكلمات المفتاح :

واحة فجيح - النخيل - الفيزاريوم - البايوض - النفايات - التحلل التركيبي التسميد (تحويلها إلى سماد) - السماد - النضج - الإمكانات الزراعية - المضاد - المعايير الفيزيائية الكيميائية - مؤشرات بيولوجية - تسمم نباتي - جودة السماد .

REMERCIEMENTS

En premier lieu, j'aimerais remercier vivement, mon directeur et mon co-directeur de thèse, Messieurs A. HAKKOU et M. BOUAKKA d'avoir encadrés ce travail, avec beaucoup de compétence, d'enthousiasme et de disponibilité. Je leurs exprime ma profonde reconnaissance et ma grande admiration pour leurs précieux conseils, leurs optimisme et le soutien qu'ils m'ont apporté.

J'exprime ma profonde gratitude à M^{me} H. SERGHINI CAID professeur à l'Université Mohamed 1^{er} Faculté des sciences OUJDA, qui m'a fait l'honneur d'exercer la fonction de présidente du jury.

Mes plus sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à Messieurs H. LATRACHE professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Beni Mellal, M. BAAZIZ, professeur à la Faculté des Sciences Semlalia- Marrakech et M. EL YACOUBI professeur à l'Université Mohamed 1^{er} Faculté des Sciences Oujda qui ont accepté de juger cette thèse avec beaucoup d'attention.

Je remercie également M^{me} et M LANGRIS professeurs à l'Université de Coen France et Y. DE LACROIX directeur de l'Institut Français de l'Oriental pour avoir bien voulu réviser la thèse. Leurs commentaires et leurs suggestions ont été fort judicieux et appréciés.

J'adresse mes remerciements aux responsables de l'association des coopératives agricoles de Figuig, du centre des travaux agricoles de Figuig et de la municipalité de Figuig qui ont mis à ma disposition des moyens pour le bon déroulement des expériences du terrain.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont collaboré à la mise en oeuvre de ce travail ; B. HACHTT, A. ASEHRAOU, A. MEZIANE, B. LAGSSYER, professeurs à l'Université Mohamed 1^{er} Faculté des Sciences Oujda, B. EZZAHIRI et K. HOUMMI professeurs à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Rabat. M. HAFIDI professeur à la Faculté des Sciences Semlalia- Marrakech

Je remercie tous les enseignants et les chercheurs membres du laboratoire de Biochimie ainsi que tous les professeurs, les fonctionnaires et les chercheurs de la Faculté des Sciences Oujda, pour leur amitié et leur aide pendant ces années de thèse.

Merci aussi à tous mes collègues et amis. Je leurs exprime ma profonde sympathie et je leur souhaite beaucoup de bien et de succès.

À la fin Je remercie mon mari ma famille, ma belle-famille et tous mes proches d'avoir su m'entourer au cours de ces années d'une inestimable affection.

Mes remerciements également à tous ceux que je n'ai pas cités ici (qu'ils me pardonnent).

ABBREVIATIONS

CRE : capacité de rétention d'eau

C/N : rapport carbone / azote

C/Nf : rapport carbone / azote final

C/Ni: rapport carbone/azote initial

MO : matière organique

Pf : poids frais

Ps : poids sec

c : cendre

CFU : unité formant une colonie

Foa : *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis*.

C.e : conductivité électrique.

Sub ; S : substrat

NTK : azote total kjeldhal

TABLE DE MATIERE

	Page
INTRODUCTION GENERALE	1
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	5
I. IMPORTANCE DU PALMIER DATTIER DANS L'OASIS	6
1. Généralité	6
2. Description botanique du palmier dattier	8
3. Exigences écologiques du palmier dattier	9
3.1. Température	9
3.2. Irrigation	9
3.3. Fertilisation	10
3.4. Toilettage	11
4. Le Palmier dattier dans l'oasis de Figuig	12
II. LA FUSARIOSE VASCULAIRE DU PALMIER DATTIER	17
1. Introduction	17
2. Progression du Bayoud	17
3. Symptômes	18
4. Méthodes de détection et d'inspection	19
4.1. Caractéristiques morphologiques et culturelles	20
4.1.1. Caractères Microscopiques	20
4.1.2. Caractères Macroscopiques	20
4.2. Test du pouvoir pathogène	22
4.3. Identification de <i>Fusarium Oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i> par méthodes moléculaires	22
5. Mode d'infection du palmier par le parasite	22
6. Facteurs influençant la propagation du champignon pathogène	22
7. Impact économique	24
7.1. Incidence de la fusariose vasculaire dans l'oasis de Figuig	24
8. Lutte contre le Bayoud	27
8.1. La lutte chimique	27
8.2. Des mesures prophylactiques	27
8.3. La lutte génétique	28
8.4. La lutte biologique	29
III. COMPOSTAGE	31
1. Généralité	31
1.1 Aperçu général sur la fraction organique du sol	31
1.2 Définition du compostage	31
1.3 . Historique	31
1.4 . Principe du compostage	32
1.5 . Différentes phases du compostage	33
2. Paramètres du compostage	34
2.1. Les facteurs trophiques	34
2.1.1. Rapport C/ N	35
2.1.2. Matières minérales	35

2.1.3. Structure du substrat	35
2.2. Les paramètres qui conditionnent le déroulement du compostage	36
2.2.1. L'humidité ou la teneur en eau du substrat	36
2.2.2. Taux d'oxygène lacunaire	37
2.2.3. Température	38
2.2.4. pH	38
2.3. Paramètres biologiques	38
3. Maturité du compost	40
3.1. Tests respirométriques	41
3.2. Tests d'auto-échauffement	41
3.3. Test SolvitaR	41
3.4. Tests d'humification	41
3.5. Tests de phytotoxicité	41
3.6. Tests empiriques	43
4. Les problèmes causés par le compost immature	43
5. Les bienfaits du compostage	44
5.1. Pour l'environnement	44
5.2. Pour l'écologie	44
5.3. Pour l'économie	44
6. Effets des composts sur les caractéristiques du sol	46
7. Effets des composts sur les maladies des plantes	46
OBJECTIFS DU TRAVAIL	
MATERIEL ET METHODES	48
I. ETUDE DE L'EFFET D'UN TRAITEMENT THERMIQUE SUR <i>FUSARIUM OXYSPORUM</i> F.SP. <i>ALBEDINIS</i> INFESTANT LE RACHIS DES PALMES	49
II. COMPOSTAGE	49
1. Lieu du compostage	49
2. Composition en sous-produits des andains de compostage	49
3. Dimensions des andains	50
4. Etude de l'effet du fumier et de l'azote sur le processus du compostage	51
5. Etude de l'effet de l'aération	52
III. ETUDES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES	52
1. Echantillonnage	52
2. Mesure des températures internes et externes des andains	54
3. Mesure de la teneur en eau	54
4. Mesure du pH	55
5. Mesure de la conductivité électrique	55
6. Détermination de la population de <i>Fusarium Oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i> au cours du compostage	55
7. Détermination de la matière organique totale	56
8. Dosage de l'azote total kjeldahl	56
9. Détermination de la granulométrie	57
10. Dosage des cations et des éléments traces métalliques	57

11. Dosage du phosphore	58
12. Paramètres physiques	59
12.1. Capacité de rétention en eau (CRE)	59
12.2. La masse volumique apparente (ρ_a)	59
12.3. La masse volumique réelle (ρ_r)	59
12.4. Porosité totale	60
IV. TEST DE MATURETE RESPIROMETRIQUE	60
V. L'INDICE DE STABILITE BIOLOGIQUE (ISB)	60
VI. TEST DE PHYTOTOXICITE	60
VII. TESTS AGRONOMIQUES	61
1. Etude de la croissance des tomates en chambre de culture	61
1.1. Préparation des mélanges	61
1.2. Préparation des plantules de tomates	61
1.3. Plantation des plantules	61
2. Les essais en plein champ	62
VIII. ETUDE DE L'EFFET SUPPRESSIF DU COMPOST MUR SUR <i>FUSARIUM OXYSPORUM</i> F.SP. <i>ALBEDINIS</i>	63
1. Isolement de la souche de <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i>	63
2. Etude <i>in vivo</i> de l'effet de compost sur <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i>	64
2.1. Suivie du comportement de Foa dans des substrats cultivés	64
2.1.1. Essai sur les plantules issues des graines	64
a. Préparation des plantules	64
b. Préparation des substrats	64
c. Inoculation des substrats	64
2.1.2. Essai sur les vitro plants	64
a. Préparation des substrats	64
b. Préparation d'inoculum	65
c. Matériel végétal	65
d. Culture des vitro plants	65
e. Dénombrement de la population de <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i> dans les différentes cultures	65
f. Isolement du parasite à partir des rejets morts	66
2.2. Suivie du comportement de <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i> dans des substrats non cultivés	66
2.2.1. Sol utilisé	66
2.2.2. Préparation des substrats	67
3. Eude <i>in vitro</i> de l'effet de compost sur <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp <i>albedinis</i>	67
3.1. Isolement de la microflore de compost mûr	68
3.2. Purification des isolats	68
3.3. Test d'antibiose	68
3.4. Action du filtrat des milieux de culture des micro-organismes antagonistes sur la croissance mycélienne du <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp <i>albedinis</i>	69
XI. Analyse statistique	69
RESULTATS ET DISCUSSIONS	70
CHAPITRE I: ETUDE DU PROCESSUS DU COMPOSTAGE	71

INTRODUCTION	72
I. RESULTATS	75
A. EFFET DES DIFFERENTES SOURCES D'AZOTE SUR LE PROCESSUS DU COMPOSTAGE	75
1. Evolution du pH et de la conductivité électrique au cours du compostage	75
2. Evolution des températures internes et externes des andains	76
3. Evolution des matières organiques et minérales au cours du compostage	78
4. Evolution de l'agent pathogène dans les andains au cours du compostage	80
5. Etude de l'effet d'un traitement thermique sur <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i> localisé dans les sous-produits	81
B. EFFET DE L'AERATION SUR LE PROCESSUS DE COMPOSTAGE	84
1. Evolution de l'humidité dans les andains au cours du compostage	84
2. Evolution des températures internes et externes dans les andains tests	85
3. Evolution du pH et de conductivité électrique au cours du compostage	87
4. Evolution de l'agent pathogène dans les andains tests	87
5. Evolution de la granulométrie	88
6. Evolution des matières organiques et minérales au cours du compostage	90
II. DISCUSSION	92
CONCLUSION	102
CHAPITRE II: QUALITES PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DU COMPOST MÛR	104
INTRODUCTION	105
RESULTATS ET DISCUSSION	108
1. Paramètres physico-chimiques du compost	108
2. Stabilité biologique du compost	112
3. L'indice de stabilité biologique du compost	114
4. Evaluation de la phytotoxicité du compost	115
5. Effet du compost sur la croissance des plantules de tomate en chambre de culture	115
6. Effet du compost sur la croissance des plantules du palmier dattier en chambre de culture	117
7. Effet du compost sur la production des courgettes en plein champ	119
CONCLUSION	122
CHAPITRE III : EFFET SUPPRESSIF DU COMPOST MÛR SUR <i>Fusarium</i> <i>oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i>	123
INTRODUCTION	124
I. RESULTATS	125
1. Effet du compost sur la protection des plantules du palmier dattier contre la fusariose vasculaire	125
1.1. Effet sur les plantules issues des graines	125
1.2. Effet sur les vitro-plants	125
1.2.1. Effet du compost sur le comportement des vitro-plants vis-à-vis du <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i>	125
1.2.2. Evolution de <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i> dans les substrats au cours de la culture des vitro-plants	128

2. Dynamique du <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>albedinis</i> dans différents mélanges de substrats non cultivés	128
3. Isolement des micro-organismes du compost	131
4. Influence des micro-organismes isolés du compost sur la croissance mycélienne du <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp <i>albedinis</i>	132
5. Influence du filtrat des micro-organismes isolés du compost sur la croissance mycélienne du <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp <i>albedinis</i>	136
II. DISCUSSION	136
CONCLUSION	141
CONCLUSION GENERALE	142
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	148
ANNEXE	172

INTRODUCTION GENERALE

Les oasis phoenicoles constituent un agrosystème très particulier où l'intensification des cultures est imposée par l'exiguïté des parcelles et la rareté de l'eau. Le palmier dattier "*Phoenix dactylifera*" est l'axe principal de sa structure, autour duquel gravite un ensemble d'autres cultures arboricoles, légumineuses et fourragères, formant ainsi un mélange anarchique d'espèces, de variétés et de classes d'âge. Cette intensification nécessite l'utilisation de fortes doses de fumure organique (25 à 50 tonnes par hectare par an) (Janati, 1990; Toutain, 1974) pour maintenir la fertilité du sol de ces régions désertiques ainsi que pour assurer une haute productivité du palmier.

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*), est une plante pérenne, monocotylédone et dioïque, dont la distribution géographique est assez large dans l'hémisphère Nord (Brun, 1998). Il est présent dans 32 pays dans le monde où sa population est estimée à 104,94 millions de pieds (Toutain *et al.*, 1989). La production dattière du monde est d'environ 6,5 millions de tonnes de dattes par an (FAO, 2004). Cette espèce fruitière est connue pour sa tolérance aux conditions climatiques extrêmes d'aridité et de continentalité (Munier, 1973). Elle permet la création d'un milieu indispensable à la pratique d'autres cultures sous-jacentes (arboricoles, céréalières, maraîchères,...), garantissant ainsi une certaine autonomie économique du milieu oasien. En outre, les diverses utilisations des produits du palmier dattier par les habitants des oasis, rendent compte du rôle primordial qu'il tient dans ces régions (Munier, 1973).

Malgré sa résistance à tous les facteurs abiotiques, le palmier dattier est menacé par la fusariose vasculaire (le Bayoud), une maladie cryptogamique causée par un champignon imparfait d'origine tellurique *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* (Killian et Maire, 1930). Cette maladie sévit depuis plus d'un siècle en Afrique du Nord, en particulier au Maroc et dans une grande partie des palmeraies de l'Algérie (Pereau-Leroy, 1958 ; Djerbi, 1982 ; Brac de la Perrière et Benkhalifa, 1991). Ces dernières années, la maladie a été découverte aussi dans les palmeraie d'ADRAR et Tagant en Mauritanie (Sedra, 1995; 1999 a, b ; 2000; 2003). Au Maroc, le bayoud a détruit plus de 10 millions de palmiers en attaquant surtout les variétés de bonne qualité dattière ayant une grande valeur commerciale (Pereau-Leroy, 1958; Djerbi, 1982). Ce fléau épidémique continue toujours de sévir et touche 4 à 12% de la population phoenicole chaque année (Djerbi, 1988; Hakkou et Bouakka, 2004). Cette destruction entraîne une importante diminution de la superficie des palmeraies marocaines, puisque celle-ci est passée de 85000 hectares en 1948 à 46.392 hectares en 2003 (IPM, 2003).

L'oasis de Figuig, située au Maroc oriental dans le domaine frontalier maroco-algérien (latitude 32°, 07N, longitude 01°.14'W), est caractérisée par des petites exploitations à trois étages de végétation : le palmier dattier, les arbres fruitiers, et les cultures légumineuses et fourragères. Ce mélange, souvent volontaire, est gouverné par les conditions socio-économiques des oasiens. Pour subvenir à une partie de leurs besoins, les oasiens utilisent tout le long de l'année les produits de leurs petites parcelles souvent limitées. Ils associent, par nécessité, diverses cultures répondant à leurs besoins et à ceux de leurs animaux. D'où l'origine d'une surexploitation d'un sol déjà fragilisé par accumulation des sels, ensablement et épuisement des matières organiques. Cet épuisement est accéléré par un manque des matières fertilisantes locales, un climat chaud, une irrigation par des eaux de qualité moyenne voire médiocre (Bouakka et Hakkou, 2004) et une utilisation des engrais chimiques.

La palmeraie de l'oasis de Figuig, d'une superficie de 700 hectares, abrite environ 190.000 pieds comprenant une douzaine de variétés dont un groupe important de franc (Hakkou et Bouakka, 2004). La fusariose vasculaire (Bayoud), attaque chaque année environ 4,3% de la population phoénicicole de l'oasis (Hakkou et Bouakka, 2004). Les palmiers de cette oasis génèrent chaque année une biomasse importante estimée à 8000 tonnes des sous-produits susceptibles d'être valorisés. L'accumulation de cette biomasse à l'intérieur de la palmeraie constitue un véritable problème écologique et phytosanitaire. En effet, ces sous-produits, dont une partie est contaminée par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* (agent causal du Bayoud), est à l'origine d'une source de contamination du sol par ce champignon pathogène, favorisant ainsi la propagation de la maladie.

Nous avons, d'une part, l'accumulation des sous-produits organiques du palmier dattier dans la palmeraie qui partent souvent en fumée par simple combustion et, d'autre part, une demande importante et croissante en matière organique. Pour résoudre ce paradoxe, nous avons envisagé le recyclage de ces sous-produits par voie biologique. Le compostage est la technique la plus intéressante pour la valorisation de ces matières organiques. Ce processus de décomposition aérobie aboutit à la formation d'un compost, facteur de protection, de stabilité et de fertilité du sol (Haug, 1993). L'application du compost mûr améliore la fertilité des sols dégradés et pauvres en nutriments du fait que celui-ci augmente le taux de matière organique et de nutriments, améliore la porosité, la capacité de rétention en eau, l'activité microbienne, la biomasse microbienne du sol et la productivité des plantes (Borken et al., 2002 ; Garcia-Gil et al., 2000 ; Guerrero et al., 2000 ; Yao et al., 2006). L'utilisation de ce compost, comme amendement organique, pourra remédier aux problèmes de

l'appauvrissement et de la salinisation des sols du milieu oasien et contribuera à la lutte contre des maladies des plantes d'origine tellurique. Plusieurs auteurs ont montré l'importance de l'utilisation du compost dans le contrôle et la réduction des maladies des cultures agricoles (Chung et Hoitink, 1990; De Brito Alvarez et *al.*, 1995; Haug, 1993; Hoitink et Grebus, 1994; Cotxarrera et *al.*, 2002). Le compost peut être aussi utilisé pour contrer l'acidification du sol grâce à son pH alcalin et ses capacités d'échange de cations (Hue et Licudine, 1999).

Notre travail consiste à valoriser les sous-produits du palmier dattier par compostage, et optimiser les conditions du compostage de ces sous-produits afin d'obtenir un compost fini indemne de l'agent pathogène, stable et sans effet nocif sur l'agriculture, qui pourrait assurer la protection du palmier dattier contre la fusariose vasculaire.

Dans la première partie de ce travail, nous avons étudié l'effet de différentes sources d'azote telles que l'azote ammoniacal, l'urée et les différentes concentrations de fumier bovin, sur le processus de compostage de ces produits en suivant l'évolution de quelques paramètres physico-chimiques et microbiologiques importants tels que la température, le pH, la conductivité électrique, l'humidité et surtout la densité de l'agent pathogène (*Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*). Après l'optimisation du mélange initial, nous avons étudié l'effet de l'aération sur le processus de compostage de ces produits en suivant toujours l'évolution de quelques paramètres physico-chimiques et microbiologiques tels que : pH, températures, humidité, rapport C/N, densité de l'agent pathogène *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.

La deuxième partie consiste à évaluer la qualité du compost des sous-produits du palmier dattier en déterminant les paramètres physico-chimiques (granulométrie, C/N, rétention en eau, pH, conductivité), biologiques (indice de stabilité biologique, tests de maturité respirométrique, test de germination) et agronomiques du compost mûr (effets sur la croissance de plante de tomate dans la chambre de culture).

La troisième partie vise à déterminer l'efficacité de compost mûr des sous-produits du palmier dattier dans la suppression de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* et la protection des palmiers dattiers contre la fusariose vasculaire. Pour ce faire, nous avons étudié *in vitro* l'effet d'antagonisme de quelques microorganismes isolés du compost sur la croissance mycélienne de l'agent pathogène, et nous avons suivi, *in vivo*, la dynamique de développement du parasite dans différents mélanges de substrats en absence de la plante hôte et de l'effet protecteur du compost sur des vitro plants en présence de l'agent pathogène.

REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE

I. IMPORTANCE DU PALMIER DATTIER DANS L'OASIS

1. Généralité

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*), relique de l'ère tertiaire, originaire des bords du golfe persique, fut propagé par la suite en dehors de ces zones dans de nombreuses directions (Popenoe, 1924; Munier, 1956). Actuellement l'aire de répartition de cette plante couvre les cinq continents; elle est cultivée essentiellement dans les zones arides et semi-arides d'Asie et d'Afrique mais aussi en Australie et dans quelques zones d'Amérique où elle a été introduite au 19^{ème} siècle. Cette plante se trouve aussi dans les régions méditerranéennes d'Europe (Munier, 1961,1973).

Le palmier dattier a été dénommé par Linné *Phoenix dactylifera* depuis 1734. *Phoenix* est le nom donné par les grecs qu'ils considéraient comme l'arbre des phéniciens, ou *phoinikes* en grec ; quant à *dactylifera*, cet adjectif décrit les fruits du palmier dattier, et vient du latin *dactylus* dérivant du grec *daktulos*, signifiant doigts (Munier, 1973).

Le palmier dattier est une plante qui nécessite, pour sa croissance et sa production dattière, des températures de 30 à 40°C et une forte luminosité. Il est donc bien adapté aux régions arides et semi-arides chaudes, il supporte des températures qui peuvent atteindre 50 à 60°C. Cependant, il a de fortes exigences en eau, puisque il consomme environ 21.000 m³ d'eau par an et par hectare de palmeraie entièrement plantée. Souvent les palmeraies s'étendent le long des cours d'eau, ou dans des oasis irriguées grâce à un système hydraulique souterrain appelé *foggaras*, ce qui est traduit par l'adage populaire arabe "le dattier vit les pieds dans l'eau et la tête au feu du ciel". En outre, il résiste à des sécheresses prolongées (Munier, 1973) et supporte un certain taux de salinité des eaux (Roseau, 1933; Cruesi, 1970).

L'importance socio-économique, écologique et environnementale de la phoéniculture est très grande. Les palmeraies permettent la subsistance de 7 à 10 millions d'oasiens dans différents points du globe (Toutain et *al.*, 1989). Le palmier dattier constitue également l'armature de l'oasis qui est considérée comme un îlot de survie dans un environnement agressif pour les populations qui y vivent. En effet, sous le palmier dattier, plante souvent majeure du système de production oasien, peuvent s'organiser plusieurs étages de cultures (les cultures saisonnières annuelles ou pluriannuelles, les arbres fruitiers) qui se développent harmonieusement (photo1) grâce au micro-climat favorable créé par le recouvrement assuré par la frondaison des dattiers; on parle alors couramment de "l'effet oasis" (Riou, 1988).



Photo 1 : Exemple des cultures oasisienne à trois étages de végétation

Le palmier dattier est principalement localisé dans l'hémisphère Nord entre 10° de latitude Nord (Somalie) et 39° de latitude Nord (Elche en Espagne ou Turkménistan). Les zones les plus favorables sont comprises entre 24° et 34° de latitude Nord (Maroc, Algérie, Tunisie, Libye, Egypte et Irak...). Aux Etats-Unis, la culture s'étend du 33° au 35° parallèle. Dans l'hémisphère Sud (Australie, Amérique du Sud) les dattiers occupent des surfaces négligeables. Dans le monde arabe, le nombre de dattiers est estimé à 73,5 millions de pieds ce qui représente 70% de l'effectif mondial qui est estimé à 104,94 millions d'arbres (FAO, 2003). La production mondiale de dattes stagne depuis 2001 à un niveau de 6,5 millions de tonnes par an (FAO, 2004).

Au Maroc, le palmier dattier est considéré comme l'une des plus vieilles espèces fruitières. Sa culture est symbole de fertilité et aussi de prospérité dans les zones sahariennes et présahariennes (MAMVA., 1999). Les zones phoenicoles marocaines s'étendent sur 12 provinces : Figuig, Errachidia, Ouarzazate, Tata, Agadir, Tiznit, Guelmim, Tan Tan, Laayoune, Smara, Boujdour et Oued Eddahab (tableau 1). Ces zones, situées au sud et au Sud-Est du pays, couvrent une superficie totale de 471000 Km² (Harrak et Chetto, 2001),

représentant les deux tiers du territoire national et disposant d'un effectif d'environ 4.700.000 palmiers. Les palmiers dattiers marocains contribuent à hauteur de 40 à 60% au revenu agricole pour environ deux millions d'habitants, avec une production annuelle moyenne de 75.110 tonnes de dattes (Nasr, 2003).

Tableau 1 : Répartition du palmier dattier au Maroc

région	Figuig ²	Errachidia ¹	Ouarzazate -Zagora ¹	Tata ¹	Tiznit ¹	Guelmim ¹	Autres ¹
Nombre de pieds	190.000	1.340.000	1.900.000	878.800	135.400	147.000	106.300

¹MADRPM, 1999.

²Hakkou et Bouakka, 2004

Le palmier dattier est respecté par les habitants des oasis, car son utilité ne s'arrête pas à la production des dattes, aliment consommé par l'homme et son cheptel. Ses divers sous produits sont également exploités par les phoeniculteurs. De plus, son bois est utilisé pour couvrir la toiture des maisons, mais sert également pour d'autres travaux de menuiserie et d'artisanat.

2. Description botanique du palmier dattier

Le palmier dattier est une plante dioïque, monocotylédone, dont la tige monopodiale couverte des bases des feuilles mortes, porte le nom de stipe (tronc) qui peut atteindre 30 à 40 m. Ce tronc a des vaisseaux conducteurs dont les cloisons terminales présentent des perforations scalariformes. Les palmes (feuilles) qui atteignent 4 à 5 m de long entourent le tronc et forment plusieurs couronnes. Une palme est formée de deux parties : le pétiole, une gaine très développée, entourée à sa base d'un feutrage et le limbe (rachis) qui est épineux à la base et entouré par des folioles dans les deux tiers supérieurs. On compte environ 50 à 200 palmes par arbre, à l'aisselle de chaque palme se trouve un bourgeon axillaire qui, en se développant, peut donner naissance à une inflorescence dans la région coronaire ou à un rejet dans la région basale ou, plus rarement, à un gourmand dans la région moyenne et sous coronaire. Le système racinaire du dattier est fasciculé ; les racines se ramifient peu ou pas du tout et le « bulbe », ou plateau racinal, est volumineux et émerge en partie au dessus du niveau du sol. Il est possible de distinguer trois types de racines : les racines respiratoires, les racines de nutrition et les racines d'absorption. Le volume de sol occupé par ce système racinaire peut atteindre une vingtaine de m³ (Munier, 1973).

3. Exigences écologiques du palmier dattier

3.1. Température

Le palmier dattier est une espèce thermophile. Son intensité maximale de végétation est atteinte à des températures dépassant 30°C, se stabilise ensuite et commence à décroître vers 38-40°C (Munier, 1973; Nixon et Carpenter, 1978), et s'arrête à partir de 10°C (zéro de végétation) (Munier, 1973). La floraison du palmier dattier intervient lorsque la température à l'ombre atteint 18°C (Zéro de floraison) (Swingle 1904) et fructifie à partir de 25°C. Ainsi, la température optimale pour la maturation des dattes, appelée également "coefficient thermique" (CT) ou "indice thermique" correspond à la chaleur de fructification, et égale à la somme des températures journalières moyennes supérieures ou égales à 18°C au cours de la période qui va de la floraison jusqu'à la maturité des dattes (Munier 1973). Généralement, elle est située entre 792 à 2000°C (Munier 1973, Ben Abdalla, 1990). Celle de la variété Deglet Nour, par exemple, est estimée à 1890°C (FAO 1994). En Afrique du nord, la valeur 1000°C est considérée comme indice limite de la culture économique du dattier (Munier 1973).

3.2. Irrigation

Le palmier dattier, comme tous les phoenix, est originaire de régions tropicales chaudes et humides; il dépend toujours des ressources hydrauliques locales. L'irrigation rationnelle des palmeraies a pour but d'assurer pendant toute l'année, et surtout pendant l'été (saison durant laquelle les exigences sont plus grandes), une évolution normale des dattiers et l'élaboration d'une bonne récolte. Les quantités optimales d'eau d'irrigation varient en fonction des conditions climatiques, de la situation géographique, de la variété, de l'âge du palmier et du type de sol. Les coefficients d'irrigation nécessaires estimés selon les études effectuées par Munier dans la palmeraie de la société agricole et industrielle du sud algérien, de 1936 à 1942 dans les deux types de sol sont de 0,35 à 0,40 l/min par palmier pour les sols moyens; et de 0,40 à 0,50 l/min par palmier pour les sols sableux (Munier 1973). Les essais réalisés en Tunisie de 1964 à 1970 (Cruesi, 1970) ont estimé un coefficient d'irrigation nécessaire de 0,45 l/min/palmier pour la variété Deglet Nour. Au Maroc, Toutain indique un volume de 0,3 à 0,35 l/min/palmier selon les régions. D'après Toutain (1973), le rythme d'irrigation dans les oasis marocaines sans culture sous jacente doit être de 5 jours en juillet- août -septembre, de 6 à 7 jours en mai – juin - octobre, de 8 jours en mars – avril, de 10 jours en février et novembre et de 15 jours en décembre – janvier. Cependant, en présence des cultures sous

jacentes les apports d'eau doivent être rapprochés: tous les deux jours en été et tous les six jours en hiver. Pour la salinité des eaux, Girard (1961) affirme que 8 à 9 gramme de sel par litre semble être la limite à ne pas dépasser pour obtenir un résultat économique valable. Les travaux de Cruesi (1970) en Tunisie préconisent l'utilisation des eaux de drainage (ayant 15g/l de sel) en mélange avec une eau très peu chargée en prenant $\frac{1}{4}$ d'eau chargée et $\frac{3}{4}$ d'eau d'irrigation.

3.3. Fertilisation

La production des dattes ne dépend pas uniquement de l'alimentation en eau, l'apport de fumier et d'engrais est important pour une meilleure croissance du dattier et pour une bonne production de dattes. Les besoins annuels en macroéléments, par pied, sont de 1,6 à 2 kg d'azote, de 0,23 à 0,28 de phosphate (P) et de 0,69 à 0,87 de potassium (K) pour une production de 80 à 100 kg de dattes (Toutain 1979). Cet auteur rapporte les essais effectués en Tunisie en 1985: pour un palmier produisant 90 Kg de dattes, il faut apporter 175 kg de fumier. L'application se fait en trois fois : juste après la récolte (reprise végétative intense et formation des nouvelles inflorescences); à la fécondation (formation des fruits); au début de l'été (croissance des fruits). Les apports annuels nécessaires en fumure organique et en engrais chimique évoluent en fonction de l'âge (Tableau 2).

Tableau 2: Quantité de fumure annuelle par arbre, calculée en fonction de l'âge du dattier, pour une plantation dans un sol de qualité moyenne préconisée par Toutain. (Peyron, 2000)

Age du dattier	Fumier en kg	N (g)	P ₂ O ₂ (g)
3 ans	20	200	50
6 ans	40	250	50
9 ans	60	350	60
12 ans	80	450	70
15 ans	90	475	75
21 ans	100	500	80

Les sols des palmeraies sont en général pauvres en humus, en azote et en acide phosphorique, par contre ils sont riches en calcium, potassium, magnésium, soufre et en micro-éléments. La pratique des cultures intensives sous le palmier, les températures élevées et les lessivages dus à l'irrigation, dégradent plus rapidement la matière organique des sols, ce qui limite leur vie microbienne (Bryssine et Toutain, 1970). Les tests de fertilisation réalisés par Monciero en

1954 avec l'apport des fertilisants minéraux estimés par plusieurs chercheurs à 76 kg d'azote, 11 kg phosphate et 87 kg de potasse par hectare et par an n'ont pas donné de résultats concluants, ce qui a été expliqué par des apports très importants de sels minéraux contenus dans les eaux d'irrigation.

3.4. Toilettage

Le toilettage est un élagage de tous les organes en voie de dessiccation qui gênent la croissance, la bonne production des palmiers et même le travail de l'agriculteur. Chaque année, une moyenne de 5 à 25 palmes par plante se dessèchent, il convient donc d'assurer chaque année un entretien rapproché. Cette opération de toilettage génère une quantité importante de sous produits (palmes, stipes, rejets...) qui s'accumulent à l'intérieur des parcelles (voir photo 2), à cause de l'abandon de l'utilisation de ces sous produits par l'agriculteur, au profit d'autres matériaux importés. La palmeraie de Figuig produit annuellement en moyenne 8000 tonnes de sous produits de palmier dattier. Cette grande quantité de biomasse s'accumule en faisant apparaître des points noirs de pollution dans la palmeraie, vecteurs de champignons pathogènes susceptibles de se propager (Hakkou et Bouakka, 2000).



Photo 2 : Accumulation des sous-produits du palmier dattier à l'intérieur des parcelles

4. Le Palmier dattier dans l'oasis de Figuig

La localisation de Figuig se caractérise par une situation de carrefour sur plusieurs plans : aux portes du désert, elle est sur la charnière Haut Atlas Oriental Saharien, sur les confins maroco-algériens à proximité immédiate de la frontière (latitude 32°07' N, longitude : 01°14' W).

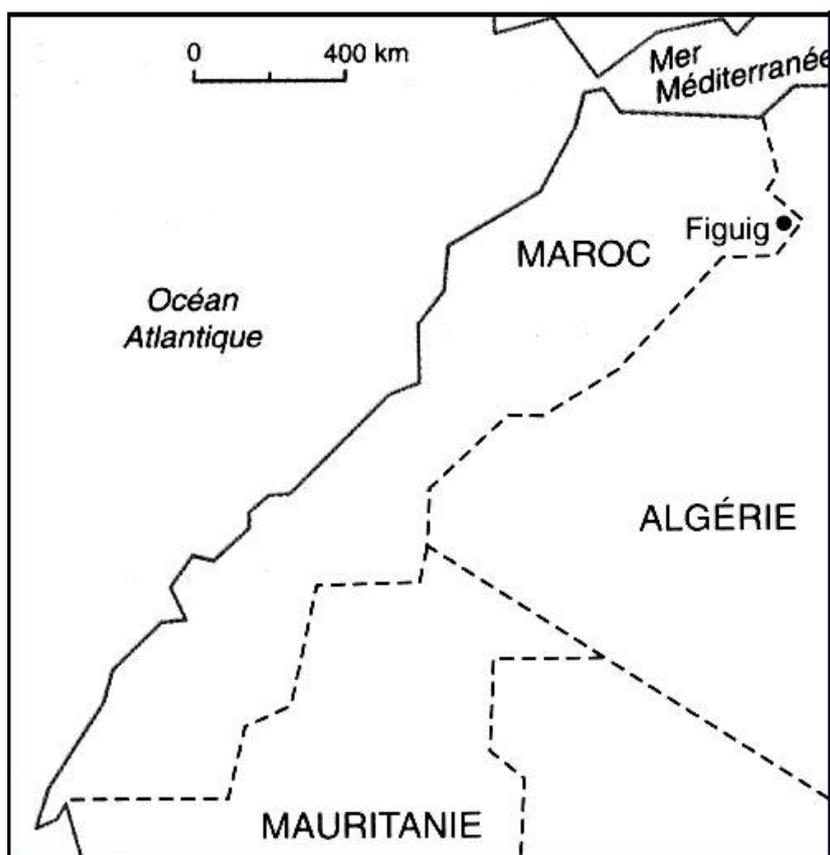


Figure 1: Carte schématique situant l'oasis de Figuig au Maroc (Hakkou et Bouakka, 2004).

Le site de Figuig se caractérise par une dépression de topographie généralement plane et subdivisée en deux paliers : une plaine de 860 mètres d'altitude moyenne et étendue au sud et au sud-est constitue le palier inférieur abritant Zénaga, et un palier haut, d'une altitude de 900 m sur lequel se trouvent les six autres ksours. Cette dépression est encadrée par un ensemble de crêtes aux formes aiguës, étroites et peu élevées, qui sont relayées par des cols larges et facilement accessibles (Bencherifa et Popp, 1990).

Le Palmier dattier est la principale richesse de l'oasis de Figuig, cette région de Sud Est marocain est parmi les plus anciennes oasis de la frange septentrionale du Sahara. Elle est composée de sept ksour : Zénaga, Loudaghir, El Maïz, Ouled Slimane, El Hammam Tahtani,

El Hammam Foukani et Laâbidate. Ces ksours sont tous reliés entre eux par les jardins plus ou moins verdoyants de la palmeraie proprement dite, étendue sur une superficie totale de 650 à 700 hectares (Bencherifa et Popp, 1990).

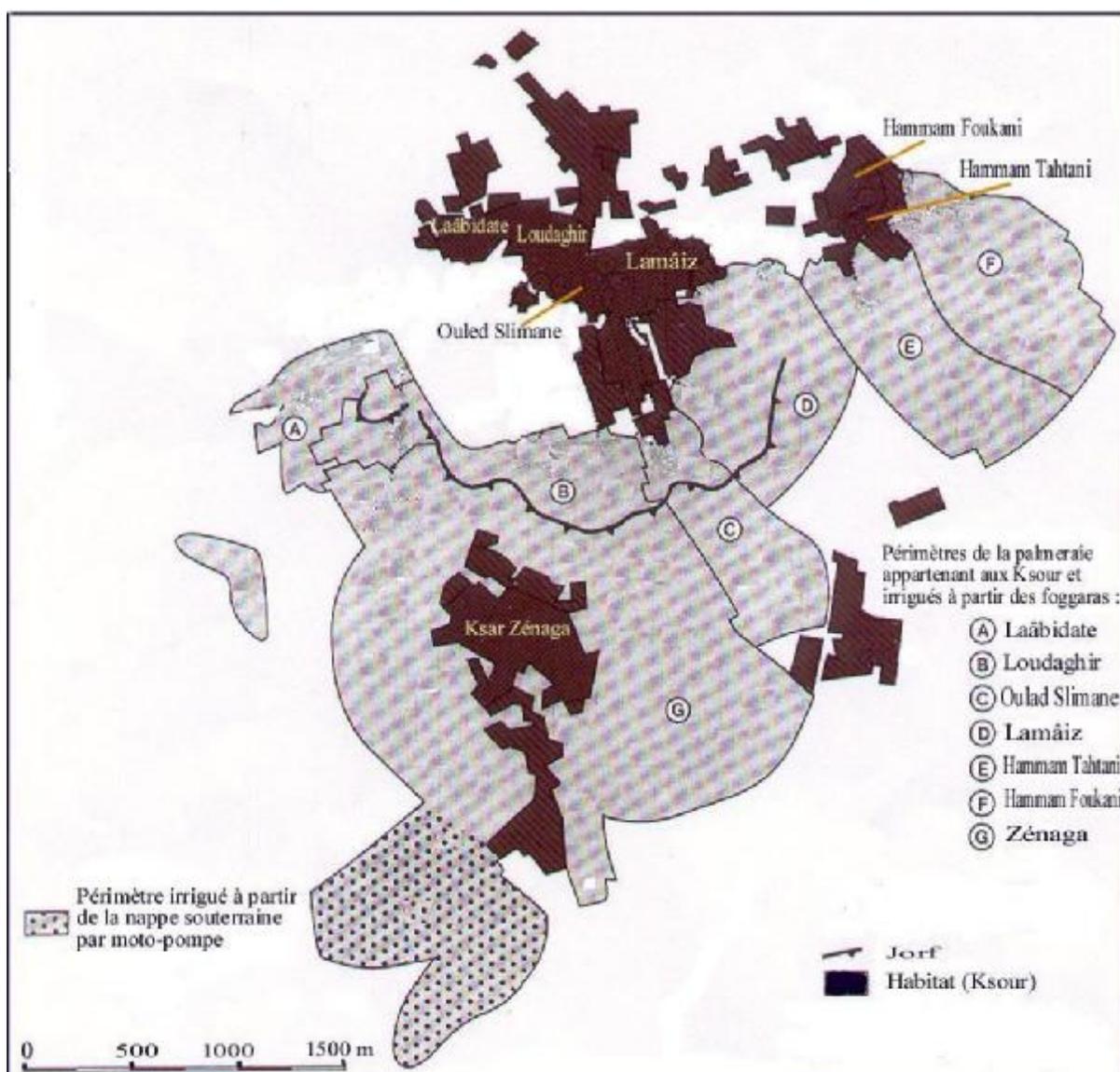


Figure 2: Plan général des périmètres irrigués des sept Ksour de la palmeraie de Figuiq (Bencherifa et Popp 1990).

L'oasis de Figuiq a un climat habituellement sec (128 mm de précipitations moyennes annuelles) qui peut être trompeur par sa forte irrégularité : il peut entraîner l'apparition d'une verdure saisonnière exceptionnelle éclipant la tendance générale vers une désertification accentuée.

Les températures fraîches l'hiver (3 à 5°C en moyennes minimales pour la période décembre - février) deviennent nettement élevées en été (41 à 42°C pour les moyennes maximales de juillet - août) (DPA, 1996).

Dans de telles conditions bioclimatiques défavorables à l'activité pédologique, seuls les sols maigres prédominent malgré l'importance des formations superficielles et leur stabilité relative. Les sols sont en réalité des apports alluviaux plus ou moins fins enrichis par les pratiques culturales. Les sols de la palmeraie souffrent d'épuisement et d'usage empirique d'engrais, en l'absence d'encadrement scientifique expérimental.

Les ressources en eau exploitées à Figuig sont souterraines par excellence. Elles jaillissent en sources et elles sont forcément drainées par gravitation en surface par des réseaux de foggaras régulièrement entretenus (Bencherifa et Popp 1990). Cette exploitation totalise un débit moyen de 200 litres/seconde irriguant les 650 hectares de jardins sans compter les nouvelles extensions (Laarja, Tisserfine ...). Des compléments précieux sont recherchés par pompage dans les puits saumâtres ce qui augmente les risques de salinisation et de stérilisation des sols déjà souffrants.



Photo 3 : Vue d'une partie de la palmeraie du Ksar Zénaga.

A Figuig, les activités économiques sont essentiellement agricoles, quoique jugées insuffisantes pour subvenir aux besoins de la population locale. Elles s'appuient surtout sur des cultures vivrières à rendement fort limité, en raison des techniques de production restées traditionnelles et de la pauvreté des sols. Par ailleurs, la morphologie du parcellaire liée au statut foncier et aux traditions souffre des subdivisions incessantes des terroirs hérités.

Le coût élevé de la production ainsi que l'abandon ou la perte des terres agricoles avec la décolonisation a suscité une insuffisance de la production et des revenus agricoles. Les dattes, principal produit agricole, souffrent pour leur part de la maladie du Bayoud dont les méfaits sont incessamment combattus par les efforts de replantations de palmiers. Les autres cultures importantes sont toujours loin de subvenir aux besoins de la population locale : céréales, maraîchages, fruits, fourrages...

Le Palmier dattier, malgré plusieurs contraintes, reste le pivot de l'économie oasienne de Figuig. Déjà situés en frange septentrionale du domaine du dattier proprement dit, les 190.000 palmiers souffrent par ailleurs de la fraîcheur due à l'altitude et surtout de la fusariose vasculaire (Bayoud). Cette maladie cryptogamique décime en priorité les meilleures espèces, réputées fragiles. Malgré tout cela, le palmier dattier reste le symbole de la fertilité et de la prospérité. Il constitue l'arbre providence de l'oasis puisqu'il a survécu au lendemain des crises les plus dures (Zaid, 1992).

La répartition variétale dans la palmeraie de Figuig a connu un changement considérable. Ce changement se caractérise par la dominance des variétés de bonne qualité dattière malgré leur sensibilité à la fusariose vasculaire (Tableau 3). En effet La population des francs qui représentait 39% en 1968 ne représente que 22,5% en 2004; par contre, la variété Assiane qui représentait 21% représente 50%, Aziza Bouzide qui représentait 0,75% représente 6% et Boufagouss gharas qui représentait 0,98% représente 2,6% (Toutain 1968a, Hakkou et Bouakka 2004).

Tableau 3 : Répartition globale des différentes variétés dans la palmeraie de Figuig (Hakkou et Bouakka 2004)

Variété	Ass	A.B	Taab	Bouf	B.Gh	Tad	A.M	Afrou	Francs	PM	Total
Nb de pieds total	95 100	11 212	3 622	18 365	4 954	3 332	4 075	1 062	42 664	4 469	188 855
En %	50,19	5,92	1,91	9,69	2,61	1,76	2,15	0,56	22,59	2,36	100

Ass : Assiane ; B.gh : Boufagouss gharasse ; A.B : Aziza bouzid ; Tad : Tadmamt ; Taab : Taabdount ; A.M : Aziza Manzou ; Bouf : Boufagouss ; Afrou : Afroukh n'tijint ; PM : Pied mâles

L'économie oasienne à Figuig se trouve actuellement touchée en profondeur et se voit confrontée à plusieurs contraintes :

- § Les longues périodes de sécheresse ainsi que les vents assez violents entraînent une surexploitation des eaux et par conséquent une régression de débit des sources existantes. Ce manque a été remplacé par le pompage électrique d'eau devenue de plus en plus coûteuse et salée.
 - § Le manque d'études approfondies de ressources en eau supplémentaires aussi bien superficielles que souterraines susceptibles d'être mobilisées.
 - § La question des droits d'eau tels que l'émiettement de la propriété d'eau et les transactions d'eau, constituent un obstacle à la modernisation du système hydraulique.
 - § La pollution des eaux d'irrigation due à l'absence d'un réseau d'assainissement des eaux usées fait que les Khetaras constituent les déversoirs par excellence de ces eaux et les déjections sont par la suite déposées dans la palmeraie.
 - § La salinité des sols, la désertification et l'ensablement menaçant la palmeraie.
 - § La structure foncière de l'oasis a accéléré la dispersion spatiale de la propriété et son morcellement, ce qui constitue un blocage à toute tentative d'instauration de nouvelles structures de développement. On se trouve aujourd'hui devant un état parcellaire où la rentabilité économique est presque impossible.
 - § L'extension de l'urbanisation, pratiquée généralement dans des zones cultivées.
 - § Le Bayoud, et les exigences du marché qui poussent les phoeniculteurs à pratiquer des monocultures de variétés nobles qui sont en général plus sensibles, entraînant l'appauvrissement génétique phoenicole.
 - § Le manque de matière fertilisante remplacée par l'utilisation anarchique des engrais chimiques qui pourraient accélérer la propagation du Bayoud.
 - § Le manque de l'entretien de la palmeraie entraîne l'accumulation des déchets qui polluent la palmeraie et accélèrent la propagation de *Fusarium* par décomposition.
-

II. LA FUSARIOSE VASCULAIRE DU PALMIER DATTIER

1. Introduction

La culture du palmier dattier est sujette à divers problèmes phytosanitaires qui entravent son développement et son extension. Le Bayoud, fusariose vasculaire du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L) causée par un champignon d'origine tellurique *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis* (Killian et Maire, 1930), est la maladie la plus destructive et la plus menaçante dans l'Afrique du nord. Elle est répandue surtout au Maroc et dans une grande partie des palmeraies de l'Algérie (Pereau-Leroy, 1958 ; Djerbi, 1982 b; Brac et Benkhalifa, 1991). En effet, au cours d'un siècle, il a détruit plus de dix millions de palmiers au Maroc (Pereau-Leroy, 1958; Sedra, 2005a) et plus de trois millions en Algérie (Djerbi, 1982a; Sedra, 2005a). Ces dernières années, la maladie a été découverte aussi dans les palmeraies d'Adrar et Tagant en Mauritanie (Sedra, 1995, 1999 a, b, 2003). La catastrophe causée par le Bayoud ne s'arrête pas à l'érosion génétique causée par la disparition de nombreuses variétés parmi les meilleures, mais conduit également à l'accentuation de la désertification et à l'appauvrissement des phoeniculteurs qui finissent par émigrer. Par ailleurs, le Bayoud constitue un véritable fléau des zones phoénicoles d'une partie de l'Afrique du Nord et aussi une menace potentielle pour la Tunisie et les autres pays producteurs de dattes.

2. Progression du Bayoud

Le Bayoud fut observé pour la première fois vers 1870 dans la vallée du Draa au nord de Zagora. Il a ensuite progressé vers l'ouest et surtout vers l'est en suivant les cordons des palmeraies (Pereau-Leroy, 1958; Toutain, 1965) (figure 3). En 1898, ce fléau atteint les palmeraies de Figuig et BéniOnif situées côte à côte des deux côtés de la frontière algéro-marocaine (Pereau-Leroy, 1958). Entre 1920 et 1950, la maladie a contaminé les palmeraies du Sud algérien, puis durant la période 1960-1978, elle a gagné des palmeraies du centre de Sud algérien, la région de Mzab et El Goléa (Djerbi, 1982a; Kada et Dubost, 1975). La maladie a été découverte aussi dans les palmeraies mauritaniennes à Adrar et à Tagant, respectivement en 1995 et 2002 (Sedra, 1995, 1999 a, b, 2003). Les derniers foyers déclarés au Maroc en 1996 sont situés dans la Vallée de Ait Mansour (région de Tafraoute) (Sedra, 1996).

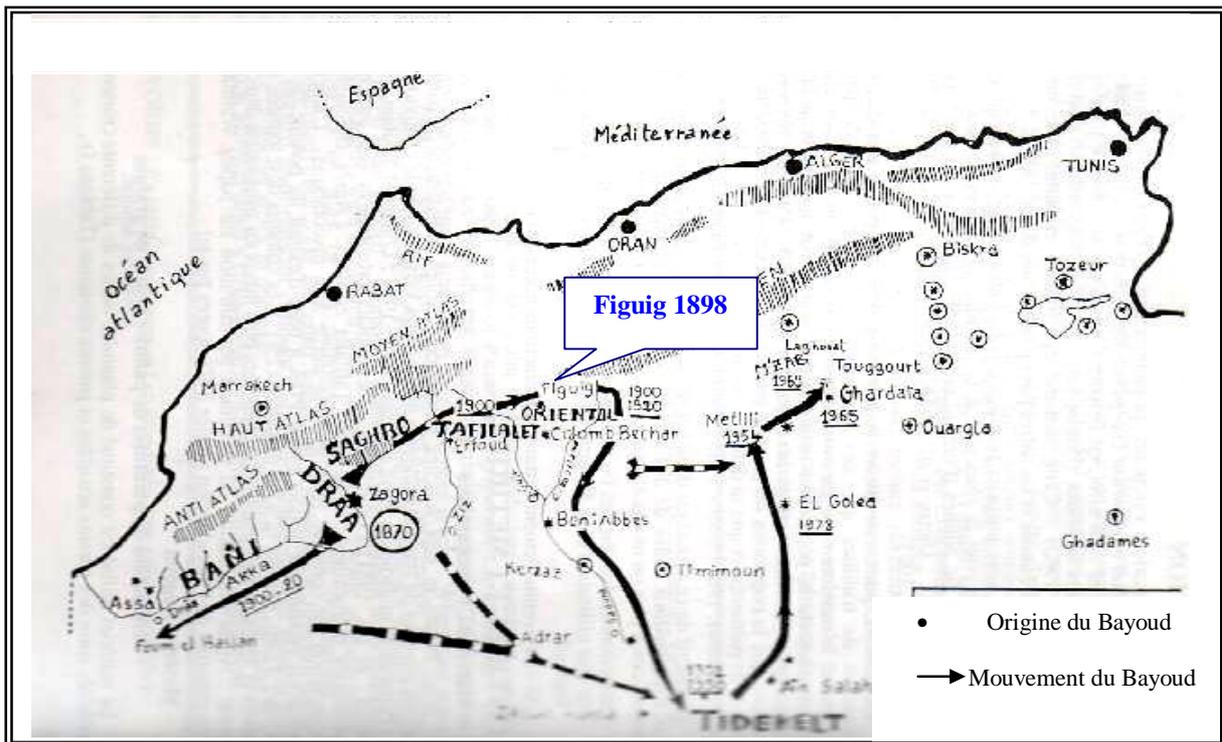


Figure 3: Origine et extension du Bayoud en Afrique du Nord (Pereau-Leroy, 1958)

3. Symptômes

Le premier symptôme externe de la maladie s'observe sur une palme de la couronne moyenne; cette palme prend un aspect plombé et se dessèche selon un processus très particulier. En effet, les folioles ou les épines situées d'un côté de cette palme se dessèchent progressivement du bas vers le sommet, et se replient vers le rachis (photo 4). Ce dessèchement gagne ensuite les folioles du côté opposé, progressant cette fois de haut en bas, et toute la palme finit par se dessécher complètement et prend une couleur blanchâtre. Ce symptôme est à l'origine du nom de la maladie, bayoud dérivant du mot arabe « abyed » qui veut dire blanc, et de la forme spéciale *albedinis* du *Fusarium oxysporum* responsable de la maladie, tiré du latin albus (blanc). Le côté dorsal du rachis est marqué d'une strie brune longitudinale, qui avance de la base vers l'apex de la fronde, et qui correspond au passage du mycélium dans les faisceaux vasculaires du rachis. Ensuite, la feuille va prendre une forme arquée, similaire à une feuille vivante, et pend le long du tronc. Les mêmes symptômes apparaissent ensuite sur les palmes voisines; puis l'attaque se généralise à l'ensemble du palmier entraînant sa mort au bout de 6 mois à 2 ans (photo 5) (Djerbi, 1988).

**Photo 4 : Premiers symptômes du Bayoud****Photo 5 : Stade final de la maladie**

Mais ces symptômes ne sont pas toujours aussi typiques, il est possible qu'ils se développent d'une façon différente. Il se peut, par exemple, que la coloration brune apparaisse au milieu du rachis et que les folioles se dessèchent de l'apex vers la base, des deux cotés à la fois. Parfois, aussi, un jaunissement généralisé pourrait être repéré avant l'apparition des symptômes typiques.

Les dattiers atteints ne présentent qu'un nombre très réduit de racines malades, de coloration rougeâtre. Ces racines alimentent plusieurs groupes de faisceaux vasculaires du stipe qui, avec le sclérenchyme et le parenchyme qui les entourent, prennent une coloration brune-rougeâtre. Les frondes qui manifestent des symptômes externes ont une coloration brune-rougeâtre avec des faisceaux vasculaires très colorés lorsqu'ils sont coupés.

4. Méthodes de détection et d'inspection

L'observation des symptômes typiques permet généralement d'identifier la maladie du Bayoud. Cependant, dans le cas des symptômes atypiques, l'identification de l'agent pathogène (*Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*) peut être effectuée par différentes méthodes

telles que les méthodes de caractérisation morphologique, les tests de pathogénéicité, et par des méthodes moléculaires.

D'autres méthodes, comme la technique de compatibilité végétative des mutants ne réduisant pas le nitrate (Nit) (Tantaoui, 1993) et l'analyse de RFLP (Tantaoui et *al.*, 1996) ont été aussi testées pour la détection et l'identification du champignon pathogène (*Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*).

4.1. Caractéristiques morphologiques et culturelles

Le parasite responsable du bayoud a été isolé pour la première fois en 1921 et identifié en 1934 par Malençon (Malençon, 1934). Il s'agit d'un champignon microscopique qui fait partie de la mycoflore du sol. Il appartient au groupe du champignon imparfait, ordre des Moniliales, et famille des Tuberculariacées. Il a été dénommé *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* (Malençon, 1950).

4.1.1. Caractères Microscopiques

Fusarium oxysporum f.sp. *albedinis* possède un mycélium hyalin et cloisonné. La multiplication asexuée se réalise par des microphialides et des macrophialides, qui produisent respectivement des microconidies et des macroconidies. Les microconidies sont sphériques ou allongées, légèrement courbées, généralement unicellulaires, hyalines, de dimensions variables dans une même culture (3-15 x 3-5 µm). Les macroconidies fusoides à falciformes, pointues aux deux extrémités, ayant généralement 3 à 5 cloisons, mesurent 20 à 35 x 3 à 5 µm. Le parasite peut se conserver sur les débris des palmiers attaqués, les tissus des porteurs sains, et pendant de longues années, dans le sol à des profondeurs atteignant plus d'un mètre sous forme de chlamydospores. Ces chlamydospores sont intercalaires ou terminales, sphériques, isolées ou en chaînes courtes regroupant 2 à 4 chlamydospores qui se forment soit sur le mycélium soit à partir des macroconidies (figure 3). (Djerbi, 1988).

4.1.2. Caractères Macroscopiques

La forme sauvage du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* peut être observée sur le milieu PDA et Komada à partir d'un fragment de rachis de palme infectée. Son aspect macroscopique est caractérisé par un tapis mycélien fin frisé à croissance lente (6 à 8,5 cm de diamètre en 8 jours à 25°C) au sein duquel se forment des petits sporodochies roses-saumon (Djerbi et *al.*, 1985) (photo 6).

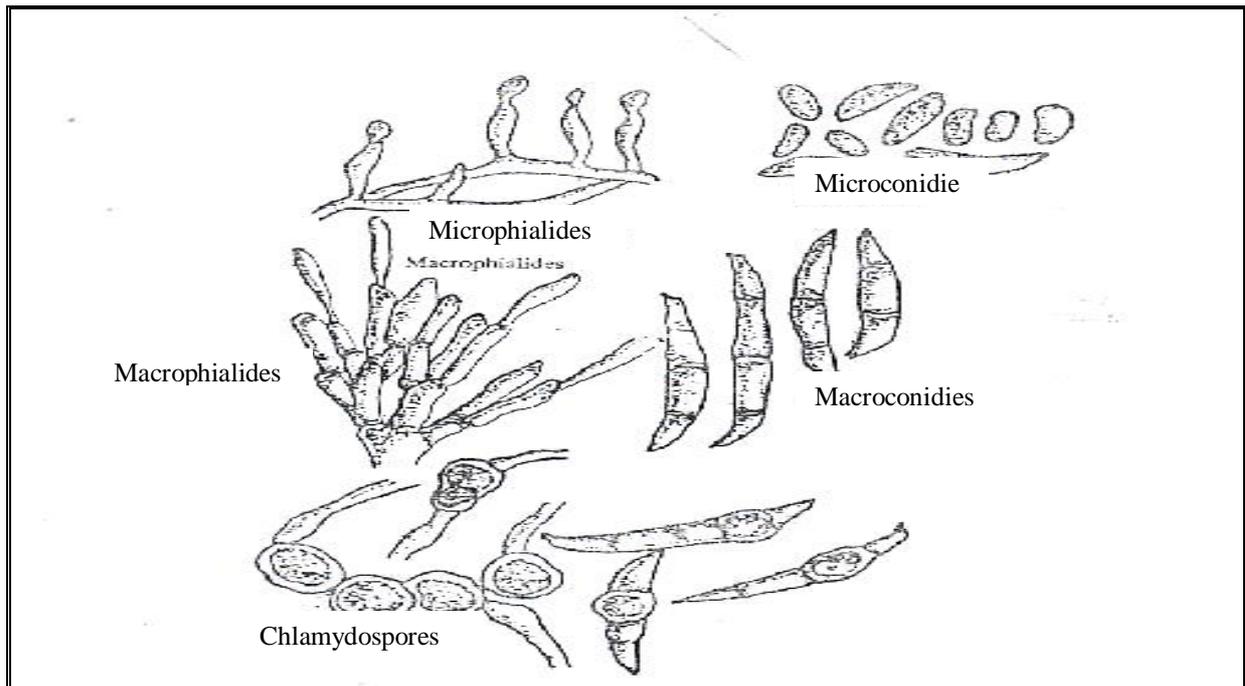


Figure 4: Caractéristiques microscopiques de *Fusarium oxysporum* f. sp. *Albedinis* (Djerbi 1988).

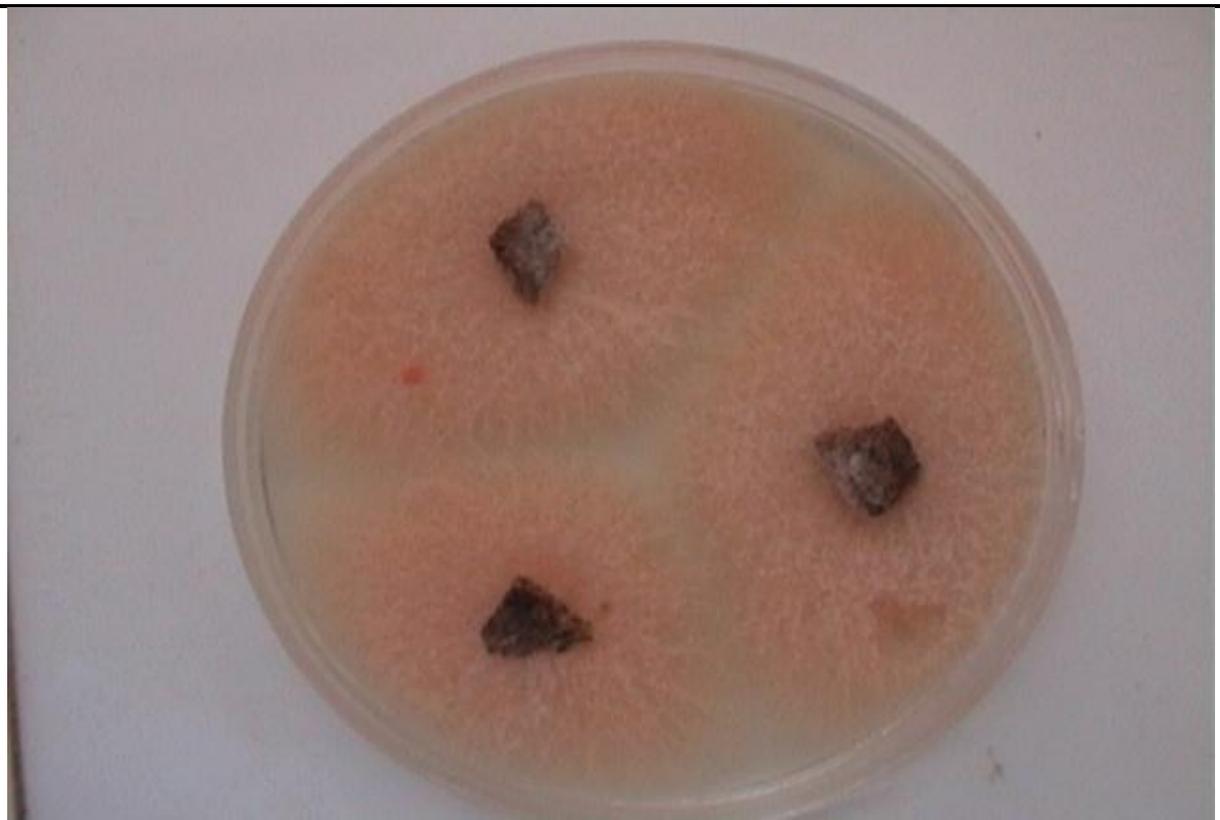


Photo 6 : Culture du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* sur le milieu PDA

4.2. Test de pouvoir pathogène

Des plantules de palmier dattier issues des graines sont cultivées dans des conditions exemptes de maladie. Un volume de 200 cm³ de la suspension de 10⁶ spores par ml de *Foa* âgées d'une semaine est déposé sur les racines de ces plantules au stade de deux feuilles. La souche est considérée pathogène si le taux de mortalité des plantules dépasse 20% en comparaison avec un témoin inoculé par une souche connue non pathogène. Ce test dure 3 à 8 semaines (Djerbi, 1990).

4.3. Identification de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* par méthodes moléculaires

Fernandez *et al* (1998) ont mis au point une paire d'amorces (TL3-FOA28) qui pourraient être utilisées comme sondes spécifiques pour le diagnostic de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* par réaction de polymérisation en chaîne (PCR). Ce test permet de différencier l'agent pathogène du palmier dattier des autres *Fusarium oxysporum*, ainsi que des souches saprophytes. Les séquences d'amorces sont 3'-GGTCGTCCGCAGACTATAACCGGC-5' (TL3) et 3'-ATCCCCGTAAAGCCC-TGAAGC-5' (FOA28).

5. Mode d'infection du palmier par le parasite

Les chlamydospores de *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* germent dès que les conditions sont favorables et pénètrent directement par les racines du palmier pour se loger dans les faisceaux ligneux. La progression du champignon est ascendante et se réalise à la fois par le mycélium et par les microconidies. Le champignon fructifie, libère des conidies qui sont entraînées par le courant de la sève jusqu'au niveau des cloisons transversales des vaisseaux où elles sont arrêtées. Les conidies germent et donnent des filaments mycéliens qui traversent la cloison. Le mycélium poursuit son développement et forme de nouvelles microconidies qui sont entraînées à leur tour jusqu'à la cloison suivante; le phénomène se poursuit ainsi jusqu'à ce que le bourgeon terminal soit atteint entraînant ainsi la mort du palmier dattier. (Djerbi, 1983). Après la mort du palmier dattier, le mycélium continue à se développer dans le parenchyme de l'arbre et forme de nombreuses chlamydospores (Louvet, 1977).

6. Facteurs influençant la propagation du champignon pathogène

En général, le champignon *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* peut se disséminer par les rejets, les tissus des dattiers, le sol ou les porteurs sains comme la luzerne, le henné et le

trèfle (Djerbi et *al.*, 1985) provenant des zones infectées. Par contre, aucune transmission par les hampes florales, les semences ou les fruits n'a été signalée (OEPP/EPPO 2003).

Dans une palmeraie infectée, les facteurs qui interviennent de façon prépondérante dans l'extension des foyers de la maladie sont (Bouakka et Hakkou, 2004) :

- la densité élevée des palmiers
- l'accumulation et la décomposition des déchets contaminés dans la palmeraie et le degré de l'entretien des parcelles
- la pratique de certaines cultures intercalaires comme la luzerne, le trèfle, les cultures maraîchères et le henné (Djerbi et *al.*, 1985 ; El Ghorfi,1987)
- l'irrigation abondante, la température (25°C-30°C) et la salinité élevée des eaux d'irrigation.
- Des cultures monovariétales des palmiers sensibles au Bayoud



Photo 7 : Foyer infecté par le Bayoud dans la palmeraie de Figuiq

7. Impact économique

Le Bayoud provoque chaque année la mort de 4,5 à 12% de la population phoenicicole des palmeraies infectées (Djerbi, 1983). Le Maroc, qui était un exportateur traditionnel des dattes, occupait le 3^{ème} rang parmi les pays producteurs; actuellement, il importe des dattes pour satisfaire le marché national. Dans la plupart des oasis, plus de 50% des variétés de bonne qualité dattière ont été détruites au profit de la prolifération des cultivars peu productifs produisant des dattes communes qui sont souvent impropres à la consommation humaine. On assiste aussi à la prédominance des khalts puisque cette catégorie représente plus de 47% de la population phoenicicole du Maroc (Harrak et Chetto, 2001). Ce phénomène entraîne la disparition progressive des cultivars de qualité reconnus mondialement (Saaidi, 1979) et par voie de conséquence une forte réduction de la densité des palmiers puisqu'elle est passée de 350 à 50 palmiers par hectare.

La maladie n'a pas seulement provoqué la perte d'un aliment de base pour les populations sahariennes, mais aussi, la perte d'une source de revenus et de devises indispensables à la vie quotidienne des oasisiens. Elle a réduit considérablement l'étendue des périmètres cultivés et a accéléré le processus de désertification.

7.1. Incidence de la fusariose vasculaire dans l'oasis de Figuig

Au début du 20^{ème} siècle les phoeniciculteurs Figuiguis ont perdu plus de 48 % de leurs palmiers dattiers parmi les variétés de bonne qualité dattière comme Boufaggousse, Boufaggousse Gharas, Afroukh N'Tijint, Assian, etc. (Toutain, 1968). Ce taux de mortalité est actuellement de 4,3 % (Hakkou et Bouakka, 2004). Cette diminution n'est pas due à la perte de la virulence du champignon pathogène; elle est le résultat d'une sélection draconienne opérée par ce champignon en détruisant toutes les variétés sensibles et laissant les moins sensibles et les plus résistantes qui sont souvent d'une qualité médiocre.

Le comportement du palmier dattier à l'égard de la fusariose vasculaire est lié au patrimoine génétique de la variété (Bendiab et *al.*, 1993), mais aussi aux conditions culturales. Les observations effectuées sur le terrain (Hakkou et Bouakka, 2004) montrent que le développement de la maladie n'est pas identique dans l'ensemble des Ksour pour une même variété sensible. Les attaques sont très variables d'une région à une autre et même entre parcelles voisines (Sedra, 1993, Sedra et Bah, 1993); ceci peut être expliqué par plusieurs facteurs (Bouakka et Hakkou, 2004) :

- La qualité et la quantité des eaux d'irrigation : dureté, température, salinité, degré de pollution etc.
- Les caractéristiques physico-chimiques des sols : la composition chimique, la richesse en éléments nutritifs, le degré de réceptivité vis-à-vis du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* (Sedra, 1993; Sedra et Bah, 1993; Sedra et Rouxel, 1989)
- La situation géographique des différents Ksour : en fonction de cette situation, les palmiers dattiers sont plus ou moins exposés aux vagues de chaleur et de froid ou aux tempêtes de sable qui posent un vrai problème pour certaines zones de la palmeraie.
- Les méthodes culturales et le degré d'entretien apportés aux parcelles. En effet, les différentes parcelles de l'oasis de Figuig ne sont pas travaillées de la même façon.
- La densité du palmier, la transmission de la fusariose vasculaire étant plus accentuée quand la densité est plus élevée.
- L'âge du palmier; les palmiers adultes entre 20 et 100 ans, sont plus touchés que les palmiers jeunes.
- La répartition variétale, c'est à dire que les zones riches en variétés sensibles auront des proportions élevées en pieds malades et vice versa (tableau 4).

Tableau 4: Répartition des différentes variétés par Ksar (exprimée en pourcentage)

	Ass	A. B	Taab	Bouf	B. Gh.	Tad	A. M.	Afrou	Francs	PM
Hamam Foukani	56,74	4,93	1,74	8,72	7,78	0,25	0,44	0,22	17,57	1,61
Hamam Tahtani	80,36	3,37	0,89	4,27	2,38	1,39	0,60	0,79	4,46	1,49
Laâbidate	45,17	1,04	1,34	11,44	1,19	0,74	1,49	0,15	24,67	5,50
Lamâize	53,83	2,2	1,74	4,86	4,30	4,80	0,37	0,69	20,14	2,99
Loudaghir	30,46	24,81	1,84	5,29	0,65	2,08	0,18	0,54	31,41	2,74
Oulad Slimane	60,10	3,80	1,68	2,23	2,69	6,58	0,66	0,70	19,18	2,38
Zénaga	47,27	5,78	2,05	11,71	1,55	1,19	3,02	0,61	24,39	2,42
% dans la palmeraie	50,19	5,92	1,91	9,69	2,61	1,76	2,15	0,56	22,59	2,36

Ass : Assiane; A.B. : Aziza Bouzid; Taab : Taabdount; Bouf : Boufaggousse; B.Gh. : Boufaggousse Gharas; Tad : Tadmamte; A.M. : Aziza Manzou; Afrou : Afroukh N'Tijint; PM : Pieds mâles.

La palmeraie de Figuig était très riche en variétés dattières; déjà en 1968, Toutain a recensé 21 variétés différentes dont plus de la moitié (12 variétés) a disparu (Toutain, 1968a) (tableau 5). Cette érosion génétique peut être expliquée par des facteurs naturels qui sont

principalement, la maladie du Bayoud et des facteurs humains telles que les forces du marché national et international. En effet, les préférences des marchés pour des dattes de haute valeur commerciale (généralement de grande taille et molles) issues des variétés connues obligent les phoeniculteurs à pratiquer des cultures monovariétales offrant des fruits de meilleure qualité mais qui sont généralement sensibles au Bayoud (tableau 6).

Tableau 5 : La population variétale des dattiers dans la palmeraie de Figuig vers 1968 selon Toutain (Toutain 1968a)

Variétés	Nombre de pieds	En %	Variétés actuellement disparues	Nombre de pieds	En %
Sair (Francs)	41 260	38,978	Taberchent	174	0,164
Boufaggousse	37 250	35,190	Ajin	71	0,067
Assian	22 120	20,897	Lakmil	64	0,060
Afroukh. Ntjint	1 326	1,253	Tlazouaght	60	0,057
Boufaggousse	1 038	0,981	Ahardane	38	0,036
Gharas					
Aziza Bouzid	795	0,751	Bou Chourne	36	0,034
Taabdount	643	0,607	Tamdait	23	0,022
Admam	353	0,333	Tajint	20	0,019
Tadmamt	304	0,287	El Kounti	20	0,019
Aziza Manzou	230	0,217	Tighergaimt	20	0,019
			Bou Skri	6	0,006
			Amira	3	0,003
Total	105 319	99,495		535	0,506

Tableau 6: La population variétale des dattiers dans la palmeraie de Figuig et l'incidence de la fusariose vasculaire (Hakkou et Bouakka, 2004).

	Nombre total de pieds	%	Nombre de pieds malades	%	Nombre de pieds non productifs	en %
Assiane	95 100	50,19	5 386	5,68	4 274	4,48
Aziza Bouzid	11 212	5,92	274	2,39	718	6,25
Taabdount	3 622	1,91	50	1,38	166	4,58
Boufaggousse	18 365	9,69	822	4,47	817	4,45
Boufaggousse	4 954	2,61	237	4,78	386	7,79
Gharas						
Tadmamte	3 332	1,76	83	2,49	50	1,49
Aziza Manzou	4 075	2,15	25	0,61	133	3,26
Afroukh	1 062	0,56	120	11,30	46	4,30
N'Tijint						
Francs	42 664	22,59	1 054	2,47	2 432	5,70
Pieds mâles	4 469	2,36	-	-	-	-
Total	188 855	100,00	8 075	4,27	9 021	4,76

En se basant sur les observations de terrain et les résultats de l'enquête, Hakkou et Bouakka en 2004, ont classé les variétés Afroukh Ntjint, Boufaggousse et Boufaggousse Gharas comme très sensibles, Assiane et Aziza Bouzid comme sensible et Taabdount et Aziza Manzou comme résistantes au Bayoud.

A Figuig, l'agriculteur préfère subir les conséquences du Bayoud plutôt que de planter une variété de faible qualité (Hakkou et Bouakka, 2004). Ces auteurs ont montré que malgré la très grande sensibilité de certaines variétés comme (Boufaggousse Gharas), les agriculteurs continuent toujours de les replanter.

8. Lutte contre le Bayoud

Selon les caractères épidémiques, infectieux et vasculaires du Bayoud, les orientations de lutte contre cette maladie s'apparentent à celles préconisées contre les autres fusarioses vasculaires connues. Quatre méthodes de lutte contre le Bayoud ont été adoptées sur le palmier dattier :

8.1. La lutte chimique

Il s'agit de l'utilisation des fongicides à action systémique ou endothérapique. Cette méthode est écartée, du fait que les possibilités pratiques d'utilisation de fongicides systématiques dans le cas des trachéomycoses sont très limitées. En plus, ces produits sont peu stables dans le sol et risquent de favoriser la sélection des souches résistantes (M.A.R.A., 1976). En les utilisant d'une façon répétitive et pendant de longues années, ces produits chimiques risquent de nuire à l'environnement.

8.2. Des mesures prophylactiques

Ces mesures visant à protéger les zones encore saines sont appliquées sur le terrain. En effet, l'OEPP/EPPO (1990) recommande aux pays phoenicicoles d'interdire l'importation du matériel en provenance des pays infectés comme :

- Le matériel végétal du palmier dattier (rejets, feuilles, etc.).
- Le sol et les végétaux destinés à la plantation (avec racines, boutures) accompagnés de terre.
- des végétaux destinés à la plantation de henné (*Lawsonia inermis*) (excepté les semences).

L'Algérie (1942- 1949) et le Maroc ont mis en place des contrôles phytosanitaires internes qui empêchent le transport de rejets des régions contaminées.

Dans le cas de détection précoce d'un nouveau foyer de Bayoud dans une zone saine, l'éradication est le moyen de lutte utilisé. En effet, après la délimitation du foyer avec une marge de sécurité suffisante, les arbres sont arrachés et incinérés sur place, le sol est, par la suite, stérilisé à la chloropicrine. Cette technique a été améliorée par l'utilisation d'un mélange de bromure de méthyle et de chloropicrine. Ces dernières années l'utilisation de chloropicrine fut totalement interdite vu son danger et sa faible efficacité. En effet, le bromure de méthyle possède une forte capacité de pénétration dans le sol et lui assure une bonne stérilisation (Dubost et Hethener, 1968; Frederix et Den Brader, 1989). La zone ainsi traitée est clôturée et reste interdite à la culture pendant une longue période. Mais cette méthode est très chère, polluante et son efficacité n'est pas garantie. Malgré ces inconvénients, elle reste la seule méthode appliquée, surtout en Algérie.

8.3. La lutte génétique

L'utilisation de variétés résistantes reste la seule méthode efficace pour lutter contre la fusariose vasculaire (Pereau-Leroy, 1957). Parmi les 32 variétés marocaines testées (tableau 7) dans les stations expérimentales de Errachidia et de Zagora, seules six variétés ont montré une résistance totale au Foa (Louvet et Toutain, 1973). Il s'agit de Bousthami noire, Bousthami blanche, Iklane, Tadment, Sayre Layalet et Boufaggousse ou Moussa. Une autre variété résistante (Boukhanni) a été retrouvée 20 ans plus tard (Sedra, 1992, 1993, 1995). Malheureusement, toutes ces variétés ont une qualité dattière faible, ce qui constitue un handicap à leur transplantation à grande échelle.

D'autres travaux ont été effectués sur des clones résistants et de bonne qualité issus de semis naturels ou des croisements contrôlés tels que Ennajda (INRA-3014), INRA-1445, INRA-3003, Al-Amal (INRA-1443), INRA-3010, Al-Fayda (INRA-1447), Bourihane (INRA-1414) et Mabrouk (INRA-1394) qui ont été sélectionnés. Le clone Ennajda (INRA-3014), cultivé à grande échelle pour la reconstitution de la palmeraie marocaine, produit des fruits de bonne qualité acceptés par les phoéniculteurs (Sedra, 2005b).

Tableau 7 : Le degré de résistance de quelques variétés des régions phéniciques du Maroc (Toutain, 1973).

Région	Totalement résistantes	Assez résistantes	Moyennement sensibles	Très sensibles
Zouzfana (Figuig)		Taabdout	Assian Aziza Tiberghaimt	Boufaggousse
Guir Tafilalet	Bou Sthammi Noir	Bou Slikène Bel Azit Race Lacmer Bou Cerdoun	Bou-ijjou Azigzao jaji	Boufaggousse Boufaggousse Mejhoul Bouskri
Gheris		Bou Cerdoun Bou Zeggar	Azizo Bou Zeggar	Boufaggousse
Ferkla Todra Saghor est			Azizao Outoukdim	Boufaggousse Boufaggousse
Sagho-est	Bou sthammi Noire Iklane Bou Sthammi Noire Iklane	Bou Slikène Bou Cerdoun Race Lahmer Bou Sliken	Azigzao Outoukdim Azigzao	Boufaggousse Jihel Boufaggousse Jihel Bouskri Bou slikhène Boufaggousse
Draa	Tadment Bou Sthammi Noire Iklane Tadment	Briki Bou-khani Aissa- youb Mah-el baid Race lahmer Race lahmar	Mydodane Bou zeggar Oum n'hale	Ahardane Bou rhar Bouskri
Bani-ouest	Sair-layalet Bou sthammi Noire Bou sthammi Blanche Bou- feggous Ou moussa Iklane		Bou ittob Mydodane	
Bani-est			Bout ittob	Jihel Boufaggousse Bouskri
Anti-Atlas	Iklane Bou sthammi blanche tadment		Bout ittob	Jihel Boufaggousse Bouskri

8.4. La lutte biologique

Des recherches sur la lutte biologique ont montré que certains micro-organismes de la flore (bactéries de type *Pseudomonas*, champignons de type *Fusarium* et *Actinomycètes*) isolés du sol de certaines palmeraies (marocaines et algériennes) sont doués d'activités antagonistes

vis à vis de l'agent causal du Bayoud (Sabaou et *al.*, 1980 ; Maslohy, 1989). Cette action se manifeste par l'inhibition de la croissance végétative du parasite, par la perte de son pouvoir pathogène vis-à-vis des palmiers sensibles et /ou par induction des réactions de défense de la plante (El Hassni et *al.*, 2006).

La lutte contre le Bayoud nécessite la mise en œuvre d'une stratégie, aussi bien préventive que curative, de contrôle du champignon et de protection des vergers.

III. COMPOSTAGE

1. Généralité

1.1. Aperçu général sur la fraction organique du sol

La nature est un lieu d'échanges permanents entre la phase minérale et la phase vivante par l'intermédiaire de la biodégradation de la matière organique du sol. La fraction organique du sol comprend tous les composés organiques simples ou complexes, libres ou associés. Les transformations des résidus organiques se font à des vitesses très variables suivant leur nature chimique et les conditions de milieu, ils peuvent être dégradés à la surface du sol selon le processus aérobie ou anaérobie.

En condition anaérobie, la minéralisation partielle de la matière organique s'accompagne de la production du méthane. Par contre, en condition aérobie, l'oxydation de la matière organique conduit à la formation de composés humifiés stables. Cette oxydation résultant de l'activité microbienne libère une quantité importante d'énergie provoquant ainsi une élévation de température au sein des substrats. Ce phénomène est à la base du compostage.

1.2. Définition du compostage

Le compostage est un processus contrôlé de bio-oxydation exothermique (Mustin, 1987 ; Fernandes et *al.*, 1988) des déchets organiques par une succession de communautés microbiennes indigènes qui aboutit à la formation d'un produit hygiénisé, stable et riche en humus (compost), qui peut être utilisé comme amendement organique, support de culture ou engrais organique sans impacts négatifs sur l'environnement (Bonneau et Souchier, 1979; Haug 1980; Vaughan et Malcolm, 1985; Stevenson et He, 1990).

1.3. Historique

Le compost ne date pas d'hier, il fut pratiqué depuis des siècles par les exploitants et les jardiniers de différentes régions du monde. La matière organique a été l'unique source de fertilisation, jusqu'à l'apparition de la théorie de Liebig en 1841, devancée par Palissy en 1563, qui démontrèrent la possibilité pour les plantes de puiser dans les sols des éléments nutritifs sous forme de combinaisons minérales, et les progrès de la chimie permirent à la fertilisation minérale d'acquérir ses lettres de noblesse.

Après la première guerre mondiale, l'ammoniac ne trouvait plus de débouchés pour la fabrication des explosifs, il fut donc mis à la disposition de l'agriculture comme engrais. Le fumier organique perdait sa place en faveur des engrais chimiques qui ont montré un formidable moyen d'augmenter la production agricole. Mais l'utilisation intensive des fertilisants chimiques et des techniques culturales abusives contribuent, significativement, à l'appauvrissement des sols en matière organique, qui deviennent alors très sensibles à l'érosion.

De 1906 à 1931, l'agronome anglais Howard mena des recherches en Inde sur la fertilisation des sols qui avaient subis un appauvrissement à cause d'exploitation inadaptée et de l'intensification de la fertilisation minérale. Cet auteur parvint à récupérer pour l'usage agricole des excréments de vaches, l'urine des animaux, les déchets des maisons, de l'étable, des champs et des jardins. Tous ces déchets étaient rassemblés, bien mélangés et humidifiés puis mis à décomposer en tas ou en fosse. Ainsi, par ses recherches, il a établi les bases solides du développement de l'agriculture organique en Angleterre.

Le mot compost vient du latin « *compositus* » et signifie « mis ensemble », mais il ne fut pas toujours appliqué aux déchets des plantes et des animaux. Avant, il signifiait un procédé de conservation de fruits et de légumes.

Les conditions de fabrication des composts ont été très longtemps empiriques. L'intérêt porté à cette technique a permis une meilleure connaissance des facteurs intervenant dans ce processus telles que la succession de population microbienne, l'influence de la température sur l'activité microbienne et la transformation des composés organiques et azotés (Waksman et *al.*, 1939). Actuellement le compostage est considéré comme une des composantes écologiquement durables dans un système de gestion intégrée des déchets.

1.4. Principe du compostage

Le compostage est un processus contrôlé de biodégradation aérobie exothermique de toutes matières compostables qui aboutit à la formation d'un amendement organique riche en substances humiques, lesquelles constituent un excellent amendement des sols (photo 8). Au cours de ce processus, les fractions organiques facilement dégradables (sucres, protéines, hémicelluloses) se transforment en produits simples (CO_2 , H_2O , $\text{NO}_3\dots$), alors que les fractions organiques complexes (lignines, lignocelluloses) se transforment en substances humiques ou pré-humiques, plus stables (Mazaud, 1993).

Le processus de compostage est à la fois consommateur et producteur de chaleur. La biodégradation des composés organiques entraîne une perte d'eau, une production de CO_2 et une modification de la porosité du milieu. Ceci se solde par une réduction du volume et de la masse de la matière, au cours du processus de compostage, qui peuvent atteindre 50% (Mustin, 1987 ; Eklind et Kirchmann, 2000). Ces réductions varient selon le degré de fermentescibilité de ces déchets.

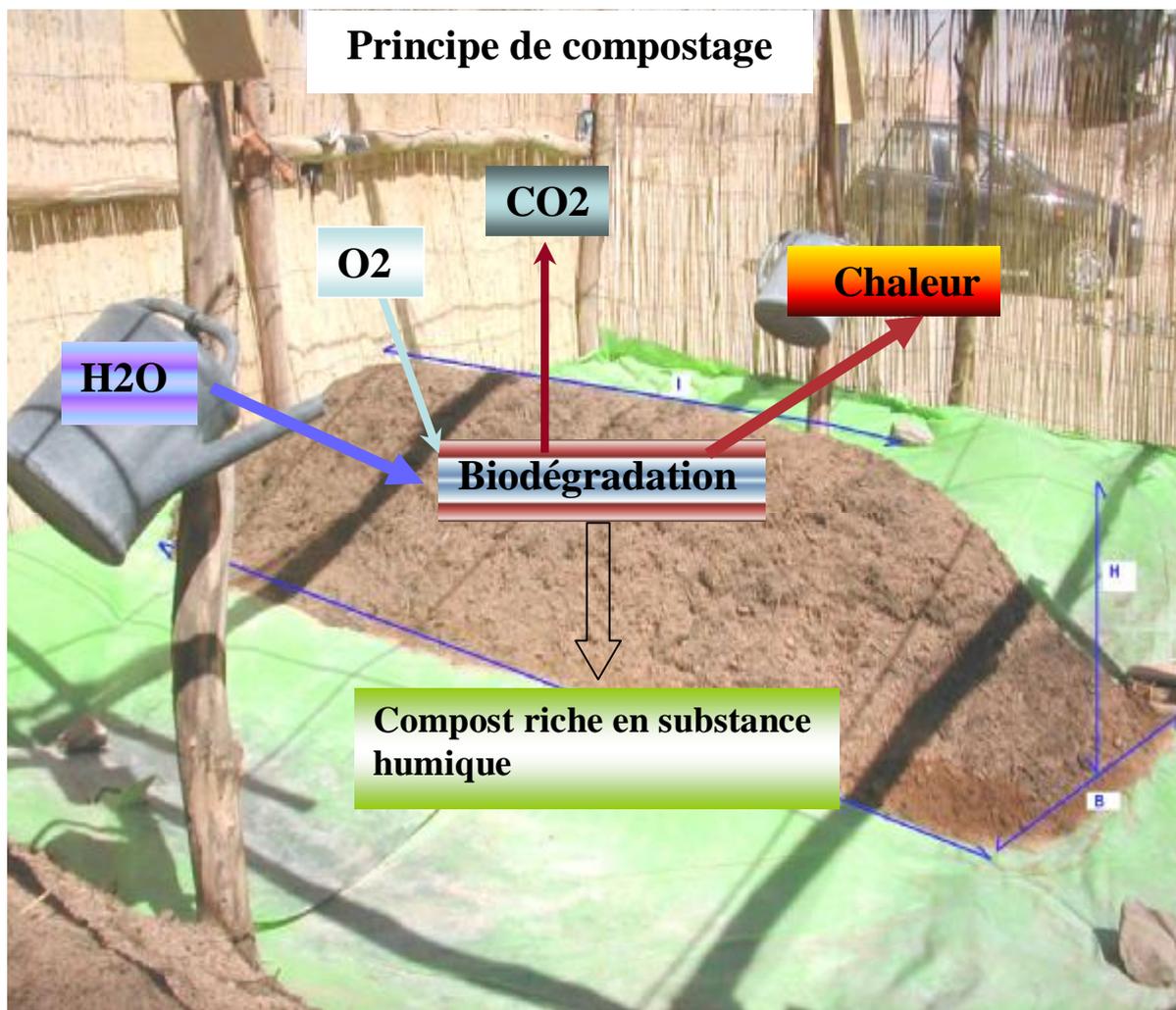


Photo 8: Principe du compostage

1.5. Différentes phases du compostage

L'évolution de la température au cours du compostage dépend de la production interne de la chaleur qui est essentiellement d'origine biologique (Waksman et *al.*, 1939) et des échanges avec l'extérieur (Bach et *al.*, 1987). L'utilisation des réacteurs et des digesteurs dans la technique de compostage ont permis de distinguer précisément au cours du compostage deux

phases qui se différencient par l'intensité de l'activité biologique : la phase de décomposition et la phase de maturation.

- **La phase de décomposition** est caractérisée par la dégradation intensive de la matière organique. Son début est caractérisé par une augmentation très rapide de la température résultant de la décomposition des substances facilement biodégradables (sucres, amidon, protéines, acides aminés) par des bactéries et des champignons ; c'est la phase mésophile. Cette phase est suivie par une phase thermophile, pendant laquelle, la température atteint des valeurs élevées qui peuvent atteindre 65 à 75°C. Au cours de cette phase, les composés lipidiques et protéiques sont fortement décomposés (Poincelot, 1974), la cellulose et les hémicelluloses sont fragilisées (Jaquin et mangenot, 1959; De Bertolid et *al.*, 1982) alors que la lignine n'est pratiquement pas attaquée (Godden et Penninckx, 1984). On assiste aussi à une élimination de la majorité des germes pathogènes (tableau 10), des graines, des mauvaises herbes et toutes particules thermosensibles.

- **La phase de maturation** au cours de laquelle l'humification se poursuit parallèlement à la minéralisation de la biomasse microbienne. La diminution de la quantité de la matière organique facilement dégradable provoque un ralentissement de l'activité microbienne ce qui entraîne le refroidissement du compost. Les micro-organismes majoritaires dans cette phase sont essentiellement ceux qui utilisent les composés les plus résistants (cellulose, lignines, tannins) comme source de carbone. La transformation de ces composés dans des conditions oxydantes donne des acides humiques résistants à l'attaque des micro-organismes (Haider 1968).

2. Paramètres du compostage

Le compostage est un procédé biologique naturel qui s'effectue dans des conditions bien contrôlées. Au cours du compostage, la vie des micro-organismes peut être influencée par un mauvais contrôle des principaux paramètres, à savoir :

- Les paramètres liés aux facteurs trophiques qui sont relatifs à la composition du substrat initial.
- Les paramètres qui conditionnent le déroulement du compostage.

2.1. Les facteurs trophiques

Pour le compostage, il est important de souligner que le substrat, au départ, est l'unique source de nourriture des micro-organismes décomposeurs qui vont réaliser sa transformation. Pour

accomplir leurs fonctions vitales, ces micro-organismes ont besoin d'un apport exogène des éléments nécessaires à leur survie.

2.1.1. Rapport C/ N

Le carbone organique représente la principale source d'énergie pour la respiration des micro-organismes, il est aussi un agent structurant, car il est susceptible de provoquer une bonne formation d'espace lacunaire. L'azote est utilisé en grande partie pour la synthèse et l'assimilation des structures protéiques et règle la vitesse de fermentation aérobie. Le rapport C/N idéal des déchets, qui garantit un bon démarrage du compostage et son déroulement optimal, doit être situé entre 25 et 40 (Bagstam, 1977; Willson, 1989; Sadaka et El. Taweel, 2003). S'il est trop élevé, le développement des micro-organismes est ralenti et par conséquent le temps requis pour la biodégradation devient plus long. S'il est faible, l'azote est en grande partie perdu sous forme d'ammoniac, par voie de volatilisation (De Bertoldi et *al.*, 1982).

Au cours du compostage, les substrats organiques perdent plus rapidement leur carbone (métabolisé par les micro-organismes et dégagé sous forme de CO_2) que leur azote (métabolisé ou perdu sous forme de composés azotés volatils comme l'ammoniac NH_3). Le rapport C/N décroît donc constamment au cours du compostage pour se stabiliser à une valeur comprise entre 8 et 25 (Gerrits et *al.*, 1965; Roletto et *al.*, 1985; Hirai et *al.*, 1986; Bernal et *al.*, 1998; Eggen et Vethe, 2001).

2.1.2. Matières minérales

Les macroéléments (P, Ca, K et Mg) et oligoéléments (Cu, Fe, Cl, Zn...), sont également indispensables au développement microbien. Mais on considère généralement que leurs teneurs ne doivent pas être limitantes car ils sont souvent présents en quantité suffisante dans les résidus organiques. Les teneurs optimales du rapport azote/phosphore (N/P) varient entre 2 (Poincelot, 1974; Bagstam, 1977) et 5 (Solbraa, 1979). Pour le potassium, un pourcentage de 0,2 à 0,5% est considéré comme suffisant pour un bon développement de la microflore du compostage. Pour les autres éléments majeurs, comme le soufre, le calcium et le magnésium, leurs teneurs limitantes sont extrêmement rares.

2.1.3. Structure du substrat

La structure d'un substrat correspond à l'agrégation des particules solides d'une matière et se caractérise par la forme, la taille et la disposition des agrégats. La granulométrie des substrats, dans certains cas, est très grossière et ne correspond pas à des conditions optimales de

fermentation aérobie, ce qui rend le broyage obligatoire pour un bon démarrage du processus de compostage. En effet, plus un matériau est divisé, plus la surface de contact entre la masse organique, les volumes lacunaires et les micro-organismes est importante, ce qui entraîne une augmentation du taux d'activité microbologique et de la vitesse de dégradation des substrats (Mustin, 1987).

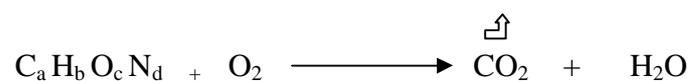
Les dimensions optimales des particules varient selon les procédés de compostage et la nature des substrats. En effet, dans le cas de compostage naturel (lent), Gotaas (1959) préconise, pour les ordures ménagères, des particules de l'ordre de 5 cm, mais pour les écorces, Bagstam, (1977) préconise des dimensions inférieures à 1 cm. Par contre, dans le cas de compostage accéléré, les dimensions conseillées peuvent être encore plus faibles, allant de 0,02 à 2 mm. En générale, pour un rapport C/N donné, il est nécessaire de trouver un compromis entre la structure du mélange et la vitesse de dégradation (Mustin 1987).

2.2. *Les paramètres qui conditionnent le déroulement du compostage*

2.2.1. L'humidité ou la teneur en eau du substrat

L'humidité du mélange est un élément essentiel à la vie des micro-organismes. Elle joue également un rôle prépondérant dans le transport des particules hydrosolubles et de l'oxygène, assurant ainsi un meilleur contact entre les fractions organiques et la flore microbienne pendant le compostage. La teneur en eau varie pour deux raisons :

- La teneur en H₂O a tendance à augmenter, car il y a production d'eau par les réactions biologiques de biodégradation des matières organiques :



- Elle a tendance à diminuer sous l'action conjuguée de la montée de la température et de l'aération, lesquelles entraînent des pertes sous forme de vapeur d'eau. Cette teneur en eau est étroitement liée au pourcentage d'espace lacunaire (Jeris et Regan 1973).

Ainsi, le taux optimal d'humidité pour un substrat donné est déterminé par l'espace lacunaire maximal qui n'entraîne pas d'inhibition de l'activité des micro-organismes ; il est généralement situé entre 50 et 80% de la masse brute totale (Gerrits, 1972 ; Willson, 1989; Richard et *al.*, 2002).

2.2.2. Taux d'oxygène lacunaire

Le compostage est un processus de biodégradation aérobie. La présence d'oxygène est indispensable au bon déroulement du compostage. Il est consommé, d'une part, par les organismes décomposeurs au cours de leur respiration et, d'autre part, par les réactions d'oxydation des composés organiques qui leurs servent de nutriments. Il est donc nécessaire d'apporter, dans la matière à composter, un taux d'oxygène suffisant, par aération.

Selon la littérature, les conditions aérobies sont maintenues lorsque le taux d'oxygène résiduel est supérieur à 5% (Schulze 1958, 1961; Poincelot, 1975; Hubert, 1979). Ce taux d'oxygène ne devra pas être inférieur à ce seuil, car la mise en place des conditions anaérobies déséquilibrerait la flore en place au profit d'une autre. Alors le système évoluerait vers le processus de méthanisation. On parle ici d'oxygène lacunaire, car il est contenu dans les « vides » existant entre les différentes particules des matières mises à composter. Le pourcentage d'oxygène des espaces vides varie en fonction de la taille, la structure et l'humidité des constituants des mélanges à composter.

Les besoins des micro-organismes aérobies évoluent au cours du compostage. Lors des premières phases de dégradation intense de la matière organique fermentescible (phase de décomposition ou stabilisation), la quantité d'oxygène mobilisée est maximale. La disparition progressive de cette fraction provoque une diminution proportionnelle des besoins en oxygène, jusqu'à une valeur résiduelle très faible à la fin de la maturation du compost. La consommation de l'oxygène par une masse organique est donc un paramètre direct de l'activité des micro-organismes aérobies qui permet de situer le stade d'évolution atteint par un compost (Miquel, 1998).

La maîtrise des conditions d'aération va permettre d'assurer des conditions de biodégradation homogène et optimale des substrats.

L'oxygénation des composts est assurée soit par des retournements réguliers, soit par ventilation, soit par la combinaison de ces deux actions. Les retournements réguliers, ou des mélanges mécaniques, permettent d'exposer de nouvelles surfaces à la dégradation, évitent la compaction et réduisent ainsi l'hétérogénéité de la matrice du compost (Smars et *al.*, 2001). Cayuela et *al.* (2006) ont été signalé que les andains retournés sont caractérisés par une longue phase thermophile par rapport aux andains qui ont subis une aération forcée. De même, le compost des andains retournés présente un fort degré d'humification.

2.2.3. Température

Le facteur température est un paramètre majeur pour le compostage. L'énergie stockée sous forme des liaisons chimiques dans les molécules organiques de la biomasse est libérée progressivement par une oxydation partielle réalisée par les micro-organismes de compostage. L'évolution de la température au cours du compostage varie selon la fermentescibilité et le pouvoir calorifique des composés, la taille des particules, les dimensions des andains, l'humidité, l'aération et les conditions climatiques, etc. (Carlyle et Norman, 1940; Plat, 1981; Finstein et Morris, 1975; Mustin, 1987 ; Godden, 1986). En effet, Waksman et *al.*, (1939) ont montré que la production de la chaleur d'origine microbienne s'arrêtait lorsque l'oxygène lacunaire est complètement consommé. Lors du compostage, Le flux de chaleur, la consommation d'oxygène ou la production de CO₂, sont des témoins directs de l'activité microbiologique aérobie.

2.2.4. pH

Le pH est un facteur important qui conditionne la bio-disponibilité des éléments nutritifs pour les micro-organismes en agissant sur la solubilité des métaux lourds et sur la plupart des réactions biochimiques (Soudi 2001). La gamme optimale des pH pour le compostage est celle des conditions optimales de la vie des micro-organismes qui interviennent dans ce processus, elle se situe autour de la neutralité. La variation de pH au cours du compostage dépend de la composition initiale, mais généralement, on assiste à une acidification au début du compostage, attribuée à la production d'acides organiques, notamment l'acide acétique, butyrique et carbonique, résultant de l'oxydation des molécules simples (sucres simples, lipides ...) par les micro-organismes mésophiles (Golueke et al, 1954) et à la dissolution de gaz carbonique (CO₂) dans l'eau. Le pH remonte ensuite rapidement à la phase thermophile (Schulze, 1961) et redevient basique (pH= 8-9) (Finstein et Morris, 1975) suite à la libération d'ammoniac par le processus d'ammonification des protéines (figure 5) (Dye, 1964; Miquel, 1998). Au cours de la phase de maturation, le pH diminue vers la neutralité suite à l'utilisation de l'ammoniac par les micro-organismes pour la biosynthèse des matières humiques; puis, il se stabilise grâce aux réactions lentes de maturation et au pouvoir tampon de l'humus.

2.3. Paramètres biologiques

Au cours du compostage, les réactions de bio-oxydation des matières organiques sont assurées par une grande variété de micro-organismes possédant un équipement enzymatique propre.

Ces micro-organismes sont d'origine tellurique et appartiennent aux divers groupes (Bactéries, Actinomycètes, Champignons (ou Mycètes), Protozoaires et Algues). A l'intérieur d'un même groupe, tous les micro-organismes n'agissent pas de la même façon sur le substrat et on peut les classer alors suivant la fonction biochimique spécifique qu'ils assurent au sein du compost.

La diversité de la flore existante est liée aux différents niveaux de biodégradabilité des constituants organiques. Ainsi, des communautés différentes de micro-organismes vont se succéder en fonction du niveau de décomposition atteint et de leurs équipements enzymatiques. Cette succession de décomposition explique, en fait, la succession des différentes phases de compostage (figure 5).

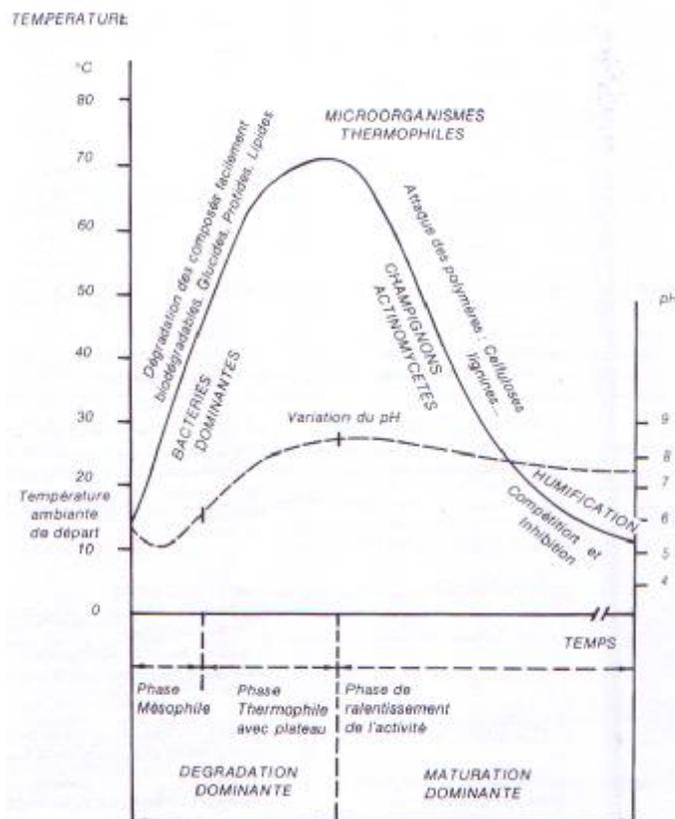


Figure 5 : Actions conjuguées des paramètres du compostage à humidité et aération optimales (Mustin, 1987)

L'origine de la transformation de la matière organique dans le compost est due à la production d'enzymes, véritables biocatalyseurs de toutes les réactions biochimiques. On distinguera deux types d'enzymes :

- Les enzymes extracellulaires sont produits et excrétés par les micro-organismes en activité.

- Les enzymes intracellulaires, libérés lors de la mort ou de la destruction des cellules, peuvent continuer à opérer indépendamment des cellules productrices, pendant un temps plus ou moins long en dépit de leur relative fragilité (dénaturation, destruction dans la « jungle » environnante du compost).

Domergues et Mangenot (1970) ont identifié l'ensemble des activités enzymatiques des composts (tableau 8).

Tableau 8 : Principales activités enzymatiques du compost (Domergues et Mangenot, 1970)

HYDROLASES	Dégradation d'une molécule du substrat par hydrolyse
Osidases	Attaque des Osides
• saccharase	Saccharose \longrightarrow Glucose + Fructose
• amylase	Amidon \longrightarrow Dextrine + Maltose
• cellulase	Cellulose \longrightarrow Sucres simples + cellulodextrines
• pectinase	pectine \longrightarrow Acide galacturonique + galactose
phosphatases	alcool – phosphate \longrightarrow alcool + phosphate (glycérophosphate \longrightarrow glycérol + phosphate)
Amidases	Destruction amide
Uréase	Urée \longrightarrow ammoniac
Protéases	Protéines \longrightarrow acides aminés ou peptides
Transferases et Isomerase	Transfert des groupes ou des radicaux d'une molécule à une autre ou changement de configuration.
Oxydo-reductases	oxydo-réduction
Oxydases et Catalases	Réduction d'oxygène gazeux

3. Maturité du compost

La maturité du compost est une donnée primordiale à connaître pour optimiser leur utilisation. La définition de la maturité des composts diffère d'un auteur à l'autre. En effet, elle est considérée par certains comme synonyme de stabilité biologique, c'est-à-dire qu'un compost est mûr lorsque sa matière organique est stable (Nicolardot et *al.*, 1982; Jimenez et Garcia, 1989; Robertson et Morgan, 1995; Houot et *al.*, 2001). Alors que pour d'autres, un compost est considéré mûr lorsque son utilisation ne présente aucun risque pour les cultures (Rynk, 2003). Donc, on pourrait dire qu'un compost mûr est un compost où la matière organique atteint un degré de stabilité physique, chimique et biologique suffisant pour ne plus provoquer d'effets phytotoxiques sur les cultures. Plusieurs recherches ont eu pour objets la mise au point des tests qui permettent l'évaluation de la maturité du compost. Parmi ces tests on peut citer:

3.1. Tests respirométriques

Ces tests sont basés sur l'activité respiratoire de la population endogène des composts dans leurs conditions optimales. Ils consistent à suivre la minéralisation du carbone (Forster *et al.*, 1993; Iannotti, 1994) ou la consommation d'oxygène (Germon *et al.*, 1980; Nicolardo *et al.*, 1986) (tableau 9). Germon *et al.* (1980) considèrent qu'un compost est mûr si sa respiration est inférieure à 40 mg d'O₂ / kg MS par heure, soit 15 à 20 fois moins qu'un produit frais. Ces tests sont considérés comme étant les plus fiables pour l'évaluation de la maturité des composts (Rynk, 2003).

3.2. Tests d'auto-échauffement

Ce test estime le niveau de stabilité de la matière organique d'un compost à partir de la température maximale obtenue par auto-échauffement d'un compost placé dans un vase isotherme DEWAR (Bidlingmaier, 1993) (tableau 9).

3.3. Test SolvitaR

Ce test est basé sur la minéralisation du carbone et la volatilisation de l'ammoniac (seekins, 1996; Brinton et Evans, 2000; Changa *et al.*, 2003). Outre le niveau de stabilité qui est évalué directement à partir du CO₂ dégagé, l'éventuelle phytotoxicité liée à la présence d'ammonium est déterminée grâce à l'estimation de l'ammoniac volatilisé (Changa *et al.*, 2003) (tableau 9).

3.4. Tests d'humification

Plusieurs paramètres d'humification sont habituellement utilisés pour déterminer la maturité d'un compost (Benny *et al.*, 1996 ; Cavani *et al.*, 2003). Parmi ces paramètres, la teneur en substances humiques (SH), en acides humiques (AH) et en acides fulviques (AF), ainsi que l'indice d'humification (IH = Carbone Acide Humique (C_{AH}) /Carbone Acide Fulviques (C_{AF}) (tableau 9). En effet, au cours du compostage, les teneurs en acides humiques tendent à augmenter, tandis que la teneur en acides fulviques diminue (Benny *et al.*, 1996).

3.5. Tests de phytotoxicité

- Tests de croissance des plantes (Nicolardo *et al.*, 1986; Hirai *et al.*, 1986. Garcia *et al.*, 1992; Helfrich *et al.*, 1998)

- Tests de germination (Zucconi et *al.*, 1981; Garcia et *al.*, 1992; Wu et *al.*, 2000)
- Tests de développement racinaire (Zucconi et *al.*, 1981; Brinton et Evans, 2000)

Ces tests sont réalisés généralement au laboratoire sur des végétaux qui sont sensibles à la phytotoxicité (cresson, ray-grass, concombre, orge, tomate...). Ce sont les seuls tests qui intègrent l'ensemble des facteurs de phytotoxicité et ils sont à ce titre particulièrement intéressants. Leurs mises en oeuvre est très simples et à la portée de tous (De Bertoldi et *al.*, 1983).

Tableau 9: Quelques valeurs des principaux indicateurs de maturité des composts

Analyses	Compost immature	Compost mûr	Déchets	Références
Respirométrie	16gC-CO ₂ /k MS en 3j (initial)	1,3 g/kg MS en 3j	MO	Iannotti et <i>al.</i> , 1994
	>15g O ₂ /kg MS en 7j 1,2 g O ₂ /kg MS/h	<7g O ₂ /kg MS en 7j 80mg O ₂ /kg MS/h	MO MO	Nicolardot et <i>al.</i> , 1986 Schumann et <i>al.</i> , 1993
pH	6,2	7,5	BIO	Avnimelech et <i>al.</i> , 1996
	6,7	8	MO	Bernal et <i>al.</i> , 1998
	5,7	7,1 à 7,7	MO	Forster et <i>al.</i> , 1993
	7,9 à 8,6	7,8	Fumier	Gagnon et <i>al.</i> , 1997
	6,6 à 7	7,5 à 8	DV	Hartz et Giannin, 1998
	7(initial)	7 8,4	MO MO	Iannotti., 1994 Iglesias-Jimenez et Alvarez, 1993
NO ₃ /NH ₄	<1	1,4 et 6,8	MO	Forester et <i>al.</i> , 1993
	-	>1	MO	Senesi 1989
	-	>6,3	MO	(Sanchez-Monedero et <i>al.</i> , 2001)
C/N	28,8 (initial)	13,5	Fumier	Adani et <i>al.</i> , 1995
	19,3	7,8	MO	Iglesias-Jimenez et Alvarez, 1993.
	20(initial)	10,4	BIO	Brinton et Evans, 2000
	8,74 (initial)	11,2	Boue	Hirai et <i>al.</i> , 1986
	21,5(initial)	17,9	Boue + DV	Hirai et <i>al.</i> , 1986
25	20,5	Fumier	Paré et al 1998	
83(initial)	<25	DV	Roletto et al 1985	
AH/AF	-	1,9	MO	(Iglesias-Jimenez et Alvarez, 1993
	0,82	1,1	DV	Kostov et al 1994
	0(initial)	3,1 à 4,8	Fumier	N'Dayegamiye et <i>al.</i> , 1997
	-	>1	DV	Reletto et <i>al.</i> , 1985
Auto échauffement	2	>4	BIO	FCQAO, 1994
Solvita	4	>6	BIO	Brinton et Evans, 2000

MO: matière organique; MS : matière sèche ; j : jour ; h : heure ; DV: déchets verts; BIO: biodéchets.

3.6. Tests empiriques

A titre indicatif, on peut citer quelques critères empiriques utilisés sur le terrain pour déterminer la maturité du compost. En effet, un compost mûr est caractérisé par:

- une couleur foncée et une odeur agréable (odeur de la terre de ferme ou d'humus) (Jimenez et Garcia, 1989),
- une souplesse au toucher et un aspect tel qu'on ne peut pas reconnaître à l'œil les composés d'origine.
- Une stabilisation des températures même après retournement et humidification.

Ces tests sont simples mais trop peu précis pour constituer des indicateurs standards et fiables de maturité.

Il existe d'autres méthodes (qui sont peu utilisées vue leurs complexités), tels que l'estimation des lipides extractibles (Dinel et *al.*, 1996), le suivie de la biomasse microbienne ou de l'activité enzymatique au cour du compostage (Forster et *al.*, 1993; Kostov et *al.*, 1994) et les analyses spectrales (RMN-C¹³(Deiana et *al.*, 1990; Chen, 2003), ou l'infrarouge (Provenzano et *al.*, 1998; Chen, 2003).

4. Les problèmes causés par le compost immature

Dans le cadre de l'utilisation d'un compost en tant qu'amendement organique, l'emploi d'un produit immature peut avoir des retombées néfastes :

- Un compost non mûr est encore riche en carbone facilement assimilable par les micro-organismes. Cette richesse en carbone peut provoquer un blocage de l'assimilation de l'azote du compost en faveur de l'utilisation de celui du sol.
- D'autres effets dépressifs sont à signaler. Ils sont notamment dûs à une décomposition rapide du compost immature. Cette transformation peut provoquer une diminution de la concentration en oxygène du sol, ce qui crée un milieu anaérobie et fortement réducteur. Dans ces conditions, on observe une augmentation de la solubilité des métaux lourds dans le sol, ainsi qu'une inhibition de la germination des graines. Cette inhibition est causée par la production de substances phytotoxiques tels que l'ammoniac, l'oxyde d'éthylène, et des acides organiques.

La plante réagit à ce milieu inhibiteur en diminuant sa respiration racinaire et son absorption d'une manière générale. De plus, elle ralentit sa production en gibbérelline, et en cytokinine (Jiménez et Garcia, 1989).

Mais les composts fortement stabilisés peuvent également présenter une certaine phytotoxicité, à cause de leur salinité (Hirai et *al.*, 1986; Garcia et *al.*, 1992). De plus, l'effet dépressif des composts n'est pas lié uniquement aux caractéristiques des composts mais aussi aux doses appliquées (De Haan, 1981; Abad Berjon et *al.*, 1997), et aux cultures pour lesquelles il servent d'amendements (Iannotti., 1994).

5. Les bienfaits du compostage

La valorisation des déchets organiques par compostage présente de nombreux avantages et répond parfaitement aux contraintes environnementales, écologiques et économiques.

5.1. Pour l'environnement

Contrairement à l'incinération, qui consiste à brûler la matière organique et à perdre ainsi la quasi-totalité du carbone organique sous forme de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, le compostage réorganise la matière organique pour piéger une partie importante du carbone dans les composés humiques et par conséquent une diminution de l'effet de serre additionnel. Lorsque le compost est valorisé en tant qu'amendement organique, on peut parler de stockage du carbone dans les sols agricoles.

Le compostage limite également la pollution des eaux superficielles et souterraines par la réduction des pertes d'azote nitrique (Houéro, 1993).

5.2. Pour l'écologie

Le compostage contribue aux effets suivants:

- Réduction des volumes des déchets et concentration des éléments minéraux.
- Destruction des phytopatogènes (tableau 10)
- Destruction des adventices.
- Destruction des agents pathogènes et des parasites humains tels que Salmonelle (Hacala 1998).
- Destruction partielle ou totale des résidus de produits phytosanitaires.

5.3. Pour l'économie

Le compostage permet de maintenir ou de créer une activité économique génératrice de revenus, comme il peut offrir des possibilités d'emploi. En parallèle, le compostage peut déclencher et développer d'autres activités économiques.

Tableau 10 : Températures auxquelles les organismes phytopathogènes sont détruits par le compostage (Duval, 1992)

Pathogène	Plante-hôte	Maladie	T (°C)
Champignons			
<i>Armillaria mellea</i>		Pourridié-agric	50
<i>Botrytis allii</i>	Oignons	Pourriture du col	47-73
<i>Botrytis cinerea</i>	Géranium	Moisissure grise	40-60
<i>Didymella lycopersici</i>	Tomate	Pourriture de la tige	39
<i>Fusarium oxysporum</i>	Aster chinois	Flétrissure fusarienne	47-73
<i>Phomopsis sclerotiidies</i>	Concombres	Pourriture noire des racines	47-73
<i>Phytophthora cinnamomi</i>	Rhododendron	Mildiou	40-60
<i>Phytophthora cryptogea</i>	Aster chinois	Mildiou	47-74
<i>Phytophthora infestans</i>	Pomme de terre	Mildiou	44-65
<i>Plasmodiophora brassicae</i>	Chou chinois	Hernie	47-73
<i>Pythium irregulare</i>	Rhododendron	Pourridié pythien	40-60
<i>Rhizoctonia solani</i>	Pomme de terre	Rhizoctonie	40-73
<i>Rhizoctonia spp.</i>	Tabac	Rhizoctonie	49-63
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Laitue	Affaissement sclérotique	47-73
<i>Sclerotium cepivorum</i>	Oignon	Pourriture blanche	47-73
<i>Sclerotium rolfsii</i>		Pourriture	50
<i>Stromatinia gladioli</i>	Glaieule	Pourriture sclérotique	47-73
<i>Thielaviopsis basicola</i>	Tabac	Pourridié noir	49-63
<i>Verticillium dahliae</i>	Houblon	Flétrissure verticillienne	50-70
Bactéries			
<i>Erwinia chrysanthemi</i>	Chrysanthème	Brûlure bactérienne	40-60
Nématodes			
<i>Globodera rostochiensis</i>	Pomme de terre		32-34
<i>Meloidogyne incognita</i>	Piment rouge, concombre		57

6. Effets des composts sur les caractéristiques du sol

L'apport du compost dans des sols agricoles crée des conditions favorables à la vie du sol et des plantes et ceci suite à:

- L'amélioration de la fertilité chimique (Fourniture des éléments nutritifs par minéralisation progressive) et biologique (Augmentation de la flore microbienne et aussi augmentation de l'activité enzymatique) du sol (Giusquiani et *al.*, 1995; Serra-Wittling, 1995; Bhattacharyya et *al.*, 2005).
- La protection du sol contre l'élévation de température, le glaçage, (sol limoneux) et le dessèchement (amélioration de la respiration du sol)
- La protection du sol contre les rayonnements UV solaires.
- L'amélioration de la porosité du sol et sa capacité de rétention d'eau (Serra-Wittling, 1995).
- La réduction de la densité apparente du sol (Bazzoffi et *al.*, 1998)
- La protection du sol contre l'érosion causée par le vent et l'eau
- La réduction de l'acidité du sol et la diminution de l'absorption des métaux par les plantes (Bolan et *al.*, 2003).
- La diminution de certaines maladies chez les végétaux (Krafft, 2000).

7 . Effets des composts sur les maladies des plantes

L'utilisation du compost et de jus de compost est une nouvelle approche ajoutée à la gestion des maladies des plantes en agriculture biologique. En effet, plusieurs auteurs ont montré l'efficacité de compost dans le contrôle des maladies d'origine tellurique ce qui participerait à limiter le recours à l'utilisation de produits phytosanitaires. Schonfeld et *al* (2003) avaient signalé que l'utilisation de compost au champ ou dans les substrats de culture a montré une efficacité vis-à-vis de *Pythium*, *Phytophthora*, *Fusarium* spp et *Rhizoctonia solani*.

Serra-Wettling (1995) et Serra-Wettling et *al* (1997) ont montré que l'addition de 10% en volume du compost (ordures ménagères) à un sol limoneux permet de diminuer voire de supprimer le développement de la Fusariose vasculaire du lin.

Serra-Wettling et *al.* (1996) rapportent que l'apport du compost au sol améliore sa résistance aux Rhizoctones, fusariose, fonte de semis et pourritures provoquées par *Rhizoctonia* sp.

Kai et *al.*, (1990) ont rapporté que l'extrait du compost de l'écorce inhibe *Fusarium oxysporum*. Ainsi, plusieurs recherches menées en Allemagne, au Japon et aux Etats Unis ont

montré que les jus de compost pourraient être efficaces dans le contrôle des maladies comme le mildiou de la pomme de terre, le phytophthora de la tomate, la pourriture grise de la fève, le *Botrytis cinerea* de la fraise, le mildiou et l'oidium de la vigne, l'oidium du comcombre (Weltzein, 1990), la pourriture grise de la tomate (Elad et Shtienberg, 1994) et la gale de pomme (Cronin et Andrew, 1996).

Ces protections citées ci-dessus sont expliquées par, la stimulation des défenses naturelles des plantes (Erhart et *al.*, 1999), et/ou la stimulation de la microflore (Pérez-Piqueres et *al.*, 2006) et de l'activité enzymatique du sol (Albiach et *al.*, 2000; Debosz et *al.*, 2002; Bhattacharyya et *al.*, 2005).

MATERIEL
ET
METHODES

I. ETUDE DE L'EFFET D'UN TRAITEMENT THERMIQUE SUR *FUSARIUM OXYSPORUM* F.SP. *ALBEDINIS* INFESTANT LE RACHIS DES PALMES

Des morceaux de 1 à 2 cm de longueur sur 0,5 à 1 cm de diamètre sont coupés à partir de rachis des palmes des deux variétés Assiane et Boufaggousse fortement contaminées par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. Deux lots de morceaux sont préparés, le premier reste avec son taux d'humidité naturel (10 à 15%) et l'autre a été humidifié pour atteindre un taux d'humidité de 40 à 45%. Ces deux lots sont incubés dans l'étuve à différentes températures (40, 50, 60 et 70°C) pendant des durées variables. Ces morceaux sont, ensuite, incubés pendant 8 jours sur le milieu PDA dans des boîtes de pétri à 25°C. Le pourcentage d'inhibition de la croissance est déterminé par mesure du diamètre de la propagation du *Fusarium* par rapport au témoin (qui n'a subi aucun traitement) selon la formule suivante :

$$\text{Le taux d'inhibition} = \frac{D_0 - D_t}{D_0} \times 100$$

D_0 : diamètre de la croissance du *Fusarium* dans le témoin.

D_t : diamètre de la croissance du *Fusarium* après traitement à une température donnée pendant une durée déterminée.

Les résultats obtenus sont la moyenne d'au moins trois répétitions.

II. COMPOSTAGE

1. Lieu du compostage

Pour éviter le transport des produits contaminés, le ramassage, le broyage et le compostage des sous-produits du palmier dattier ont été réalisés dans le centre des travaux agricoles (C.T.A) à l'intérieur de l'oasis de Figuig.

Le processus du compostage a été suivi dans une plate forme (photo1), plastifiée, ombragée et protégée contre le vent. Elle est équipée d'un système de récupération de lixiviat.

2. Composition en sous-produits des andains de compostage

La grande taille et la nature ligneuse des sous-produits du palmier dattier rendent l'opération de broyage nécessaire pour accélérer le processus de compostage. Ce broyage a été réalisé par un broyeur à couteau pour obtenir un broyat caractérisé par une granulométrie hétérogène de quelques millimètres à 70 mm et par une humidité de 7 à 12%. Dans l'opération de

broyage, nous avons mélangé les différentes parties du palmier dattier en respectant les proportions suivantes : 80 % de palme complète et 20% du stipe. Les matières contaminées ont été broyées séparément des autres collectées au hasard pour être stockées séparément dans des sacs fermés jusqu'au déclenchement de l'opération de compostage.

Le mélange de la biomasse utilisée pour constituer les andains de différentes expérimentations est composé de 90% des sous-produits engendrés naturellement par le palmier dattier et 10% de ceux contaminés par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*, engendrés par les pieds attequés par la fusariose vasculaire. Ce mélange a été arrosé pour atteindre un taux d'humidité final de 60 à 70%.



Photo 1 : Plate forme du compostage.

3. Dimensions des andains

Pour faciliter le retournement manuel par la fourche, nous mettons en place les trois andains (piles) espacés de 1,5 m et afin d'éviter l'auto-entassement de ces piles, nous avons respecté les dimensions suivantes (photo 2) :

Les dimensions des trois andains sont les mêmes : longueur de la base de l'andain (L) de 335 à 350 cm, longueur du sommet (l) de 215 à 225 cm, largeur à la base (B) de 135 à 145 cm et hauteur (H) de 85 à 90 cm.



Photo 2 : Dimensions de l'andain.

4. Etude de l'effet du fumier et de l'azote sur le processus du compostage

Pour déclencher le processus de décomposition des matières organiques, il faut alimenter le mélange à composter en micro-organismes et en sources d'azote. Le fumier étant un substrat riche en microflore et en azote et, en même temps, une denrée rare et chère dans l'oasis, il est important de chercher la dose minimale du fumier qui permettra d'aboutir à un compost de bonne qualité. A côté du fumier, on a aussi étudié l'effet de l'azote ammoniacal et de l'urée qu'on a mélangé aux sous-produits du palmier dattier préparés précédemment selon les proportions présentées dans le tableau 1.

L'opération du compostage a été réalisée dans l'oasis de Figuig du 24 Septembre au 7 Décembre 2003.

Tableau 1: composition des andains de compostage

Andain	F1	F2	F3	F4	F5	Az	Ur	T
Sous-produits en m ³	1,8	1,75	1,65	1,45	1,1	2,2	2,2	2,2
Fumier en m ³	0,3	0,45	0,55	0,75	1,1	0	0	0
Azote ammoniacal en g	0	0	0	0	0	922	0	0
Urée en g	0	0	0	0	0	0	320	0

5. Etude de l'effet de l'aération

L'opération du compostage nécessite une dégradation aérobie, l'aération des andains est assurée par des retournements manuels à l'aide d'une pelle. Pour déterminer la fréquence optimale de retournement, nous avons étudié l'effet des fréquences suivantes sur le processus du compostage :

Du 1^{er} au 50^{ème} jour : l'andain I subit un retournement tous les deux jours, l'andain II un retournement tous les trois jours et l'andain III un retournement tous les cinq jours.

Au-delà du 50^{ème} jour du compostage, les trois andains subissent un retournement tous les cinq jours.

III. ETUDES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES

1. Echantillonnage

La méthode utilisée est la méthode de l'échantillonnage par quartage (AFNOR, 1999a). Elle consiste à effectuer une dizaine de prélèvements d'une façon uniforme sur l'ensemble de l'andain, à la surface et à différentes profondeurs, de façon à constituer un échantillon global qu'on homogénéise parfaitement. Ce mélange est divisé en quatre quartiers équivalents en figurant deux axes perpendiculaires pour éliminer deux quartiers opposés. Puis, on mélange les deux restants et on procède à nouveau à la division en quatre quartiers équivalents dont on éliminera cette fois les quartiers opposés selon la diagonale perpendiculaire à celle des quartiers précédemment éliminés. Les quartiers restants sont homogénéisés et constituent l'échantillon pour les différentes études au laboratoire (figure 1).

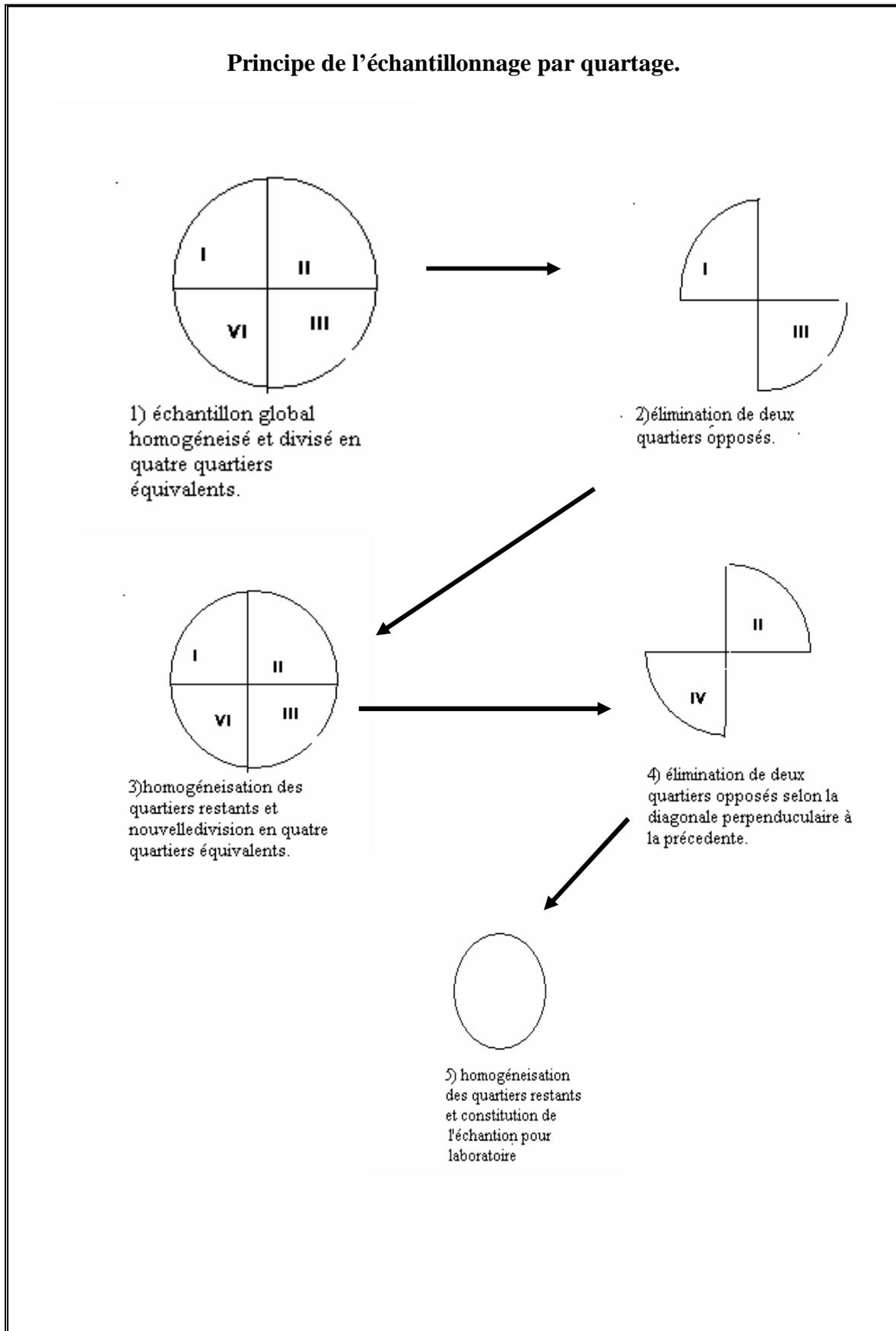


Figure 1 : Principe d'échantillonnage par quartage

2. Mesure des températures internes et externes des andains

Les températures internes et externes de chaque andain ont été relevées quotidiennement à la mi-journée à l'aide de deux thermomètres à sonde métallique de longueurs différentes : 15 et 60 cm (photo 3). Les résultats sont les moyennes de trois mesures successives à des profondeurs de 15 cm (externe) et 60 cm (interne) dans les deux côtés latéraux de l'andain.



Photo 3 : Thermomètres à sondes métalliques.

3. Mesure de la teneur en eau (AFNOR, 1999a)

Un échantillon d'environ 10 g (P1) de chaque andain a été placé dans une étuve portée à une température de 105 °C pendant 5 heures. L'échantillon a été pesé après refroidissement dans un dessiccateur (P2). La teneur, exprimée en pourcentage massique en eau, est alors déterminée à partir de la moyenne de trois essais.

$$\text{Teneur en eau (\% poids frais)} = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$$

Le prélèvement ne se fait que 2 à 5 h après arrosage pour que l'eau puisse drainer dans la totalité de l'andain. Dans le cas où l'humidité diminue, on procède à un arrosage et le lixiviat est remis à l'andain après chaque retournement.

Pour apprécier l'humidité du compost sur le terrain, on presse entre les mains un échantillon de compost prélevé au cœur de l'andain. Si l'eau suinte facilement, le compost est trop humide, par contre si l'eau humidifie la main sans suinter, le compost a un niveau acceptable d'humidité. Si la main n'est pas humidifiée, le compost nécessite un arrosage.

4. Mesure du pH

75 g de compost ont été mis en suspension dans 100 ml d'eau distillée (pH 6.4 et conductivité électrique 10 μ S/cm). Après agitation pendant 30 minutes et filtration à travers un tamis de 500 μ m de maille, les mesures de pH ont été effectuées par un pH-mètre (WTW pH521) sur le filtrat à température ambiante. Les résultats présentent la moyenne de trois mesures.

5. Mesure de la conductivité électrique

La conductivité électrique correspond à la concentration des solutés ionisables présents dans l'échantillon. Elle est exprimée en siemens par mètres (S/m) ou en millisiemens par centimètre (mS/cm).

La conductivité électrique correspond aussi à la concentration en éléments minéraux solubles dans le substrat. Elle est mesurée par un conductimètre (WTW LF 318) sur le même filtrat utilisé pour mesurer le pH.

Les résultats présentent la moyenne d'au moins trois mesures de la conductivité. Pour calculer la conductivité à 20°C, on applique la formule suivante :

Conductivité $E_{20^\circ\text{C}}$ = Conductivité E_T (1 + 0,025 ΔT) avec $\Delta T = 20 - T$

E_T : conductivité mesurée à température ambiante.

T : température ambiante.

6. Détermination de la population de *Fusarium Oxysporum* f.sp. *albedinis* au cours du compostage

Un échantillon de 75 g de chaque andain a été mis en suspension dans 100 ml d'eau distillée stérile. Après agitation à une température ambiante pendant une heure, la suspension est

filtrée et le filtrat obtenu est dilué successivement de 10 en 10. Des boîtes de pétri de 10 cm de diamètre contenant 15 ml du milieu solide stérile de KOMADA (annexe 1) (Komada, 1975) ont étéensemencées par 1 ml du filtrat dilué. Ces boîtes sont incubées à 27°C à l'obscurité pendant 72 heures, puis sous éclairage continu et à température ambiante pendant une semaine. L'identification de l'agent pathogène s'effectue en se basant sur ses caractéristiques morphologiques et microscopiques (mycélium fin, frisé, rasant) et leur pigmentation (Rose-saumon) (Sedra et Djerbi, 1984 ; Sedra, 1993 ; Djerbi et *al.*, 1984). Le dénombrement de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* est exprimé en nombre de colonies formées par gramme de matière sèche (CFU/g de matière sèche).

7. Détermination de la matière organique totale

La méthode par calcination est utilisée pour déterminer la matière organique totale (AFNOR, 1999a). Elle est calculée à partir de la teneur en cendres après calcination de compost sec à une température de 470 à 490°C pendant 6 heures. Conventionnellement, le pourcentage de carbone est égal à la moitié du pourcentage de la matière organique totale (AFNOR, 1999a).

$$\text{Pourcentage de la matière organique totale dans l'échantillon sec} = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$$

De même, on détermine la teneur en cendres selon la formule suivante :

$$\text{Pourcentage en cendres} = \frac{P2}{P1} \times 100$$

P1 : poids sec de l'échantillon

P2 : poids de l'échantillon après la calcination

On prend comme résultat la moyenne de trois déterminations.

8. Dosage de l'azote total kjeldahl

La teneur en azote total a été déterminée par la méthode de Kjeldahl (NTK) modifiée (AFNOR, 1999b). Une prise de 2 g de compost sec et broyée a été placée dans un matras de minéralisation contenant 4 ml d'un mélange des acides salicylique/sulfurique (25 g d'acide salicylique dans un litre d'acide sulfurique concentré (d =1,84)). L'ensemble a été bien mélangé puis laissé reposer. 0,5 g de thiosulfate de sodium ont été ajoutés à ce mélange puis chauffés sur un dispositif de minéralisation jusqu'à la disparition de la mousse. Après refroidissement du matras, 1,1 g d'un catalyseur (200 g de sulfate de potassium, 6 g de

sulfate de cuivre et 6 g de dioxyde de Titane) ont été ajoutés puis mélangés et chauffés à 380°C jusqu'à l'obtention d'un mélange clair. Le minéralisat obtenu a été récupéré par des rinçages successifs du matras avec l'eau distillée puis la distillation a été effectuée par entraînement à la vapeur en présence de NaOH (10 M) en quantité suffisante. Le distillat a été récupéré dans 5 ml d'acide borique (20 g/l) en présence de quelques gouttes d'indicateur coloré (0,02 g de rouge de méthyle, 0,1 g de vert de bromocrésol dans 100 ml d'éthanol). L'ammoniac contenu dans le distillat est titré par une solution d'acide sulfurique 0,01 mol/l (virage au rose vif). La teneur totale en azote (W_N), en milligramme par gramme de substrat a été calculée en sachant que 1 ml d' H_2SO_4 1N neutralise 14 mg d'Azote selon la formule suivante :

$$W_N = \frac{(V_1 - V_0) \times M_N \times [H^+]}{m}$$

V_1 : le volume en millilitres d'acide sulfurique (N/10) utilisé pour la titration de l'échantillon.

V_0 : le volume en millilitre d'acide sulfurique (N/10) utilisé dans l'essai à blanc.

M_N : la masse molaire de l'azote, en gramme par mole (= 14)

$[H^+]$: la concentration en H^+ de l'acide sulfurique en moles par litre.

m : la masse en gramme, de l'échantillon de compost sec et broyé.

9. Détermination de la granulométrie

La granulométrie est la proportion relative de répartition des particules dans différents intervalles de dimensions. Elle a été déterminée par le tamiseur (Retsch) portant des tamis à mailles carrées de 2 à 16 mm (Tamis-Tram en inox, Afnor NFX 11504) assemblés dans l'ordre croissant d'ouverture de maille et placés sur l'agitateur mécanique (machine à tamiser Retsch). La prise d'essai est placée sur le tamis supérieur et l'agitateur est mis en marche avec une amplitude de 60 durant 10 minutes après avoir mis en place le couvercle. Les quantités retenues sur chaque tamis et dans le réceptacle sont pesées avec 0,001 g de précision.

10. Dosage des cations et des éléments traces métalliques

Les cations (Ca, K, Mg, Na) et les éléments traces métalliques (Cr, Cu, Ni, Zn, Pb) ont été déterminés par absorption atomique selon la méthode adoptée par l'Agence Internationale de

l'Energie Atomique (AIEA). Une prise de 300 mg de compost mûr sec et broyé a été minéralisée à 100°C pendant 4 à 5 h dans une bombe de téflon (sous pression) contenant 4 ml d'acide nitrique pur. Après refroidissement, le minéralisât a été récupéré par des lavages successifs de la bombe avec de l'eau bidistillée jusqu'à un volume de 50 ml. Les différents éléments sont mesurés par absorption atomique.

11. Dosage du phosphore

La détermination de la teneur en phosphore (P) est effectuée après formation du complexe de l'ion orthophosphate avec le molybdate d'ammonium et le vanadate d'ammonium selon la méthode suivante :

Une prise d'essai de 2,5 g de compost sec et broyé a été introduite dans un creuset à incinération contenant 1 g de carbonate de calcium. Après 5 h d'incinération à 550°C, le résidu obtenu a été transféré dans un bécher de 250 ml, auquel on a ajouté 20 ml d'eau distillée et un volume d'une solution d'acide chlorhydrique 6N jusqu'à cessation d'effervescence (environ 10 ml d'HCl). Le bécher a été placé, par la suite, dans un chauffe ballon pour évaporation à sec. Après refroidissement, le résidu a été repris dans 10 ml d'acide nitrique (1M) et porté à ébullition durant 5 min. Le liquide a été transvasé dans une fiole jaugée de 500 ml tout en rinçant le bécher plusieurs fois à l'eau distillée chaude jusqu'au trait de jauge de la fiole. La solution obtenue a été homogénéisée puis filtrée à travers un filtre pour analyse qualitative exempte de cendres (Macherey-Nagel). 10 ml du réactif vanado-molybdique (annexe 2) ont été ajoutés dans un tube contenant 10 ml de filtrat, puis laissés à température ambiante pendant 10 min après homogénéisation. La lecture a été effectuée dans un spectrophotomètre à une longueur d'onde de 430 nm. La solution obtenue par addition de 10 ml de réactif vanado-molybdique à 10 ml d'eau distillée a été utilisée comme un blanc.

Les solutions de la gamme étalon contenant respectivement, 5, 10, 20, 30 et 40 µg de P par ml ont été préparées à partir d'une solution mère de KH_2PO_4 1 g/l.

La teneur en phosphore total est exprimée en pourcentage de la masse de produit selon la formule suivant :

$$\%P = \frac{X \cdot V \cdot F \cdot 100}{m \cdot 10^6}$$

X : teneur en phosphore en µg/ml de l'essai déterminée à partir de la courbe étalon.

V : volume de récupération de résidu en ml

F : facteur de dilution

m : masse de la prise d'essai en g

Les résultats obtenus sont la moyenne d'au moins trois répétitions.

12. Paramètres physiques

La capacité de rétention en eau, la masse volumique apparente, la masse volumique réelle et la porosité totale ont été déterminées selon la méthode de Gras et Aguis (1981). Un cylindre d'un volume (V) de 250 ml fermé à sa base par une toile de nylon a été rempli par le substrat comprimé sous une pression de 50 g /cm². Le tube a été immergé dans un bain d'eau pendant 48 heures, puis a subi 2 heures d'égouttage sur tamis suspendu et 5 minutes sur un matelas de papier filtre. L'échantillon est pesé avant (P) et après séchage à 105°C jusqu'à obtention d'une masse constante (P'). On déduit :

12.1. Capacité de rétention en eau (CRE)

La CRE est le rapport entre la teneur en eau du substrat et la pression matricielle d'un échantillon du substrat donné. Elle est déterminée selon la formule suivante :

$$CRE = \frac{P - P'}{V} \times 1000$$

12.2. La masse volumique apparente (ra)

La masse volumique apparente est le rapport entre la masse de l'échantillon sec (P') et le volume apparent du substrat qu'il occupe (V) (Dartigues, 1981).

$$\rho_a = \frac{P'}{V} \text{ en g / l}$$

12.3. La masse volumique réelle (rr)

La masse volumique réelle est le poids volumique réel de la matière constitutive de substrat. Elle est mesurée par un pycnomètre à air ou à eau. Toutefois, elle peut être évaluée selon l'équation suivante :

$$\rho_r = \frac{100}{\frac{MO}{1500} + \frac{100 - MO}{2650}}$$

MO : la teneur en matière organique en % du poids sec.

1500 : la masse volumique moyenne de la matière organique sèche, en g/l.

2650 : la masse volumique moyenne de la matière minérale sèche en g/l.

12.4. Porosité totale

La porosité totale est le volume des espaces vides occupés par le gaz et les liquides par rapport au volume d'encombrement total (Rivières, 1980).

$$\text{Porosité en \% de volume apparent} = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) \times 100 \quad (\text{Gras et Aguis., 1982}).$$

IV. TEST DE MATURITE RESPIROMETRIQUE

La maturité respirométrique est évaluée par la production de CO₂ d'un échantillon de compost mûr incubé dans une enceinte thermostatée (28°C) au bout de 24h, 48h, 96h et 168h. L'indice de minéralisation correspond au rapport de CO₂ cumulé sur la teneur en carbone du produit (C-CO₂) (Morel et al., 1986). Cet indice permet de comparer la stabilité de différents matériaux indépendamment de leur origine et de leur processus.

V. L'INDICE DE STABILITE BIOLOGIQUE (ISB)

L'indice de stabilité biologique a pour objectif l'évaluation de la stabilité dans le sol de la fraction carbonée des matières fertilisantes organiques. Il exprime le pourcentage de la matière organique d'un amendement qui se transforme en humus stable (Van Soest, 1963 ; Van Soest, Win, 1968). Cet indice est déterminé après évaluation de différentes fractions de la matière organique qui résistent à la dégradation (substances solubles (SOL), hemicellulose (HEM), cellulose brute (CEW), lignine + cutine (LIC) et il est déterminé selon la formule suivante :

$$\text{ISB} = 2,112 - (0,02009 \times \text{SOL}) - (0,02378 \times \text{HEM}) + (0,0084 \times \text{LIC}) - (0,02216 \times \text{CEW}).$$

VI. TEST DE PHYTOTOXICITE

Le test consiste à faire germer dans des boîtes de pétri des graines de cresson (*Lepidium sativum*) en contact avec l'extrait hydrosoluble de compost. Cet extrait a été obtenu à partir d'un mélange de 4 g de compost sec et broyé et de 60 ml d'eau distillée stérile. Ce mélange a été agité pendant 30 minutes puis centrifugé à 800 g pendant 20 minutes, le surnageant a été filtré pour obtenir l'extrait hydrosoluble du compost. La germination des graines a été

réalisée dans des boîtes de pétri stériles contenant du papier filtre imbibé de l'extrait du compost ainsi préparé. Après 48 heures d'incubation à 28°C, les taux de germination et d'élongation racinaire sont mesurés par rapport à un témoin conduit à l'eau distillée (Zuconni et al., 1981) et l'indice de germination a été déterminé à partir de la formule suivante:

$$\text{Indice de germination} = \frac{\% \text{ des graines germées} \times \% \text{ de la longueur des racicules}}{100}$$

VII. TESTS AGRONOMIQUES

1. Etude de la croissance des tomates en chambre de culture

Il s'agit d'étudier l'effet de différentes concentrations de compost mûr sur la croissance des plantules de tomate (*Lycopersicon esculentum*) (Variété Saint Pierre produite par Griffaton). Cette croissance a été évaluée par le comptage du nombre de feuilles et la détermination des poids frais et sec de la partie aérienne des plantes après six semaines de croissance.

1.1. Préparation des mélanges

Dans cette expérience, les mélanges suivants ont été testés :

- compost et vermiculite (V/V) : **100% Compost**
- compost, tourbe et vermiculite (V/V/2V) : **50% Compost**
- tourbe et vermiculite (V/V) : **100% Tourbe.**

1.2. Préparation des plantules de tomates

Les semis ont été faits sur un plateau poreux rempli de vermiculite stérile (autoclavés à 120°C pendant une heure). Ce plateau a été placé dans une bassine contenant de l'eau distillée stérile pour assurer l'irrigation. L'incubation a été effectuée dans une chambre de culture à 25 ± 2°C jusqu'à l'obtention des plants à 2 feuilles (12 jours).

1.3. Plantation des plantules

Les plantules de tomates ainsi préparées sont plantées dans des pots d'une capacité de 200 ml contenant les différents mélanges de substrats. Ces pots sont introduits dans des bassines contenant de l'eau et les cultures ont été conduites en chambre de culture à 25 ± 2°C pendant six semaines (6 h d'obscurité et 18 h d'éclairage). Dix-huit répétitions ont été utilisées dans cette étude.

2. Essai en plein champ

Dans cette étude, nous avons comparé l'effet de l'apport de différentes proportions de compost mûr par apport au témoin (sol sans amendement), sur la croissance et la production des plantes de courgette (*Cucurbita pepo*) variété « HYBRID Courgette ». L'essai a été installé selon la méthode des blocs aléatoires à trois répétitions dans une parcelle homogène d'une superficie de 56 m² (figure 2).

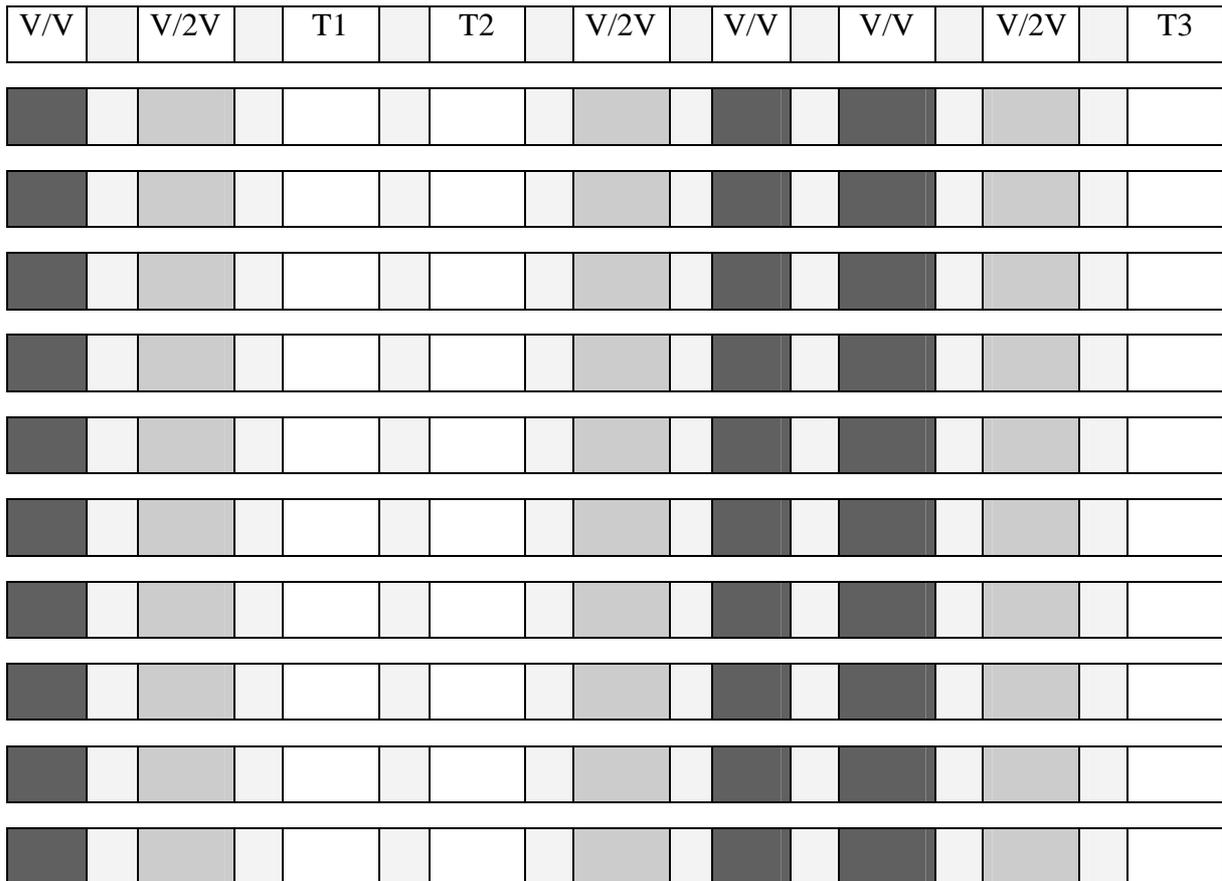


Figure 2: Dispositif expérimental pour l'essai de courgettes en plein champ.

V/V : mélange compost/sol (V/V) ; V/2V : mélange compost/sol (V/2V) ; T : 100% Sol

Après préparation du sol (un sous-solage ou labour profond de 20 à 25 cm suivi d'un cover-crochage afin d'ameublir le sol), on a réalisé des trous de 30 cm de profondeur dans lesquels on a introduit les mélanges étudiés (mélange compost/ terre : V/2V et V/V). Pour le témoin on a utilisé le sol sans amendement.

Le semis a été réalisé le 26 Mars 2004 et la récolte a été effectuée du 29 Mai au 26 Juin 2004. L'irrigation est faite tous les 2 jours pendant une heure par le système d'irrigation localisée « goutte à goutte ».

Les observations portent sur la vitesse de germination et sur la production des plantes de courgette dans les différents traitements étudiés.

VIII. ETUDE DE L'EFFET SUPPRESSIF DU COMPOST MUR SUR *FUSARIUM OXYSPORUM* F.SP. *ALBEDINIS*

1. Isolement de la souche de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*

La souche de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* utilisée dans l'ensemble de cette étude a été isolée à partir du rachis d'une palme contaminée et conservée dans l'oxyde d'ammonium selon la méthode de Lock et Colhoun (1974). Cette méthode a été appliquée aussi par Sedra en 1985 pour le *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans le talc. Elle permet de quantifier les apports d'inoculum dans le sol ou dans le substrat sans y créer des modifications physiques ou microbiologiques (Rouxel, 1978). De même, elle assure une bonne répartition de l'inoculum dans le sol (Alabouvette et al., 1982).

La souche de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* a été isolée à partir du rachis d'une palme contaminée du cultivar Bouffagousse attaqué par la fusariose vasculaire. Des fragments de 0,5 cm³ environ sont désinfectés par l'éthanol suivi d'un flambage. Ces fragments sont ensuite déposés sur PDA et incubés pendant une semaine à 27°C puis 2 à 4 jours sous éclairage naturel à température ambiante. A partir de cette culture, on a réalisé une suspension, puis des dilutions pour avoir des colonies bien séparées. On a prélevé une colonie qu'on a mise en suspension, puis des boîtes de pétri contenant PDA sont ensemencées par étalement à la surface de la gélose d'un ml de cette suspension. Les cultures sont incubées à 27°C pendant trois semaines et les propagules du parasite sont récoltés par grattage et lavage de la surface du milieu de chaque boîte par 5 ml d'eau distillée stérile. L'ensemble est placé dans un tube conique puis centrifugé pendant 2 à 4 min à 800 g pour éliminer les fragments de gélose et de mycélium. Le surnageant ainsi obtenu est incorporé dans l'oxyde d'ammonium stérile à raison de 1ml par 5 g d'oxyde d'ammonium, puis soumis à un dessèchement à 28°C dans des erlens stérils pendant 10 à 15 jours afin de favoriser la transformation des conidies en chlamydospores. La concentration d'inoculum dans l'oxyde d'ammonium a été déterminée en utilisant la technique de suspension dilution et ensemencement sur les milieux PDA et Komada.

2. Eude *in vivo* de l'effet de compost sur *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*

Pour étudier l'effet de quelques concentrations de compost mûr sur le comportement de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*, nous avons suivi, *in vivo* :

- § l'effet protecteur du compost exercé sur des plantules du palmier dattier issues des graines et sur des vitro-plants en présence de l'agent pathogène;
- § la dynamique de développement du parasite dans différents mélanges de substrats en absence de la plante hôte.

2.1. Suivre du comportement de *Foa* dans des substrats cultivés

2.1.1. Essai sur les plantules issues des graines

a. Préparation des plantules

Nous avons utilisé dans cette étude des plantules issues des graines du fruit d'une variété sensible (Boufagousse Gharasse). Ces graines sont désinfectées dans l'eau de javel (10%) pendant 10 minutes puis lavées abondamment à l'eau du robinet et trempées dans l'eau bouillante et laissées se refroidir au repos pendant 6 heures. La germination de ces graines a été effectuée à 27°C dans la tourbe humidifiée jusqu'à l'obtention des plantules avec une seule feuille.

b. Préparation des substrats

Dans ce test nous avons utilisé deux types de substrat:

S1 : mélange de 9 V Tourbe et 1V vermiculite

S2 : mélange 4,5 V tourbe /4,5 V compost 1V vermiculite.

Avant d'être traités, ces deux substrats ont été humidifiés et aérés en les mélangeant tous les deux jours pendant deux semaines.

c. Inoculation des substrats

Les substrats préparés sont infestés par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* conservé dans l'oxyde d'ammonium à raison de 10^6 UFC par ml de substrat. Pour le témoin, on a utilisé les substrats non inoculés. 10 répétitions ont été effectuées pour chaque type de culture.

2.1.2. Essai sur les vitro plants

a. Préparation des substrats

Les mélanges des substrats utilisés dans cette expérimentation sont :

S1 : 100% sol

S2 : mélange sol / compost (V/V)

S3 : mélange sol/ compost (2V/V)

b. Préparation d'inoculum

Des erlens contenant le milieu Czapeck (annexe 6) stérile sontensemencés par la souche Foa conservée dans l'oxyde d'ammonium. Les cultures sont placées dans un bain-marie ($27\pm 2^{\circ}\text{C}$) sous agitation (60 tours/min) pendant 10 jours. Les cultures sont ensuite filtrées pour éliminer les mycéliums et le filtrat obtenu est ensuite centrifugé à 2000 g à 4°C pendant 15 minutes. Le culot a été lavé 2 à 3 fois puis récupéré dans 2 litres d'eau distillée stérile. La concentration de la suspension a été estimée par comptage des cellules sur la cellule malassez et des colonies de (Foa) sur les milieux solide PDA et Komada.

c. Matériel végétal

Les vitro-plants utilisés dans ce test sont ceux des variétés de Bouskri, Agguelid, et Ennajda multipliés dans le domaine royal de Meknes.

d. Culture des vitro plants

Pour chaque variété de vitro-plant, nous avons suivi deux cultures : une culture témoin (non inoculée par le champignon pathogène) et une culture test (inoculée à raison de 10^5 UFC/g de substrat sec). 10 répétitions ont été effectuées pour chaque traitement.

Les vitro-plants dégagés de leurs substrats d'origine, ont été replantés dans les mélanges de substrats préparés précédemment dans des mottes de 11 litres et placées sous une serre en plastique selon le dispositif expérimental présenté dans la photo (4). L'irrigation a été effectuée autant que nécessaire.

e. Dénombrement de la population de *Fusarium oxysporum* f.sp. albedinis dans les différentes cultures

La densité de Foa. est estimée par la méthode de suspension dilution. Après chaque mois de culture, on prélève à partir de 3 à 4 sachets de mêmes substrats et de même variété un poids de 30 g par la méthode de carottage. Les prélèvements sont effectués entre 8 et 18 cm de profondeur. Les 30 g ainsi prélevés, sont mis en suspension dans 100 ml d'eau distillée stérile et agités pendant 30 minutes. Des boîtes de pétri contenant 20 ml du milieu de culture gélosé KOMADA (annexe 1) sontensemencées par 1 ml de la suspension puis incubées à

27°C pendant 5 jours à l'obscurité puis pendant 5 jours sous éclairage naturel à température ambiante.



Photo 4 : Essai de suivi de l'effet de compost dans la protection des vitro plants vis-à-vis de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.

f. Isolement du parasite à partir des rejets morts

Pour confirmer les attaques dues au *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* la recherche du parasite a été effectuée sur les plantules mortes. On coupe 3 palmes de chaque plantule sur lesquelles on prélève des morceaux qu'on place sur milieu PDA. Ces cultures sont incubées à 27°C pendant 6 jours puis sous éclairage naturel pendant 4 à 6 jours. Pour confirmer ces résultats, six répétitions ont été effectuées pour chaque plantule.

2.2. Suivre du comportement de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans des substrats non cultivés

2.2.1. Sol utilisé

Le sol utilisé provient d'un verger phoénicicole contaminé par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* situé dans la palmeraie de Figuig (Ksar Zénaga, la zone de la palmeraie de

Berkoukess). Le prélèvement a été effectué à 2 m du pied attaqué par la fusariose vasculaire à une profondeur située entre 20 et 60 cm.

2.2.2. Préparation des substrats

Après tamisage du sol à travers un tamis à mailles de 2000 μm , un volume de 400 ml de différents mélanges de substrats (sol, compost, mélange sol/compost v/v et sol/compost 2v/v) sont introduits dans des pots en verre de 1000 ml. Ces pots ont été répartis en deux lots :

- le premier n'a subi aucun traitement
- le deuxième a subi un autoclavage pendant une heure à 120°C, l'opération est effectuée trois fois toutes les 24 heures;

Les différents substrats ainsi préparés sont laissés au repos pour reprendre la température ambiante puis inoculés avec *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* à raison de 10^4 UFC/g de substrat sec, puis humidifiés avec de l'eau distillée stérile afin d'obtenir un substrat homogène et non compact. Ce test a été conduit dans une chambre de culture à 27 ± 3 °C. Pour les témoins, nous avons utilisé les différents mélanges de substrats sans inoculation.

Pour étudier le comportement de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans les différents substrats, nous avons suivi la densité de ce champignon pendant 6 mois. Le dénombrement de Foa a été effectué selon la méthode de suspension dilution et ensemencement sur milieu KOMADA (annexe 1) (Komada, 1975). L'identification de l'agent pathogène a été effectuée en se basant sur ses caractéristiques morphologiques et microscopiques (mycélium fin, frisé, rasant) et leur pigmentation (Rose saumon) (Sedra, 1993). Le dénombrement de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* est exprimé en nombre de colonies formées par gramme de matière sèche (CFU/g de matière sèche). Les résultats obtenus sont la moyenne de trois répétitions.

3. Etude *in vitro* de l'effet de compost sur *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*

Pour étudier l'effet suppressif de notre compost, nous avons cherché dans la flore du compost mûr des micro-organismes montrant un effet antagoniste vis-à-vis de l'agent pathogène *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. Nous avons commencé par faire les travaux de criblage qui consistent à isoler des micro-organismes présentant des capacités d'inhibition de la croissance de l'agent pathogène.

Le pouvoir d'inhibition de la croissance du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* par les micro-organismes ainsi isolés à partir du compost a été étudié par deux méthodes différentes :

- § la technique de cultures opposées
- § la technique de l'étude de l'effet de toxines libérées dans le milieu de culture par le microorganisme antagoniste isolé.

3.1. Isolement de la microflore de compost mûr

La population des bactéries et des champignons du compost a été déterminée en utilisant la technique de suspension dilution. Le dénombrement a été effectué dans le milieu PCA (Annexe 3). Pour l'isolement, on a utilisé le milieu PDA (Annexe 4) ajusté à un pH=4 pour les champignons et le milieu gélosé à base de peptone et d'extrait de levure (annexe 5) pour les bactéries. L'incubation a été effectuée à 27°C jusqu'au développement des micro-organismes sous forme de colonies isolées.

3.2. Purification des isolats

Ces colonies isolées sont repiquées chacune dans trois boîtes de pétri contenant 25 ml de PDA, les boîtes sont incubées à 27°C pendant 4 à 8 jours (selon la vitesse de croissance des micro-organismes isolés) puis sous éclairage naturel pendant 5 à 8 jours.

L'identification de la flore fongique a été faite à l'aide de clés de Barnett et Hunter (1972). Les bactéries sont déterminées selon la technique de Gram et les critères morphologiques.

3.3. Test d'antibiose

La technique utilisée est inspirée de celle des cultures opposées, préconisées par Patel et Brown (1969). Son principe est basé sur la confrontation "*in vitro*" du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* avec chaque microorganisme ainsi isolé à partir du compost. Ces confrontations sont réalisées sur milieu PDA non acidifié selon la méthode suivante : une pastille de 5 mm de diamètre, prélevée sur des cultures de chaque microorganisme à tester, est placée à 50 mm de celle de culture du champignon pathogène (Foa). Pour le témoin, la souche du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* est mise en culture seule. Les cultures sont incubées à 27°C pendant 10 jours puis sous éclairage pendant 5 jours. Les notations sont faites par mesure du diamètre de la colonie du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. Chaque traitement a été réalisé en 3 répétitions.

$$\text{Le taux d'inhibition} = \frac{D_0 - D_x}{D_0} \times 100$$

D_0 : diamètre de la croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans le témoin.

D_x : diamètre de la croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* confronté au micro-organisme isolé du compost.

3.4. Action du filtrat des milieux de culture des micro-organismes antagonistes sur la croissance mycélienne du Fusarium oxysporum f.sp. albedinis (F.o.a)

Après 10 jours de culture des micro-organismes ayant montré un effet antagoniste en milieu liquide Czapeck (annexe 6), les cellules en suspension sont séparées du milieu de culture par centrifugation à 1000 g à 4°C pendant 15 minutes. Le surnageant obtenu est ensuite filtré, dans des conditions stériles, à travers un filtre de 0,22 µm (Acrodisc Syringe Filter).

Dans des boîtes de pétri, nous avons réparti différents volumes de filtrat (1, 2 et 3 ml) puis complété à 10 ml par le milieu PDA maintenu fluide (40 à 45°C) tout en agitant. Après solidification du milieu, on a placé au centre de chaque boîte une pastille de 5 mm de diamètre prélevée dans une culture de Foa. Les boîtes témoins reçoivent les mêmes volumes du milieu Czapek stérile. Les cultures sont incubées dans l'étuve thermostatée réglée à 27±3°C pendant 10 jours.

$$\text{Le taux d'inhibition} = \frac{D_0 - D_x}{D_0} \times 100$$

D_0 : diamètre de la croissance mycélienne du Foa dans le témoin.

D_x : diamètre de la croissance mycélienne du Foa en présence d'un volume de filtrat de culture d'un micro-organisme isolé du compost.

IX. Analyse statistique

Les données des essais de croissance de tomate, du palmier dattier et de courgette ont été comparées par le "test t de student" en utilisant le logiciel SPSS 10.0.

OBJECTIFS DU TRAVAIL

Notre travail a comme objectifs la valorisation des sous-produits du palmier dattier par compostage en cherchant les conditions optimales pour obtenir un compost mûr indemne de l'agent pathogène, stable et sans effet nocif sur l'agriculture et qui pourra assurer la protection du palmier dattier contre les maladies telluriques et surtout la fusariose vasculaire (Bayoud).

Pour atteindre ces objectifs, nous avons :

- Étudié l'effet de différentes sources d'azote telles que l'azote ammoniacal, l'urée et les différentes concentrations de fumier bovin, sur le processus de compostage de ces produits en suivant l'évolution de quelques paramètres physico-chimiques et microbiologiques importants tels que la température, le pH, la conductivité électrique, l'humidité et surtout la densité de l'agent pathogène (*Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*).
 - étudié l'effet de l'aération sur le processus de compostage de ces produits en suivant toujours l'évolution des mêmes paramètres physico-chimiques et microbiologiques.
 - évalué la qualité du compost des sous-produits du palmier dattier en déterminant les paramètres physico-chimiques (granulométrie, C/N, rétention en eau, pH, conductivité), biologiques (indice de stabilité biologique, tests de maturité respirométrique, test de germination) et agronomiques du compost mûr (effets sur la croissance de plante de tomate dans la chambre de culture).
 - déterminé l'efficacité de compost mûr des sous-produits du palmier dattier dans la suppression de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* et la protection des palmiers dattiers contre la fusariose vasculaire.
-
-

RESULTATS
ET
DISCUSSIONS

CHAPITRE I

ETUDE DU PROCESSUS DU

COMPOSTAGE

INTRODUCTION

Le développement économique national, l'élévation générale du niveau de vie due essentiellement au flux d'argent généré par l'émigration (Bencherifa et Popp, 1990), l'amélioration des moyens et infrastructure de communications incitent les populations oasiennes à changer leur mode de vie. Les sous-produits du palmier dattier, utilisés, jadis, pour la vie quotidienne de l'oasien, sont abandonnés au profit des produits manufacturés. Ceci entraîne l'accumulation au fil des années, d'une biomasse importante faisant apparaître des points noirs de pollution dans les palmeraies. La décomposition de cette biomasse, dont une partie est contaminée par l'agent responsable du Bayoud, constitue un vecteur de propagation de la maladie et une source de l'alimentation du sol en champignon pathogène. Ces foyers sont souvent, des niches des rongeurs, ravageurs des récoltes agricoles et des abris pour des animaux dangereux.

Pour atténuer la gravité de ce problème, on peut envisager le recyclage de ces sous-produits pour une réutilisation bénéfique. Le compostage est la technique la plus intéressante pour la valorisation de ces matières organiques. Ce processus de fermentation aérobie aboutit à la formation d'un compost, facteur de protection, de stabilité et de fertilité du sol (Haug 1993 ; Sela et *al.* 1998). L'utilisation de ce compost, comme amendement organique, pourra remédier aux problèmes de l'appauvrissement et de la salinisation des sols du milieu oasien et contribuer à la lutte contre des maladies des plantes. Plusieurs auteurs ont montré l'importance de l'utilisation du compost dans le contrôle et la réduction des maladies des cultures agricoles (Chung et Hoitink, 1990 ; De Brito Alvarez et al., 1995 ; Hoitink et Fahy, 1986 ; Volland et Epstein, 1994 ; Haug, 1993 ; Hoitink et Grebus, 1994).

L'intégration de toutes les mesures de lutte permettant d'éradiquer ou de réduire le champignon pathogène dans le sol est nécessaire pour assurer une protection des variétés nobles, sensibles au *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* et menacées de disparition (Tantaoui, 1993). Le ramassage des sous-produits du palmier dattier pour alimenter l'opération du compostage contribue à l'assainissement des parcelles et à la lutte contre la fusariose vasculaire en limitant la propagation du champignon pathogène par les sous-produits contaminés en décomposition. Plusieurs travaux de recherche ont montré que les micro-organismes pathogènes qui parasitent les déchets organiques à composter peuvent être éliminés au cours du processus du compostage par antagonisme (Knoll, 1961 ; Phae et Shoda, 1990), toxicité de certains composés formés durant la décomposition des matériaux,

et/ou par la chaleur dégagée au cours de la phase thermophile du compostage (Pera et Calvet, 1989 ; Kuter et al., 1985 ; Bollen, 1985 ; Duval, 1992).

Dans la palmeraie de l'oasis de Figuig, les palmiers dattiers en nombre de 190000, génèrent environ 8 000 tonnes de sous-produits chaque année. Cette biomasse, importante pour une palmeraie de 700 hectares, pose des problèmes écologiques et phytosanitaires (Hakkou et Bouakka, 2004). La valorisation de ces sous-produits par compostage pourra contribuer à résoudre ces problèmes.

Les sous-produits du palmier dattier ne possèdent pas la qualité requise pour un compostage. En effet, le rapport C/N de ces sous-produits est trop élevé, il est de l'ordre de 115, alors que le rapport C/N idéal qui garantit un bon démarrage du compostage et son déroulement optimal doit être situé entre 25 et 40 (Bagstam, 1977; Willson, 1989; Sadaka, et El. Taweel, 2003). D'où le recours à la recherche d'une source d'azote afin d'équilibrer ce rapport C/N et d'obtenir un compost hygiénisé et de bonne qualité agronomique.

Dans le compost, les micro-organismes ont besoin de l'azote, du phosphore, du potassium et des oligo-éléments et exigent du carbone organique comme source d'énergie. Les besoins azotés du compostage sont fonction de la teneur en matériaux carbonés facilement biodégradables. Pour les teneurs en carbone organique total qui varient peu autour de 50% de la matière sèche (45 à 55%), les teneurs optimales d'azote sont de 0,7% pour les substrats les plus difficilement biodégradables et de 2% pour les substrats les plus dégradables (Mustin, 1987).

- Un substrat riche en carbone dégradable (déchet sucré) aura un C/N optimum bas. On pourra donc, avec profit, ajouter de l'azote, de préférence sous forme organique (urée, déchets azotés).
- Un substrat riche en carbone peu dégradable (résidus ligno-cellulosiques) aura un C/N optimum plus élevé. On pourra se contenter de rajouter des quantités limitées d'azote sous forme organique sans pour autant vouloir atteindre un C/N de 30.

Le compostage est un procédé contrôlé, la maîtrise des conditions optimales aboutissant à l'obtention d'un produit de qualité est indispensable. Le substrat est l'un des plus importants facteurs auquel sont adjoints d'autres facteurs comme l'aération et le taux d'humidité.

Dans ce chapitre, nous étudierons l'effet des différentes sources d'azote et des fréquences de retournement sur le processus de compostage des sous-produits du palmier dattier contaminés par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* (Agent causal de la fusariose vasculaire du palmier dattier). Nous suivrons l'évolution de quelques paramètres physico-chimiques et

microbiologiques importants (pH, températures, humidité, rapport C/N, densité de l'agent pathogène *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*...) pour une bonne décomposition des matières organiques et surtout pour l'hygiénisation du compost par élimination de l'agent pathogène.

RESULTATS

A. EFFET DES DIFFERENTES SOURCES D'AZOTE SUR LE PROCESSUS DU COMPOSTAGE

1. Evolution du pH et de la conductivité électrique au cours du compostage

Les mesures du pH et de la conductivité électrique ont été effectuées avant chaque retournement le long de l'opération de compostage. Le tableau (I.1) montre qu'au cours du processus du compostage et quel que soit le taux du fumier ou de l'azote dans les andains, le pH reste stable et relativement basique (entre 8,2 et 8,7) dans tous les andains, mais légèrement supérieur à celui de l'andain témoin (7,26 à 7,42).

A l'inverse du pH, la conductivité électrique chute au cours de l'opération du compostage dans tous les andains (tableau I.2). Cette diminution est moins prononcée dans l'andain témoin (17%) que dans les autres andains (25 à 30%).

L'ajout des sources d'azote a augmenté la conductivité du mélange initial. Pour les andains qui contiennent le fumier, la conductivité électrique augmente avec l'augmentation de la quantité du fumier apporté. Ainsi, la conductivité du produit fini dépend étroitement de celle du mélange initial.

Tableau I.1 : Evolution du pH au cours du processus de compostage

	Jour du prélèvement						
	1 ^{er}	7 ^{ème}	15 ^{ème}	25 ^{ème}	35 ^{ème}	50 ^{ème}	75 ^{ème}
T	7,29 ± 0,04	7,26 ± 0,06	7,34 ± 0,09	7,42 ± 0,06	7,37 ± 0,12	7,42 ± 0,14	7,33 ± 0,07
Ur	8,47 ± 0,12	8,52 ± 0,17	8,73 ± 0,13	8,47 ± 0,09	8,38 ± 0,15	8,40 ± 0,12	8,45 ± 0,11
Az	8,61 ± 0,13	8,67 ± 0,11	8,70 ± 0,14	8,70 ± 0,11	8,55 ± 0,17	8,39 ± 0,21	8,51 ± 0,16
F1	8,70 ± 0,12	8,65 ± 0,11	8,64 ± 0,17	8,52 ± 0,10	8,55 ± 0,16	8,42 ± 0,16	8,51 ± 0,18
F2	8,63 ± 0,15	8,60 ± 0,11	8,59 ± 0,15	8,22 ± 0,13	8,18 ± 0,11	8,33 ± 0,13	8,35 ± 0,14
F3	8,44 ± 0,10	8,50 ± 0,13	8,52 ± 0,13	8,24 ± 0,11	8,18 ± 0,16	8,29 ± 0,20	8,44 ± 0,14
F4	8,53 ± 0,12	8,53 ± 0,17	8,34 ± 0,17	8,41 ± 0,14	8,29 ± 0,15	8,33 ± 0,18	8,27 ± 0,17
F5	8,37 ± 0,11	8,61 ± 0,14	8,61 ± 0,13	8,58 ± 0,12	8,51 ± 0,14	8,40 ± 0,16	8,26 ± 0,14

T : Témoin sans aucun additif ; Ur : 320 g d'urée + 2,2 m³ du mélange ; Az : 922 g d'azote ammoniacal + 2,2 m³ du mélange ; F1 : 0,3 m³ du fumier + 1,8 m³ du mélange ; F2 : 0,45 m³ du fumier + 1,75 m³ du mélange ; F3 : 0,55 m³ du fumier + 1,65 m³ du mélanges ; F4 : 0,75 m³ du fumier + 1,45 m³ du mélange ; F5 : 1,1 m³ du fumier + 1,1 m³ du mélange.

Tableau I.2 : Evolution de la conductivité électrique au cours du processus de compostage

	Jour du prélèvement						
	1 ^{er}	7 ^{ème}	15 ^{ème}	25 ^{ème}	35 ^{ème}	50 ^{ème}	75 ^{ème}
T	7,90 ± 0,13	7,70 ± 0,09	7,63 ± 0,06	7,58 ± 0,06	7,56 ± 0,04	7,02 ± 0,03	6,52 ± 0,04
Ur	9,28 ± 0,05	9,36 ± 0,04	9,23 ± 0,05	6,75 ± 0,08	6,97 ± 0,11	7,02 ± 0,07	6,91 ± 0,03
Az	9,51 ± 0,07	9,38 ± 0,03	8,88 ± 0,03	7,00 ± 0,05	8,62 ± 0,10	7,55 ± 0,07	6,95 ± 0,04
F1	8,32 ± 0,03	8,58 ± 0,05	7,91 ± 0,03	6,87 ± 0,07	7,00 ± 0,08	7,05 ± 0,03	5,68 ± 0,06
F2	8,52 ± 0,07	8,02 ± 0,04	8,51 ± 0,07	7,63 ± 0,03	7,01 ± 0,09	7,10 ± 0,04	5,98 ± 0,04
F3	8,44 ± 0,04	7,52 ± 0,06	8,09 ± 0,04	7,08 ± 0,09	7,00 ± 0,06	6,65 ± 0,02	6,09 ± 0,07
F4	9,01 ± 0,06	9,33 ± 0,03	8,92 ± 0,05	7,76 ± 0,08	6,71 ± 0,06	6,69 ± 0,04	6,50 ± 0,06
F5	9,48 ± 0,04	8,53 ± 0,03	8,89 ± 0,06	8,02 ± 0,09	8,04 ± 0,05	7,98 ± 0,03	7,00 ± 0,06

T : Témoin sans aucun additif ; **Ur** : 320 g d'urée + 2,2 m³ du mélange ; **Az** : 922 g d'azote ammoniacal + 2,2 m³ du mélange ; **F1** : 0,3 m³ du fumier + 1,8 m³ du mélange ; **F2** : 0,45 m³ du fumier + 1,75 m³ du mélange ; **F3** : 0,55 m³ du fumier + 1,65 m³ du mélanges ; **F4** : 0,75 m³ du fumier + 1,45 m³ du mélange ; **F5** : 1,1 m³ du fumier + 1,1 m³ du mélange.

2. Evolution des températures internes et externes des andains

La présence du fumier dans les andains accélère le processus de compostage. L'évolution des températures internes et externes dans les différents andains dépend du volume du fumier ajouté au mélange. Une phase mésophile, qui se caractérise par une augmentation rapide de la température qui atteint des valeurs maximales pendant la première semaine de compostage. Cette phase est suivie d'une période de 25 jours pendant laquelle la température reste élevée entre 50 et 70°C pour les andains riches en fumier (F3, F4 et F5) et entre 40 et 60°C pour l'andain F2. Par contre l'andain F1, le moins riche en fumier, présente des températures moins élevées (40 à 45°C) pour une période d'une semaine (figure I.1). L'andain composté sans aucun additif (T) n'atteint qu'une température modeste d'environ 35°C, l'ajout des composés azotés; l'urée (Ur) ou l'azote ammoniacal (Az) n'a rien changé dans l'évolution des températures internes (figure I.3).

Les variations brusques de températures observées pendant les différentes phases sont dues principalement aux retournements et, dans une certaine mesure, aux variations de la température ambiante.

Les températures externes dans les andains (F1, F2, F3, F4, F5) suivent la même allure que les températures internes avec un écart de 2 à 10°C (figure I. 2).

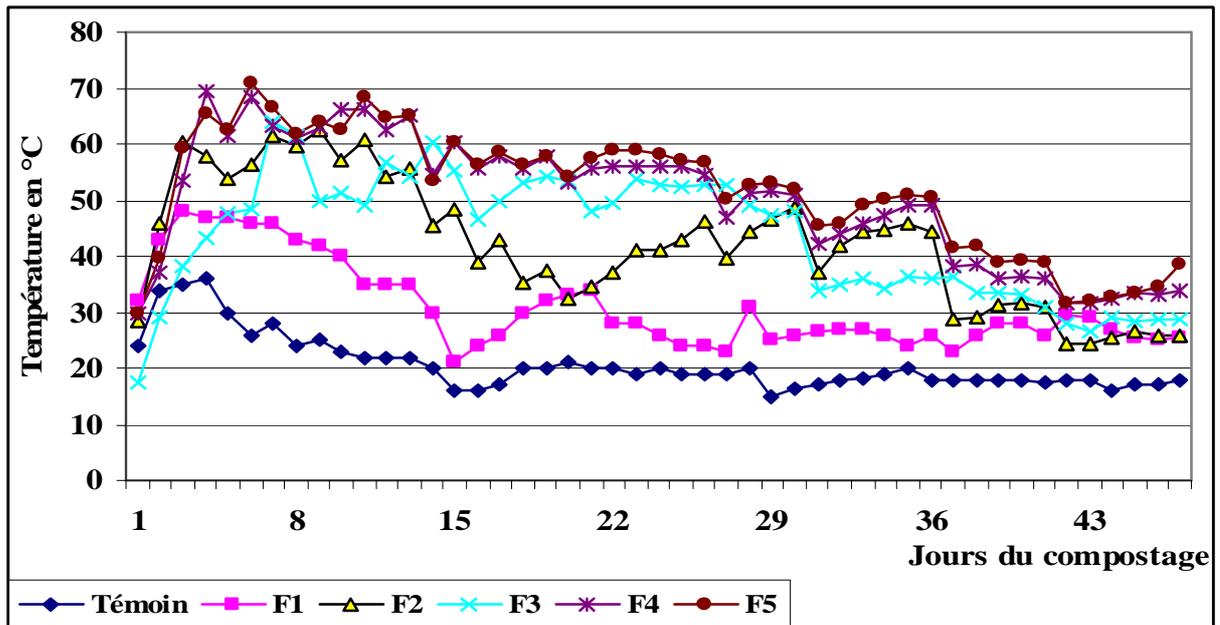


Figure I.1: Evolution des températures internes des andains au cours du processus de compostage.

Témoin : mélange des sous-produits sans aucun additif ; F1 : 0,3 m³ du fumier + 1,8 m³ du mélange ; F2 : 0,45 m³ du fumier + 1,75 m³ du mélange ; F3 : 0,55 m³ du fumier + 1,65 m³ du mélanges ; F4 : 0,75 m³ du fumier + 1,45 m³ du mélange ; F5 : 1,1 m³ du fumier + 1,1 m³ du mélange.

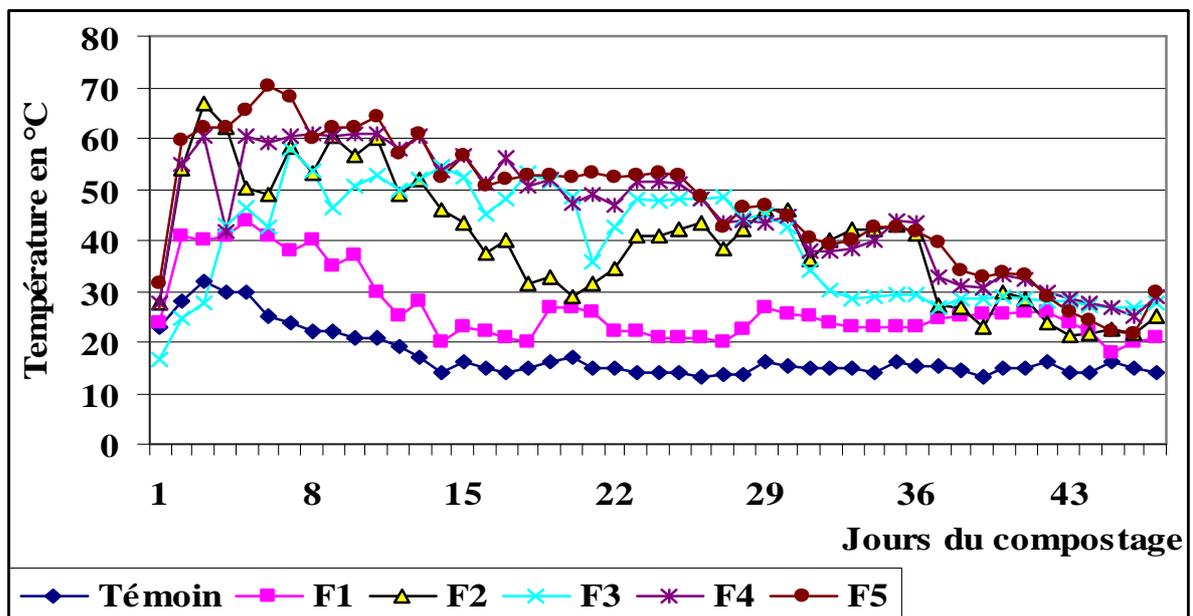


Figure I.2 : Evolution des températures externes des andains au cours du processus de compostage.

Témoin : mélange des sous-produits sans aucun additif ; F1 : 0,3 m³ du fumier + 1,8 m³ du mélange ; F2 : 0,45 m³ du fumier + 1,75 m³ du mélange ; F3 : 0,55 m³ du fumier + 1,65 m³ du mélanges ; F4 : 0,75 m³ du fumier + 1,45 m³ du mélange ; F5 : 1,1 m³ du fumier + 1,1 m³ du mélange.

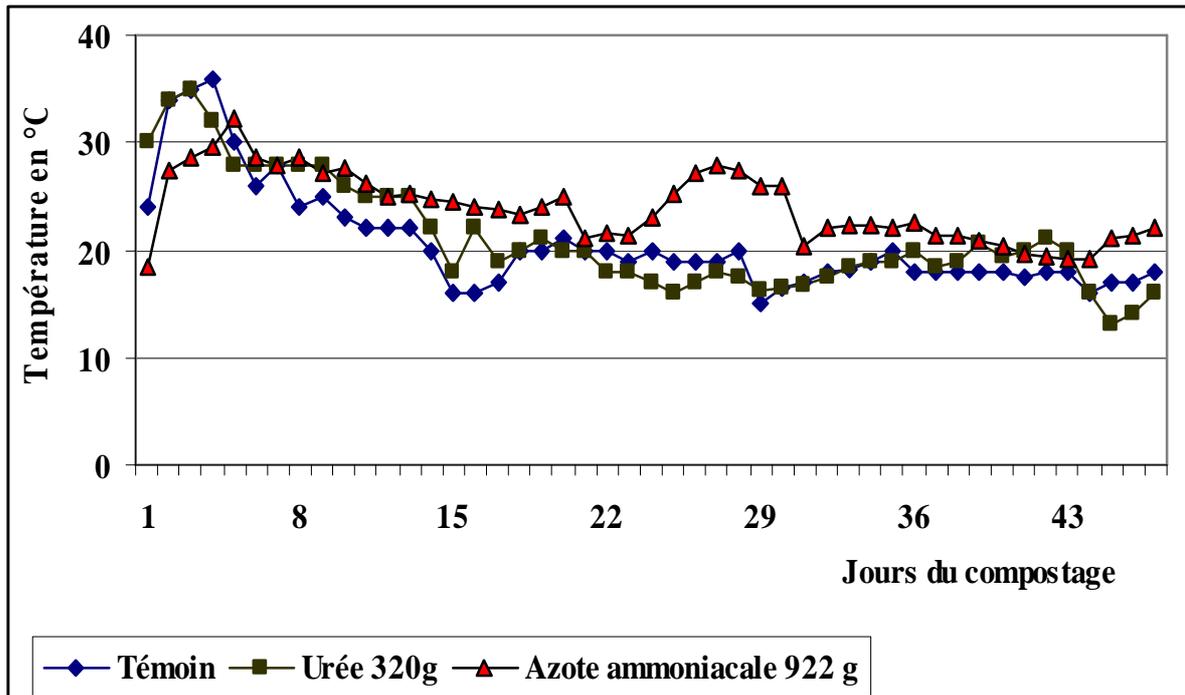


Figure I.3 : Evolution des températures internes des andains au cours du processus de compostage

Témoïn : mélange sans aucun additif ; Ur : 320 g d'urée + 2,2 m³ du mélange ; Az : 922 g d'azote ammoniacal + 2,2 m³ du mélange.

3. Evolution des matières organiques et minérales au cours du compostage

La perte de la matière organique, au cours du processus de compostage, dépend du mélange initial (tableau I.3), elle est de l'ordre de 4% pour le témoin et d'environ 10% pour les andains (Ur et Az) contenant l'azote minérale et pour l'andain F1 qui contient la plus faible quantité de fumier, alors qu'il est de l'ordre de 25% pour les autres andains (F2, F3, F4, F5). Parallèlement, les taux de cendre dans les différents andains suivent une évolution inverse à celle des matières organiques.

Pour l'azote, nous constatons que (tableau I.3) :

- Les andains Ur et Az perdent environ 50 % de leur azote au cours de l'opération de compostage.
- Les andains contenant du fumier F1, F2, F3, F4 et F5 gagnent respectivement 29, 33, 40, 20 et 13% d'azote après 75 jours de compostage.
- Le taux d'azote de l'andain témoin n'a pas changé.

Tableau I.3 : Evolution quantitative et qualitative de la matière minérale et organique au cours du compostage.

Andains	Prélèvement au 1 ^{er} jour								Prélèvement au 75 ^{ème} jour							
	T	Ur	Az	F1	F2	F3	F4	F5	T	Ur	Az	F1	F2	F3	F4	F5
Taux de M.O.	91,00	88,00	93,00	75,00	69,80	63,20	60,80	58,30	87,00	79,00	81,00	64,70	51,60	47,00	45,00	41,70
	± 7,3	± 6,9	± 7,6	± 6,6	± 6,1	± 3,9	± 3,9	± 3,9	± 6,5	± 6,3	± 7,3	± 3,2	± 3,7	± 2,9	± 2,9	± 2,0
Taux de cendre	09,00	12,00	07,00	25,00	30,20	36,80	39,20	41,70	13,00	21,00	19,00	35,30	48,40	53,00	55,00	58,30
	± 0,6	± 0,7	± 0,5	± 2,3	± 2,5	± 2,2	± 2,6	± 2,8	± 0,7	± 0,9	± 0,6	± 2,4	± 3,1	± 3,2	± 3,2	± 2,7
Taux de C.O.	45,00	44,00	46,00	37,50	34,90	31,60	30,40	29,15	43,50	39,50	40,50	32,35	25,80	23,50	22,50	20,85
	± 3,7	± 3,7	± 3,7	± 2,3	± 2,0	± 1,9	± 1,9	± 1,7	± 3,7	± 2,7	± 3,2	± 2,0	± 1,8	± 1,5	± 1,5	± 1,6
Taux d'azote (NTK)	0,39	1,17	1,15	0,47	0,57	0,63	0,73	0,82	0,41	0,56	0,63	0,61	0,76	0,88	0,88	0,96
	± 0,07	± 0,6	± 0,7	± 0,10	± 0,12	± 0,11	± 0,11	± 0,13	± 0,11	± 0,12	± 0,12	± 0,10	± 0,10	± 0,13	± 0,13	± 0,16
Rapport C/N	115,4	37,60	40,00	79,78	61,22	50,16	41,64	35,55	106,1	70,53	64,28	53,03	33,95	26,70	25,57	21,72
	± 7,8	± 2,8	± 2,7	± 5,2	± 4,2	± 3,8	± 2,9	± 2,2	± 7,8	± 6,8	± 5,7	± 4,1	± 3,1	± 3,9	± 3,5	± 2,3

M.O. : matière organique ; C.O. : carbone organique. Les taux sont exprimés en % de matière sèche.

T : Témoin sans aucun additif ; Ur : 320 g d'urée + 2,2 m³ du mélange ; Az : 922 g d'azote ammoniacal + 2,2 m³ du mélange ; F1 : 0,3 m³ du fumier + 1,8 m³ du mélange ; F2 : 0,45 m³ du fumier + 1,75 m³ du mélange ; F3 : 0,55 m³ du fumier + 1,65 m³ du mélanges ; F4 : 0,75 m³ du fumier + 1,45 m³ du mélange ; F5 : 1,1 m³ du fumier + 1,1 m³ du mélange.

Les valeurs sont la moyenne d'au moins trois mesures.

Au cours du compostage, le rapport C/N décroît constamment dans les andains contenant du fumier et au bout de 75 jours de biotransformation, cette diminution est de 35 à 46%. Il n'y a aucune corrélation entre la chute des rapports C/N et la quantité du fumier ajoutée aux andains. Par contre, dans les andains contenant de l'urée (Ur) ou de l'azote ammoniacal (Az), les rapports C/N ont augmenté de 87 et 60% respectivement (tableau I.3).

4. Evolution de l'agent pathogène dans les andains au cours du compostage

La cinétique de destruction du champignon pathogène, responsable de la fusariose vasculaire du palmier dattier, est identique pour les quatre andains contenant du fumier bovin. Nous pouvons distinguer deux phases principales (Figure I.4) : une première phase qui dure environ cinq jours, pendant laquelle la population fusarienne initiale chute rapidement dans les cinq andains. Cette chute dépend du taux du fumier introduit dans l'andain; chaque fois que ce taux est grand, chaque fois que la chute est rapide. La seconde phase dure environ 12 à 15 jours pendant laquelle la microflore fusarienne continue de baisser mais lentement jusqu'à sa disparition totale. Ceci est vrai pour tous les andains qui contiennent du fumier à l'exception de l'andain F1 (le moins riche en fumier). La température de la phase thermophile de ce dernier, inférieure à celles des autres, a fait que la vitesse d'élimination de l'agent pathogène est moins rapide et que sa prolifération a repris à partir du 45^{ème} jour du compostage, après le rétablissement des conditions favorables dans la phase de maturation du compost et a atteint sa valeur initiale après le 75^{ème} jour du compostage. Dans l'andain qui contient de l'urée (Ur), le comportement du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* est identique à celui de l'andain témoin. On observe une augmentation de la population fusarienne pendant la première semaine du compostage puis une chute douce pour revenir à la densité initiale après le 35^{ème} jour du compostage (figure I.4). A l'inverse, la présence de l'azote ammoniacal favorise la prolifération de l'agent pathogène dans l'andain (Az) : on constate une augmentation rapide d'environ 62% pendant les 5 premiers jours du compostage pour rester stable jusqu'à la fin de l'opération du compostage.

Donc, l'augmentation de la température au début de l'opération du compostage et sa persistance pendant plus de 25 jours à des valeurs de 55 à 70°C dans les andains F2, F3, F4 et F5 a montré son efficacité à éliminer complètement l'agent pathogène *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*, responsable de la fusariose vasculaire du palmier dattier (Bayoud) (figure I.4).

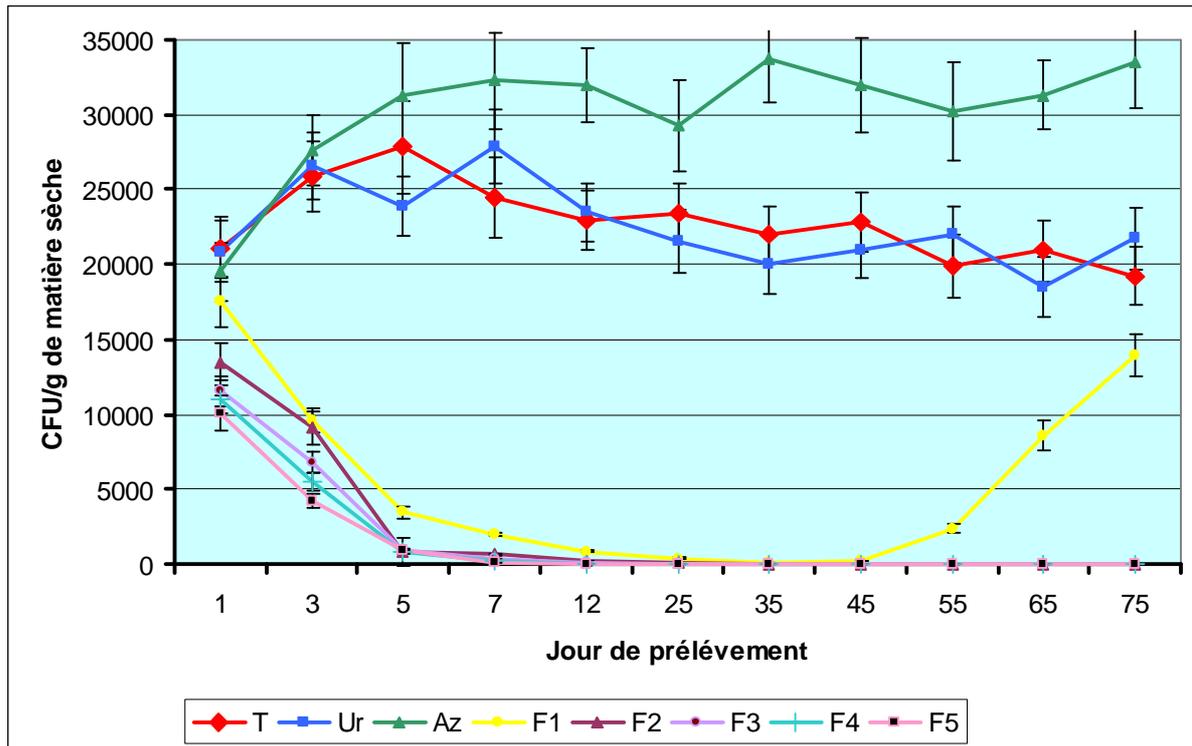


Figure I.4 : Dénombrement du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* exprimé en CFU/g de matière sèche.

T : Témoin sans aucun additif ; Ur : 320 g d'urée + 2,2 m³ du mélange ; Az : 922 g d'azote ammoniacal + 2,2 m³ du mélange ; F1 : 0,3 m³ du fumier + 1,8 m³ du mélange ; F2 : 0,45 m³ du fumier + 1,75 m³ du mélange ; F3 : 0,55 m³ du fumier + 1,65 m³ du mélanges ; F4 : 0,75 m³ du fumier + 1,45 m³ du mélange ; F5 : 1,1 m³ du fumier + 1,1 m³ du mélange.

5. Etude de l'effet d'un traitement thermique sur *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* localisé dans les sous-produits

Pour confirmer l'effet thermique sur la disparition de l'agent pathogène au cours du compostage, nous avons étudié l'effet des différentes températures sur la croissance du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* localisé dans son hôte naturel à savoir le rachi des palmes infectées. Les résultats obtenus (tableau I.4, photos I.1 et I.2) montrent que la destruction de ce champignon pathogène, dans son milieu naturel, dépend de l'humidité, de la température et de la durée de traitement. Ainsi le champignon qui loge dans le rachi avec une humidité de 45 % a été éliminé facilement par rapport à celui du rachi sec (15 à 20% d'humidité). Un traitement à 50°C pendant 48 heures du rachi humide est suffisant pour éliminer complètement l'agent pathogène alors que le rachi sec demande un traitement plus long puisque à 72 heures, l'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* n'est que de 25% (photo I.1 et I.2, tableau I.4).

Dans les deux cas (sec et humide), un traitement de 12 heures à une température de 60°C est suffisant pour détruire le champignon pathogène.

Tableau I.4 : Effet des traitements thermiques sur *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* logé dans le rachi des palmes des deux variétés du palmier dattier atteintes par la fusariose vasculaire.

Temps d'incubation	Variété	Taux d'humidité	Température d'incubation en °C			
			40 ° C	50 ° C	60 ° C	70 ° C
0 hr	Assiane	15 à 20%	+++	+++	+++	+++
		40 à 45%	+++	+++	+++	+++
	Bouffaggousse	15 à 20%	+++	+++	+++	+++
		40 à 45%	+++	+++	+++	+++
6 hr	Assiane	15 à 20%	+++	+++	+ -	-
		40 à 45%	+++	++	-	-
	Bouffaggousse	15 à 20%	+++	+++	+ -	-
		40 à 45%	+++	+	-	-
12 hr	Assiane	15 à 20%	+++	++	-	-
		40 à 45%	+++	+ -	-	-
	Bouffaggousse	15 à 20%	+++	+	-	-
		40 à 45%	+++	+ -	-	-
24 hr	Assiane	15 à 20%	+++	++	-	-
		40 à 45%	+++	-	-	-
	Bouffaggousse	15 à 20%	+++	+	-	-
		40 à 45%	+++	-	-	-
48 hr	Assiane	15 à 20%	+++	+ -	-	-
		40 à 45%	++	-	-	-
	Bouffaggousse	15 à 20%	+++	-	-	-
		40 à 45%	++	-	-	-
72 hr	Assiane	15 à 20%	++	+ -	-	-
		40 à 45%	++	-	-	-
	Bouffaggousse	15 à 20%	++	-	-	-
		40 à 45%	++	-	-	-

Les résultats sont exprimés en pourcentage d'inhibition du diamètre de la croissance de l'agent pathogène sur un milieu solide par rapport aux témoins.

(+++): 0% inhibition; (++): 0-25% inhibition; (+): 25-50% inhibition; (+-): 50-75% inhibition, (-) : 100% inhibition.

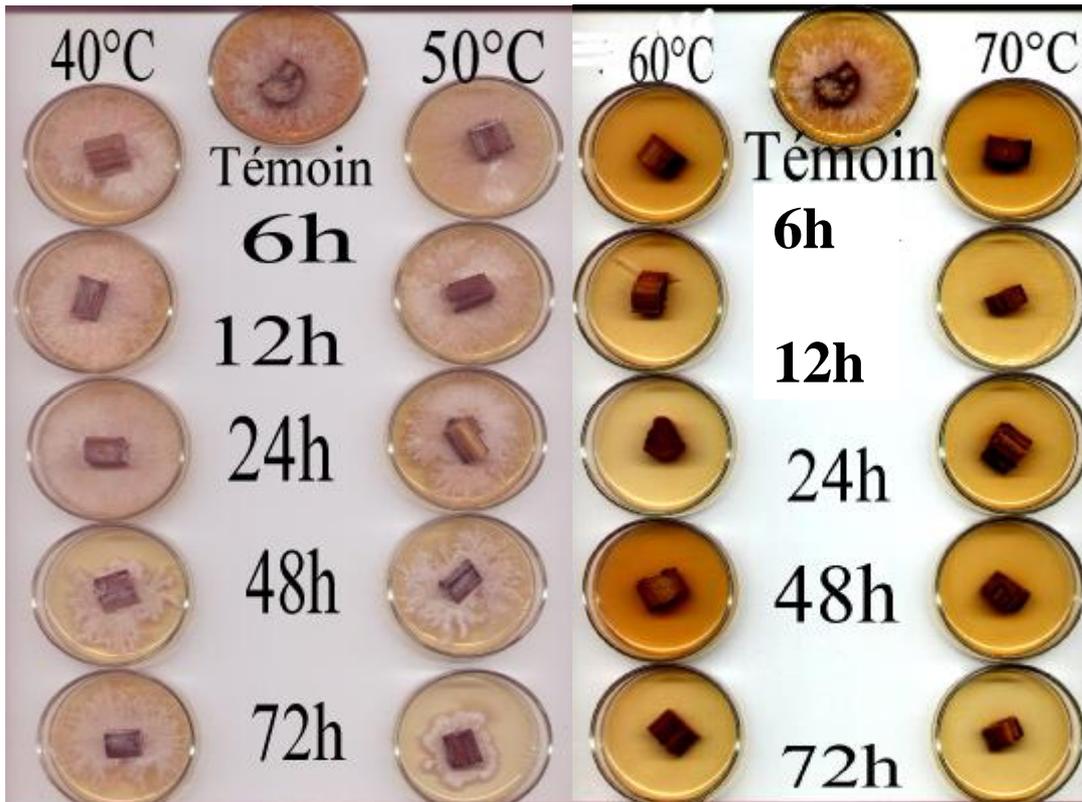


Photo I.1 : Effet de la température sur *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans son milieu naturel (humidité du rachi 15 à 20%).

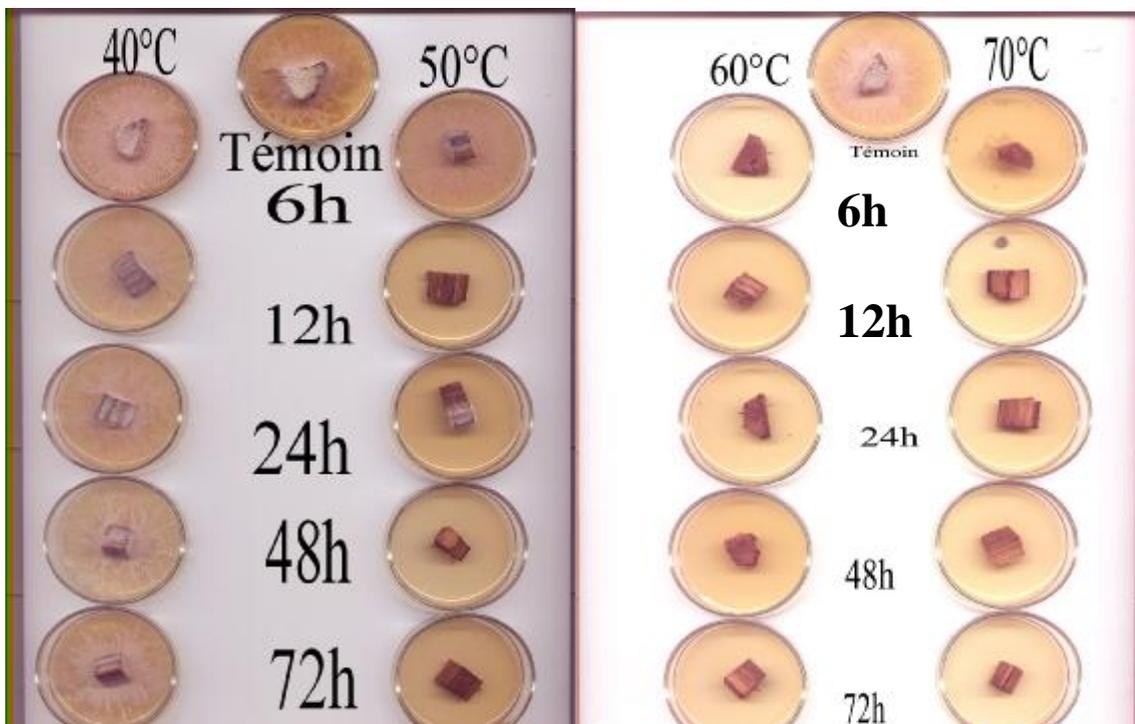


Photo I.2 : Effet de la température sur la croissance du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans son milieu naturel (humidité du rachi 40 à 45%)

B. EFFET DE L'AERATION SUR LE PROCESSUS DE COMPOSTAGE

1. Evolution de l'humidité dans les andains au cours du compostage

Le maintien d'une humidité adéquate est nécessaire au bon déroulement du processus de compostage. Cette humidité doit se maintenir à des taux de 60 à 70%. Pour ce faire, des arrosages des andains sont nécessaires pour contrebalancer les pertes d'eau. Ces pertes sont dues essentiellement aux réactions exothermiques de fermentation, aux conditions climatiques et aux retournements des andains. Ces apports d'eau sont fonction de la phase du compostage. Ils sont en moyenne de $0,040 \text{ m}^3$ /andain/jour durant le premier mois de compostage, de $0,026 \text{ m}^3$ /andain/jour dans le deuxième mois et de $0,01 \text{ m}^3$ /andain/jour dans le dernier mois. Mais l'apport important d'eau dans les andains a eu lieu lors de l'humidification de la matière première pour le déclenchement du processus de fermentation, il est de l'ordre de $1,33 \text{ m}^3$ pour chaque andain.

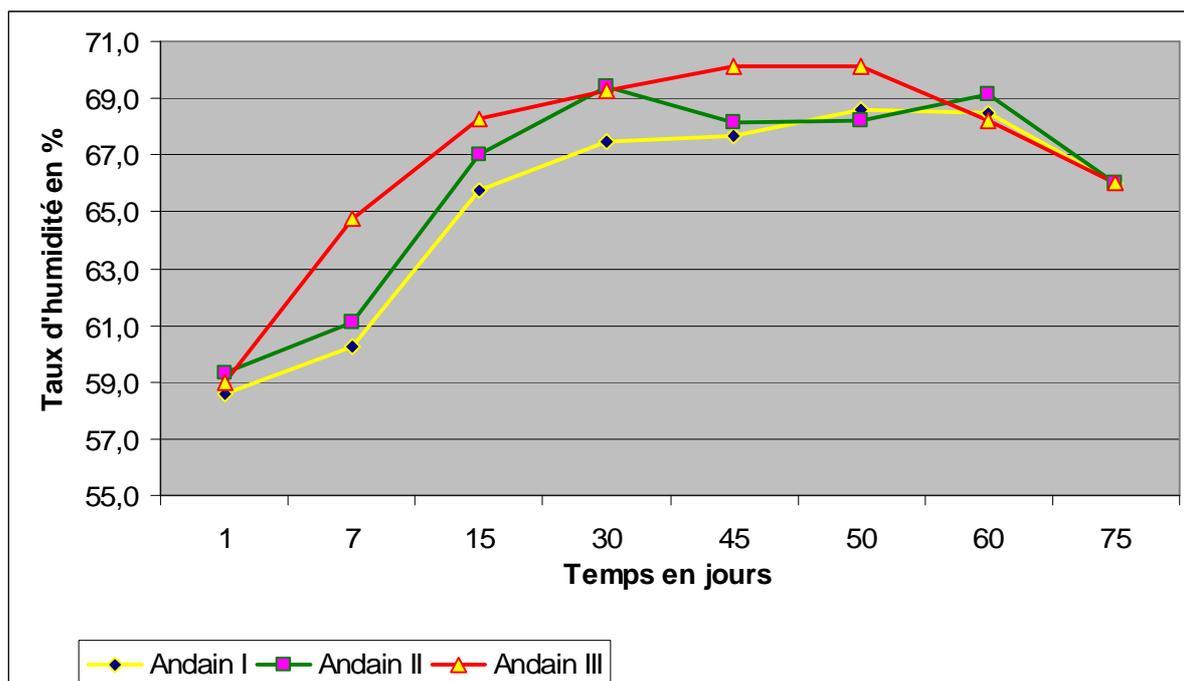


Figure I.5 : Evolution d'humidité dans les trois andains au cours du processus de compostage. Andain I : un retournement tous les deux jours ; Andain II : un retournement tous les trois jours ; Andain III : un retournement tous les cinq jours.

Au cours du compostage et à chaque arrosage, les quantités d'eau apportées aux trois andains sont identiques. La totalité d'eau incorporée dans chaque andain durant les 80 jours de compostage représente environ $3,5 \text{ m}^3$. Ce qui représente 11,4 litres d'eau par kg des sous-produits secs à compostier.

Les mesures du taux d'humidité des différents andains au cours de l'opération du compostage ont été effectuées régulièrement. Il ressort des résultats rassemblés dans la figure (I.5) que :

- les taux de l'humidité des andains sont maintenus à des valeurs optimales du compostage (60 à 70%) ;
- le taux de l'humidité dépend de la fréquence de retournement. La pile la plus retournée présente un taux d'humidité le plus faible par rapport aux deux autres.

2. Evolution des températures internes et externes dans les andains tests

L'évolution des températures dans les andains I et II présente les mêmes phases (voir figures I.6 et I.7) :

- Une phase mésophile, de courte durée 3 à 4 jours, caractérisée par une augmentation rapide de la température.
- Une phase thermophile, qui se présente en deux périodes :
 - Une période de 10 jours où la température reste élevée entre 60 à 70°C pour les températures internes et entre 60 à 65°C pour les températures externes.
 - Une période de 14 jours où la température se stabilise à des valeurs de 50 à 60°C pour les températures internes et de 45 à 55°C pour les températures externes.
- Une phase de refroidissement qui dure environ 15 jours, les températures tombent à des valeurs de 25 à 35°C qui sont proches de la température ambiante.
- Une phase de maturation qui débute vers le 43^{ème} jour du compostage, les températures restent stables, proches de la température ambiante.

Pour l'andain III qui est retourné une fois tous les cinq jours, l'évolution de ses températures internes et externes présente les mêmes phases qui caractérisent les deux andains I et II, à l'exception des températures qui sont moins élevées dans la phase thermophile : de 50 à 60°C pour les températures internes et de 45 à 55°C pour les températures externes.

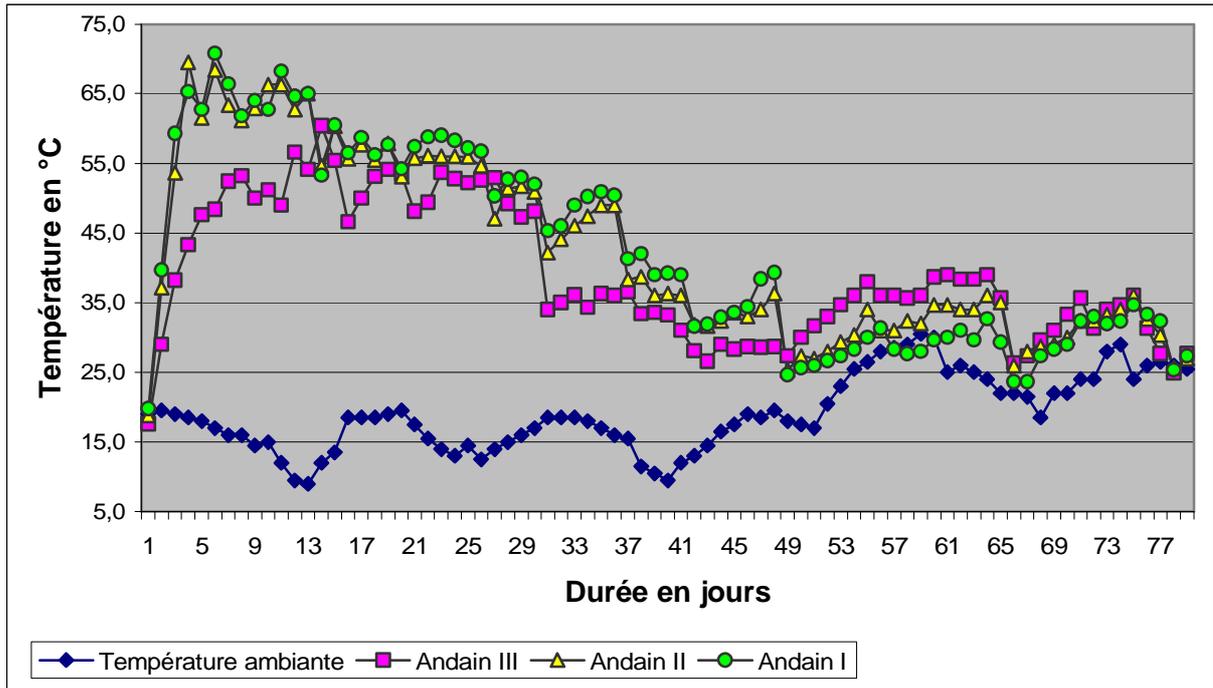


Figure I.6 : Evolution des températures internes des andains au cours du processus de compostage.

Andain I : un retournement tous les deux jours ; Andain II : un retournement tous les trois jours ; Andain III : un retournement tous les cinq jours.

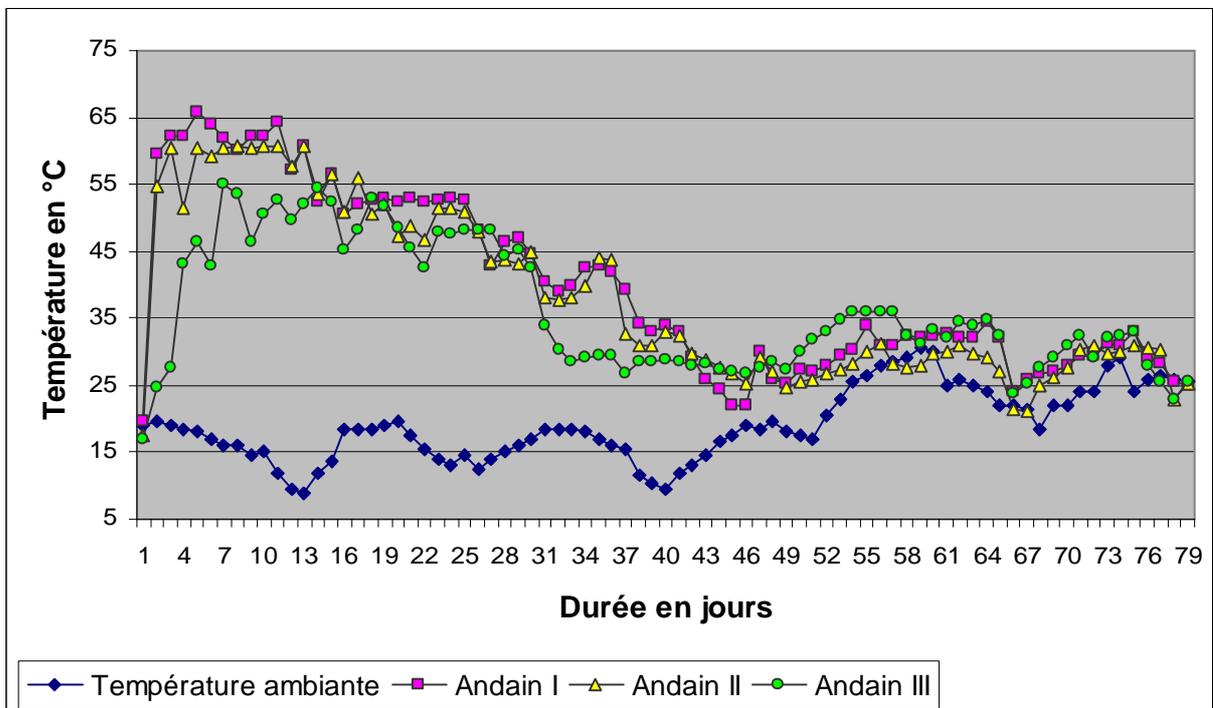


Figure I.7 : Evolution des températures externes des andains au cours du processus de compostage.

Andain I : un retournement tous les deux jours ; Andain II : un retournement tous les trois jours ; Andain III : un retournement tous les cinq jours.

Les variations brusques de températures observées pendant les différentes phases sont dues principalement aux retournements et, dans une certaine mesure, aux variations de la température ambiante.

3. Evolution du pH et de la conductivité électrique au cours du compostage

Les mesures du pH et de la conductivité électrique ont été effectuées avant chaque retournement le long de l'opération de compostage.

La figure I.8 montre qu'au cours du processus de compostage et quelle que soit la fréquence de retournement, le pH reste stable et relativement basique. Il oscille entre 8,2 et 8,7. Par contre la conductivité électrique diminue dans les trois andains, elle passe en moyenne de 9 à 6 mS/cm (figure I.9).

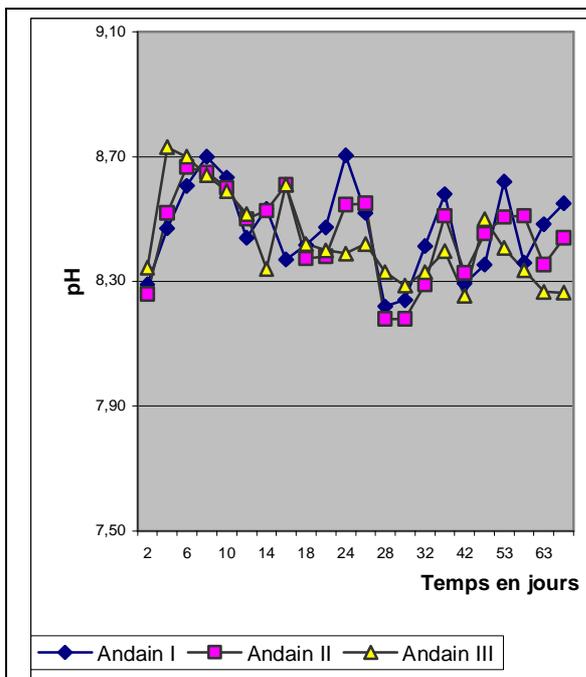


Figure I.8 : Evolution du pH.

Andain I : un retournement tous les deux jours ;
 Andain II : un retournement tous les trois jours ;
 Andain III : un retournement tous les cinq jours.

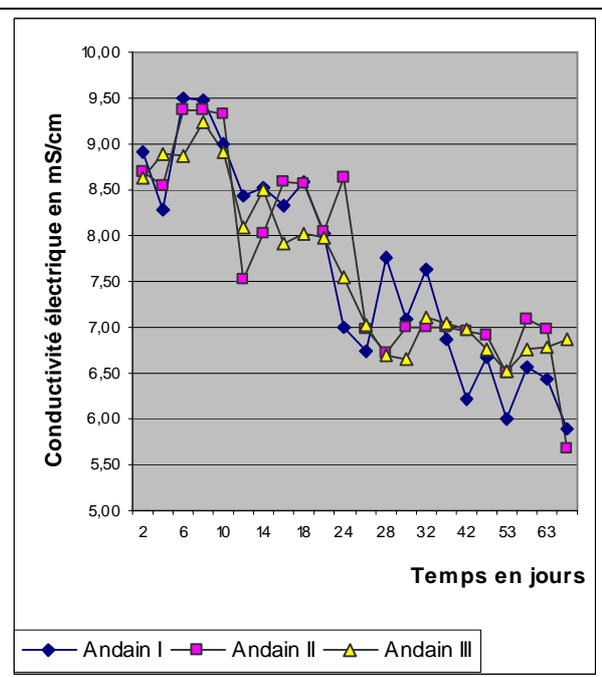


Figure I.9 : Evolution de la conductivité électrique

Andain I : un retournement tous les deux jours ;
 Andain II : un retournement tous les trois jours ;
 Andain III : un retournement tous les cinq jours.

4. Evolution de l'agent pathogène dans les andains tests

Le comportement du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans les trois andains est identique, mais sa population est caractéristique des conditions expérimentales. Nous pouvons distinguer deux phases principales (figure I.10) :

§ La première phase qui dure environ cinq jours, pendant laquelle la population fusarienne initiale chute rapidement pour les trois andains. Mais cette chute dépend de la fréquence de retournement. Ainsi, les populations des andains I et II (les plus retournés) sont réduites de 15 fois environ alors que celle de l'andain III ne l'est que de 3 fois.

§ La seconde phase qui dure environ 25 jours, pendant laquelle la microflore fusarienne continue de baisser lentement jusqu'à sa disparition totale. Là aussi, la population de l'andain III, le moins retourné, reste importante par rapport aux populations des deux autres andains.

Au-delà du 35^{ème} jour de compostage, *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* est complètement éliminé des trois andains.

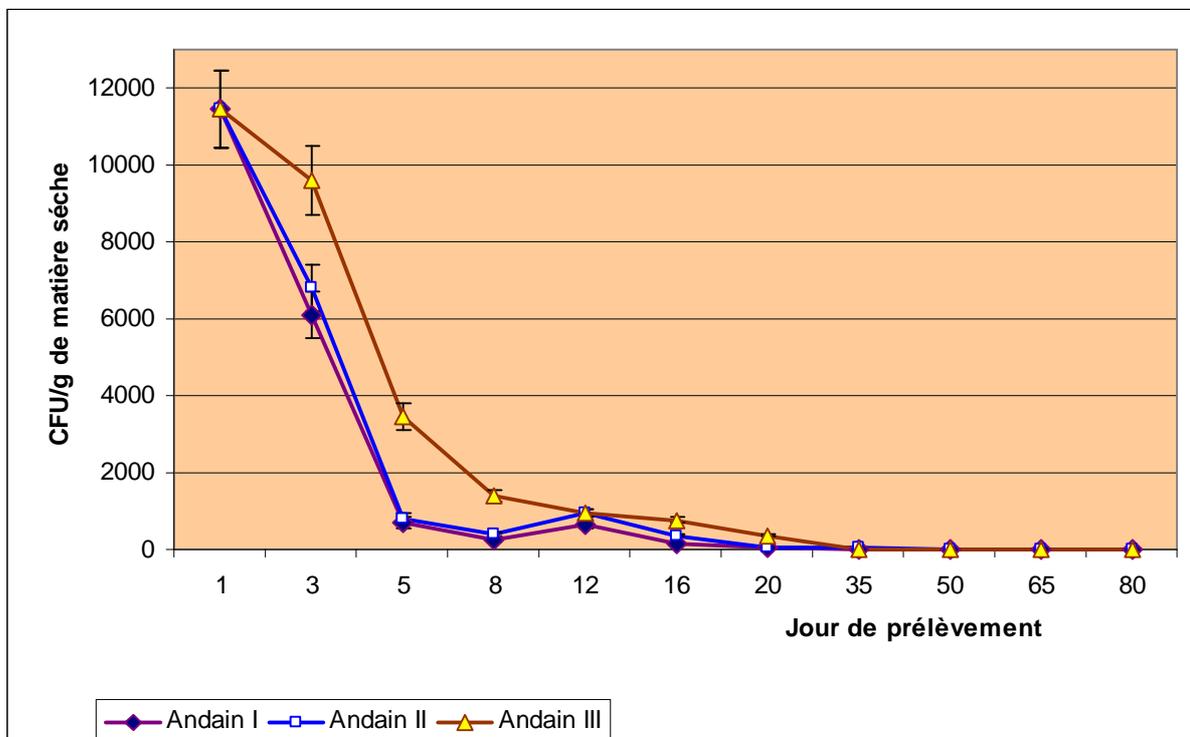


Figure I.10 : Evolution de la population de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* au cours du processus de compostage.

CFU : unité formant colonie. Le nombre moyen de colonies est calculé à partir de quatre répétitions

Andain I : un retournement tous les deux jours ; Andain II : un retournement tous les trois jours ;

Andain III : un retournement tous les cinq jours.

5. Evolution de la granulométrie

La granulométrie initiale du substrat à composter est hétérogène. C'est un mélange de plusieurs fractions dont la présence de grandes particules est nécessaire pour faciliter la respiration et éviter le compactage des andains (tableau I.5 et figure I.11). Au cours du

processus de compostage, cette granulométrie diminue suite à la dégradation de la matière organique par les micro-organismes. Cette diminution se traduit par une diminution des taux des fractions ayant des dimensions élevées, supérieures à 5 mm, au profit de l'augmentation des fractions plus petites ayant des dimensions inférieures ou égales à 5 mm (tableau I.5 et figure I.11). Ainsi l'augmentation de la fraction 2 à 5 mm est de 139, 145 et 140 % respectivement pour les andains I, II et III. A l'inverse, les fractions qui ont subi une décomposition avancée sont les fractions ayant une granulométrie supérieures à 5mm. Ainsi, on peut distinguer trois types de fractions en fonction de leur degré de décomposition : une fraction ayant des particules de dimension supérieure à 12 mm, sa décomposition est de 80 à 100%, une fraction ayant des particules de dimension de 8 à 12 mm, sa décomposition est de 50 à 87% et une fraction ayant des particules de dimension de 5 à 8 mm, sa décomposition est de 32 à 43%.

Selon ces résultats, la fréquence de retournement n'affecte pas la granulométrie des différents andains obtenus après 80 jours de compostage.

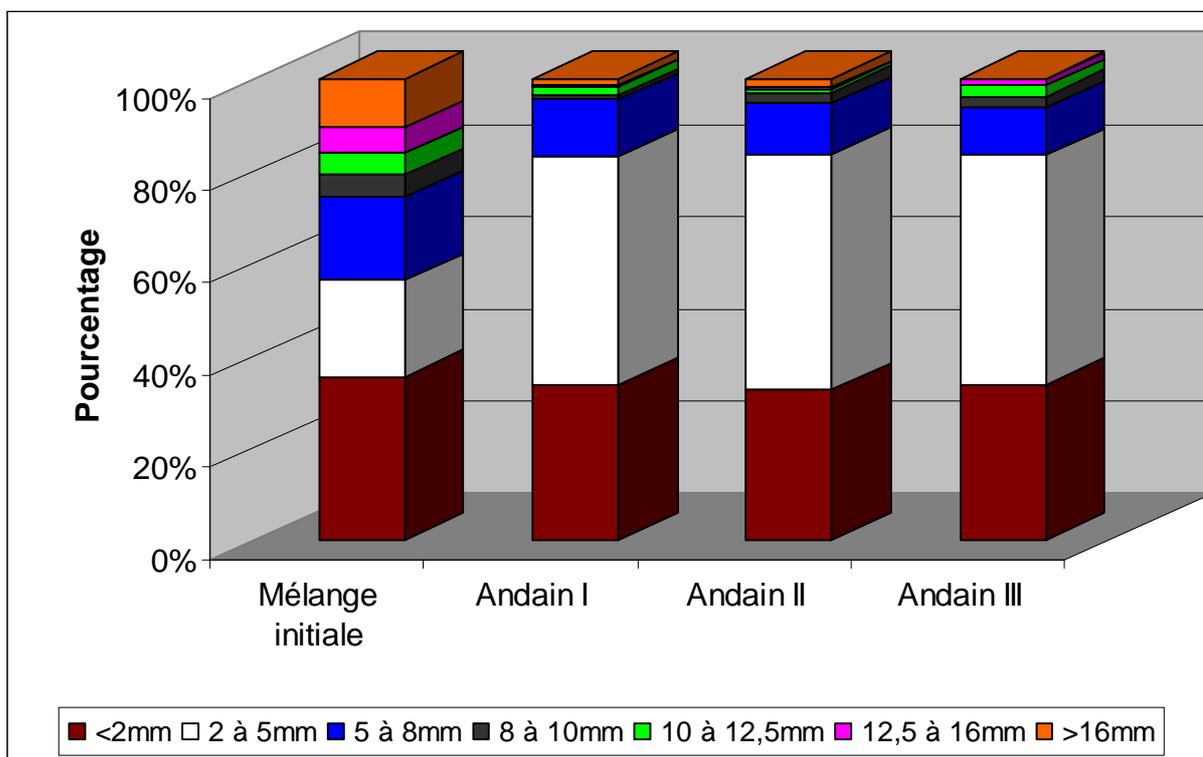


Figure I.11 : Granulométrie des andains avant et après 80 jours de compostage.

Tableau I.5 : Granulométrie de mélange initial et de compost des trois andains tests obtenue après 80 jours de compostage, exprimée en pourcentage.

Dimension en mm	Pourcentage du mélange initial	Pourcentage après 80 jours de compostage					
		Andain I		Andain II		Andain III	
		A	B	A	B	A	B
<2	30,0 ± 2,7	33,6 ± 3,1	+12,0	32,7 ± 2,9	+ 9,0	33,7 ± 3,3	+12,3
2 à 5	20,8 ± 2,1	49,7 ± 4,7	+138,9	51,0 ± 5,2	+145,2	49,8 ± 5,7	+139,5
6 à 8	18,0 ± 1,6	12,1 ± 0,7	- 32,6	11,0 ± 1,1	- 38,9	10,2 ± 0,8	- 43,1
9 à 10	4,7 ± 0,3	1,1 ± 0,1	- 76,9	2,3 ± 0,2	- 50,4	2,5 ± 0,1	- 47,6
11 à 12,5	5,6 ± 0,6	1,9 ± 0,2	- 66,1	0,8 ± 0,1	- 85,7	2,4 ± 0,3	- 57,1
13 à 16	5,4 ± 0,7	0,0	- 99,3	0,4 ± 0,06	- 92,9	1,1 ± 0,09	- 80,0
>16	15,5 ± 1,5	1,6 ± 0,2	- 89,7	1,8 ± 0,21	- 88,4	0,3 ± 0,03	- 98,1

A : Pourcentage de la fraction après 80 jours de compostage

B : (-) pourcentage de diminution de la fraction ; (+) pourcentage de l'augmentation de la fraction.

Andain I : un retournement tous les deux jours ; Andain II : un retournement tous les trois jours ; Andain III : un retournement tous les cinq jours. Le pourcentage moyen est calculé à partir de trois répétitions

6. Evolution des matières organiques et minérales au cours du compostage

Tableau I.6 : composition qualitative et quantitative des andains de compostage

	Fumier bovin	Sous-produits broyés	Mélange initial
Volume en m ³	0,24 ± 0,002	0,73 ± 0,004	1,95 ± 0,021
Poids brut en Kg	213 ± 3,6	160 ± 2,3	771 ± 4,3
Poids sec en Kg	160,00 ± 4,7	148,60 ± 3,9	308,32 ± 7,7
Taux d'humidité en %	24,88 ± 1,3	7,13 ± 0,9	60 ± 2,9
Taux de M.O. en %	50,00 ± 3,3	90,00 ± 7,3	60,80 ± 3,9
Taux de cendre en %	50,00 ± 3,3	10,00 ± 0,7	39,20 ± 2,6
Taux de C.O. en %	25,00 ± 1,6	45,00 ± 3,7	30,40 ± 1,9
Taux d'azote (NTK) en %	1,50 ± 0,3	0,39 ± 0,07	0,63 ± 0,11
Rapport C/N	16,66 ± 1,8	115,40 ± 7,8	47,78 ± 3,8

M.O. : matière organique ; C.O. : carbone organique ; NTK : azote total déterminé par la méthode de Kjeldhal ; C/N : rapport Carbone/Azote. Les taux sont exprimés en % de matière sèche. Les valeurs sont la moyenne d'au moins trois mesures.

Quatre vingt dix pourcent (90%) des sous-produits du palmier dattier sont composés exclusivement de matières organiques. L'azote total ne représente que 0,39% (Tableau I.6). Dans ces conditions, le démarrage du processus de compostage sera très difficile. L'ajout du

fumier s'avérait nécessaire pour déclencher l'activité biologique dans l'andain en compostage. L'apport du fumier est important pour deux raisons essentielles : il a fait diminuer le rapport C/N de 115 à 48 dans le mélange initial et a apporté une population de micro-organismes, agent principal de la décomposition des matières organiques.

Après 80 jours de compostage, et en fonction de la fréquence de retournement, nous constatons (tableau I.7) :

- § Une réduction du volume total de 35 ; 29 et 27%, respectivement, pour l'andain I, l'andain II et l'andain III,
- § Une baisse du poids sec d'environ 24 ; 17 et 16%, respectivement, pour l'andain I, l'andain II et l'andain III,
- § Une diminution de la matière organique de 23% pour les deux andains les mieux aérés et 15% pour l'andain III retourné une fois tous les 5 jours,
- § Une augmentation des taux d'azote total de 20% pour les andains II et III et de 40% pour l'andain I,
- § Une chute du rapport C/N de 44 ; 37 et 29% respectivement pour l'andain I, II et III.
- § Une augmentation de la matière minérale de 35 ; 33 et 23,5%, respectivement, pour l'andain I, II et III.

Tableau I.7 : Evolution quantitative et qualitative de la matière minérale et organique au cours du compostage.

	Mélange initial	Après 80 jours de compostage		
		Andain I	Andain II	Andain III
Volume en m ³	1,95 ± 0,021	1,26 ± 0,019	1,38 ± 0,012	1,42 ± 0,011
Poids brut en Kg	771 ± 4,3	530 ± 3,3	580 ± 10,2	595 ± 9,7
Poids sec en Kg	308,32 ± 7,7	234,61 ± 6,1	255,24 ± 6,3	260,17 ± 7,1
Taux d'humidité	60 ± 2,9	66 ± 3,1	66 ± 2,9	66 ± 3,7
Taux de M.O.	60,80 ± 3,9	47,00 ± 2,9	47,90 ± 3,3	51,60 ± 3,7
Taux de cendre	39,20 ± 2,6	53,00 ± 3,2	52,10 ± 3,5	48,40 ± 3,1
Taux de C.O.	30,40 ± 1,9	23,50 ± 1,5	23,95 ± 1,7	25,80 ± 1,8
Taux d'azote (NTK)	0,63 ± 0,11	0,88 ± 0,13	0,79 ± 0,09	0,76 ± 0,10
Rapport C/N	47,78 ± 3,8	26,70 ± 3,9	30,32 ± 2,5	33,95 ± 3,1

M.O. : matière organique ; C.O. : carbone organique ; NTK : azote total déterminé par la méthode de Kjeldhal ; C/N : rapport Carbone/Azote. Les taux sont exprimés en % de matière sèche. Les valeurs sont la moyenne d'au moins trois mesures.

Andain I : un retournement tous les deux jours; Andain II : un retournement tous les trois jours ; Andain III : un retournement tous les cinq jours.

I. DISCUSSION

Les bactéries, les actinomycètes, les champignons, les protozoaires et les algues d'origine tellurique dégradent la matière organique durant le processus de compostage par la production d'enzymes. La composition et la granulométrie de la matière première, l'espace lacunaire, la pression d'oxygène, la température, l'humidité et le pH interviennent simultanément au cours du processus de compostage. Le contrôle de ces paramètres est essentiel pour mener à bien l'évolution de la matière organique et obtenir un compost de qualité. Ces micro-organismes, par leur activité au cours de l'opération de compostage, modifient les paramètres de l'andain en décomposition. Ces modifications aboutissent à une sélection de nouvelles populations de micro-organismes possédant un équipement enzymatique capable de s'adapter à ces nouvelles caractéristiques de l'andain en compostage. Donc, des communautés différentes de micro-organismes vont ainsi se succéder en fonction du niveau de décomposition atteint et des conditions physico-chimiques du substrat en décomposition. La diversité de la flore existante est donc en fait liée aux différents niveaux de biodégradabilité des constituants organiques.

Le pH est un facteur important qui conditionne la plupart des réactions biochimiques catalysées par des enzymes et qui permet la biodisponibilité des éléments nutritifs pour les micro-organismes décomposeurs et la solubilité des éléments minéraux. La fermentation en aérobie exothermique, qui s'opère dans les andains du compostage, produit du CO₂ sous forme de gaz volatil qui n'influence pas le pH du compost des différents andains. Ainsi, ni l'apport de différentes sources d'azote, ni la fréquence de retournement n'ont affecté l'évolution du pH au cours de l'opération du compostage (Tableau I.1, Figure I.8). De même, d'autres réactions biochimiques et microbiologiques susceptibles d'influencer le pH des andains ont un effet négligeable. L'évolution de pH dans nos andains ne répond pas exactement aux données de la littérature. Ainsi, selon plusieurs auteurs, le processus de compostage modifie légèrement le pH et particulièrement pendant les premiers jours où on assiste à une très légère acidification attribuée à la production d'acides organiques, suivie, en phase thermophile, d'une légère alcalinisation suite à la libération d'ammonium par le processus d'ammonification des protéines (Kochtizky et *al.*, 1969 ; Peters et *al.*, 2000). Cette différence pourrait être expliquée par la nature de substrat composté (Albuquerque et *al.*, 2006). Les pH des composts finis, de nos différentes expérimentations, à l'exception de

l'andain témoin sans aucun additif (tableau I.1, figure I.8), restent légèrement basiques et semblables à ceux obtenus par de nombreux auteurs (Roletto et *al.*, 1985 ; Avnimelech et *al.*, 1996 ; Francou, 2003).

L'assimilation des particules ioniques responsables de la conductivité dans des réactions biochimiques au cours du compostage ou/et le lessivage de ces molécules ou/et la diminution de leur extractibilité suite à leur fixation sur la matière organique stabilisée (Avnimelech et *al.*, 1996) pourraient être à la base de la diminution de la conductivité électrique au cours du processus du compostage des différents andains (tableau I.2. figure I.9).

Le maintien d'une humidité adéquate est nécessaire au bon déroulement du processus de compostage. L'eau de la matière organique est nécessaire à la vie des micro-organismes. Elle joue également un rôle prépondérant dans les transports des particules assurant ainsi un meilleur contact entre les fractions organiques et la flore microbienne. Au cours de l'opération du compostage, le taux d'humidité des trois andains est maintenu à des valeurs de 60 à 70% (figure I.5). Ces taux sont optimaux pour le processus de décomposition de la matière organique (Gotaas, 1959 ; Kochtizky et *al.*, 1969 ; Jeris et Regan, 1973). Si l'humidité est insuffisante, inférieure à 50% du poids frais, l'activité biologique et surtout microbiologique est ralentie de manière significative. En cas d'excès d'eau (humidité supérieure à 70 %), l'air de l'espace lacunaire des andains est chassé ce qui entraîne des conditions d'anaérobiose et une mauvaise circulation d'air à l'intérieur des andains qui empêche la diffusion de l'oxygène vers les micro-organismes (Wiley et *al.*, 1966 ; Jeris et Regan, 1973 ; Mustin, 1987). Ceci a pour conséquence une baisse de température d'une part et, d'autre part, une asphyxie et un dégagement d'odeurs désagréables (Wiley et *al.*, 1966). De même, des taux plus élevés d'oxygène dans les andains en compostage indiquent une forte circulation d'air qui entraîne une chute du taux de l'humidité, une déperdition de chaleur et par voie de conséquence un arrêt du processus de compostage (Cayuela et *al.*, 2006). En général, on considère que le compostage optimal dans les premières phases est obtenu pour des valeurs de 30 à 36% d'espace lacunaire dans la masse et dépend de la nature du substrat à composer (Jeris et Regan, 1973).

Pour maintenir l'humidité à des taux optimaux dans nos andains, des arrosages ont été effectués, chaque fois qu'il a été nécessaire, pendant toute la période de compostage et ceci pour contrebalancer les pertes d'eau engendrées par l'évaporation et les retournements des andains. En effet, l'andain III le moins retourné garde une humidité généralement plus élevée

que les deux autres (figure I.5). On estime un besoin en eau d'environ 11,4 L/Kg du mélange initial sec. En réalité, durant le processus de compostage, on assiste à la fois à la production d'eau par les réactions biochimiques de biodégradation des matières organiques et à une perte d'eau par évaporation. C'est en phase thermophile que la quantité d'eau ajoutée aux trois andains est importante. Elle est de 1,5 et 4 fois plus importante que celles ajoutées respectivement en phase de refroidissement et en phase mésophile de maturation.

Dans un milieu oasien où l'eau fait défaut, donc à gérer scrupuleusement, il faut maintenir un taux d'humidité le plus faible possible mais optimal pour le processus du compostage. En conditions chaudes, on peut assister, et particulièrement durant la dernière phase de compostage, à un dessèchement. Le besoin en eau est satisfait par des arrosages continus le long de l'opération de compostage. Un ombrage des andains et la plantation de brise-vents sont nécessaires pour atténuer l'effet des courants d'air, surtout chauds, qui sévissent dans les régions sahariennes.

L'augmentation des températures observée dans des andains les sous-produits du palmier dattier mélangés au fumier est le résultat d'oxydation de la matière organique par une population microbienne aérobie apportée par le fumier. Au début du compostage, pendant les trois premiers jours, l'activité biologique s'installe grâce aux micro-organismes mésophiles. Cette importante activité est reflétée par l'augmentation rapide de la température à des valeurs de 50 à 70°C. C'est la phase mésophile (Figures I.1, I.2, I.6 et I.7), elle correspond à la prolifération des micro-organismes dans le compost. Cette phase est suivie par la phase thermophile qui se met en place et qui dure plus de 30 jours (figures I.1, I.2, I.6 et I.7). Les actinomycètes, les champignons thermophiles (Chang et Hudson, 1967 ; Chang, 1967) et les bactéries thermophiles (Beffa et *al.*, 1996 ; Blanc et *al.*, 1997 ; Strom, 1985) sont les plus actifs pendant cette phase de compostage. La phase thermophile est la plus importante au cours de ce processus pour deux raisons principales : elle accélère le processus de décomposition et assure l'assainissement du compost par suppression des germes pathogènes véhiculés par les sous-produits et le fumier (Grushevoi et Levykh, 1940; Duval, 1992). Les actinomycètes et les champignons thermophiles dégradent les sources de carbone complexes comme la cellulose et l'hémicellulose (Chang, 1967 ; Mustin, 1987). Veeken et *al.* (2001) ont montré que pendant les 4 premières semaines de compostage de la paille du blé mélangé au fumier porcin, les molécules aliphatiques sont complètement dégradées mais l'hémicellulose et les protéines sont relativement résistantes. La dégradation de la cellulose n'est pas

complète alors que la lignine reste intacte durant la phase thermophiles. De même, Amir et *al.* (2004), ont montré que les composés facilement accessibles comme les chaînes aliphatiques périphériques des structures lipidiques et peptidiques sont oxydés pour aboutir à la formation de structures aromatiques riches en groupements fonctionnels. Contrairement à ce qui a été rapporté par Veeken et *al.* (2001), d'autres auteurs (Tomatie et *al.*, 1995; Solano et *al.*, 2001; Paredes et *al.*, 2002 et Cayuela et *al.*, 2006) ont montré que la dégradation de la lignine pendant le processus de compostage dépend de la durée de la phase thermophile. Ainsi, Tuomela et *al.* (2002) ont rapporté que les champignons thermophiles ayant une température optimale de 50°C sont considérés comme des principaux décomposeurs de la lignine.

Mais au-delà de 70°C, l'activité des micro-organismes thermosensibles décomposeurs qui participent dans les opérations de maturation du compost est inhibée. Cette température devient limitante pour l'activité biologique, ce qui réduit la quantité de chaleur produite et la température se stabilise jusqu'à ce que certaines conditions deviennent limitantes, notamment la décomposition du substrat. Ceci conduit à une baisse progressive de la température. Cette phase de refroidissement dure environ 15 jours dans les andains, les températures tombent à des valeurs de 25 à 35°C, proches de la température ambiante après 42 jours de compostage (figures I.1, I.2, I.6 et I.7). A ce stade, la phase de maturation commence et la flore mésophile se réinstalle pour finir la dégradation de la cellulose et de la lignine (Veeken et *al.*, 2001, Tuomela et *al.*, 2000).

La présence de l'azote sous forme de l'urée ou ammoniacal (figure I.3) n'a aucun effet sur les températures internes des andains en les comparant avec les températures de l'andain témoin. Ceci pourrait être dû à l'inhibition des micro-organismes par l'addition de ces sources d'azotes. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par Ezelin de Souza, (1998) et Charest et Beauchamp (2002).

Pour garder une bonne oxygénation, les retournements sont importants. Ils permettront de mélanger les matériaux pour qu'ils soient tous bien accessibles et attaqués par la flore microbienne et aussi d'entretenir l'aération souvent entravée par le phénomène de tassement des andains (Cayuela et *al.*, 2006 ; Albuquerque et *al.*, 2006). Par la suite, le retournement permet le redémarrage du processus biologique et la température va de nouveau augmenter, ce qui explique les variations brusques des températures observées pendant les différentes phases. La fréquence de retournement dépend de la nature et des conditions physico-

chimiques du substrat. 2 à 3 retournements par semaine sont suffisants selon Kochtizky et *al.*, (1969) et Peters et *al.* (2000). Dans nos expérimentations, la fréquence de retournement affecte l'évolution des températures. Pour l'andain III, le moins retourné (une fois tous les cinq jours), l'évolution de ses températures internes et externes présente les mêmes phases que celles observées dans les deux andains I et II, mais avec des températures moins élevées. En général, il y a une différence de 10°C environ (figures I.6 et I.7). Des retournements très fréquents introduisent des taux plus élevés d'oxygène dans les andains en compostage ce qui entraîne une forte circulation d'air engendrant ainsi une déperdition de chaleur donc un refroidissement de l'andain et un ralentissement du processus de biodégradation (Gary et *al.*, 1973). Ils induisent aussi un coût supplémentaire en main d'œuvre et en énergie (Hao et *al.*, 2001).

Le compostage est un processus aérobique, un apport d'air aux andains en compostage est nécessaire pour fournir de l'oxygène aux organismes décomposeurs et pour chasser les gaz produits par la biodégradation. Le pourcentage de l'espace lacunaire, donc de la biodisponibilité de l'oxygène, est fonction de la granulométrie. Si la granulométrie est trop fine, elle provoque une asphyxie des micro-organismes. Si elle est trop grossière, elle peut provoquer un dessèchement dû à des circulations d'air importantes. Un broyage des sous-produits du palmier dattier à composter est donc nécessaire pour obtenir une granulométrie favorable et un bon mélange des produits. Ceci entraîne un accroissement du taux de l'activité microbiologique et de la vitesse de dégradation des substrats (Dresboll et Magid, 2006). Après broyage, la granulométrie initiale de ces sous-produits est hétérogène. C'est un mélange de plusieurs fractions dont la présence de grandes particules (Plus de 30% des particules ont une dimensions supérieures à 9 mm) est nécessaire pour faciliter la respiration et éviter le compactage des andains (tableau I.5, figure I.11).

Au cours du processus de compostage, la granulométrie de substrat diminue suite à la dégradation de la matière organique par les micro-organismes. Cette diminution se traduit par une diminution des taux des grandes fractions supérieures à 5 mm au profit de l'augmentation des fractions plus petites ayant des dimensions inférieures ou égales à 5 mm (tableau I.5, figure I.11). Ainsi, l'augmentation de la fraction 2 à 5 mm est de 139, 145 et 140 % respectivement pour les andains I, II et III. A l'inverse, les fractions qui ont subi une décomposition avancée sont les fractions ayant une granulométrie élevée.

L'oxygène est consommé d'une part par les micro-organismes au cours de leur respiration et, d'autre part, par les réactions d'oxydation consommatrices d'oxygène. Un taux de 10 à 15%

d'oxygène lacunaire est considéré comme adéquat et le seuil minimal nécessaire pour maintenir des conditions aérobiques est d'environ 5% d'oxygène (Schulze, 1962). A des valeurs inférieures, on se met dans des conditions d'anaérobie susceptibles de déséquilibrer la flore en place au profit d'une autre qui pourra évoluer vers un processus de méthanisation avec production de biogaz (Eliott et Travis, 1973 ; Lopez-Real et Baptista, 1996). La vitesse de transfert de l'oxygène de cet espace aux micro-organismes conditionne la vitesse du compostage.

Les besoins des micro-organismes aérobies évoluent au cours de compostage. Ils sont maximaux au démarrage et lors des premières phases de dégradation intense de la matière organique fermentescible (Mustin, 1987). La disparition progressive de cette fraction provoque une diminution proportionnelle des besoins en oxygène, jusqu'à la période de maturation du compost où une faible consommation résiduelle est encore nécessaire. Ceci justifie la continuité des retournements de nos andains, après la phase de refroidissement de compostage, même à faible fréquence (un retournement tous les 5 jours). La consommation de l'oxygène est donc un paramètre direct de l'activité des micro-organismes aérobies qui permet de situer le stade d'évolution atteint par un compost.

Les températures optimales d'un compostage sont celles qui permettent une dégradation rapide des matières organiques et une hygiénisation du compost. Le compostage permet d'éliminer plusieurs organismes indésirables comme les champignons, les bactéries, les nématodes et certains virus (Pera et Calvet, 1989 ; Kuter *et al.*, 1985 ; Bollen, 1985 ; Haug, 1993). Les champignons, connus pour leurs dégâts en horticulture, sont éliminés par compostage, même ceux réputés résistants et très persistants dans le sol sont détruits tels que; *Fusarium oxysporum*, *Sclerotium cepivorum*, *Stromatina gladioli*, *Verticillium dahlie* etc... (tableau 10 "Revue bibliographique") (Bollen, 1984; Duval, 1992).

L'augmentation de la température au début de l'opération du compostage et sa persistance pendant plus de 25 jours à des valeurs de 55 à 70°C (figures I.1, I.2, I.6 et I.7) a montré son efficacité à éliminer complètement l'agent pathogène *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*, responsable de la fusariose vasculaire du palmier dattier (Bayoud).

La cinétique de destruction du champignon pathogène, responsable de la fusariose vasculaire du palmier dattier, est identique pour les andains contenant du fumier, mais sa densité est caractéristique des conditions expérimentales. Nous pouvons distinguer deux phases

principales (figures I.4 et I.10) : une première qui dure environ cinq jours, pendant laquelle la population fusarienne initiale chute rapidement. Cette chute dépend du taux du fumier introduit dans l'andain. Chaque fois que ce taux est grand, chaque fois que la chute est rapide. Elle dépend aussi de la fréquence de retournement : la cinétique de destruction de ce champignon est identique pour les deux andains I et II, mais différente de celle de l'andain III (le moins aéré). La température de la phase thermophile de ce dernier, inférieure à celle des deux autres, a fait que la vitesse de l'élimination de l'agent pathogène est moins rapide.

La seconde phase dure environ 12 à 15 jours pendant laquelle la microflore fusarienne continue de baisser mais lentement jusqu'à sa disparition totale (figures I.4 et I.10). Ceci est vrai pour tous les andains qui contiennent du fumier à l'exception de l'andain F1 (le moins riche en fumier). La température de la phase thermophile de ce dernier, inférieure à celles des autres, a fait que la vitesse de l'élimination de l'agent pathogène est moins rapide et que la prolifération de l'agent pathogène a repris à partir du 45^{ème} jour, après le rétablissement des conditions favorables dans la phase de maturation du compost et a atteint sa valeur initiale après le 75^{ème} jour du compostage.

La présence de l'urée comme source d'azote dans l'andain (Ur) n'a pas affecté le comportement de l'agent pathogène, alors que l'azote ammoniacale (Az) a stimulé sa prolifération (figure I.4) et pourrait constituer la source préférentielle assimilable par *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*. Généralement, la forme ammoniacale est la plus utilisée par les *Fusaria* comme source d'azote (Griffin, 1970). Messian et al., (1991) rapportent que les conidies du *Fusarium* sont très actives dans un milieu ammoniacal. De même, Ezelin-de souza, 1998 a montré que le compost de bagasse mélangé avec l'urée a un effet réceptif vis-à-vis de *Fusarium solani* par contre le compost issue de bagasse seul a un effet suppressif vis-à-vis de ce champignon. D'autres études ont montré que les substrats carencés en azote permettent de contrôler la pourriture racinaire des plantes causée par *Fusarium solani* (Patrick et Toussoun, 1965; Messian et al., 1991). Cette inhibition de *Fusarium* qui est due à une déficience en azote a été expliquée par l'inhibition de la maturité des chlamydospores (Griffin, 1976) et par la lyse des tubes germinatifs (Patrick et Toussoun, 1965).

Il est connu que la croissance du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* commence à 7°C et s'arrête aux environs de 38°C (Bulit et al., 1967). En étudiant la germination des chlamydospores du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*, Bounaga (1975) a montré que cette germination est arrêtée vers 60°C, sans que cette température soit mortelle. Les résultats de

nos expérimentations réalisées sur des morceaux de rachis des palmes infectées par *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis* (Photo I.1 et I.2 ; Tableau I.4), montrent bien qu'il suffit d'incuber les sous-produits infectés pendant 6 heures à 70°C, ou pendant 12 heures à 60°C pour détruire complètement l'agent pathogène logé dans ces sous-produits et ceci quels que soient la variété et le taux d'humidité des sous-produits. L'humidité par ses propriétés de conductrice de chaleur, accélère l'élimination du champignon : pour un traitement de 6 heures à 60°C, le champignon des sous-produits humides (40 à 45% d'humidité) des deux variétés est complètement détruit. Cependant, pour les sous-produits moins humides (20 à 25% d'humidité) l'inhibition n'est que de 50 à 75% (photos I.1 et I.2 ; tableau I.4). Ces résultats confirment, en partie, la destruction du *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis* observée dans les andains contenant le fumier (figures I.4 et I.10).

La destruction des agents pathogènes exigera une exposition de toutes les parties de l'andain à une température autour de 55°C pendant au moins trois jours. Une durée de cinq jours sous une température de 55°C est souhaitable (Bollen, 1984). Les meilleurs résultats sont obtenus à une température voisine de 60 à 70°C (Jeris et Regan, 1973). Des souches de Salmonelles sont complètement détruites dans un compost à 65°C pendant une journée (Knoll, 1961). L'élimination des micro-organismes pathogènes durant le processus de compostage peut se faire aussi par compétition avec d'autres micro-organismes non pathogènes (Knoll, 1961 ; Phae et Shoda, 1990). Plusieurs auteurs ont montré le rôle des micro-organismes telluriques dans la résistance des sols aux fusarioses vasculaires (Rouxel et al., 1979 ; Alabouvette et al., 1980 ; Amir et Amir, 1988 ; Maslouhy, 1989).

Dans le compost, les micro-organismes ont besoin d'éléments nutritifs (azote, phosphore, potassium, oligo-éléments) et exigent du carbone organique comme source d'énergie. Le rapport Carbone/Azote (C/N) idéal qui garantit un bon démarrage du compostage des sous-produits et son déroulement optimal doit être situé entre 25 et 45 (Gotaas, 1959 ; Mustin, 1987). S'il est trop élevé, le temps requis pour la biodégradation devient plus long et s'il est faible, l'azote est, en grande partie, perdu sous forme d'ammoniac par voie de volatilisation ou par départ de nitrates (Mustin, 1987).

Le rapport C/N des sous-produits du palmier dattier est très élevé (115,4), du fait que ces derniers sont très riches en matières organiques (90%) et très pauvres en azote (0,39%) (tableaux I.3 et I.6). Dans ces conditions, le démarrage du processus de compostage n'a pas eu lieu (figure I.1 et I.2). L'ajout du fumier, beaucoup plus riche en azote (1,5%) (tableaux

I.3 et I.6), s'avérait nécessaire pour déclencher l'activité biologique dans les andains en compostage. L'apport du fumier a ramené les rapports C/N dans les andains F2, F3, F4 et F5 à des valeurs de 35 à 60 qui ont déclenché le processus du compostage (tableau I.3 ; figures I.1 et I.2). Certes, la majorité de ces rapports restent toujours supérieurs à celui considéré comme optimal pour un bon démarrage de l'activité biologique (25 à 45) (Gotaas, 1959 ; Mustin, 1987), mais le processus de compostage a bien démarré dans les quatre andains. Les besoins azotés du compostage sont donc fonction de la teneur en matériaux carbonés facilement biodégradables. Pour les teneurs en carbone organique total qui varient peu autour de 50% de la matière sèche (45 à 55%), les teneurs optimales d'azote sont de 0,7%, pour les substrats les plus difficilement biodégradables, à 2% pour les substrats les plus dégradables (Mustin, 1987). Selon cet auteur, notre substrat est ligno-cellulosique, donc considéré comme peu biodégradable.

Selon nos résultats (tableau I.3, figure I.3), le rapport C/N, seul, ne peut pas expliquer ce phénomène, puisque dans les andains Ur et Az dont les rapport C/N sont d'environ 40, le processus du compostage n'a pas démarré. Les sous-produits du palmier dattier de l'oasis de Figuig exposés aux rayons du soleil chauds et à une humidité atmosphérique relativement très faible n'ont pas pu développer une microflore microbienne capable de déclencher leur biodégradation. Donc, cela signifie qu'en plus des sources d'azote, le fumier bovin véhicule aussi une flore microbienne indispensable pour la décomposition de ces sous-produits.

L'augmentation du rapport C/N observée dans les andains contenant de l'urée (Ur) ou de l'azote ammoniacal (Az), pourrait être expliquée par une faible dégradation des matières organiques qui minimise les pertes de carbone et par une forte perte d'azote par lessivage au cours des arrosages répétés ou/et par volatilisation sous forme d'ammoniac. En effet, l'urée est facilement et rapidement hydrolysée par les micro-organismes.

En fonction de la matière première à composter, la baisse du rapport C/N peut atteindre une valeur 13 dans un compost fini. Ceci s'explique par le fait que les micro-organismes consomment plus de carbone (principal constituant des molécules organiques) que d'azote. Veeken et *al.* (2001) ont montré que 40% de la matière organique sont dégradés durant 4 semaines de compostage. Ces baisses des rapports C/N constatées dans nos andains en présence du fumier, sont dues principalement à la dégradation de la matière organique puisque son taux a été réduit de 26 à 28% (tableau I.7) et à l'augmentation de l'azote total qui pourrait être due à l'activité des bactéries fixatrices d'azote, à la dégradation des protéines des matériaux de départ et aussi aux résidus des micro-organismes qui se multiplient au début de

compostage (Mustin, 1987). Au bout de 80 jours de compostage et en fonction de la fréquence de retournement, le volume total et le poids sec des andains sont réduits respectivement de 27 à 35% et de 16 à 24% (tableau I.7). Ces baisses apparaissent faibles en les comparant à celles décrites dans la littérature : 26 à 60% pour le poids et 40 à 66% pour le volume (Kochtizky et *al.*, 1969 ; Jeris et Regan, 1973 ; Larney et *al.*, 2000). Cette faible perte de poids pourrait être expliquée par le rapport C/N élevé du mélange composté, (Dresboll et Magid, 2006). Ces baisses sont dues principalement à la dégradation de la matière organique puisque son taux a été réduit de 15 à 23%. Quant à l'azote total, son taux a été augmenté de 20 à 40% ce qui a conduit à une chute du rapport C/N de 44 ; 37 et 29%, respectivement, pour l'andain I, II et III. Ceci montre bien qu'une aération optimale entraîne une meilleure activité de dégradation au cours de l'opération de compostage. Les pertes du carbone et de l'azote se font principalement sous forme de CO₂ et de l'ammoniac. Eghball et *al.* (1997) ont montré que 46 à 62% de carbone sont perdus sous forme de gaz carbonique et 19 à 42% d'azote total sous forme d'ammoniac volatil. Les rapports C/N des différents andains restent toujours élevés après 75 à 80 jours de compostage; ils sont de 22 à 53 (tableaux I.3 et I.7). Les matières organiques de ces composts pourraient encore être dégradées par la flore mésophile qui participe activement dans la maturation du compost. Selon Veeken et *al.* (2001), ce produit qui contient encore des matières organiques biodégradables, surtout la cellulose, pourra avoir un pouvoir phytosanitaire et être un bon amendement organique du sol.

CONCLUSION

Le compostage est un processus de décomposition biologique des matériaux organiques dans des conditions qui permettent le développement de température thermophile avec production d'un produit fini, stable et hygiénisé.

Dans cette partie nous avons évalué l'effet des apports des sources d'azote selon son origine chimique (urée et azote ammoniacal) ou organique (fumier bovin) sur le compostage des sous-produits du palmier dattier dont 10% sont contaminés par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* par rapport au témoin constitué uniquement de ces sous-produits broyés. Nous avons étudié également l'effet de la fréquence de retournement sur le compostage du mélange optimal qui est constitué de 25% de fumier bovin et 75% de broyat des sous-produits du palmier dattier.

La comparaison des résultats obtenus d'une part dans les mélanges contenant le fumier bovin (F1, F2, F3, F4, F5) et d'autre part dans les mélanges composés de l'azote minérale (Ur et Az) par rapport au témoin (T) montre que seul le fumier favorise le démarrage du processus de compostage des sous-produits du palmier dattier. En effet, l'évolution de la température, de la matière organique, de l'azote totale, du rapport C/N et de la population de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* sont nettement meilleurs en présence de fumier en comparaison aux autres mélanges.

Au sein des andains contenant le fumier bovin, la température maximale atteinte, ainsi que l'évolution de *Fusarium* pathogène au cours du compostage dépendent de la quantité de fumier présente dans le mélange. Nos résultats montrent que plus il y a de fumier plus la température maximale est élevée et la destruction de l'agent pathogène est rapide. Un apport de 20% de fumier bovin est le taux minimal qui assure un bon compostage des sous-produits du palmier dattier broyés et, surtout, qui détruit complètement le *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* logé dans ces sous-produits par l'effet thermique engendré par la décomposition microbienne des sous-produits en aérobiose. Cet effet thermique sur le comportement du champignon pathogène a été confirmé par les résultats des tests *in vitro* effectués sur des morceaux de rachis contaminés qui montrent bien l'implication de la température et de l'humidité dans la destruction de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. En effet, la température nécessaire pour détruire ce pathogène dépend de l'humidité du matériel

contaminé. Généralement, une température de 60°C pendant 12 heures est suffisante pour détruire ce pathogène.

Le contrôle de l'aération, est essentiel pour mener à bien l'évolution de la matière organique et obtenir un compost de qualité. Un retournement chaque trois jours pendant la phase thermophile est suffisant pour composter les sous-produits du palmier dattier mélangés avec 25% de fumier bovin en volume.

Au cours de l'opération du compostage, le pH reste stable alors que la conductivité électrique subit une diminution quelles que soit la composition des andains et la fréquence de retournement.

L'évolution du rapport C/N est fonction de la matière première. Ce rapport subit une réduction en présence de fumier bovin et une augmentation dans les andains contenant de l'urée (Ur) ou de l'azote ammoniacal (Az). Cette évolution du rapport C/N est due principalement à la diminution du taux de la matière organique et à l'augmentation du taux d'azote observée dans les andains contenant le fumier bovin. Elle pourrait également être due à la réduction de l'azote et la stabilisation de matière organique observée en présence d'autres sources d'azote (Az et Ur).

Au cours du compostage, la décomposition de la matière organique est reflétée par la diminution du taux des fractions ayant des dimensions supérieures à 5 mm, qui sont remplacées par des fractions ayant des dimensions inférieures.

Nos résultats montrent qu'un taux de 25% de fumier, un retournement chaque trois jours pendant la phase thermophile et un maintien d'un taux d'humidité entre 55 et 70% constituent des conditions optimales pour assurer un bon processus de compostage des sous-produits du palmier dattier broyés.

CHAPITRE II

**QUALITES PHYSICO-
CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES
DU COMPOST MÛR**

INTRODUCTION

La palmeraie de l'oasis de Figuig est caractérisée par une architecture particulière, le palmier dattier "*Phoenix dactylifera*" est l'axe principal de sa structure, autour duquel gravite un ensemble d'autres cultures arboricoles, légumineuses et fourragères, formant ainsi un mélange anarchique d'espèces, de variétés et de classes d'âge. Ce mélange, souvent volontaire, est gouverné par les conditions socio-économiques des oasiens et par la fusariose vasculaire (Bayoud), une maladie redoutable qui attaque les meilleures variétés des dattiers. Pour subvenir à une partie de leurs besoins, les oasiens utilisent tout le long de l'année les produits de leurs petites parcelles souvent limitées. Ils associent, par nécessité, diverses cultures répondant à leurs besoins et à ceux de leurs animaux. D'où l'origine d'une surexploitation d'un sol déjà fragilisé par accumulation des sels, ensablement et épuisement des matières organiques. Cet épuisement est accéléré par l'aridité de climat (Aguilar et al 1997), le manque des matières fertilisantes locales, l'irrigation par des eaux de qualité moyenne, voire médiocre (Bouakka et Hakkou, 2004) et l'utilisation des engrais chimiques.

La palmeraie de l'oasis de Figuig génère chaque année une biomasse importante estimée à environ 8000 tonnes des sous-produits susceptibles d'être valorisés. L'accumulation de cette biomasse à l'intérieur de la palmeraie constitue un véritable problème écologique et phytosanitaire.

Nous avons, d'une part, l'accumulation des sous-produits organiques du palmier dattier dans la palmeraie qui partent souvent en fumée par simple combustion et, d'autre part, une demande importante et croissante en matière organique. Pour résoudre ce paradoxe, on peut envisager le recyclage de ces sous-produits par voie biologique. Le compostage est la technique la plus intéressante pour la valorisation de ces matières organiques. Il a été recommandé comme un composant essentiel pour entretenir l'agriculture (Arrouge et al., 1999, Edwards et al., 2000) et restaurer les fonctions écologiques et économiques du sol (Shalipour et al 1992). Ce processus de fermentation aérobie aboutit à la formation d'un compost, facteur de protection, de stabilité et de fertilité du sol (Haug 1993 ; Martinez et al 2003). L'application du compost mûr améliore la fertilité des sols dégradés et pauvres en nutriments, la porosité, la capacité de rétention en eau, l'activité microbienne, la biomasse microbienne du sol et la productivité des plantes (diaz et al., 1994; Roldan et al., 1996; Ehaliotis et al., 1998; Garcia-Gil et al., 2000 ; Guerrero et al., 2000; Borken et al., 2002 ; Yao et al.,2006). L'utilisation de ce compost, comme amendement organique, pourra

remédier aux problèmes de l'appauvrissement et de la salinisation des sols du milieu oasien et contribuera à la lutte contre des maladies des plantes d'origine tellurique. Plusieurs auteurs ont montré l'importance de l'utilisation du compost dans, le contrôle et la réduction des maladies des cultures agricoles (Hoitink et Fahy 1986; Chung et Hoitink, 1990 ; De Brito Alvarez et *al.*, 1995; Haug, 1993 ; Hoitink et Grebus, 1994; Cotxarrera et *al.*, 2002) et l'inhibition des mauvaises herbes. Dans le chapitre précédent nous avons montré que le processus de compostage des sous-produits du palmier dattier contaminés par *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*, en présence de fumier bovin, aboutit à un compost sain, puisque ce champignon pathogène est complètement éliminé pendant le processus de compostage. Le compost peut être aussi utilisé pour stabiliser le pH et neutraliser les sols acides grâce à ses bases échangeables (Ca, Mg, K, Na) présentes au niveau du complexe argilo-humique. Ces complexes sont aussi responsables du pouvoir tampon du sol et de sa capacité à résister aux variations du pH (Dick et McCoy, 1993; Gobat et *al* 1998; Hueet Licudine, 1999, Gobat et *al* 2003). Globalement, l'apport de matières organiques comme amendement du sol améliore ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques (Chenu, 2002).

La valorisation de ces sous-produits nécessite donc de connaître leurs évolutions afin d'optimiser leur utilisation et leur innocuité vis-à-vis de l'environnement. La qualité du compost livré aux agriculteurs doit aussi présenter des critères répondant aux normes internationales qu'ils soient physiques (densité, granulométrie, capacité de rétention en eau...), chimiques (taux de matière organique, rapport C/N, pH, conductivité électrique, teneur en éléments fertilisants et teneur en métaux lourds), biologiques (indice de stabilité biologique et test de maturité respirométrique) ou phytosanitaires (absence d'agents pathogènes, des graines d'adventice, corps étrangers...). A partir de ces critères, le degré de maturité pourra être en partie apprécié. A coté de cette approche essentiellement analytique, la qualité de compost s'apprécie aussi par des tests agronomiques au laboratoire ou/et en plein champ. En effet, l'insuffisance de maturité se traduit généralement par un échauffement résultant de la présence des produits facilement fermentescibles ou par une carence en azote (Pommel, Just, 1977) et, surtout, par inhibition de la germination des graines, la croissance racinaire, la croissance des plantes et la stimulation des maladies (Zucconi et *al.*, 1981; Hoitink et Boehem, 1999).

Ce chapitre consiste à évaluer la qualité du compost des sous-produits du palmier dattier obtenu après 6 mois de maturation en déterminant leur paramètres physico-chimiques (granulométrie, C/N, rétention en eau, pH, conductivité), biologiques (indice de stabilité

biologique, tests de maturité respirométrique, test de germination) et leur importance agronomique en étudiant leurs effets sur la croissance des plantules de tomate et du palmier dattier dans la chambre de culture et le rendement de courgette en plein champ.

RESULTATS ET DISCUSSION

La qualité d'un compost est évaluée aux moyens d'analyses physico-chimiques et biologiques et aussi par des tests agronomiques. Il existe certaines normes importantes à considérer pour établir cette qualité, notamment la maturité, la concentration en matières organiques, la présence de contaminants physiques, le pH, la granulométrie, la concentration en éléments nutritifs, le taux d'humidité et la composition et les concentrations de métaux lourds. Le compost peut contenir différentes quantités d'éléments nutritifs comme l'azote, le phosphore et le potassium, mais les concentrations de ces éléments ne sont pas aussi élevées dans le compost que dans les engrais. Le compost est en réalité un amendement du sol ou un traitement pour le sol visant à lui rendre sa matière organique et à améliorer sa structure physique, son aération et ses capacités de rétention en eau.

1. Paramètres physico-chimiques du compost

Pour évaluer la capacité d'un substrat à répondre aux besoins nutritifs des plantes, il est nécessaire de se référer à leurs caractéristiques physico-chimiques. Le tableau II.1 montre que le compost des sous-produits du palmier dattier obtenu après 6 mois de maturation présente des caractéristiques physico-chimiques appropriées, avec un pourcentage de la matière organique de 38%, un pH proche de la neutralité, un taux d'azote modéré et un rapport C/N de 20. Ce compost présente les caractéristiques (tableau II.1) d'un compost mûr décrit dans la littérature tels que un taux de matière organique supérieur à 30%, un pH situé entre 7,0 et 7,6 (Garcia, et *al.*, 1991) et un rapport C/N inférieure à 25 (CCME, BNQ, 1995). Le rapport C/N est traditionnellement employé pour évaluer la maturité des composts car leur évolution est en relation directe avec la biodégradation de la matière organique (Atallah et *al.*, 1995) qui se traduit à la fois par l'élimination du carbone sous forme de CO₂ et par la concentration des éléments minéraux (N, P, K...). Cela explique leur diminution au cours du compostage pour se stabiliser à une valeur inférieure à 17 selon Randle et Hays (1972), 20 selon Rajasekaran et Sampathkumar (1981) et 25 selon les normes canadiennes (CCME, BNQ, 1995). Cette diminution indique une évolution de la matière organique vers des formes plus stables et plus humifiées. Selon Fricke et Vogtman (1994), lors de l'application d'un amendement organique dans le sol, le rapport C/N doit être inférieur à 20 afin d'éviter le phénomène de « faim d'azote ». Evanylo et Daniels, (1999); Bellamy et *al.*, (1995), Simard et *al.*, (1998); Levy et Taylor (2003) rapportent que les fortes valeurs du rapport C/N sont à

l'origine de la phytotoxicité, de l'immobilisation de l'azote et de l'inhibition de la croissance des plantes de certains composts. La maturité des composts peut être aussi évaluée par la valeur du rapport C/N final sur le rapport C/N initial (Morel et al., 1979). D'après Jimenez et Garcia (1989), ce rapport doit être inférieur à 0,75.

Tableau II.1 : Caractéristiques physico-chimiques du compost des sous-produits du palmier dattier.

% H	% MO	pH	CE en ms/cm	% NTK	C/N f	C/Nf/ C/Ni
50± 2	38± 4	7,5± 0,05	9,63± 0,29	0,94 ± 0,1	20 ± 1	0,43

H : humidité ; MO : matière organique; CE : Conductivité électrique à 20°C ; NTK : azote totale kjeldahl ; C/Nf : rapport C/N final; C/Ni : rapport C/N initial.

La conductivité électrique du compost fournit aussi des informations intéressantes sur la présence des sels solubles tels que le potassium (K), le magnésium (Mg), le calcium (Ca) et le sodium (Na). A part le sodium, ces sels sont essentiels à la croissance des plantes. Une forte conductivité (tableau II.1) indique une valeur fertilisante élevée. Le comité de normalisation ne prend pas en compte ce paramètre comme critère de qualité, car il ne donne pas des informations claires sur les ions impliqués (BNQ, 1995).

Le compost tend à augmenter le pH et la conductivité électrique des sols acides (Zheljazkov, Warman, 2004). Cette augmentation est due aux bases échangeables (Ca, Mg, K, et Na) présentes au niveau des complexes argilo-humiques (Mustin, 1987). Ces complexes sont aussi responsables du pouvoir tampon du sol et de sa capacité à résister aux variations du pH. Les caractéristiques physico-chimiques de compost des sous-produits du palmier dattier obtenu après 6 mois de maturation sont très proches de celles du compost commercialisé sous le nom "PERE BIO" résultant du compostage d'un mélange des fumiers des bovins, du cheval et du mouton, qui se caractérise par une teneur de la matière organique de 35%, un taux d'azote de 0,83% et un rapport C/N de 21. Ce compost répond à la norme U44-051 (Ezelin - de Souza 1998).

Comparativement à la tourbe, le compost des sous-produits du palmier dattier est caractérisé par une meilleure capacité de rétention en eau (tableau II.2) puisqu'il retient trois fois son poids sec en eau. Potvin et Bernard (1995) ont montré que les composts peuvent retenir 2 à 5 fois leurs poids sec en eau. L'addition du compost des sous-produits du palmier dattier au sol améliore directement leurs propriétés physiques en augmentant leur taux de matière organique, et leur capacité de rétention en eau (tableau II.2) et par conséquence, une amélioration des réserves en eau utile. Ce phénomène est associé en grande partie à la

quantité et à la qualité de la matière organique apportée au sol (Gagnon et al., 1998, Gobat et al 2003).

L'augmentation de la capacité de rétention en eau en présence du compost du palmier dattier présentera ainsi un effet bénéfique pour les sols de la palmeraie en période de sécheresse et entraînera une économie d'eau dans une région où l'eau constitue une denrée rare et précieuse.

Tableau II.2 : Caractéristiques physiques des substrats et mélanges de substrats.

	Tourbe	Compost	Sol	1/3 Compost	1/2 Compost
Capacité de rétention en eau en %	66 ± 2	75 ± 3	49 ± 1	53 ± 1	56 ± 1
Densité apparente en g/l	453 ± 11	357 ± 29	1265±4	928 ± 17	821 ± 24
Densité réelle en g/l	1170 ± 10	1599 ±13	2526 ± 6	2493 ± 9	2431 ± 18
Porosité totale en %	61 ± 0,7	78 ± 1	50 ± 0,3	63 ± 0,6	66 ± 1
Matière organique totale en %	90 ± 2	38 ± 4	6 ± 0,3	8 ± 0,5	12 ± 1

1/3 Compost : mélange sol et compost (2V/V) ; 1/2 compost : mélange sol et compost (V/V).

L'addition de compost au sol permet également le maintien d'une bonne porosité (tableau II.2), qui améliore le drainage naturel des sols et facilite les échanges gazeux, malgré sa fine granulométrie. En effet, environ 80% du compost sont constitués par des fractions de particules ayant des diamètres inférieurs à 3 mm (figure II.1).

Plusieurs auteurs ont montré l'effet bénéfique de l'application du compost sur la structure du sol (Giusquiani et al., 1995; Rosen et al., 1993 ; Abdelhamid et al., 2004). Des études à court et à moyen terme ont indiqué l'existence d'une relation linéaire entre la réduction de la densité du sol par application du compost et l'augmentation des taux des matières organiques. Cette diminution de la densité du sol est due à l'effet de dilution provoqué par l'application des matières organiques moins denses (Tester, 1990). Ce changement dans les propriétés physiques et structurales du sol (densité, stabilité des agrégats et porosité) est le résultat de l'interaction entre les matières organiques ajoutées et les matériaux du sol (Guisquiani et al., 1995 ; Bresson et al., 2001).

La richesse en éléments nutritifs essentiels à la vie des plantes tels que l'azote, le phosphore, le potassium, le magnésium et le calcium (tableau II.3) qui s'ajoute aux différents autres critères physiques et chimiques font du compost des sous-produits du palmier dattier un bon amendement organique, qui peut se substituer en partie à la tourbe et aux engrais organiques. Les macro-éléments regroupent l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium et le soufre. Ces éléments fournissent les principaux nutriments aux végétaux.

Ils sont les principaux cations impliqués dans la capacité d'échange cationique (CEC) des sols et ils sont également responsables de leur pouvoir tampon. L'azote, le phosphore et le potassium sont consommés en grandes quantités par les végétaux. Ils contribuent tous à des fonctions précises comme la croissance des feuilles et des tiges, la croissance des racines et le développement des fleurs et des fruits.

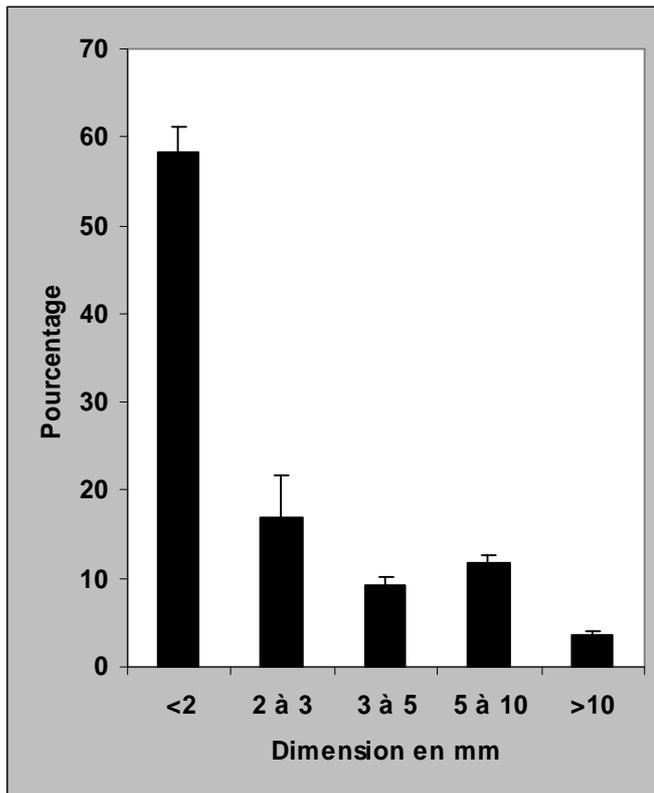


Figure II.1 : Granulométrie du compost mûr
Le pourcentage moyen est calculé à partir de trois répétitions.

Tableau II.3 : Teneurs en macro-éléments nutritifs du compost

	Na	Mg	K	Ca	P ₂ O ₅
Taux en g/100 g du compost sec	0,61 ± 0,07	0,96 ± 0,05	1,19 ± 0,13	7,28 ± 1,24	1,2 ± 0,11

Afin d'atteindre une limite claire pour l'élimination des déchets en agriculture, les exigences minimales pour les divers produits doivent être définies. La qualité minimale comprend trois aspects : métaux lourds, hygiène et corps étrangers. Contrairement aux engrais inorganiques, les fumures organiques apportent, en plus des macroéléments, un complément des micro-éléments (oligo-éléments) qui sont indispensables au bon développement des végétaux. On y retrouve le fer, le manganèse, le cuivre et le zinc. Leur présence en très petites quantités est

essentielle à la vie des végétaux. L'approvisionnement équilibré et en quantité optimale de ces micro-éléments a un impact critique, car les excès peuvent nuire aux plantes et à l'environnement en général. Le compost offre une quantité équilibrée et raisonnable de ces micro-éléments. Le tableau (II.4) montre que les teneurs en éléments traces métalliques (Cr, Cu, Ni, Zn, et Pb) du compost des sous-produits du palmier dattier sont inférieures aux limites maximales autorisées par la plupart des pays producteurs du compost (Belgique, Canada, Allemagne, Pays bas, et Espagne) (William et Brinton, 2000). Zheljzkov et Warman (2004) ont montré que le compost mûr des déchets municipaux contenant des concentrations en Cu, Pb, Mo et en Zn de 311, 223, 17 et 767 mg/Kg respectivement, peut être utilisé comme amendement organique du sol sans effets sur des cultures agricoles et sans augmenter les taux normaux du Cu, Pb et du Zn dans les tissus de ces cultures. En ce qui concerne la présence des métaux lourds, les analyses montrent que notre compost répond aux critères de qualité A et AA de la norme canadienne du compost (CAN:BNQ 0413-200, 1997). Donc l'application du compost des sous-produits du palmier dattier en horticulture ou sur le sol n'aura aucun effet nocif sur l'environnement.

Tableau II.4 : Teneur en micro-éléments nutritifs du compost et limites autorisées par les pays producteurs du compost.

	Teneur du compost en mg/Kg	Limites des métaux lourds autorisés en mg/Kg					
		B (Agr)	B (Hort)	NL	D	SP	C (Agr)
Cr	13,2	150	200	70	100	750	210
Cu	14,8	100	500	90	100	1750	100
Ni	5,8	50	100	20	50	400	62
Zn	79,8	1000	1500	280	400	4000	500
Pb	18	600	1000	120	150	1200	150

B : Belgique; C : Canada; D : Allemagne; NL : Pays bas ; SP : Espagne; Agr : utilisation en agriculture ou sur sol; Hort : utilisation en horticulture.

2. Stabilité biologique du compost

Les normes de qualité des composts sont importantes et doivent être respectées pour prévenir des dégâts éventuels sur l'environnement, mais elles sont insuffisantes pour les utilisateurs professionnels. Pour ces derniers, les paramètres biologiques sont beaucoup plus importants, telles que l'activité biologique, la qualité microbiologique et la phytotoxicité, car ils s'intéressent à l'effet direct du compost sur la croissance et la santé des plantes.

La stabilité et la maturité du compost ont été identifiées comme ayant de grands effets sur les propriétés biologiques et chimiques des sols. A température et humidité constantes, l'activité

microbienne chute d'une façon exponentielle avec le temps ce qui réduit le taux de carbone biodisponible (Chodak et al., 2001). La respiration microbienne ou la production du CO₂ par le compost aéré sont souvent utilisées comme indicateurs de l'activité ou de la stabilité du compost (Wu et Ma, 2002). La maturité du compost correspond à une réduction des phénomènes de biodégradation, ce qui se traduit par une diminution de la consommation d'oxygène et la production de gaz carbonique par les matières compostées à des valeurs inférieures à 15g/kg pendant une semaine (seuil de maturité) (Morel et al., 1986 ; Nicolardot et al., 1986). Notre compost produit environ 9 g/kg de CO₂ pendant 7 jours avec un indice de minéralisation de 3% (figure II.2).

Mais on ne peut pas se baser sur ce paramètre seul pour juger la maturité de compost, car la faible production de CO₂ peut être due à l'épuisement des composés carbonés de faible poids moléculaire. Ce ralentissement pourrait aussi provenir d'une inhibition partielle des micro-organismes par des substances toxiques tels que les acides gras, les tanins ou les acides phénoliques non polymérisés (Henin, Just, 1967), les acides vanilliques ou para hydroxybenzoïques (Nuntagij et al., 1990) ou encore l'acide cinnamique et ses dérivés (Jung et al., 1968). La faible activité microbienne peut être aussi attribuée à la présence des substances antimicrobiennes résultantes de l'attaque de la lignine (Sening, 1963).

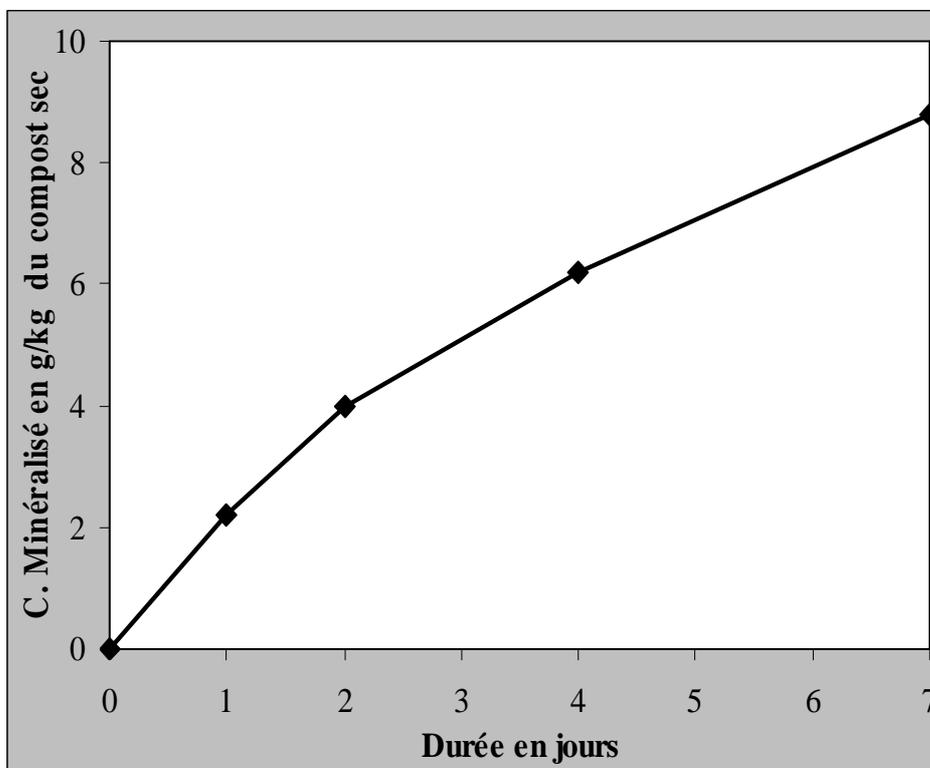


Figure II.2 : Cinétique de minéralisation du compost.

3. L'indice de stabilité biologique du compost

La valeur d'une matière fertilisante "amendement organique" s'apprécie par sa faculté à produire de l'humus stable dans le sol. Elle est estimée par la mesure de l'indice de stabilité biologique. A ce titre, la concentration en matière organique n'est nullement suffisante pour estimer la valeur amendante d'un produit donné car, seuls les produits riches en lignine et en tanins sont en fait susceptibles de produire de l'humus stable dans le sol. Cette capacité s'exprime classiquement par le "coefficient isohumique" mais la mesure de ce coefficient n'est possible que par des essais au champ menés sur une longue durée allant de 10 à 20 ans.

Pour pallier à cette difficulté, les recherches font recours à la caractérisation biochimique de la matière organique. Les résultats cités par Djakovitch (1988) montrent que le compost des sous-produits du palmier dattier (tableau II.5) a des caractéristiques plus proches de celles de la tourbe. De même, sa richesse en lignine et cutine confirme sa valeur fertilisante importante.

Tableau II.5 : Caractéristiques biochimiques de la matière organique du compost.

Fractions	Compost des sous-produits du palmier dattier	Compost des matières organiques (Djakovitch, 1988)	Tourbe (Djakovitch, 1988)
Fraction soluble	25,17	40	20
hémicellulose	22,83	14	16
cellulose	24,12	18	38
Lignine et cutine	27,88	28	26

Les valeurs sont exprimées en pourcentage des différentes fractions de la matière organique totale.

La maturité du compost est définie par le degré de stabilisation de sa matière organique. Dans notre cas, nous avons obtenu un indice de stabilité biologique de 59,2%. Ceci signifie que plus de 59 % de la matière organique est potentiellement stable. En effet, d'après la littérature, ce type de produit a un rôle nutritif et structural pour le sol. Il apporte non seulement des éléments minéraux, mais contribue également à l'amélioration de l'élasticité, de la capacité d'échange cationique, de la capacité de rétention en eau et de la porosité du sol (Borken et *al.*, 2002 ; Garcia-Gil et *al.*, 2000 ; Guerrero et *al.*, 2000). D'après la classification des amendements organiques proposée par Linéres et Djakovitch (1993) et Audureau (1992), le compost des sous-produits du palmier dattier a une très haute valeur isohumique, donc un pouvoir amendant élevé.

4. Evaluation de la phytotoxicité du compost

Les paramètres physico-chimiques et microbiologiques du compost donne une idée importante sur sa qualité et sa maturité mais son efficacité agronomique ne s'apprécie que par des tests biologiques (bio test) en laboratoire et en plein champ. Il est donc nécessaire, voire impératif de prendre en compte plusieurs critères afin de se prononcer sur le degré de maturité d'un compost. Toutefois, une valorisation agronomique du compost nécessite la réalisation d'une évaluation préalable de ses risques phytotoxiques.

L'indice de germination est un facteur relatif à la germination et à l'élongation racinaire. Il est largement utilisé pour évaluer la phytotoxicité du compost (Bernal et *al.*, 1998, Ait Baddi et *al.*, 2004). Pour évaluer le caractère phytotoxique de notre compost obtenu après 6 mois de maturation, on a procédé à des tests de germination des graines de cresson en raison de leur sensibilité à la pollution organique et à la salinité. Après 48 heures d'incubation, le taux de germination atteint est de 95% et l'indice de germination mesuré est de 84%. Selon le comité de normalisation CCME et BNQ qui exige un taux de germination supérieur à 90%, notre compost ne présente aucun effet phytotoxique. Tiquia et *al.*, (1996) ont montré que l'augmentation de cet indice indique, en plus de l'absence de la phytotoxicité, une forte maturité du compost.

5. Effet du compost sur la croissance des plantules de tomate en chambre de culture

La maturité d'un compost est relative à un objectif agronomique de valorisation selon un itinéraire technique bien défini. L'étude de la croissance des plantes de tomate confirme la maturité de ce compost. En effet, aucune inhibition de la croissance n'est observée dans les différents substrats étudiés (figure II.3).

En ce qui concerne la performance des substrats, les résultats montrent que le mélange : compost, tourbe et vermiculite (V/V/2V) est le support de culture le plus efficient (Figure II.3). Il permet une bonne croissance des plantes de tomate et un bon rendement en matière sèche et fraîche par rapport au mélange tourbe vermiculite (V/V) (substrat de référence). Ces résultats sont significativement différents selon le "test t de student" ($P < 5\%$). Cet effet pourrait être dû à la présence dans le compost des régulateurs de croissance tels que la gibbérelline, la cytokinine, l'acide indole acétique (auxine) (Atiyeh et *al* 2002) et pourrait être

aussi dû à la présence d'humus (Tichy, 1982; Atiyeh et al 2002) qui agit directement sur la physiologie des végétaux (Pedneault, 1994) en :

- réduisant la transpiration et la consommation d'eau ;
- augmentant la respiration racinaire et la photosynthèse ;
- améliorant l'efficacité des métabolismes internes ;
- stimulant la formation et la croissance des racines ;
- en augmentant le rendement et la résistance des végétaux.

L'utilisation du compost comme constituant de substrat de culture pour la croissance des plantes de tomate a amélioré donc les performances de la tourbe (substrat de référence). De nombreuses études ont montré que les composts peuvent substituer à la hauteur de 25 à 60% le volume de tourbe utilisée dans l'horticulture pour la préparation des substrats de croissance (Siminis et Manios, 1990; D'angelo, 1995; Chong et Cline, 1996; Kostov et al., 1996; Veeken et al 2005). De même, des effets synergiques de compost et de fertilisants chimiques ont été démontrés (Hountin et al., 1995 ; Simard et al., 1998).

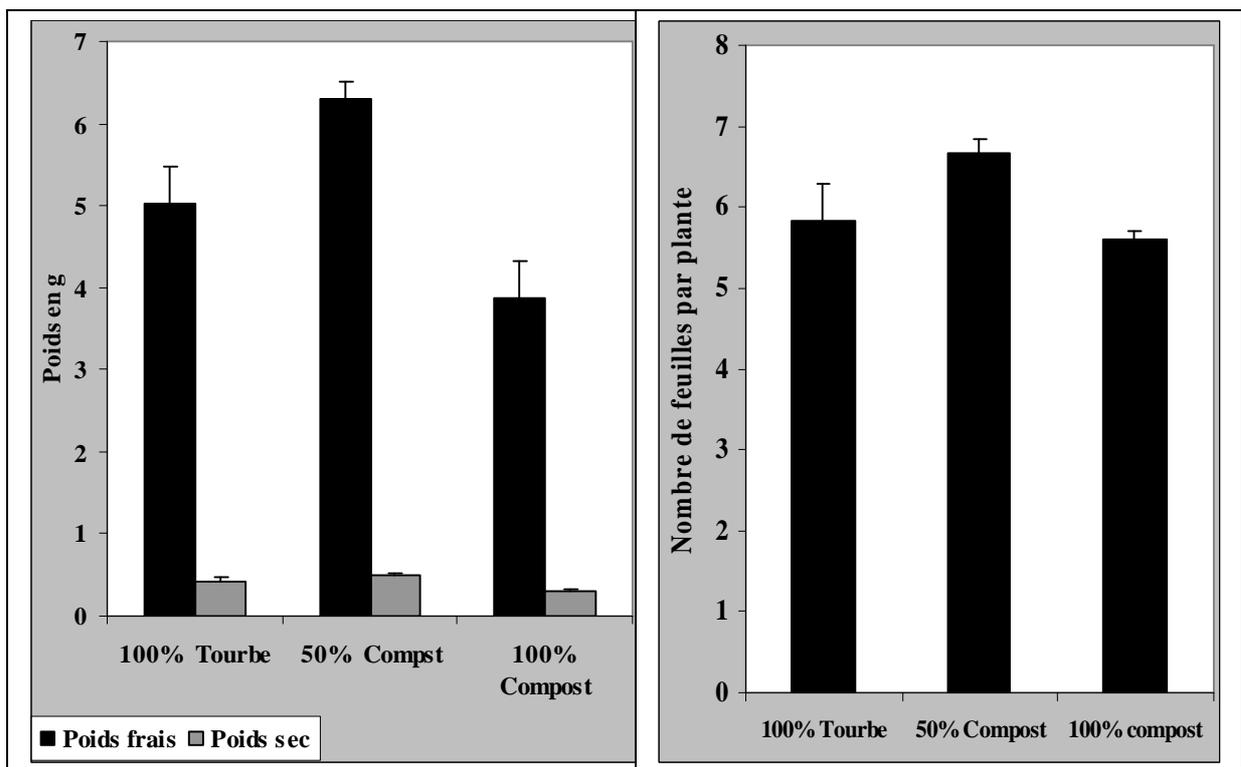


Figure II.3 : Effet du compost sur la croissance des plantules de tomate.

Le poids est exprimé en g de la partie aérienne d'une plante fraîche et séchée;

100% Tourbe : tourbe et vermiculite (V/V) ; 50% Compost : compost, tourbe et vermiculite (V/V/2V) ;

100% Compost : compost et vermiculite (V/V)

6. Effet du compost sur la croissance des plantules du palmier dattier en chambre de culture

Comparativement à la tourbe, le mélange tourbe compost V/V a montré une amélioration de la croissance des plantules du palmier dattier issue des graines de la variété boufagousse (figure II.4, II.5, II.6 et photo II.1). Nous avons ainsi constaté :

- une augmentation d'environ 66% du poids frais et sec de la partie aérienne et aussi de 20% de la longueur et du nombre de feuilles.
- Une augmentation de plus de 20% du poids sec et frais de la partie racinaire.

Les analyses statistiques selon le "test t de student" ($p < 0.05$) relèvent que les différences observées dans la partie aérienne sont très significatives. Par contre au niveau racinaire, elles ne sont pas significatives. D'après ces résultats, on pourrait conclure que ce compost peut se substituer à 50% du volume de la tourbe dans les mélanges des substrats de culture. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus dans le test de tomate (voir chapitre II.5) ce qui confirme la maturité et la stabilité de ce compost et l'absence de substances phytotoxiques. Ces résultats confirment également l'absence de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* l'agent responsable du Bayoud dans le compost puisque aucun symptôme de la dite maladie n'a été observé.

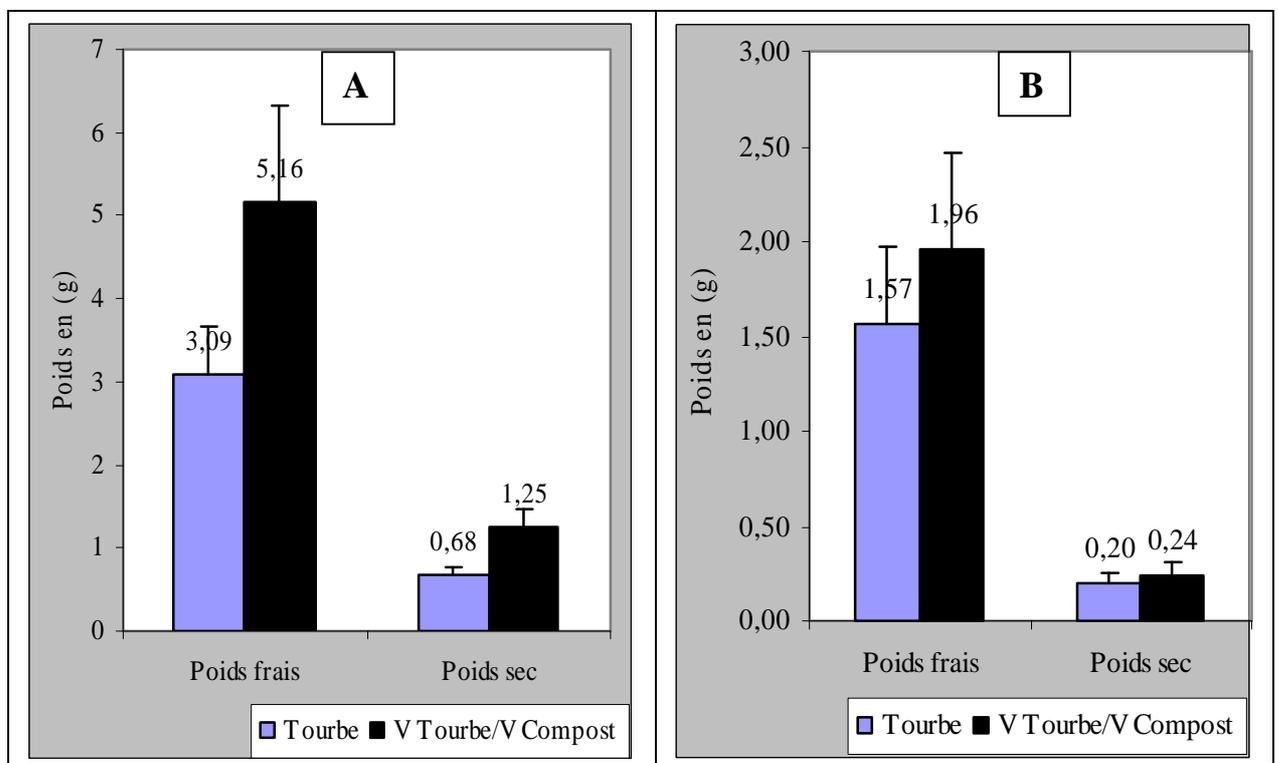


Figure II.4 : Effet du compost sur la croissance du plantule du palmier dattier.

A : Poids frais et sec de la partie aérienne ; B : Poids frais et sec de la partie racinaire.

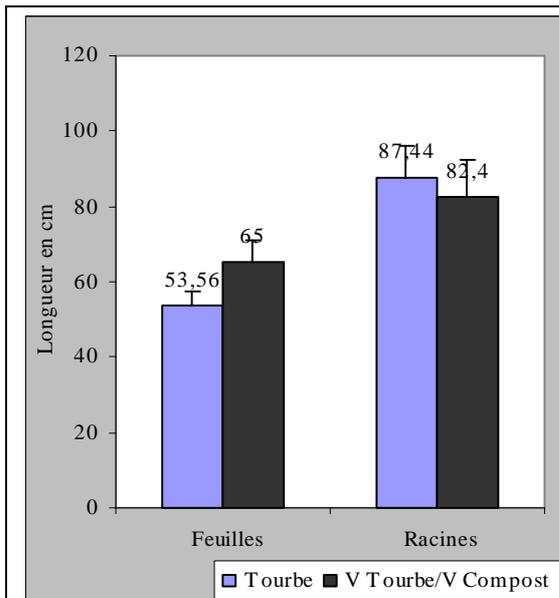


Figure II.5 : Effet du compost sur la croissance du plantule du palmier dattier, mesurée par la longueur des feuilles et des racines.

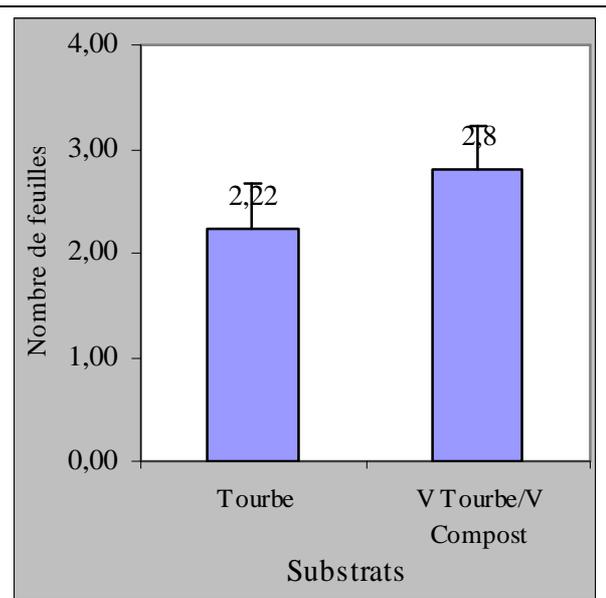


Figure II.6 : Effet du compost sur la croissance du plantule du palmier dattier, mesurée par le nombre de feuilles



Photo II.1: Effet du compost sur la croissance des plantules du palmier dattier

7. Effet du compost sur la production des courgettes en plein champ

La valeur agronomique du compost peut être définie comme l'aptitude du compost à améliorer la fertilité du sol. Pour déterminer la valeur agronomique du compost des sous-produits du palmier dattier, on a procédé à des tests à l'échelle réelle en plein champ au cours desquels on a suivi la vitesse de germination et la production des courgettes. D'après les résultats rassemblés dans la figure (II.7), nous constatons que le pourcentage de la germination atteint 100% dans les trois traitements mais avec des vitesses différentes. Chaque fois qu'on a beaucoup plus de compost comme amendement, chaque fois qu'on a une meilleure vitesse de germination. En effet, au 14^{ème} jour, ce taux atteint 100% dans le cas du mélange sol /compost (V/V), 80% dans le cas du mélange sol/compos (2V/V) et 60% dans le cas de 100% sol. Ces résultats pourraient être expliqués par l'augmentation de rétention en eau et de porosité en présence de compost et aussi par l'absence des substances phytotoxiques.

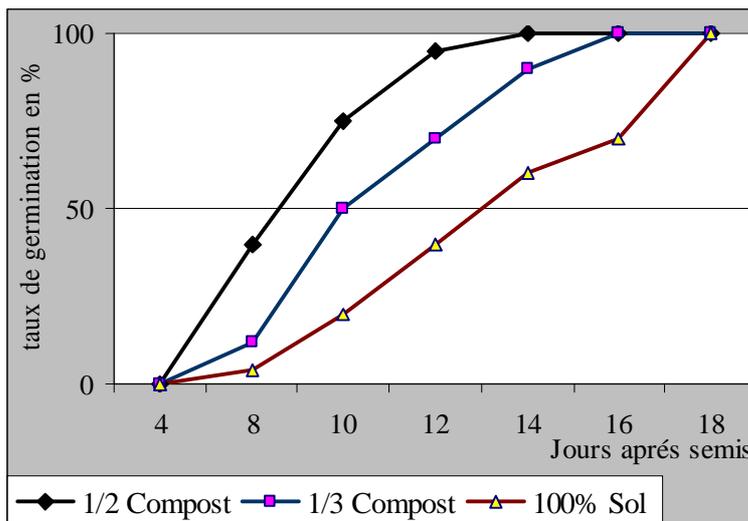


Figure II.7 : Vitesse de germination des graines de courgette selon les différents amendements

La production de courgettes a été suivie pendant une période de 24 jours par mesure du nombre de fruits récoltés et leur poids (figures II.8 et II.9). Nous constatons que l'apport du compost contribue également à une amélioration du rendement de la culture de courgette par rapport au sol non amendé. En effet, l'apport du compost au sol a augmenté :

- le nombre moyen de fruits par plante de 50% et 37%, respectivement, pour des essais contenant 50% et 33% du compost.
- le poids moyen de fruits par pieds de 45% et 28%, respectivement, pour des essais contenant 50% et 33% du compost.

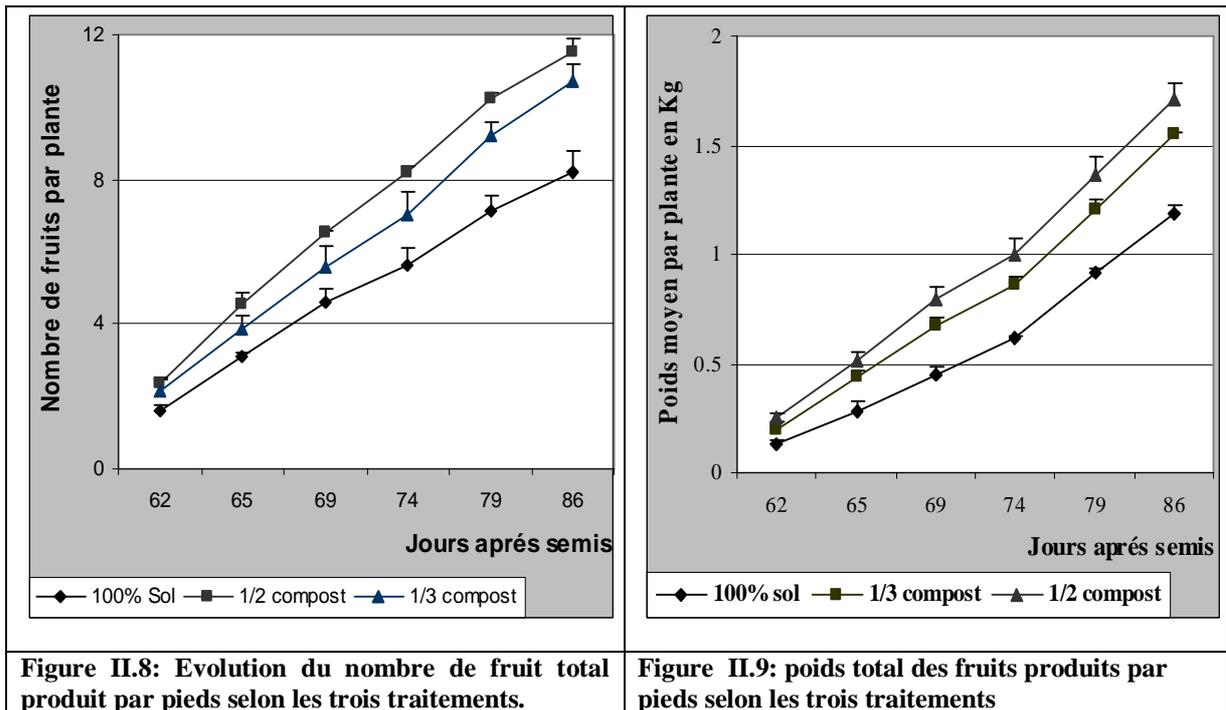


Photo II.2 : Effet du compost sur la croissance de courgette

Nos résultats montrent également que la production augmente avec la dose appliquée du compost. Des études antérieures avaient effectivement démontré que l'apport des composts a favorisé la production des plantes (Pednealt, 1994; Guerrero et al. 2001 ; Atiyeh et al. 2002). Larchevêque et al. (2005) avaient signalé également que l'utilisation de compost comme amendement des sols dégradés a augmenté la concentration de l'azote, de phosphore et de l'humidité des feuilles de *Quercus coccifera*.

Ces résultats pourraient être expliqués par l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol grâce à l'apport du compost (tableau II.2) (Aggelides et Londra 2000; Abdelhamid et *al.*, 2004). Cet apport se traduit par l'approvisionnement du sol en éléments majeurs NPK indispensables au bon développement des plantes et par l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques par l'apport de l'humus qui augmente la capacité d'échange cationique en s'opposant à la lixiviation des ions. Dans ces conditions, le sol retient plus d'éléments nutritifs et favorise ainsi la nutrition des racines en augmentant la consommation d'oxygène, la fixation de l'azote (Tomati et *al* 1996) et la respiration racinaire (Pedneault, 1994).

Les composts, en améliorant ainsi la fertilité physique du sol, participent à une meilleure nutrition phosphatée de la plante (Traoré et *al.*, 2001). Plusieurs auteurs ont montré l'importance de l'utilisation de compost et des matières organiques comme amendement à court et à long terme, ces composts favorisent le maintien et l'augmentation des matières organiques dans le sol (Pansu et Gautheyrou, 2003; Soumaré et *al* 2003 ; Gagnon et *al.*, 1998, Borken et *al.*, 2004). Pour les sols sableux, l'apport du compost contribue à la formation de gros agrégats grâce aux mucilages microbiens, aux filaments des champignons et aux polysaccharides issus de la décomposition de la matière organique (Ibrahim, Shindo, 1999 ; N'Dagamige, 2000). La formation de gros agrégats améliore la structure du sol, réduit l'érosion éolienne et hydrique (Bazzoffi et *al.*, 1998), diminue les risques de compaction et améliore la capacité de rétention en eau qui permet une meilleure résistance des sols à la sécheresse (Pedneault, 1994; Zougmore et *al* 2004; Agassi et *al* 2004). Alors que pour les sols lourds argileux, l'apport du compost améliore la porosité et la respiration basale du sol (Mustin, 1987; Nogales et *al.*, 1996; Zeytin et Baran, 2003), l'aération et le réchauffement des sols (Mustin 1987). Le compost améliore également les propriétés mécaniques du sol, sa plasticité, son adhésivité, le gonflement et le retrait des argiles ainsi que sa densité apparente. L'utilisation du compost améliore également la qualité nutritive de la tomate par réduction de la teneur en nitrate et augmentation de la teneur en vitamine C (Gobat et *al.*, (1998; 2003)). Abdel-Sabour et El-seoud (1996) ont montré aussi que l'utilisation du compost dans les cultures de sésame augmente les teneurs en chlorophylle, en carbohydrate et en composition minérale de ce dernier.

Parallèlement, plusieurs travaux ont d'ailleurs mis en évidence les gains qualitatifs et quantitatifs occasionnés par l'application du compost en combinaison ou non avec des fertilisants minéraux (Iglesias-Jimenez et Alvarez 1993; Simard et *al.*, 1999; Mamo et *al.*, 1999; Akanbi et Togun 2002; Zougmore et *al.*, 2003; Agassi et *al.*, 2004).

CONCLUSION

La maîtrise de la phase de maturation est nécessaire pour assurer l'innocuité du compost par la stabilisation et l'humification de matière organique et la diminution de la mobilisation des éléments traces métalliques. Les utilisations potentielles du compost sont multiples. Outre en agriculture et en horticulture, les composts peuvent être utilisés dans des programmes de revégétation et de biorestauration des sites dégradés ou contaminés. Les bénéfices agronomiques des composts sont nombreux. C'est en améliorant les propriétés physiques et chimiques et en stimulant l'activité biologique que le compost favorise la fertilité des sols. L'avantage principal à l'utilisation du compost étant directement lié à son contenu en matière organique stable et à sa capacité à générer de l'humus. Le compost des sous-produits du palmier dattier montre des propriétés intéressantes : ses caractéristiques physico-chimiques (pH, conductivité électrique, porosité, capacité de rétention en eau, matière organique, le rapport C/N...) qui répondent aux normes internationales, sa composition en micro-éléments et macro-éléments nutritifs, ses bonnes caractéristiques biochimiques, biologiques et agronomiques et ses propriétés phytosanitaires (l'absence de phytotoxines et d'agents pathogènes surtout le champignon responsable du Bayoud (*Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*)), font de ce compost un candidat potentiel pour remédier aux problèmes de manque de substrats de culture et de la détérioration de la structure et de l'appauvrissement des sols agricoles. L'opération du compostage des sous-produits du palmier dattier mettra fin aux problèmes de la pollution des palmeraies et contribuera à limiter les contaminations des sols par le champignon pathogène abrité par ces sous-produits. L'application aux sols de la palmeraie de l'oasis de Figuig du compost mûr, obtenu par ce processus de fermentation aérobique, pourra contribuer à la reconstitution de ces sols dégradés tout en améliorant leur capacité de rétention en eau (propriété bien demandée dans un milieu où l'eau fait défaut), et aussi en augmentant le rendement agricole des parcelles des oasis.

CHAPITRE III

EFFET SUPPRESSIF DU COMPOST MÛR SUR *FUSARIUM* *OXYSPORUM* F.SP. *ALBEDINIS*

INTRODUCTION

Les caractéristiques biologiques de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* et de son hôte (palmier dattier) rendent toute tentative de lutte très difficile. La lutte chimique est écartée suite à la fragilité de l'écosystème oasien et à son efficacité non garantie. Les mesures prophylactiques et la mise en quarantaine n'arrêtent pas la maladie. Comme la plupart des fusarioses, l'utilisation des variétés résistantes est la seule méthode efficace, mais dans le cas du dattier, la sélection n'est pas facile, en plus, la plupart des variétés sélectionnées résistantes produisent des dattes de faible qualité (Pereau-Leroy, 1958 ; Toutain, 1968b ; Sedra, 1995 ; Elhadrami et *al.*, 2005). Or, les exigences du marché nécessitent la production des meilleures variétés qui sont généralement très sensibles (Sedra, 1995 ; Sedra, 1993). L'existence dans la nature de sols résistants à la fusariose vasculaire des dattiers et l'isolement des micro-organismes qui ont montrés un effet antagoniste *in vitro* et *in vivo* vis-à-vis du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* ont fait l'objet de quelques études en Algérie et au Maroc (Sabaou, 1979, 1980; Sabaou et *al* 1980, 1983; Amir, 1981; Amir et Sabaou 1983; Sabaou et Bounagua, 1987; Sedra, 1985; Maslohy 1989; Sedra 1993; Louvet 1991; Sedra et maslohy 1995). Cette stratégie de lutte est très intéressante mais, elle reste sans application sur le terrain.

Ces dernières années, le monde a accordé une place prépondérante à la qualité de l'environnement, à la pérennité des ressources naturelles et surtout à la réduction de l'utilisation des substances chimiques. Ceci conduit la communauté scientifique à se tourner vers la possibilité d'utiliser de façon rationnelle des composts. Ainsi, plusieurs recherches sont consacrées à la valorisation des composts en tant qu'outil de protection des cultures (Hoitink et *al.*, 1993; Veeken et *al.*, 2005). Des composts issus de divers déchets qu'ils soient agricoles, industriels ou ménagers, ont montré leurs capacités à protéger les cultures contre de nombreux ennemis tels que des adventices, des insectes, des mollusques, des nématodes, des champignons, des bactéries et des virus.

Dans ce chapitre, nous évaluerons l'effet de compost mûr des sous-produits du palmier dattier sur la protection des plantules du palmier dattier contre *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis* et sur le comportement de ce dernier dans différents mélanges de substrats en présence et en absence de la plante hôte. Ainsi, pour expliquer les résultats obtenus dans les tests *in vivo*, nous avons réalisé des tests *in vitro* qui étudient l'action de certains micro-organismes isolés du compost mûr sur la croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.

I. RESULTATS

1. Effet du compost sur la protection des plantules du palmier dattier contre la fusariose vasculaire

La qualité biologique des composts exige, en plus des tests de phytotoxicité, des tests de suppressivité. Ces derniers font partie des biotests qui consistent à évaluer la capacité des composts à protéger les plantes contre les maladies. Dans cette étude, on a procédé à des tests aussi bien sur des vitro-plants du palmier dattier que sur les plantules issues de la germination des graines.

1.1. Effet sur les plantules issues des graines

D'après les résultats présentés dans la figure et la photo (III.1), nous constatons que :

- Le substrat constitué de la tourbe seule, ne présente aucun effet sur la virulence du *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*. En effet, l'inoculation du substrat par ce champignon pathogène a causé des dégâts importants, puisque 90% des plantules du palmier ont été infectées, puis mortes en comparaison avec le test témoin (tourbe non inoculée).
- Le processus du compostage a hygiénisé les sous-produits du palmier dattier contaminés par *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*, puisque les plantules cultivées dans un substrat contenant 50% (V/V) du compost mûr sont indemnes et présentent de plus une meilleure croissance en comparaison avec le témoin (tourbe toute seule) (voir chapitre II). Ceci confirme les résultats déjà obtenus (voir chapitre I).
- Ce compost présente aussi un effet protecteur vis-à-vis de l'agent pathogène, puisque 70% des plantules du palmier dattier cultivées dans un mélange de substrat contenant 50% du compost (V/V) n'ont pas été touchées par la maladie et restent indemnes.

1.2. Effet sur les vitro-plants

1.2.1. Effet du compost sur le comportement des vitro-plants vis-à-vis du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*

Les résultats obtenus après dix mois de culture des vitro-plants dans des mélanges de substrat inoculés par le pathogène (figure III.2) montrent que :

- La gravité des attaques des vitro-plants par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* est fonction de la nature des substrats et de la variété du vitro-plant. La présence de compost réduit la mortalité de 60% et 80% respectivement pour les mélanges compost/sol 1v/2v et v/v par rapport au témoin (100% sol) dans le cas de la variété Bouskri et de 50 à 60% dans le cas des autres variétés testées.
- Les vitro-plants cultivés dans les substrats non inoculés par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*, aussi bien dans le sol que dans les mélanges compost/sol n'ont pas été infectés par ce champignon et aucune mortalité n'a été observée.

Ces résultats confirment, encore une fois, l'élimination de l'agent pathogène au cours du compostage et aussi l'effet suppressif de ce compost vis-à-vis de ce pathogène qui est très virulent puisque le pourcentage de mortalité atteint 100% dans les variétés sensibles (Bouskri et Aguellide) et 50% dans le cas de la variété dite, résistante (Ennajda) (photo III.2).

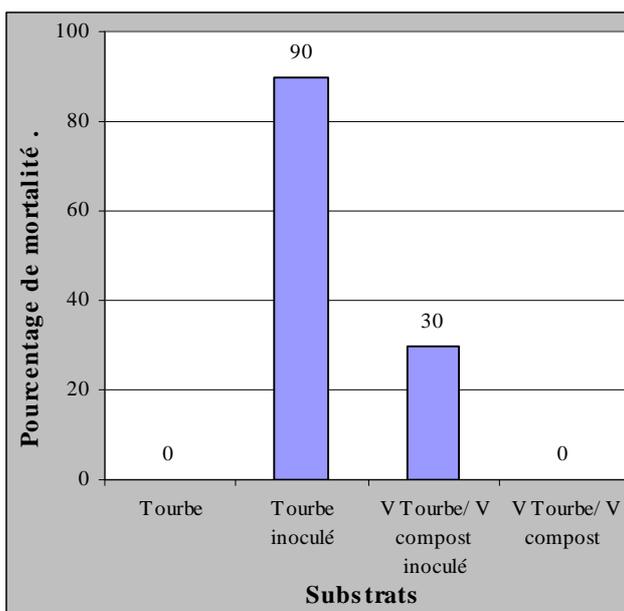


Figure III.1: taux de mortalité des plantules du palmier dattier issues des graines après neuf mois d'incubation dans les substrats inoculés ou non par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.



Photo III.1: Effet du compost dans la protection des plantules du palmier dattier issues des graines contre la fusariose vasculaire.

A : mélange compost tourbe (v/v) inoculé par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* (Foa);
 B : Tourbe inoculée par Foa.

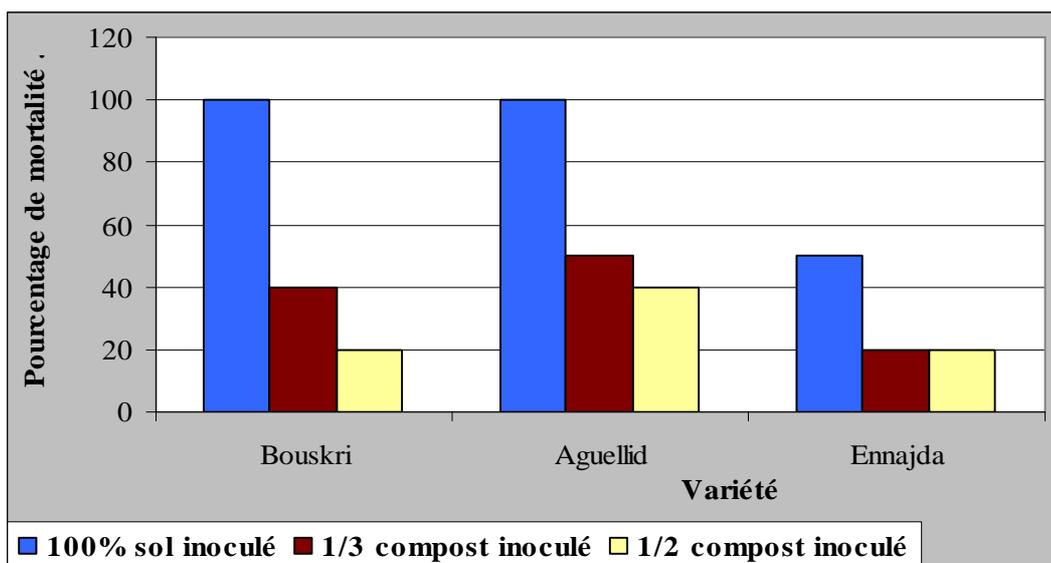


Figure III.2: Taux de mortalité des vitro-plants après dix mois d'incubation dans les substrats inoculés par 10^5 UFC de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*/g de substrat sec.
 1/3 Compost : le mélange 2v sol/ 1v compost; 1/2 compost : mélange 1V compost/ 1V sol.



Photo III.2: Signes de la fusariose vasculaire dans le vitro-plant (variété Ennajda) inoculé

1.2.2. Evolution de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans les substrats au cours de la culture des vitro-plants

L'évolution de la population de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans les substrats des différentes cultures dépend de la proportion du compost dans le mélange (figure III.3) :

Après 30 jours de la culture des vitro-plants dans les différents substrats inoculés par ce champignon, la densité du *Foa* dans des substrats en absence du compost reste stable, par contre, la présence du compost entraîne une réduction de 88 et 94% du *Fusarium* respectivement dans les mélanges compost/sol V /2V et V/V. Cette réduction se poursuit jusqu'à la disparition du champignon. Par contre, en absence du compost, la concentration de ce champignon reste relativement élevée après 160 jours de culture, elle est d'environ 5000 UFC/g de substrat.

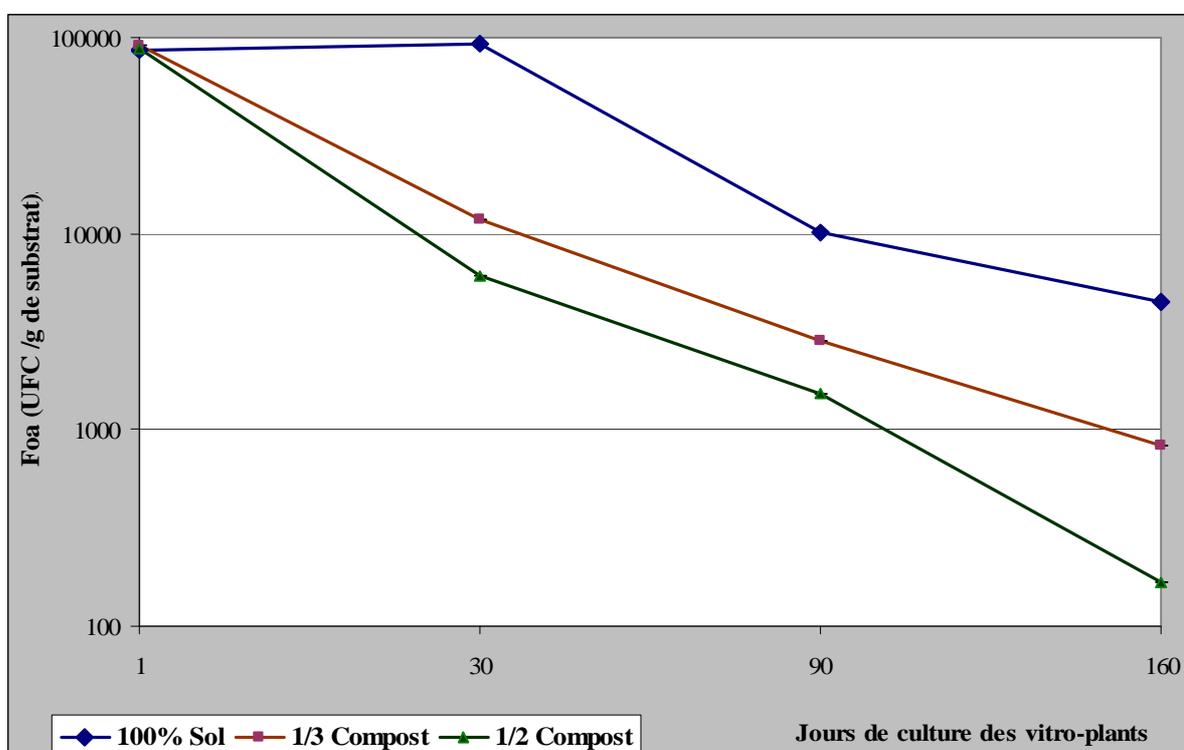


Figure III.3: Evolution de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans les substrats des vitro plants

2. Dynamique du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans différents mélanges de substrats non cultivés

Pour expliquer les phénomènes qui interviennent dans la protection des plantules du palmier dattier et pour confirmer la diminution de champignon pathogène observée dans les substrats des vitro-plants, nous avons suivi l'évolution du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* pathogène dans des substrats inoculés par ce champignon en absence de la plante hôte.

Dans cette expérience, nous avons étudié dix cas différents. Les résultats obtenus sont regroupés dans les figures (III.4, III.5 et III.6).

L'évolution de la densité est variable selon le traitement et selon le mélange de substrats en question:

Dans les substrats (100% sol, V compost/2Vsol, V compost/V sol et 100% compost) non autoclavés (figure III.4), la population du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* a subi une diminution au cours du temps. On constate ainsi deux phases :

- la première phase qui a duré 70 jours au cours de laquelle la destruction est rapide, puisque la population de l'agent pathogène est passée de 10000 UFC/ g de matière sèche à 3000, 600, 700 et 400 UFC/ g de matière sèche respectivement dans les substrats : 100% sol, sol/ compost (2v/v), sol/compost (v/v) et 100% compost.
- La deuxième phase au cours de laquelle la destruction se poursuit mais lentement jusqu'à une disparition de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* au 130^{ème} jour d'incubation dans les substrats qui contiennent du compost. Par contre, dans le sol, la population reste importante d'environ 2000 UFC/g de matière sèche.

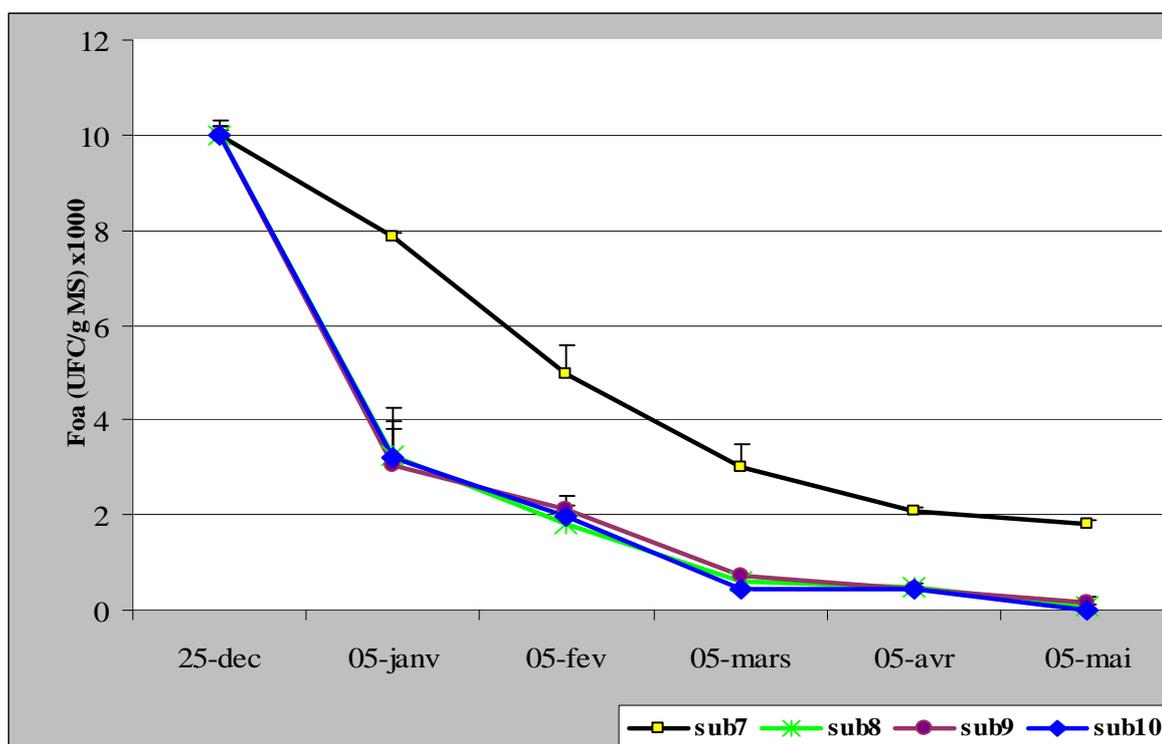


Figure III.4 : Evolution de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dans les substrats non autoclavés
Sub7: 100% sol; **sub 8:** mélange (2Vsol/Vcompost); **sub9:** mélange (Vsol/Vcompost). **Sub 10:** 100% compost.

L'évolution du *Foa* dans le substrat constitué de 100% de sol autoclavé passe par quatre phases principales (figure III.5) :

- Une phase de latence qui dure environ 10 jours ;
- Une phase exponentielle qui dure 30 jours où la population fusarienne initiale est multipliée par 36.
- Une phase stationnaire
- Une phase de régression où la densité du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* diminue.

L'ajout du compost mûr dans le sol stérile a inhibé la prolifération du champignon pathogène (figure III.5) et a réduit aussi la densité de la population initiale puisque, après 130 jours d'incubation, la population a été réduite de 91% et de 76% respectivement dans les mélanges (sol /compost (v/v et 2v/v)).

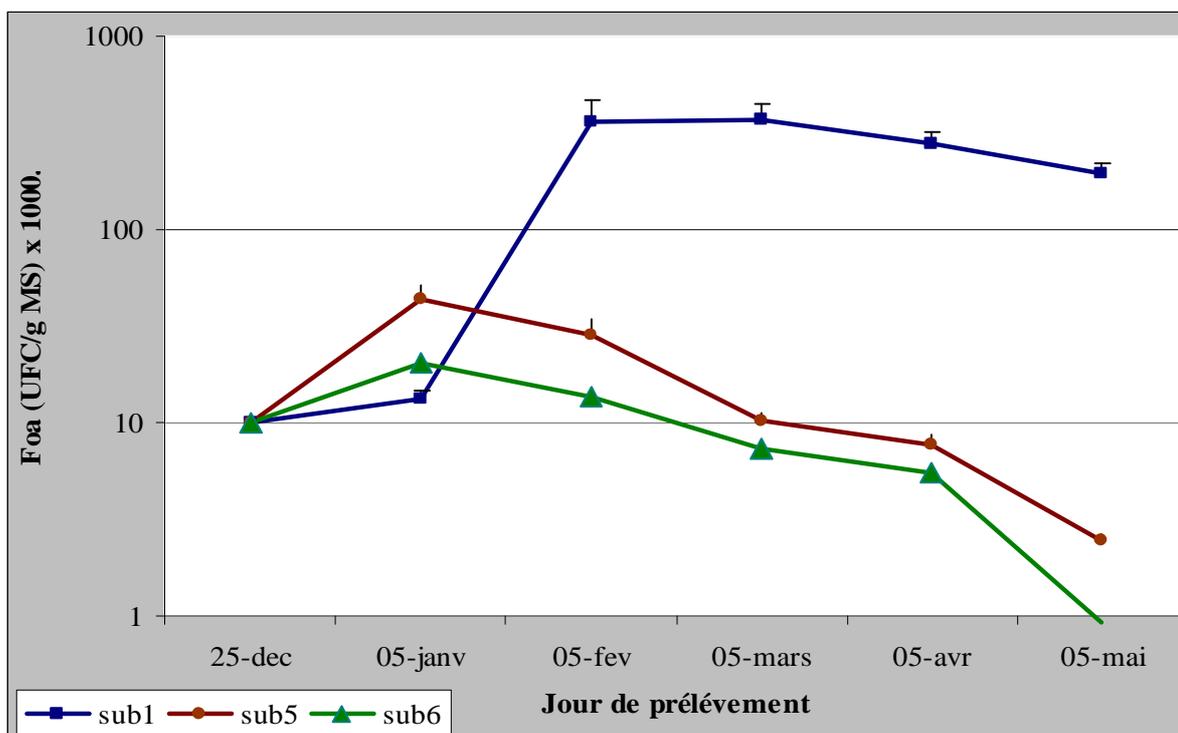


Figure III.5: Evolution de *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis* dans les substrats contenant le sol autoclavé en présence du compost mûr.

Sub 1 : 100% sol autoclavé ; sub 5 : mélange (2Vsol stérile / V compost); sub 6 : mélange (Vsol stérile / Vcompost).

Dans les substrats autoclavés (stériles), la courbe d'évolution de la population du champignon pathogène comporte deux phases (figure III.6) :

- une phase de prolifération qui dure environ 40 à 60 jours, au cours de laquelle la population initiale a été multipliée par 36, 198, 376 et 1347 fois respectivement dans les

mélanges autoclavés : 100% sol, compost/sol (1v/2v), compost/sol (v/v) et 100% compost. Contrairement à ce qu'on a obtenu dans les substrats non autoclavés (figure III.4), dans les substrats autoclavés chaque fois que le taux du compost est élevé, la prolifération est meilleure (figure III.6).

- une phase de réduction progressive qui se poursuit jusqu'à la fin de l'expérimentation où la population reste encore supérieure à la population initiale.

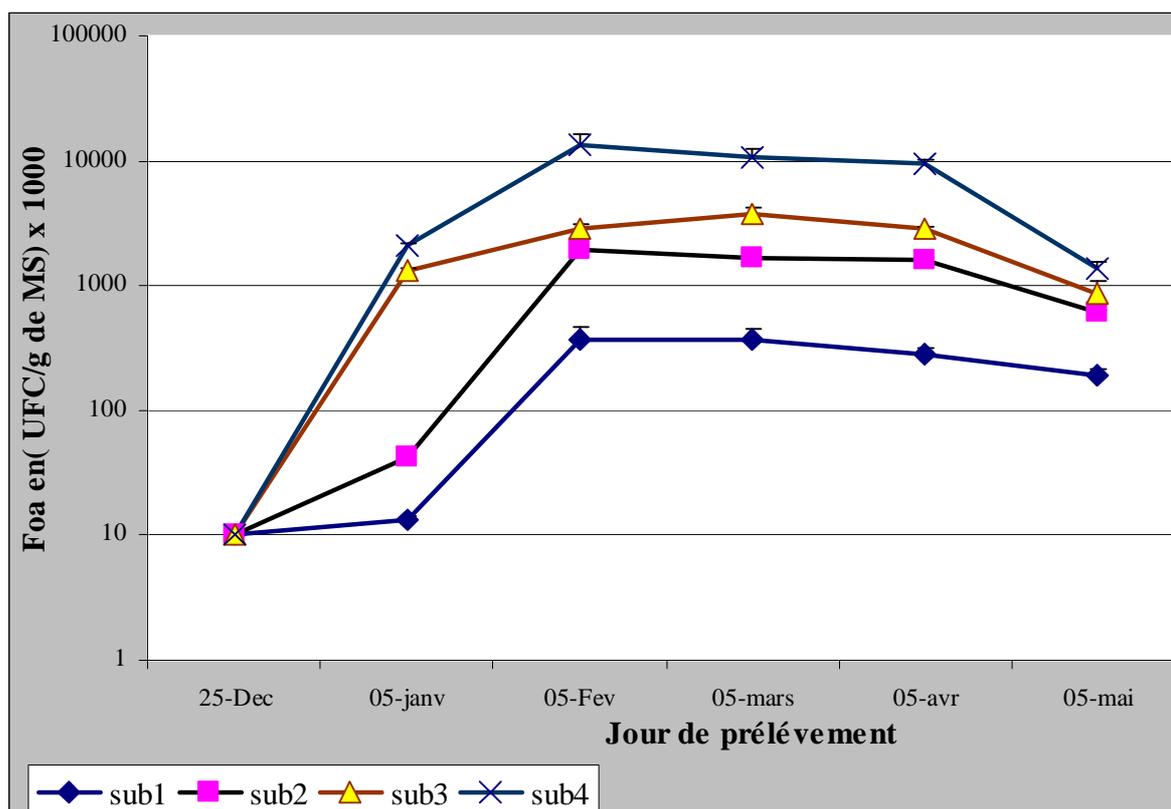


Figure III.6 : Evolution de *Fusarium oxysporum fsp albedinis* dans les substrats autoclavés.

Sub1: 100% sol; sub 2: mélange (2Vsol/Vcompost); sub3: mélange (Vsol/Vcompost). Sub 4: 100% compost.

3. Isolement des micro-organismes du compost

La photo (III.3), représentant une culture sur milieux solides de la microflore du compost des sous-produits du palmier dattier, montre que ce dernier contient une population riche et diversifiée de micro-organismes. Il abrite environ $54 \cdot 10^6$ UFC/g de compost sec (tableau III.1). En se basant sur les caractéristiques morphologiques tels que la couleur, la taille et l'aspect général des colonies, nous pouvons distinguer plus d'une vingtaine d'espèces de champignons et une cinquantaine de colonies différentes de bactéries. La microflore du compost est constituée principalement par :

- Des champignons qui appartiennent au genre *Aspergillus* et *Penicillium*.
- Des bactéries qui appartiennent principalement au genre *Bacillus*.

Tableau III.1: Densité et composition de la microflore du compost mûr

Flore fongique	Flore bactérienne
50 x10 ⁶ UFC/g de compost sec	4 x 10 ⁶ UFC/g de compost sec
Principalement des <i>Aspergillus</i> et des <i>Penicillium</i>	Principalement des Bacilles Gram ⁺ sporulant, sauf B32 qui est une Bacille Gram ⁻

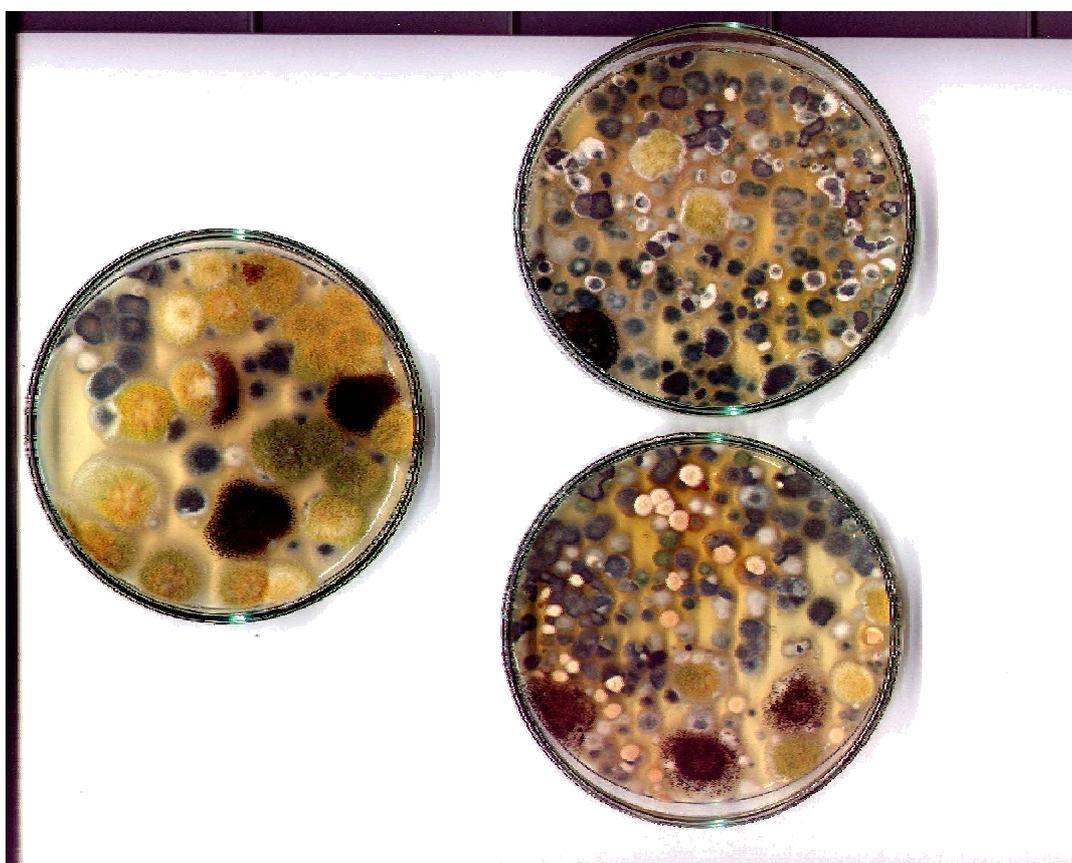


Photo III.3: Flore microbienne du compost mûr sur milieu PDA

4. Influence des micro-organismes isolés du compost sur la croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis*.

La croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis* en culture dans des boîtes de pétri sur milieu PDA est ralentie en présence de quelques micro-organismes isolés du

compost (tableau III.2 et III.3). Le pourcentage d'inhibition varie d'un micro-organisme à un autre, généralement il est entre 20 et 70% (tableau III.2 et III.3).

On peut classer les micro-organismes isolés du compost en trois catégories :

- **Micro-organismes à forte action antagoniste** tels que les *Aspergillus* (**JNf**; **VF**; **VE**), les *Penicillium* (**bGB**, **GVC**, **BblG**) et le *Bacillus* (**B8**). Ces micro-organismes montrent une inhibition de plus de 45% vis-à-vis du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* (tableau III.2 et III.3).
- **Micro-organismes à action antagoniste moyenne présentant un taux d'inhibition entre 20 et 50%** tels que l'*Aspergillus* (Vj) et la plupart des bacilles testées.
- **Micro-organismes non antagonistes** : Ces micro-organismes n'ont montré aucune inhibition ; la croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* évolue de la même façon que le témoin.

En plus de l'inhibition de la croissance mycélienne, on a observé un aplatissement des colonies du parasite en contact avec le micro-organisme antagoniste et les mycéliums deviennent plus rasants et moins épais.

Tableau III.2: Taux d'inhibition de la croissance mycélienne de *Foa* par quelques champignons isolés du compost.

Genre	<i>ASPERGILLUS</i>				<i>PENICILLIUM</i>		
Espèce nommée	JNf	VJ	VE	VF	bGB	GVC	BblG
% d'inhibition	60±8	40 ±3	70±10	65 ± 12	53±3	68 ±7	53±6

Tableau III.3: Taux d'inhibition de la croissance mycélienne de *Foa* par quelques bactéries isolées du compost.

Genre	<i>BACILLUS</i>										ND
Espèce nommée	B1	B7	B8	B16	B19	B21	B33	B34	B44	B45	B32
% d'inhibition	29±3	34±4	45±5	18 ±2	25±1	28±4	39 ±1	37±1	34±4	27±6	31±4

ND : non identifié

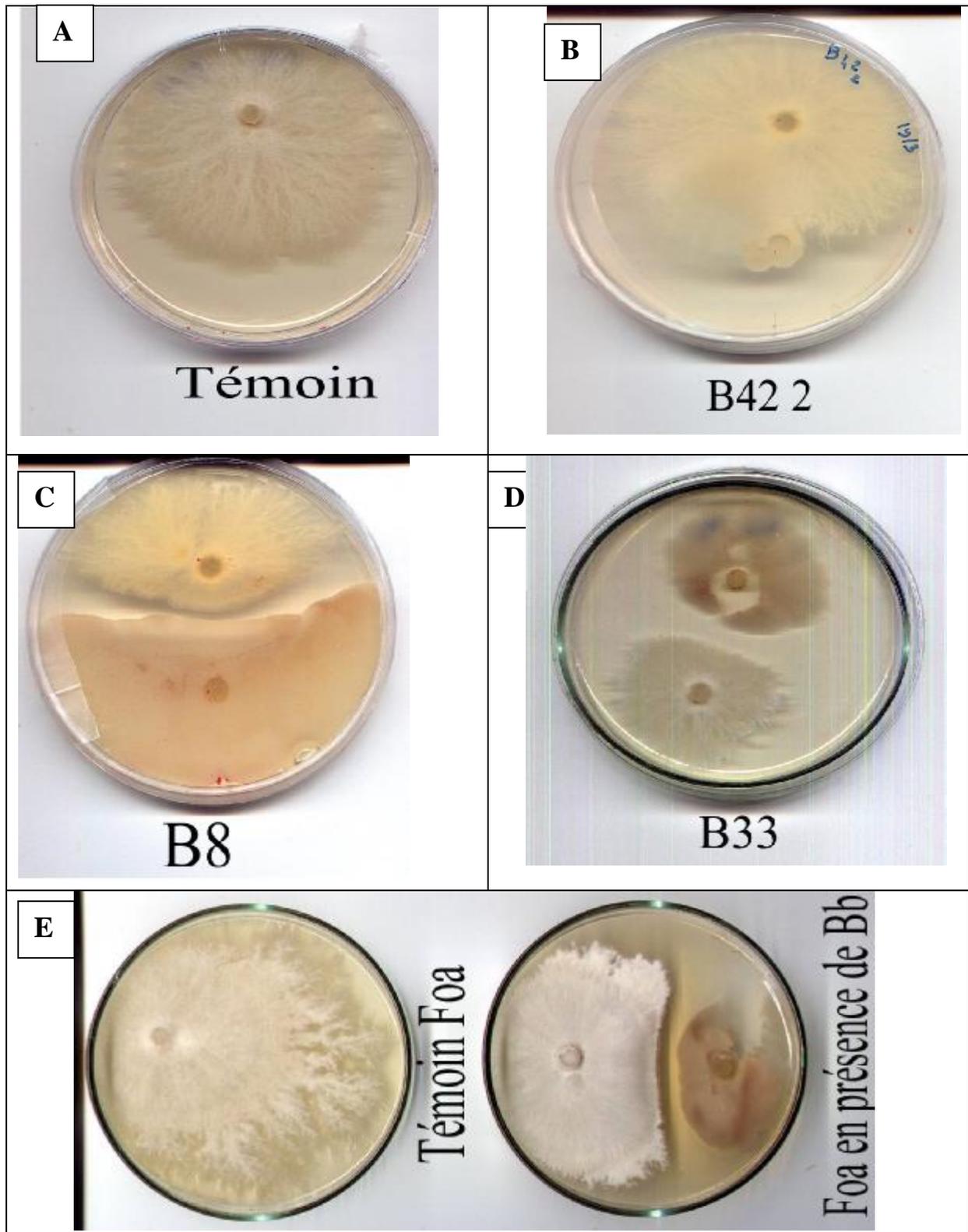


Photo III.4 : Effet des micro-organismes isolés du compost sur la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.

A : témoin *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* seul, C,D et E : *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* en présence des bactéries antagonistes, B : *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* en présence des bactéries non antagonistes

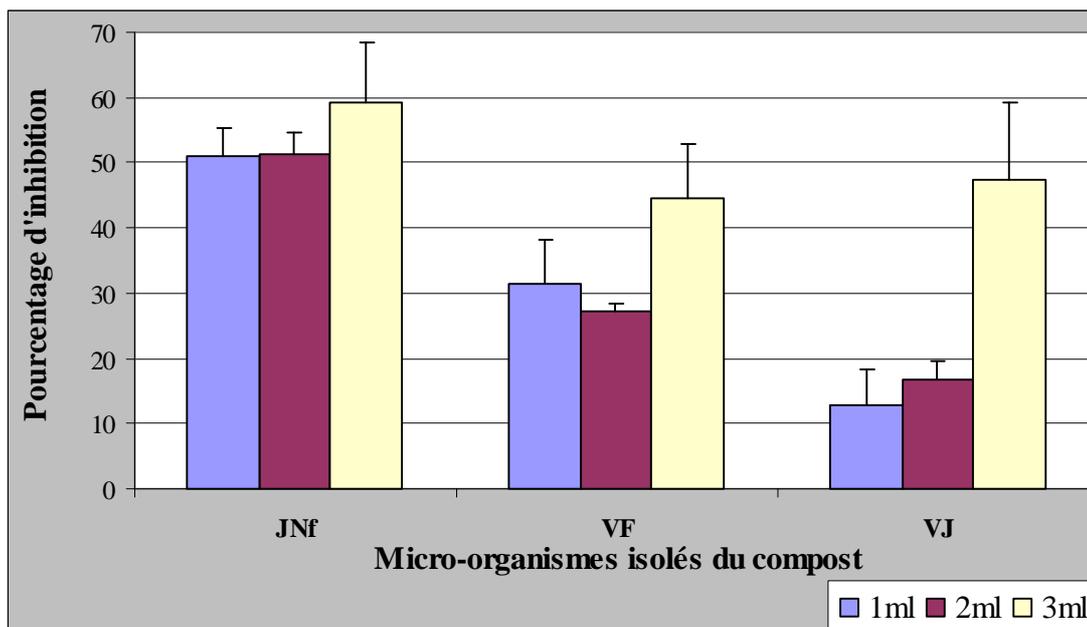


Figure III.7 : Effet des filtrats des cultures des micro-organismes isolés du compost sur la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.

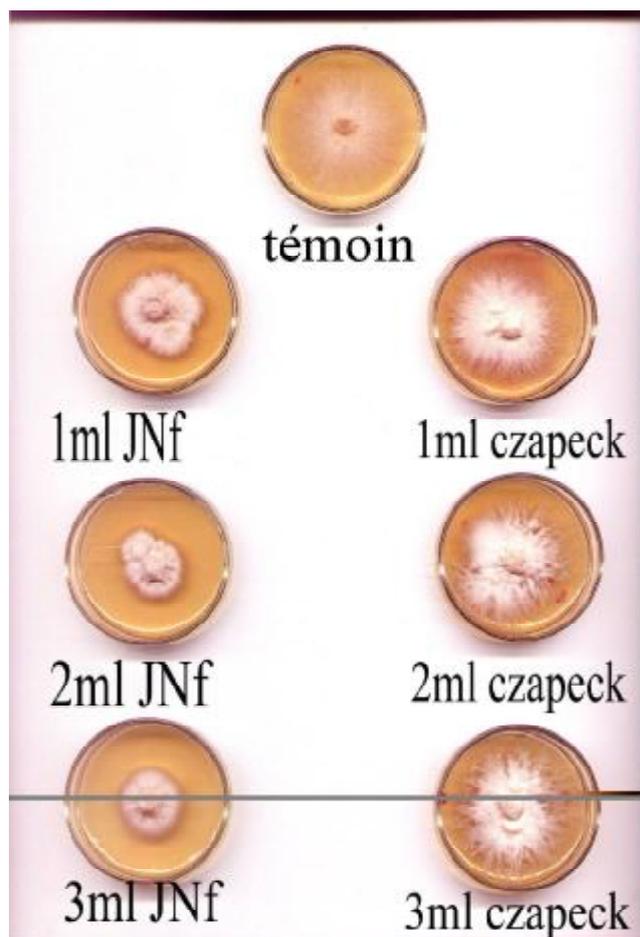


Photo III.5 : Effet de filtrat de culture de l'*Aspergillus* nommé JNf sur la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.

5. Influence du filtrat des micro-organismes isolés du compost sur la croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.

L'incorporation du filtrat du milieu de culture des micro-organismes isolés du compost dans le milieu PDA entraîne une réduction de la croissance mycélienne du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. Cette diminution dépend du micro-organisme antagoniste et du volume ajouté (figure III.7). Elle est de 50, 30 et 15% respectivement en présence de 1 ml des filtrats de JNf, VF, VJ par rapport au témoin. Elle passe à 60, 46 et 48% en présence de 3 ml des différents filtrats, respectivement (figure III.7).

II. DISCUSSION

La protection des plantes contre les maladies d'origine tellurique prend en compte trois facteurs essentiels : la plante hôte, l'agent pathogène et l'environnement de la plante et du pathogène.

Le sol et la tourbe utilisés dans notre étude sont des substrats réceptifs vis-à-vis de *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis* car ils lui permettent d'exercer sans aucune difficulté son pouvoir pathogène (figure III.1 et III.2). Les mélanges de substrats contenant le compost des sous-produits du palmier dattier montrent un effet suppressif à l'encontre de l'agent causal du Bayoud, puisque, la présence de ce compost dans le sol ou dans la tourbe réduit significativement la gravité de la fusariose vasculaire des plantules du palmier dattier. Des résultats similaires ont été obtenus par Cohen et *al.*, (1998). Ces derniers ont montré que la sévérité de la maladie causée par *Fusarium oxysporum* est réduite de 95% dans la culture de coton amendée de compost mûr des résidus solides municipaux. Weltzen (1990) a aussi obtenu des résultats encourageants contre l'agent de pourriture grise de tomate en utilisant le compost à base de fumier bovin. Le compost peut agir directement ou indirectement contre les maladies des plantes :

- Directement par sa richesse et sa biodiversité en microflore, constituée d'importantes populations de micro-organismes antagonistes, ayant des potentialités à protéger activement des plantes en créant un environnement défavorable aux pathogènes (Hoitink et Fahy, 1986; Bordeleau, 1999 ; Mcquilken et *al.*, 1994 ; Zhang et *al.*, 1998 ; Steinberg et *al.*, 2004). Même en absence de la plante, le compost peut agir directement sur les pathogènes en inhibant leur développement.

- Indirectement, en influençant les conditions de vie des plantes par une amélioration de la structure du sol grâce à l'apport de complexe humique stable. Les plantes sont, ainsi, bien développées et moins stressées et donc plus résistantes aux maladies; c'est le phénomène de résistance induite (Linderman et Gilbert, 1973).

La résistance induite peut être aussi déclenchée suite à la présence des micro-organismes antagonistes (El Hassni et al., 2006 ; Glick et Bashan, 1997 ; Chérif et al., 2002 ; Getha et Vikinsewary, 2002)

La réduction de la densité de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* observée dans les mélanges des substrats contenant le compost en présence et en absence de la plante hôte (figure III.3 et III.4) explique l'effet direct du compost des sous-produits des palmiers dattiers sur le *Fusarium* pathogène. Les effets suppressifs des composts sont fréquemment mentionnés dans la littérature (Serra-wetting, 1995 ; Tuitert et al., 1998 ; Blok et al., 2002 ; Fuchs, 2003 ; Veeken et al., 2005 ; Pérez-Piqueres et al., 2006). En 2000, Zinati a signalé que le compost peut remplacer le bromure de méthyle utilisé comme traitement fongicide préventif en culture horticole intensive. Ce fongicide a été utilisé souvent pour désinfecter les sols contaminés par *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*. Selon Mustin (1987), les principaux mécanismes d'action des composts sur certains phytopathogènes se font par :

- § mycostatisme ou bactériostatisme : inhibition directe de la germination des spores;
- § lyse : destruction des mycéliums des agents pathogènes;
- § actions de type antibiotique : émission de substances organiques spécifiques et toxiques;
- § compétition pour l'espace vital et pour les éléments nutritifs;
- § parasitisme.

Ces mécanismes, généralement d'origine biologique, sont exercés par la flore microbienne diversifiée des composts (De Ceuster et Hoitink, 1999; Rijkeboer et al., 2002; Postma et al., 2003) et/ou d'origine physico-chimique due à la présence des substances inhibitrices (Ezelin de Souza, 1998).

Dans ce contexte, plusieurs études ont été réalisées. Ainsi, Ezelin de Souza (1998) a montré que le compost préparé à partir de bagasse broyée et de boues résiduelles réduit fortement la densité de l'inoculum de *Fusarium oxysporum* f.sp. *lini* et aussi la gravité des attaques qu'il provoque chez la lentille. Cette inhibition serait d'origine physicochimique (substances inhibitrices, pH acide...) ou biologique (intervention de micro-organismes comme *Trichoderma* sp, *Gliocladium* sp et *Bacillus subtilis*, qui opèrent selon différents mécanismes tels que la compétition et le mycoparasitisme).

Znaidi (2002) ; Kai et al (1990), ont montré que les composts riches en composés lignocellulosiques sont les plus efficaces à inhiber l'activité de plusieurs genres du *Fusarium* tel que le *Fusarium oxysporum*. D'après ces données, on pourrait attribuer l'effet protecteur du compost des sous-produits du palmier dattier contre la fusariose vasculaire des plantules du palmier dattier (figures III.1 et III.2) à la présence des composés lignocellulosiques et/ou à sa richesse en micro-organismes antagonistes.

Le compost des sous-produits du palmier dattier montre un effet suppressif dans un substrat, même en absence de la plante hôte, en empêchant le développement de la population de l'agent pathogène. En effet, les résultats des figures (III.4, III.5 et III.6) ont permis de comparer les aptitudes de différents substrats à favoriser ou à inhiber la germination et le développement des chlamydospores de *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis* en absence de la plante hôte. Les substrats contenant du compost non stérile (figure III.4 et III.5) présentent un effet suppressif qui est à dose dépendante : plus on a du compost, plus l'élimination du *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis* est importante. En revanche, les substrats autoclavés, perdent leurs capacités à éliminer le *Fusarium* pathogène pendant l'incubation (figure III.6). La présence du compost stérile amplifie la prolifération de ce champignon pathogène et ceci est d'autant plus important que la quantité du compost stérile ajoutée au substrat stérile est élevée. Ezelin-de Souza (1998) avait signalé un effet similaire de compost de bagasse sur la dynamique de *Fusarium solani*. Ces observations mettent en évidence l'effet de la flore de ce compost dans l'élimination du *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis* et par conséquent, dans la protection des plantules du palmier dattier. En effet, l'autoclavage a détruit la microflore du compost en le rendant plus dangereux puisque le champignon pathogène retrouve toutes les conditions favorables pour une bonne prolifération due à l'absence de compétition, la présence d'éléments nutritifs essentiels et des conditions physico-chimiques favorables. Dans ces conditions, le champignon pathogène se multiplie plus facilement et l'effet suppressif du compost est anéanti. Des résultats similaires ont été obtenus par Fuchs (2003). Le compost agit vraisemblablement autant par son activité microbienne intrinsèque que par la stimulation des activités microbiennes du sol (Yao et al., 2006 ; Pérez-Piqueres et al., 2006). Ces résultats pourraient être expliqués par le fait que le compost stimule l'activité biologique du sol par ses apports en matières organiques qui nourrissent les micro-organismes présents dans le sol en favorisant ainsi leur croissance et leur développement (Bailey et Lazarovits, 2003). De plus, le compost alimente le sol en une flore microbienne importante et diversifiée en enrichissant sa biodiversité et par voie de conséquence son pouvoir suppressif vis-à-vis des

agents pathogènes (Gomez et al., 2006). Donc, l'efficacité du compost des sous-produits du palmier dattier est due essentiellement aux antagonistes biologiques à savoir les bactéries et les champignons ce qui reconferme sa maturité. En effet, seuls les composts jeunes et riches en lignine sont susceptibles de libérer des composés chimiques inhibiteurs, alors que l'effet inhibiteur du compost mûr est assuré essentiellement par sa microflore.

L'effet bénéfique du compost attribué à l'activité biologique est dû, soit à l'ensemble des micro-organismes des sols et du compost (c'est le contrôle général) soit, à la présence de micro-organismes antagonistes vis-à-vis des agents pathogènes (c'est le contrôle spécifique) (Hoitink et al., 1997). Pour la résistance générale, l'ensemble des micro-organismes entrent en concurrence avec les pathogènes du point de vue sources nutritives et/ou espace vital. Ce système est efficace pour les pathogènes dépendants des sources externes de carbone comme la fusariose.

Pour la résistance spécifique, une population antagoniste prend la place de la population infectieuse initiale sans conséquences néfastes sur la plante, ou bien excrète des substances antibiotiques qui anéantissent les agents pathogènes.

Pour analyser les mécanismes d'action des micro-organismes isolés du compost des sous-produits du palmier dattier sur *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis*, nous avons réalisé des tests d'antibiose *in vitro*. Les résultats obtenus (tableaux III.2 et III.3) montrent qu'un certain nombre de ces micro-organismes inhibent la croissance mycélienne du parasite. L'intensité de cette inhibition varie entre 20 et 70%, selon le micro-organisme testé. Cette diminution de la croissance mycélienne et l'aplatissement du filament du parasite observés dans le test d'antibiose (technique de culture opposée) (photo III.4) sont dûs, soit à la présence des substances toxiques qui diffusent dans le milieu de culture et provoquent la lyse mycélienne, soit à la compétitivité des deux micro-organismes pour les sources nutritives du milieu de culture. Van Bruggen et Duineveld, (1995) ont rapporté que les micro-organismes présents dans les composts sont d'excellents compétiteurs pour les sources de carbone facilement disponibles, entraînant un effet fongicide envers les pathogènes dépendant de cette source de carbone. Rosenwig et Stotzky (1979) ont rapporté aussi que l'antagonisme exercé par quelques bactéries du sol sur des champignons semblait être dû principalement à une compétition pour la source de carbone. Park et al (1988), de leur côté, ont montré également que la compétition entre les *Pseudomonas* et *Fusarium oxysporum* pathogènes s'exerce sur le fer disponible dans le substrat.

Dans le cas de biocontrôle des fusarioses vasculaires, plusieurs études ont rapporté l'utilisation des bactéries telles que, *Bacillus*, *Pseudomonas fluorescens* et des champignons tels que *Penicillium*, *Fusarium* non pathogène et *Trichoderma* (Sneh, 1998; Postma et al., 2003; Garbeva et al., 2004). Sedra et Bah (1993); Maslohy (1989) ont attribué la résistance du sol de Marrakech à la présence des *Pseudomonas fluorescens*, de *Fusarium* non pathogène et des actinomycètes.

L'effet suppressif du compost mûr des sous-produits du palmier dattier vis-à-vis du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* pourrait être expliqué par sa richesse en micro-organismes qui appartiennent au genre *Aspergillus*, *Penicillium* et *Bacillus*. En effet, Trankner et Andeas (1992) ont rapporté que ces genres de micro-organismes sont parmi les composants actifs de la microflore des composts. De même, Garbeva et al., (2004) ont signalé que les micro-organismes qui appartiennent au genre *Bacillus*, *Pseudomonas* et *Penicillium* ont un effet suppressif vis-à-vis du *Fusarium*.

L'incorporation du filtrat de culture de certains antagonistes dans le milieu de croissance de l'agent pathogène, provoque une inhibition inférieure ou égale à celle obtenue lors de la confrontation directe (tableau III.2 et figure III.7). Ces résultats confirment la présence des substances antifongiques secrétées au cours du développement de ces micro-organismes. L'intensité de l'action inhibitrice du filtrat est fonction du micro-organisme antagoniste. Cette différence d'activité contre ce champignon pathogène pourrait être expliquée par la qualité ou/et la quantité des substances toxiques excrétées. L'effet suppressif exercé par la flore microbienne de ce compost sur *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* pourrait être attribué d'une part, aux actions intenses de fongistase et d'antibiose qui agissent directement sur les activités du parasite, et d'autre part, au déclenchement de la résistance induite chez les plantules du palmier dattier. Le même phénomène est observé par les micro-organismes antagonistes vis-à-vis du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* (El Hassni et al., 2006 et Maslohy, 1989).

CONCLUSION

Le sol et la tourbe utilisés dans cette étude sont des substrats réceptifs vis-à-vis de *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis* car ils lui permettent d'exercer sans aucune difficulté son pouvoir pathogène. L'ajout de compost mûr des sous-produits du palmier dattier apporte un effet suppressif à ces substrats. Donc, en plus des économies de la tourbe, le compost offre la possibilité de fournir au substrat un pouvoir suppressif à l'encontre du *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis*, et produit ainsi des plantes saines et vigoureuses. L'effet suppressif observé est d'origine biologique puisque l'autoclavage entraîne sa disparition. Les antagonistes que nous avons identifiés sont constitués principalement des *Aspergillus*, des *Penicilliums* et des *Bacillus*.

A la lumière des résultats obtenus, il s'avère que le compost des sous-produits du palmier dattier pourrait être un moyen de contrôle biologique efficace, capable de limiter la propagation de la maladie et de lutter contre la sévérité de la fusariose vasculaire dans les palmeraies des oasis de l'Afrique du nord. L'apport de ce compost aux sols contaminés par *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis* pourrait diminuer considérablement la population de ce champignon par des mécanismes biologiques respectant l'écosystème oasien tout en oeuvrant à la décontamination des sols oasiens à moyen et/ou à long terme. Donc, l'utilisation de ce compost dans les systèmes de production agricole oasienne peut fournir un moyen de recyclage de tous les déchets agricoles, réduire les coûts de production des cultures végétales en diminuant les pertes associées aux maladies, réduire l'utilisation des produits chimiques et produire des aliments exempts de résidus chimiques.

**CONCLUSION
GENERALE ET
PERSPECTIVES**

L'importante biomasse générée par le palmier dattier, soit naturellement ou suite à un dessèchement pathologique s'accumule au fil des années. Elle est à l'origine de la pollution des parcelles et de la progression de la maladie du Bayoud dans les palmeraies. La valorisation de ces déchets agricoles par compostage a des impacts environnementaux, agronomiques, sociaux et économiques importants. En effet, le recyclage de ces sous-produits élimine les déchets polluants et restitue aux sols la matière organique qui lui fait de plus en plus défaut suite à une surexploitation, aux conditions climatiques et à l'utilisation des engrais chimiques. Beaucoup de travaux ont mis en évidence le rôle primordial du compostage dans l'hygiénisation des déchets et l'effet bénéfique que joue le compost mûr dans la suppression des maladies causées par les pathogènes d'origine tellurique.

Ce travail vise à optimiser le processus du compostage des sous-produits du palmier dattier et à évaluer les potentialités agronomiques et écologiques du compost mûr, en déterminant sa valeur agronomique, sa capacité à protéger les plantules du palmier dattier contre la fusariose vasculaire et à désinfecter les sols contaminés par le *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.

Les paramètres impliqués dans le démarrage du processus de compostage sont principalement la composition et la granulométrie de la matière première, l'espace lacunaire, la pression d'oxygène, la température, l'humidité et le pH. Le contrôle de ces paramètres est essentiel pour mener à bien l'évolution de la matière organique et obtenir un compost de qualité.

Pour composter ces sous-produits, un apport important d'eau était nécessaire (environ 11,4 l par Kg de matière sèche à composter), pour assurer une bonne activité d'eau favorable à l'activité microbienne et surtout pour maintenir le taux d'humidité constant à une valeur de 60 à 70%. Cette activité, qui se fait en aérobie, exige aussi un apport d'oxygène par retournement.

Le rapport C/N des sous-produits du palmier dattier est très élevé, il est de l'ordre de 115. Dans ces conditions, le démarrage du processus de compostage n'a pas eu lieu. L'ajout du fumier bovin a ramené ce rapport à des valeurs de 35 à 80 et le processus du compostage a bien démarré surtout dans les andains qui contiennent plus de 20% de fumier en volume. Le rapport C/N seul, ne peut pas expliquer ce phénomène, puisque dans les andains qui contiennent l'urée (Ur) ou l'azote ammoniacal (Az) dont les rapports C/N sont d'environ 40, le processus du compostage n'a pas démarré. Il semble que le fumier, en plus de sa richesse

en azote, approvisionne le mélange à composter en populations de micro-organismes qui participent activement à la décomposition de la matière organique.

L'évolution de la température des andains dépend de la composition initiale, elle reflète, en quelque sorte, l'activité de dégradation des matières organiques par la population microbienne aérobie. Les andains témoins (sans aucun additif) et ceux contenant de l'azote sous forme d'urée ou d'ammoniac, n'ont montré qu'une faible activité de décomposition puisque les températures internes et externes mesurées restent faibles et la valeur maximale atteinte est d'environ 35°C. La présence du fumier dans les andains est indispensable puisqu'elle a provoqué une augmentation rapide et significative des températures dès les premiers jours du compostage. Les valeurs maximales atteintes dépendent du volume du fumier ajouté au mélange. Plus le volume du fumier est grand plus les valeurs maximales sont élevées.

Le comportement de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* dépend de l'évolution de la température. Ce paramètre est important pour assurer l'hygiénisation du matériel organique, à condition que l'humidité soit suffisante. La destruction totale de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* n'a été observée que dans les andains qui contiennent un taux de fumier supérieur à 20% en volume et ayant atteint des températures maximales supérieures à 60°C pendant la phase thermophile. Contrairement au fumier, l'azote ammoniacal semble multiplier la population de l'agent pathogène initiale alors que l'urée n'affecte pas la population de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* qui reste stable durant les 70 jours de compostage.

Cet effet thermique sur le comportement du champignon pathogène a été confirmé par les résultats des tests *in vitro* effectués sur des morceaux de rachis contaminés qui montrent bien l'implication de la température et de l'humidité dans la destruction de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. En effet, la température nécessaire pour détruire ce pathogène dépend de l'humidité du matériel contaminé. Généralement, une température de 60°C pendant 12 heures est suffisante pour détruire ce pathogène.

Le contrôle de l'aération est essentiel pour obtenir un compost de qualité. Un retournement chaque trois jours pendant la phase thermophile est suffisant pour bien décomposer les sous-produits du palmier dattier mélangés avec 25% de fumier bovin en volume.

L'évolution du rapport C/N est fonction de la matière première. Ce rapport subit une réduction en présence de fumier bovin, qui varie au bout de 80 jours du compostage entre 29 et 45% selon le taux de fumier et la fréquence de retournement. Contrairement à ce qui est rapporté par la littérature et à ce qu'on a observé en présence de fumier, le rapport C/N a subit

une augmentation de 87 ou de 60% respectivement dans les andains contenant de l'urée (Ur) ou de l'azote ammoniacal (Az). L'évolution du rapport C/N observée au cours du compostage est due principalement à la décomposition de la matière organique et à la concentration de l'azote observée dans les andains contenant le fumier bovin, et à la diminution de l'azote constatée en présence d'autres sources d'azote (Az et Ur).

Pendant le compostage, le volume total et la masse des sous-produits compostés diminuent. Cette diminution est due principalement au tassement du compost, aux fragmentations du substrat et à la dégradation des substrats accompagnée par des pertes en carbone dues au départ du gaz carbonique.

Après six mois de maturation, le compost des sous-produits du palmier dattier mélangé avec 25% de fumier bovin en volume présente des caractéristiques physico-chimiques d'un compost mûr tels qu'un taux de matière organique de 38, une teneur en azote totale de 0,94, un rapport C/N final de 20, un rapport C/Nf/ C/Ni de 0,43 et un pH de 7,5. Ce compost est caractérisé par une conductivité électrique élevée (9,6 ms/cm). Ceci est expliqué par sa richesse en macro-éléments Ca, Mg, K, et Na. Ce compost se caractérise également par une porosité et une capacité de rétention en eau supérieures à celles de la tourbe. L'apport de ce compost au sol a amélioré leurs caractéristiques physico-chimiques.

Le compost des sous-produits du palmier dattier ne présente aucune toxicité vis-à-vis des graines de cresson. L'utilisation de ce compost dans les substrats de culture a montré une efficacité vis-à-vis de la croissance des plantules de tomate et du palmier dattier. En effet, en mélangeant 50 % de compost à la tourbe, la croissance de ces plantules est améliorée d'une façon significative par rapport au témoin (tourbe seule). Ce compost est considéré mûr et peut substituer 50% de la tourbe en horticulture. L'apport de ce compost comme amendement organique a montré également un effet bénéfique sur le rendement de la culture de courgette sans aucun risque environnemental, car ses teneurs en éléments traces métalliques sont inférieures aux limites autorisées par la plupart des organismes européens.

En plus, l'application de ce compost influence les interactions entre les plantules du palmier dattier et le *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis* en les protégeant contre la fusariose vasculaire. L'ajout de 50% de compost dans la tourbe ou dans le sol protège plus de 50 % des plantules de palmier dattier. Ce compost agit directement contre le pathogène en

compromettant sa survie dans les substrats en absence de la plante hôte en empêchant ainsi son développement.

La capacité suppressive de compost mûr issu des sous-produits du palmier dattier vis-à-vis de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* est due essentiellement à la microflore abondante qu'il héberge, constituée principalement par des champignons appartenant aux genre *Penicillium* et *Aspergillus* et par des bactéries du genre *Bacillus*. Ces micro-organismes déploient contre ce champignon pathogène des mécanismes d'antagonisme de nature différente tels que l'antibiose, (la compétition pour l'espace et les nutriments) et le mycoparasitisme.

Le compostage des sous-produits du palmier dattier est une action positive aussi bien pour ces aspects économiques, écologiques et sociaux. Une élimination de ces déchets organiques polluants qui constituent le vecteur de propagation du Bayoud et une production d'un compost de qualité. Ce compost contribue à une amélioration écologique et phytosanitaire des sols. Ecologiquement, ce compost contribue à la fertilité des sols en limitant l'érosion et l'évaporation et en économisant l'eau qui est un élément précieux dans ces régions arides. Du côté phytosanitaire, le compost pourrait contribuer à la protection des dattiers contre le Bayoud en désinfectant les sols contaminés par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.

La maîtrise de la phase de maturation est nécessaire pour assurer l'innocuité du compost par la stabilisation et l'humification de matière organique et la diminution de la mobilisation des éléments traces métalliques. Les utilisations potentielles du compost sont multiples. Outre en agriculture et en horticulture, les composts peuvent être utilisés dans des programmes de revégétation et de biorestauration des sites dégradés ou contaminés. Les bénéfices agronomiques des composts sont nombreux. C'est en améliorant les propriétés physiques et chimiques et en stimulant l'activité biologique que le compost favorise la fertilité des sols. L'avantage principal à l'utilisation du compost étant directement lié à son contenu en matière organique et à sa capacité à générer de l'humus. Le compost des sous-produits du palmier dattier montre des propriétés intéressantes : ses caractéristiques physico-chimiques (pH, conductivité électrique, porosité, capacité de rétention en eau, matière organique, le rapport N/C...) qui répondent aux normes internationales, sa composition en micro-éléments et macro-éléments nutritifs, ses bonnes caractéristiques biochimiques, biologiques et agronomiques et ses propriétés phytosanitaires (l'absence de phytotoxines et d'agents pathogènes surtout le champignon responsable du Bayoud (*Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*)), font de ce compost un candidat potentiel pour remédier aux problèmes de la détérioration de la structure et de l'appauvrissement des sols agricoles. L'opération du

compostage des sous-produits du palmier dattier mettra fin aux problèmes de la pollution des palmeraies et contribuera à limiter les contaminations des sols par le champignon pathogène abrité par ces sous-produits. L'application aux sols de la palmeraie de l'oasis de Figuig du compost mûr, obtenu par ce processus de fermentation aérobie, pourra contribuer à la reconstitution de ces sols dégradés tout en améliorant leur capacité de rétention en eau (propriété bien demandée dans un milieu où l'eau fait défaut), et aussi en augmentant le rendement agricole des parcelles des oasis.

Pour compléter ce travail et approfondir nos connaissances sur l'intérêt scientifique et surtout agronomique du compost des sous-produits du palmier dattier, des investigations restent à réaliser en perspectives :

- Elargir les études, en plein champ, sur l'effet de l'application du compost mûr sur le développement des cultures oasiennes et surtout la résistance du palmier dattier au *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*.
- Approfondir la recherche sur la population microbienne du compost en identifiant les espèces antagonistes isolées au cours de nos travaux de recherche.
- Etudier le comportement et l'adaptation des microorganismes antagonistes isolés du compost mûr dans des substrats réceptifs inoculés et dans les sols des palmeraies.
- Rechercher et identifier les molécules responsables des inhibitions observées en présence de filtrat des antagonistes pour déterminer le ou les mécanismes qui interviennent dans la protection des plantules du palmier dattier contre la fusariose vasculaire.
- Etudier les effets synergiques de l'association de l'application du compost et de la mycorhization sur la résistance du palmier dattier aux stress hydrique et salin et aux attaques des microorganismes phytopathogènes telluriques comme *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*,
- Etudier le processus du compostage des andains à grande dimension dans l'objectif de produire du compost de bonne qualité agronomique et phytosanitaire pour le commercialiser à grande échelle.

**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

- Abad Berjon, M., Climent Morato, M. D., Aragon Revuelta, P., Camarero Simon, A., 1997.** The influence of solid urban waste compost and nitrogen-mineral fertilizer on growth and productivity in potatoes. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 28:1653-1661.
- Abdelhamid, M.T., Takatsugu Horiuchi, Shinya Oba., 2004.** Composting of rice straw with oilseed rape cake and poultry manure and its effects on faba bean (*Vicia faba* L.) growth and soil properties. *Bioresource Technology*, 93: 183-189.
- Abdel-Sabour M.F., El-seoud M.A., 1996.** Effects of organic-waste compost addition on sesame growth, yield and chemical composition. *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 60: 157-164.
- Adani, F., Genevini, P. L., Tambone F., 1995.** A new nindex of organic matter stability. *Compost Science & Utilization*, 3:23-37.
- AFNOR., 1999a.** Recueil de normes et réglementation AFNOR. Matières fertilisantes et supports de culture. Tome 1: normalisation. Paris: Association française de normalisation. 694p.
- AFNOR., 1999b.** Recueil de normes et réglementation AFNOR. Qualité des sols. Vol 1. Paris: Association française de normalisation. 566p.
- Agassi, M., Levy, G.J., Hadas, A., Benyamini, Y., Zhevelev, H., Fizik, E., Gotessman, M., Sasson, N., 2004.** Mulching with composted municipal solid wastes in Central Negev, Israel: I. effects on minimizing rainwater losses and on hazards to the environment. *Soil & Tillage Research*, 78 : 103-113.
- Aggelides, S.M., Londra P.A., 2000.** Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. *Bioresource Technology*, 71: 253-259.
- Aguilar, F. J., Gonzalez, P., Revilla, J., De Leon, J.J., Porcel, O., 1997.** Agricultural Use of Municipal Solid Waste on Tree and Bush Crops. *J. agric. Engng Res*, 67: 73 - 79.
- Ait Baddi, G., Alburquerque, A.J., Gonzalez, J., Cegarrab, J., Hafidi, M., 2004.** Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of olive mill wastes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 54: 39 – 44.
- Akanbi, WB., Togun, AO., 2002.** The influence of maize-stover compost and nitrogen fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of amaranth. *Scientia Horticulturae*, 93 :1-8.
- Alabouvette, C., Rouxel, F., Louvet, J., 1980.** Recherche sur la résistance des sols aux maladies. VII. Etude comparative de la germination des chlamydospores de *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani* au contact de sols résistants et sensibles aux fusarioses vasculaires. *Ann. Phytopathol*, 12 : 21-30.
- Alabouvette, C., Couteaudier, Y., Louvet, J., 1982.** Comparaison de la réceptivité de différents sols et substrats de culture aux fusarioses vasculaires. *Agronomie*, 2: 1-6.
- Albiach, R., Canet, R., Pomares, F., Ingelmo, F., 2000.** Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil. *Bioresource Technology*, 5: 43-48.
- Alburquerque, J.A., González, J., Garcia, D., Cegarra, J., 2006.** Effects of bulking agent on the composting of “alperujo”, the solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction. *Process Biochemistry*, 41 : 127–132

Amir H., 1981. Antagonisme de divers microorganismes vis-à-vis de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* agent du Bayoud. Thèse Magister., U.S.T.H.B., Alger. 144p.

Amir, H., Sabaou, N., 1983. Le palmier dattier et la fusariose. XII: Antagonisme dans le sol de deux actinomycètes vis-à-vis de *Fusarium oxysporum*. F.sp. *albedinis* responsable du Bayoud. Bull. Soc. Hist. Afr. Nord, 13: 47-60.

Amir, H., Amir, A. 1988. Le palmier dattier et la fusariose. XIV. Antagonisme dans le sol de souches de *Fusarium solani* vis à vis de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. Rev. Ecol. Biol. Sol, 25 : 161-174.

Amir, S., Hafidi, M., Merlina, G., Hamdi, H., Revel, J-C., 2004. Elemental analysis, FTIR and ¹³C-NMR of humic acids from sewage sludge composting. *Agronomie*, 24 : 13-18.

Arrougé, T., Moresoli, G., Soucy, G., 1999. Primary and secondary sludge composting: a feasibility study. *Pulp Paper Can.*, 100: 33-36.

Atallah, T., Andreux, F., Choné T., Gras, F., 1995. Effect of storage and composting on the properties and degradability of cattle manure. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 54: 203-213.

Atiyeh, R.M., Lee, S., Edwards, C.A., Arancon, N.Q., Metzger, J.D., 2002. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource Technology*, 84: 7-14.

Audureau, I., 1992. Caractérisation biochimique de divers amendements organiques: application de la méthode Van Soest modifiée. Rapport de stage. INRA., Bordeaux, France: ENITHP, 19p.

Avnimelech, Y., Bruner, M., Ezrony, I., Sela, R., Kochba. M., 1996. Stability indexes for municipal solid waste compost. *Compost Science & Utilization*, 4:13-20.

Bach, P. D., K. Nakasaki, M. Shoda, H. Kubota. 1987. Thermal balance in composting operations. *Ferment. Technol.*, 65:199-209.

Bagstam G. 1977. Experiments made in bench scale composters. III: composting of spruce bark together with sewage sludge. *Vatten* 3, 239-250.

Bailey, K.L., Lazarovits, G., 2003. Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments. *Soil and Tillage Research*, 72: 169-180.

Barnett, H.L., Hunter, B.B., 1972. Illustrated genera of imperfect fungi. Third edition, Burgess Publishing Company, 241 P.

Bazzoffi, P., Pellegrini, S., Rocchini, A., Mandi, M., Grasselli, O., 1998. The Effect of Urban Refuse Compost and Different Tractors Tyres on Soil Physical Properties, Soil Erosion and Maize Yield. *Soil and Tillage. Research*, 48: 275-286.

Beffa, T., Blanc, M., Lyon, P.F., Vogt, G., Marchiani, M., Fischer, J.L., and Aragno, M., 1996. Isolation of *Thermus* strains from hot composts (60 to 80°C). *Appl. Environ. Microbiol.* 62 : 1723-1727.

Bellamy, K.L., Chong, C., Cline, R.A., 1995. Paper sludge utilization in agriculture and container nursery culture. *J. Environ. Qual.*, 24: 1074-1082.

Ben Abdalla, A., 1990. La phoeniculture, les systèmes agricoles oasiens. *Options méditerranéennes*, sér. A, N° 11 : 105-120.

Bencherifa, A., Popp, H., 1990. L'oasis de Figuig : persistance et changement. Passau : Passavia Universitätsverlag, 1990 ; Série : Essais et études N° 3, 109p.

Bendiab, K., Baaziz M., Brakez, Z., Sedra My. H., 1993. Correlation of isoenzyme polymorphism and Bayoud-disease resistance in date palm cultivars and progeny. *Euphytica*, 65: 23-32.

Benny, C., Hatcher, P.G., Hadar, Y., Chen, Y., 1996. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid wastes. *J. Environ. Qual.*, 25: 776-785.

Bernal MP., Paredes C., Sanchez-Monedero MA., Cegarra J., 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide-range of organic wastes. *Bioresour. Technol.* , 63: 91-99.

Bhattacharyya, P., Chakraborty, A., Chakrabarti, K., Tripathy, S., Powell, M.A., 2005. Chromium uptake by rice and accumulation in soil amended with municipal solid waste compost. *Chemosphere*, 60 :1481–1486.

Bidlingmaier, W., 1993. The history of development of compost standards in germany. In *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*, Harry A.J. Hoitink and Harold M.Keener ed. The Ohio State University. 536-544

Blanc, M., Marilley, L., Beffa, T., Aragno, M., 1997. Rapid identification of heterotrophic, thermophilic, spore-forming bacteria isolated from hot composts. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 47 : 1246-1248.

Blok, W.J., Coenen, G.C.M., Pijl, A.S., Termorshuizen, A.J., 2002. Disease suppression and microbial communities in potting mixes amended with composted biowastes. In: Michel, F.J., Rynk, R.F., Hoitink, H.A.J. (Eds.), *Proceedings of the International Symposium Composting and Compost Utilization*, Columbus, Ohio, 6-8 May 2002, disc format. JG Press, Emmaus, USA

BNQ. P 0413-200. (1995). Amendements organiques - Compost. Bureau de Normalisation du Québec. 7 P. http://www.compost.org/WDO_website/pdf/compostqualitydoc.pdf

Bollen, G.J., 1984. The fate of plant pathogens during composting of crop residues. pp. 282-290 in Gasser, J.K.R. (éditeur). 1984. *Composting of agricultural and other wastes*. Elsevier applied science publishers, Londres.

Bollen, G.J. 1985. Plant pathogen survival during the composting of crop residus. In *Composting of agricultural and other wastes*. Proceedings of seminar organised by the Commission of the European Communities, Directorate-General Science, Research and Development, Environment Research Programme, held at Brasenose College, Oxford, UK, 19-20 March 1984. pp. 282-290. Edited by J.K.R. GASSER. Elsevier Applied Sciences Publishers. CEC.

Bonneau, M., Souchier, B., 1979. *Pédologie tome 2: constituants et propriétés du sol*. Masson, Ed. Paris. 459p.

- Bordeleau, L.M., 1999.** L'usage du compost restaure la biodiversité dans les sols agricoles. *Bio-Bulle*, 19: 20-24.
- Borken W., Muths A., Beese F., 2002.** Changes in microbial and soil properties following compost treatment of degraded temperate forest soils. *Soil. Bio. Biochem*, 34: 403-412.
- Borken W., Xu YJ., Beese F. (2004).** Leaching of dissolved organic carbon and carbon dioxide emission after compost application to six nutrient-depleted forest soils. *J. Environ. Qual*, 33: 89-98.
- Bouakka M., Hakkou A., 2004.** Oasis de Figuig : L'irrigation et la fusariose vasculaire (Bayoud). *El Awamia*, 1 : 27- 46.
- Bounaga, N.R., 1975.** Le palmier dattier et la fusariose : - Etude comparative de la germination des microconodies et macroconodies du *Fusarium oxysporum* f.sp *albedinis* (Killian et Maire) Gordon. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord.* 66 : 39-44.
- Brac de la Perriere, R.A., Benkhalifa, A., 1991.** Progression de la fusariose du palmier dattier en Algérie. *Sécheresse*, 2 : 119-128.
- Bresson, L.M., Koch, C., Le Bissonais, Y., Barriuso, E., Lecomte, V., 2001.** Soil surface structure stabilization by municipal waste compost application. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 65: 1804-1811.
- Brinton, W. F., Evans, E., 2000.** Plant performance in relation to depletion, CO₂-rate and volatile fatty acids in container media composts of varying maturity.
- Brun, J., 1998.** La lutte biologique. Les Ravageurs du palmier dattier. Conception et réalisation : INRA/ Urdic/ Antibes.
- Bryssine, L., Toutain G., 1970.** Etude des sols des palmeraies. 1, Evolution d'un sol de palmeraie par la culture et la fumure. *Alawamia*; 35.
- Bulit, J., Louvet, J., Bouhot, D., Toutain, G., 1967.** Recherches sur le *Fusarium*. I. Travaux sur le Bayoud, fusariose vasculaire du palmier dattier en Afrique du Nord. *Ann. Epiphyties*, 18: 213-240.
- CAN /BNQ 0413-200. 1997.** Amendements organiques-composts. Bureau de Normalisation du Québec Norme Nationale du Canada, 25 p. <http://www.woodsend.org/pdf-files/criq-stability.pdf>
- Carlyle, R.E., Norman, A.G., 1940.** Microbial thermogenesis in the decomposition of plant materials. II : Factors involved. *Journal Paper of the Iowa Agricultural Experiment station, Ames, Iowa*, 804: 699-724.
- Cavani, L., Ciavatta, C., Gessa, C., 2003.** Identification of organic matter from peat, leonardite and lignite fertilisers using humification parameters and electrofocusing. *Biores. Technol.*, 86, 45-52.
- Cayuela, M.L., Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., 2006.** Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes. *Process Biochemistry*, 41: 616–623.
- CCME, BNQ., 1995.** Guidelines for compost Quality. part 1. Canadian Council of Ministers of the Environment. http://www.compost.org/WDO_website/pdf/compostqualitydoc.pdf
- Chang, Y., 1967.** The fungi of wheat straw compost. II. Biochemical and physiological studies. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 50: 667-677.

- Chang, Y., Hudson, H.J., 1967.** The fungi of wheat straw compost. I. Ecological studies. Trans. Br. Mycol. Soc. 50: 649-666.
- Changa, C.M., Wang, P., Watson, M.E., Hoitink, H.A.J., 2003.** Assessment of the reliability of a commercial maturity test kit for composted manures. *Compost Science & Utilization*, 11: 125-143.
- Charest, M. H., Beauchamp, C.J., 2002.** Composting of de-inking paper sludge with poultry manure at three nitrogen levels using mechanical turning: behavior of physico-chemical parameters. *Bioresource Technology*, 81: 7-17.
- Chen, Y., 2003.** Nuclear magnetic resonance, infra-red and pyrolysis: application of spectroscopic methodologies to maturity determination. *Compost Science & Utilization*, 11, 2:152-168.
- Chenu, C., 2002.** Conséquences agronomiques et environnementales du stockage de carbone dans les sols agricoles. In *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France. Rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, édité par INRA* ed. 60-62.
- Chérif, M., Sadfi, N., Benhamou, N., Boudabbous, A., Boubaker, A., Hajlaoui, M.R., Tirilly, Y., 2002.** Ultrastructure and cytochemistry of in vitro interactions of the antagonistic bacteria *Bacillus cereus* X16 and *B. thuringiensis* 55T with *Fusarium roseum* var. *sambucinum*. *J. Plant Pathol.*, 84: 83-93.
- Chodak, M., Borken, W., Ludwig, B., Beese, F., 2001.** Effect of temperature on the mineralization of C and N of fresh and mature compost in sandy material. *J. Plant. Nutr. Soil. Sci.*, 164: 289-294.
- Chong, C., Cline, R.A., 1996.** Response of container-grown nursery crops to raw and composted paper mill sludges. *Compost Sci. Util.*, 2: 90-96.
- Chung, Y.R., Hoitink, H.A.J., 1990.** Interaction between thermophilic fungi and *Trichoderma hamatum* in suppression of *Rhizoctonia* damping-off in a bark compost-amended container medium. *Phytopathology*, 80: 73-77.
- Cohen, R., Cheftz, B., Hadar, Y., 1998.** suppression of soil-born pathogens by composted municipal solid waste. Beneficial co-utilisation of agricultural, municipal and industrial by-products. Kluwer Academic Publisher. Brown S., Angle J.S. Jacobs L., 113-130.
- Cotxarrera, L., Trillas-Gay, M.I., Steinberg, C., Alabouvette, C., 2002.** Use of sewage sludge compost and *Trichoderma asperellum* isolates to suppress *Fusarium* wilt of tomato. *Soil Biology & Biochemistry*, 34: 467-476.
- Cronin, M., Andrew, H., 1996.** Putative mechanism and dynamics of inhibition of the apple scab pathogen *Venturia inaequalis* by composts extracts. *Soil Biology & Biochemistry*, 28 : 1241-1249.
- Cruesi., 1970.** Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées. Rapport technique 1962-1969. Tech.Rpt/UNESCO/PNUD (SF) Tun5. Paris, France, 256 p.
- D'angelo, G., 1995.** Response of three compost-based substrates to different irrigation and fertilization regimes in *Poinsettia*. In: De-Bertoldi, M., Sequi, P., Lammers, B., Papi, T. (Eds.), *The Science of Composting*. Blackie Academic and Professional, London, 1113-1117.
- Dartigues, A., 1981.** Salinité des substrats horticoles. Essai d'harmonisation des différents modes d'expression des résultats analytiques. Académie d'Agriculture de France.
-
-

- De Bertoldi, M., Vallini, G., Pera, A., 1982.** Ecologia microbica del compostaggio. *Ann. Microbiol.*, 32: 121-135.
- De Bertoldi, M., Vallini, G., Pera, A., 1983.** The biology of composting: a review. *Waste Management & Research*, 1:157-176.
- De Brito Alvarez, M.A., Gagne, S., Antoun, H., 1995.** Effect of compost on rhizosphere microflora of the tomato and on the incidence of plant growth-promoting rhizobacteria. *Appl. Environ. Microbiol.*, 61: 194-199.
- De Ceuster, T.J.J., Hoitink, H.A.J., 1999.** Prospects for composts and biocontrol agents as substitutes for methyl bromide in biological control of plant diseases. *Compost Science and Utilization*, 7: 6-15.
- De Haan, S., 1981.** Results of municipal waste compost research over more than fifty years at the Institute for Soil Fertility at Haren/Gorninge, the Netherlands. *Neth. J. agric. Sci.*, 29:49-61.
- Debosz, K., Petersen, S.O., Kure, L.K., Ambus, P., 2002.** Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Applied Soil Ecology*, 19: 237-248.
- Deiana, S., Gessa, C., Manunza, B., Rausa, R., Seeber, R., 1990.** Analytical and spectroscopic characterization of humic acids extracted from sewage sludge, manure, and worm compost. *Soil Science*, 150, 1: 419-424.
- Diaz, E., Roldan, A., Lax, A., Albaladejo, J., 1994.** Formation of stable aggregates in degraded soil by amendment with urban refuse and peat. *Geoderma*, 63: 277-288.
- Dick, W.A., McCoy, E.L., 1993.** Enhancing soil Fertility by Addition of compost. *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*. Harry A. J. Hoitink et Harold M. Keener (Editeurs), Wooster, Ohio. 622-644.
- Dinel, H., Schnitzer, M., Dumontet, S., 1996.** Compost maturity: Extractable lipids as indicators of organic matter stability. *Compost Science & Utilization*, 4 :6-12.
- Djakovitch, JL., 1988.** Mise au point d'une méthode de détermination rapide du coefficient isohumique, de matériaux utilisables pour l'amendement des sols. Diplôme d'Ingénieur du C.N.A.M., Bordeaux, France.
- Djerbi, M., 1982 a.** Le Bayoud en Algérie, Problème et Solution. F.A.O. Regional Project for palm and Dates Research centre in the Near East and North. Africa, Baghdad Iraq, 45 p.
- Djerbi, M., 1982 b.** Bayoud disease in North Africa: history, distribution, diagnosis and control. *Date palm Journal*, 1 (2): 153-97.
- Djerbi, M., 1983.** Diseases of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.).F.A.O. Regional Project for Palm and Dates Research Centre in the Near East and North Africa. 106 p.
- Djerbi, M., 1988.** Les maladie des palmiers dattiers : Le Bayoud (15-36). Rapport de Projet Régional de lutte contre le Bayoud (RAB/84/018).

- Djerbi, M., 1990.** Méthodes de diagnostic du bayoudh du palmier dattier. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin, 20: 607-613.
- Djerbi, M., Sedra, M.H., El Idrissi Ammari, M.A., 1985.** Caractéristiques culturales et identification du *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis*, agent causal du Bayoud. Ann. Inst. Nat. Rech. Agro. Tunisie, 58 :1-8.
- Domergues, Y., Magenot, F., 1970.** Ecologie microbienne du sol. Ed Masson. Paris. 796 p.
- DPA., 1996.** Projet de mise en valeur en bour. Périmètre de la Palmeraie de Figuig. Direction provinciale de l'agriculture de Figuig.
- Dresboll, D. B., Magid, J., 2006.** Structural changes of plant residues during decomposition in a compost environment. Bioresource Technology, 97: 973–981.
- Dubost, D., Hetner, P., 1968.** La lutte contre le Bayoud, problèmes et méthodes. Service de la botanique, Faculté des sciences, Université d'Alger, 16 p.
- Duval, J., 1992.** L'élimination des phytopathogènes par le compostage. *AGRO- BIO-310-03*. [www.http://eap.mcgill.ca/AgroBio](http://eap.mcgill.ca/AgroBio).
- Dye, M.H., Rothbaum, H.P., 1964.** Self-Heating of Damp Wool. II: Self-Heating of Damp Wool under adiabatic condition. New Zealand Journal of Science, 7: 97-118.
- Edwards, L., Burney, J.R., Richter, G., Macrae, A.H., 2000.** Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada Agriculture, Ecosystems and Environment, 81: 217-222.
- Eggen, T., Vethe, O., 2001.** Stability indices for different composts. Compost Science & Utilization, 9:19-26.
- Eghball, B., Power, J.F., Gilley, J.E., Doran, J.W., 1997.** Nutrients, carbon, and mass loss during composting of beef cattle feedlot manure. J. Environ. Qual., 26 : 189-193.
- Ehaliotis, C., Cadisch, G., Giller, K.E., 1998.** Substrate amendments can alter microbial dynamics and N availability from maize residues to subsequent crops. Soil Biol. Biochem, 30: 1281–1292.
- Eklind, Y., Kirchmann, H., 2000.** Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. I: carbon turnover. Bioresource Technology, 74:115-124.
- El Ghorfi, A., 1987.** Contribution à l'étude des porteurs sains du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*, agent causal du Bayoud; fusariose vasculaire du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) thèse de 3^{ème} cycle, phytopathologie, faculté des sciences. Université cadi ayyad Marrakech, 97p.
- El Hadrami, A., El Idrissi-Tourane, A., El Hassni, M., Daayf, F., El Hadrami, I., 2005.** Toxin-based in vitro selection and its potential application to date palm for resistance to the bayoud *Fusarium* wilt. C. R. Biol., 328: 732–744.
- El Hassni, M., El Hadrami, A., Daayf, F., Chérif, M., Ait Barka, E., El Hadrami, I., 2006.** Biological control of bayoud disease in date palm: election of microorganisms inhibiting the causal agent and inducing defense reactions. Environmental and Experimental Botany, sous presse.

- Elad, Y., Shtienberg, D., 1994.** Effect of compost water extracts on grey mould (*Botrytis Cinerea*). Crop protection, 13 : 109-114.
- Elliott, L.F., Travis, T.A., 1973.** Detection of carbonyl sulfide and other gases emanating from beef cattle manure. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 37: 700-702.
- Erhart, E., Burian, K., Hartl, W., Stich, K., 1999.** Suppression of *Pythium ultimum* by biowaste composts in relation to compost microbial biomass, activity and content of phenolic compounds. Journal of Phytopathology, 147: 299-305.
- Evanylo, G.K., Daniels, W.L., 1999.** Paper mill sludge composting and compost utilization. Compos. Sci. Utiliz., 7 (2): 30-39.
- Ezelin-de Souza, K., 1998.** Contribution à la valorisation de la bagasse par transformation biologique et chimique. Valeur agronomique des composts et propriétés suppressives vis-à-vis du champignon phytopathogène *Fusarium solani*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. 390p.
- FAO., 1994.** Les produits du palmier dattier; édition 101.
- FAO., 2004.** Food and Agriculture Organization, http://www.fao.org/index_fr.htm.
- FCQAO., 1994.** Methods book for the analysis of compost - Kompost information Nr 230. BGK ed.
- Fernandes, F., Viel, M., Sayag, D., Andere, L., 1988.** Microbial Breakdown of fats through in-vessel Co-composting of agricultural and urban wastes, 26: 33-48.
- Fernandez, D., Ouinten, M., Tantaoui, A., Geiger, J.P., Daboussi, M.J., Langin, T., 1998.** Fot1 insertion in the *fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* genome provide diagnostic PCR targets for detection of the date palm pathogen. Applied and Environmental Microbiology, 64: 633-636.
- Finstein, M.S., Morris, M.L., 1975.** Microbiology of municipal soli waste composting. Adv. Appl. Microbiol., 19:113-151.
- Forster, J. C., Zech, W., Würdinger, E., 1993.** Comparison of chemical and microbial methods for the characterization of the maturity of composts from contrasting sources. Biol. Fertil. Soils., 16: 93-99.
- Francou, C., 2003.** Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: influence de la nature des déchets et du procédé de compostage – Recherche d'indicateurs pertinents. Thèse de doctorat INAPG, UMR INRA INAPG. Environnement et grandes cultures de Grignon. 388 p.
- Frederix, M.J.J., Den Brader, K., 1989.** Résultats des essais de désinfection des sols contenant des échantillons de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. FAO/PNUD/RAB /88/024. Ghardaia, Algérie.
- Fricke, K., Vogtman, H., 1994.** Compost quality: physical characteristics, Nutrient content, heavy metals and organic chemicals. Toxicological and Environmental Chemistry, 443: 95-114.
- Fuchs, J., 2003.** Le compost de qualité au service de la santé des plantes. Agronomie. Alter Agri., 61: 7-9.

- Gagnon, B., Robitaille, R., Simard, R., 1998.** Est-ce qu'il est bon mon compost ? 2^{ème} partie. Bio-Bulle., 14: 25-27.
- Gagnon, B., Simard, R.R., Robitaille, R., Goulet, M., Rioux, R., 1997.** Effect of composts and inorganic fertilizers on spring wheat growth and N uptake. Can. J. Soil. Sci., 77:487-495.
- Garbeva, P., van Veen, J.A., van Elsas, J.D., 2004.** Microbial diversity in soil: selection of microbial population by plant and soil type and implications for disease suppressiveness. Annu. Rev. Phytopathol, 42: 243-270.
- Garcia, C., Hernandez, T., Costa, F., 1991.** Study on Water Extract of Sewage Sludge Composts Soil. Sci. Plant. Nutr., 37: 399-408.
- Garcia, C., Hernandez, T., Costa, F., Pascual, J.A., 1992.** Phytotoxicity due to the agricultural use of urban wastes. Germination experiments. J. Sci. Food Agric., 59:313-319.
- Garcia-Gil, J.C., Plaza, C., Solver-Rovra, P., Polo, A., 2000.** A long-term effect of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. Soil. Bio. Biochem., 32: 1907-1913.
- Gary, K.R., Sherman, K., Diddlestone, A.J., 1973.** A review of composting. Part 1. Process Biochem., 32-36.
- Germon, J.C., Nicolardot, B., Catroux, G., 1980.** Mise au point d'un test rapide de détermination de la maturité des composts. Ministère de l'environnement et du cadre de vie, convention d'étude n°79-501 France.
- Gerrits, J.P.G., Bels-Koning, H. C., Muller, F.M., 1965.** Changes in compost constituents during composting, pasteurization and cropping. Mushroom Sci., 6: 225-243.
- Gerrits, J.P.G., 1972.** The influence of water in mushroom composts. Mushroom Sci., 8: 43-57.
- Getha, K., Vikineswary, S., 2002.** Antagonistic effects of *Streptomyces violaceusniger* strain G10 on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 4: indirect evidence for the role of antibiosis in the antagonistic process. J. Ind. Microbiol. Biotechnol., 28, 303–310.
- Girard., 1961.** Actualité dans le domaine de la recherche en phoeniciculture. Les journées de la datte (3-4 mai) Algérie.
- Giusquiani, P.L., Pagliai, M., Gigliotti, G., Businelli, D., Benetti, A., 1995.** Urban waste compost: effects on physical, chemical and biological soil properties. J. Environ. Qual., 24: 175-182.
- Glick, B.R., Bashan, Y., 1997.** Genetic manipulation of plant growth promoting bacteria to enhance biocontrol of phytopathogens. Biotechnol. Adv., 15: 353–378.
- Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., 2003.** Le sol vivant. Base de pédologie, biologie des sols. Lausanne: presses polytechniques et universitaires Romandes, collection gérer l'environnement (14), Deuxième édition revue et augmentée 568p. ISBN: 2-88074-501-2.
- Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., 1998.** Le sol vivant. Base de pédologie, biologie des sols. Lausanne: presses polytechniques et universitaires Romandes, collection gérer l'environnement (14), 520p. ISBN: 2-88074-367-2.

- Godden, B., Penninckx, M.J., 1984.** Biochemistry of manure composting lignin biotrans formation and humification. *Ann. Microbial. Inst. Past.*, 135B : 69-78.
- Godden, B., 1986.** Les tests enzymatiques et chimiques de maturité des composts. *Compost information*, 22: 20-24.
- Golueke, C., Card, B.J., Mc Gauhey, P.H., 1954.** A critical evaluation of inoculum in composting. *Applied Microbiology*, 2: 45-53.
- Gomez E., Ferreras L.,Toresani S., 2006.** Soil bacterial functional diversity as influenced by organic amendment application. *Bioresource Technology*, 97: 1484-1489.
- Gotaas, H.B., 1959.** Composting sanitary disposa land reclamation of organic wastes. World health organization. Monograph, Series N° 31. Geneva. 205 p.
- Gras, R., Aguis, I., 1981.** Influence de l'épaisseur des massifs poreux sur leur rétention d'eau-capacité en bac. *Science du sol*, 3: 171-86.
- Gras, R., Aguis, I., 1982.** Quelques propriétés physiques des substrats horticoles II. *PHE-Revue horticoles*, 233: 61-65.
- Griffin, G.J., 1970.** Carbon and nitrogen requirements for macroconidial germination of *Fusarium solani*: dependence on conidial density. *Can. J. Microbiol.*, 16: 733-740.
- Griffin, G.J., 1976.** Roles of low pH, carbon and inorganic nitrogen source use in chlamyospore formation by *Fusarium solani*. *Can. J. Microbiol.*, 22: 1381-1389.
- Grushevoi, S.E., Levykh, P.M., 1940.** The possibility of obtaining seed-bed soil free from infection in compost heaps. *Review of applied mycology* 20:87. In Duval J. 1992. L'élimination des phytopathogènes par le compostage. AGRO- BIO-310-03. [www.http://eap.mcgill.ca/AgroBio](http://eap.mcgill.ca/AgroBio).
- Guerrero, C., Gomez, I., Mataix Solera, J., Moral, R., Mataix Beneyto, J., Hernandez, MT., 2000.** Effects of solid waste compost on microbiological and physical properties of a burnt forest soil in field experiments. *Biol. Ferti. Soils*, 32: 410-414.
- Guerrero, C., Gomez, I., Moral, R., Mataix-Solera, J., Mataix-Beneyto, J., Hernandez, MT., 2001.** Reclamation of a burned forest soil with municipal waste compost: macronutrient dynamic and improved vegetation cover recovery. *Bioresource Technology*, 76: 221-227.
- Guisquiani, PL., Pagliai, M., Gigliotti, G., Businelli, D., Benetti, A., 1995.** Urban waste compost effects on physical, chemical and biochemical soil properties due to organic waste applications. *J. Environ. Qual.*, 24: 175-182.
- Hacala, S., 1998.** Le compostage du fumier en exploitation d'élevage. *Receuil des interventions du 15 Decembre 1998*. Paris. ACTA/ ADEME/ Ministère de l'agriculture et de la pêche: 28-43.
- Haider, K., 1968.** Der bildungsmechanismus stickstoff haltiger huminstoffe wahrend der rotte. *Mushroom sci.*, 7: 139-147. in Ezlin de Souza. 1998.
- Hakkou A., Bouakka M. (2004).** Oasis de Figuig: l'état actuel de la palmeraie et incidence de la fusariose vasculaire (Bayoud). *Sécheresse* 15(2), p. 147-58.

Hakkou, A., Bouakka, M., 2000. Rapport final du projet : programme de sauvetage de la palmeraie de FIGUIG et encouragement des coopératives agricoles. 184p.

Hao, X., Chang, C., Larney, F.J., Travis, G.R., 2001. Greenhouse Gas Emissions during Cattle Feedlot Manure Composting. *Environ. Qual.*, 30: 376–386.

Harrak, H., Chetto., A., 2001. Valorisation et commercialisation des dattes au maroc. Edition INRA 2001, Marrakech, Maroc, Ed. Alwatania, 222p.

Hartz, T. K., Giannini, C., 1998. Duration of composting of yard wastes affects both physical and chemical characteristics of compost and plant growth. *HortScience*, 33 :1192-1196.

Haug, R.T., 1993. The practical handbook of compost engineering. Lewis Publ., Boca Raton, Florida, USA, 717 p.

Haug, R.T., 1980. Compost Engineering: principes and practice ED ANN ARBOR science Michigan USA, 655 p.

Helfrich, P., Chefetz, B., Hadar, Y., Chen, Y., Schnabl, H., 1998. A novel methode for determining phytotoxicity in composts. *Compost Science &Utilization*, 6: 6-13.

Henin, JR., Just, C., 1967. Présence d'acides phénols libres dans le sol. Etude de leur influence sur la germination et la croissance des végétaux. *Ann. Agron.*, 18.

Hirai, M. F., Katayama, A., Kubota, H., 1986. Effect of compost maturity on plant growth. *BioCycle*, 27:58-61.

Hoitink H. A. V., Stone A. G., Han D. Y. 1997. Suppression of plant disease by composts. *Hortscience*, 32 (2): 184-187.

Hoitink, H.A.J., Grebus, M.E., 1994. Status of biological control of plant diseases with compost. *Compost. Sci. Util.*, 2: 6-12.

Hoitink, H.A.J., Fahy, P.C., 1986. Basis for the control of soilborne plant pathogens with composts. *Annu. Rev. Phytopathol*, 24: 93-114.

Hoitink, H.A.J., Boehm, M.J., 1999. Biocontrol within the context of soil microbial communities: A substrate-dependent phenomenon. *Ann. Rev. Phytopathology*, 427-445.

Hoitink, H.A.J., Boehm, M.J., Hadar, Y., 1993. Mechanisms of suppression of soilborne plant pathogens in compost-amended substrates. In: *Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects.* H.A.J. Hoitink and H.M. Keener edit. The Ohio State University.

Houéro B. 1993. Les depots de fumiers au champs: pertes en azote par percolation des jus sous les tas. In Uet 13, Dossier Ruralité Environnement Développement. Luxembourg, 73-83.

Hountin, J A., Karam, A., Parent, L.E., 1995. Effect of Peat Moss-Shrimp Wastes Compost on the Growth of Barley (*Hordeum vulgare* L.) on a Loamy Sand Soil. *Soil. Sci. Plant Analysis*, 26: 3275-3289.

Houot, S., Francou, C., Vergé-Leviel, C., 2001. Gestion de la maturité des composts: conséquence sur leur valeur agronomique et leur inocuité. Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée. Actes

des 5èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de la terre. Palais des Congrès de Blois. 27-29 novembre 2001. Ed. G.Thevenet (Comifer) et A.Joubert (Gemmas).

Howell, C.R., Stipanovic, R.D., 1979. Control of *Rhizoctonia solani* on cotton seedlings with *Pseudomonas fluorescens* and with an antibiotic produced by the bacterium. *Phytopathology*, 69: 480-482.

Hubert, G., 1979. compostage des boues résiduaires avec un support carboné: procédé TRIGA. *L'eau et industrie*, 40: 130-138.

Hue, N.V., Licudine, D.L., 1999. Amelioration of subsoil acidity through surface application of organic manures. *Environ. Qual.*, 28: 623-632.

Iannotti, D.A., Grebus, M.E., Toth, B.L., Madden, L.V., Hoitink, H.A.J., 1994. Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. *J. Environ. Qual.*, 23:1177-1183.

Ibrahim, S., Shindo, H., 1999. Effect of Continuous Compost Application on Water-Stable Soil Macroaggregation in a field Subjected to Double Cropping. *Soil. Sc. Plant Nut.*, 45: 1003-1007.

Iglesias-Jimenez, A., Alvarez, C.E., 1993. Apparent availability of nitrogen in composted municipal refuse. *Biol. Fertil. Soils*, 16: 313-318.

IPM., 2003: La protection intégrée du palmier dattier (IPM), Importance de la diversité génétique du palmier dattier dans la conservation des oasis et l'amélioration des condition de vie des population oasiennes au maghreb. Tozeur Tunisie 11-13 Décembre. 8p.

Janati, A., 1990. Les cultures fourragères dans les oasis. CIHEAM-Options Méditerranéennes, sér.A/ n°11, les systèmes agricoles oasiens.

Jaquin, F., Mangenot, F., 1959. Populations microbiennes des bois. III - Humification in vitro d'une sciure de hêtre. *Plant and soil*, 9: 377-391.

Jemenez, E.I., Garcia, V.P., 1989. Evaluation of city refus compost maturity a review. *Biological wastes*, 27: 115-142.

Jeris, J.S., Regan, R.W., 1973. Controlling environmental parameters for optimum composting. *Compost Sci.*, 14: 8-22.

Jung, G., Bruckert, S., Dommergues, Y., 1968. Etude comparée de diverses substances hydrosolubles extraites à partir des litières tropicales et tempérées. *Oecol. Plant*, 3: 237-253.

Kada, A., Dubost, D., 1975. Le bayoud à Ghardaia. *Bull. Agron. Saharienne, Algérie*, 1(13): 29-61.

Kai, Hideaki, Tohru, U., Maashahiro, S., 1990. Antimicrobial activity of bark-compost extracts. ATTRA: Appropriate Technology Transfer for Rural Areas (<http://www.attra.org/attra-pub/PDF/comptea.pdf>). In Znaidi I.E.A., 2002. Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes. (<http://orgprints.org/3064/01/Etude.pdf>)

Killian, C., Maire, R., 1930. Le Bayoud, maladie du dattier. *Bull. Soc. Hist. Nat. Agr.*, 21: 89-101.

Knoll, K.H., 1961. Public health and refuse disposal. *Compost. Sci.*, 2. 35-40.

- Kochtizky, O.W., Seaman, W.K., Wiley, J.S., 1969.** Municipal composting research at Johnson City, Tennessee. *Compost Sci.*, 9(4): 5-16.
- Komada, H., 1975.** Development of a selective medium for quantitative isolation of *Fusarium oxysporum* from natural soil. *Rev. of Plant Protect. Res.*, 8: 114-125.
- Kostov, O., Petkova, G., Van Cleemput, O., 1994.** Microbial indicators for sawdust and bark compost stability and humification process. *Bioresource Technology*, 50:193-200.
- Kostov, O., Tzvetkov, Y., Petkova, G., Lynch, M., 1996.** Aerobic composting of plant wastes and their effect on the yield of ryegrass and tomatoes. *Biol. Fert. Soils*. 23: 20-25.
- Krafft V. H., 2000.** Le compost au jardin. Collection les quatre saisons du Jardinage., terre vivante 2^{ème} édition, 126 p.
- Kuter, G.A., Hoitink, H.A.J., Rossman, L.A., 1985.** Effects of aeration and temperature on composting of municipal sludge in a full-scale vessel system. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 57 : 309-315.
- Larchevêque, M., Baldy, V., Korboulewsky, N., Ormeno, E., Fernabdez, C., 2005.** Compost effect on bacterial and fungal colonization of kermes oak leaf litter in a terrestrial Mediterranean ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 30: 79-89.
- Larney, F.J., Olson, A.F., Carcamon, A.A., Chang, C., 2000.** Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and summer. *Bioresource Technol.* 75: 139-148.
- Larpent, J.P., Larpent-Gourgaud, M., 1990.** Mémento technique de microbiologie. Deuxième édition. Edt Technique de documentation- Lavoisier. 417P.
- Levy, J. S., Taylor, B.R., 2003.** Effects of pulp mill solids and three composts on early growth of tomatoes *Bioresource Technology*, 89: 297-305.
- Linderman, R. G., Gilbert, R. G., 1973.** Influence of volatile compounds from alfalfa hay on microbial activity in soil in relation to growth of *Sclerotium rolfsii*. *Phytopathology*, 63: 359-362.
- Linéres, M., Djakovitch, J.L., 1993.** Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. In J. Decroux, et J.C. Ignazi: *Matières Organiques et Agricultures*. GEMAS-COMIFER, Blois, 159-168.
- Locke, T., Colhoun, J., 1974.** contribution to a methode of testing oil palm seedings for resistance to *Fusarium oxysporum* f.sp. *elaeidis* TOOVEY. *Phytopathol. Z.*, 79: 77-92.
- Lopez-Real, J., Baptista, M., 1996.** A preliminary comparative study of three manure composting systems and their influence on process parameters and methane emissions. *Compost Sci. Utilization*, 4: 71-82.
- Louvet, J., Toutain, G., 1981.** Bayoud, *Fusarium* wilt of date palm. In: *Fusarium: Disease, Biology and Taxonomy*. Nelson, P.E., Toussoun, T.A. and Cook, R.J ed. The Pennsylvania State University Press, 13-20.

- Louvet, J., 1977.** Observations sur la localisation des chlamydospores de *Fusarium oxysporum* dans les tissus des plantes parasitées. Travaux dédiés à G.Viennot-Bourgin, I.N.R.A., société Française de phytopathologie, Paris, 193-197.
- Louvet, J., 1991.** Que devons-nous faire pour lutter contre le Bayoud? Physiologie des arbres et Arbustes en zones arides et semi arides: Groupes d'Etudes d'Arbre, Paris-France, 337-346.
- MADRPM, 1999.** Statistiques du secteur phoenicicole. Ministère de l'agriculture, du développement Rural et des pêches maritimes, Direction de la production végétale (DPV), Division d'Horticulture, Rabat, roc.
- Malençon, G., 1934.** La question du Bayoud au Maroc. Ann. Crypt. Exot., 2 :1-41. (Abstr. Rev. Appl. Mycol. 14: 302-303).
- Malençon, G., 1950.** La diffusion et l'épidémiologie de la maladie fusarienne du palmier dattier en Afrique du Nord. Rev. Mycol. Suppl. Colonial, 15 (1) : 45-60.
- Mamo, M., Rosen, C.J., Halbach, T.R., 1999.** Nitrogen availability and leaching from soil amended with municipal solid waste compost. J. Environ. Qual., 28: 1074-1082.
- MAMVA., 1999.** Ministère de L'agriculture et de Mise en Valeur Agricole. La phoeniciculture au MAROC, Terre et vie N° 36 Mars 1999. Terre et vie n° 37 Avril.
- MARA., Ministère de L'agriculture et de la Reforme Agraire. 1976.** Direction de la Recherche Agronomique. Rabat. Maladie et Ravageurs des plantes cultivées au MAROC. Tome I.
- Martinez, F., Cuevas, G., Calvo, R., Walter, I., 2003.** Biowaste effects on soil and native plants in semi arid ecosystem. J. Environ. Qual. 32, 472-479.
- Maslohy, My.A., 1989.** Contribution à l'étude *in vitro* et *in situ* des antagonistes de *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* agent causal du Bayoud. Thèse de 3ème cycle. Université Cadi Ayyad. Marrakech. 98p.
- Mazaud, D., 1993.** Végeterre ou le broyage compostage des déchets d'espaces verts, Aspects techniques et réglementation.
- McQuilken, M. P., Whipps, J.M., Lynch, J.M., 1994.** Effects of water extracts of a composted manure-straw mixture on the plant pathogen *Botrytis cinerea*. World journal of microbiology and biotechnology, 10: 20-28.
- Messian, C.M., Blancard, D., Rouxel, F., Lafon, R. 1991.** Les maladies des plantes maraichères. 3^{ème} édition, INRA, 552p.
- Miquel, G., 1998.** Recyclage et valorisation des déchets ménagers. Rapport 415 (98-99)-Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Adresse URL : <http://www.Senat.fr/rap/o98-415/o98-415.htm>.
- Monciero, A., 1954.** Contribution à l'étude du pollen et de la fécondation du palmier dattier. Ann. De l'Institut Agronomique d'Algérie, 8 (4): 3-28.
- Morel, J.L., Gukert, A., Nikolardot, B., Benistant, D., Catroux, G., Germon, J.C., 1986.** Etude de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques et de la stabilité biologique des ordures ménagères au cour du compostage. Agronomie, 8: 693-701.

- Morel, J.L., Jacquin, F., Guckkert, A., Barthel, C., 1979.** Contribution à la détermination de tests de la maturité des composts urbains. C.R. Contact N° 75-124. Min. Environ. Car. Vie. Ensaia, Nancy : 1-32.
- Munier, P., 1956.** Possibilités et avenir de l'extension de la culture du palmier dattier dans les confins Saharo-Soudanais d'A.O.F et d'A.E.F. Fruits, 11 (4): 162-167.
- Munier, P., 1961.** Le palmier dattier en Colombie. Fruits. 16.(3).
- Munier, P., 1973.** Le palmier dattier. Collection: Techniques Agricoles et Productions Tropicales. G.-P. Maison neuve et Larose, Paris, France. 217p.
- Mustin, M., 1987.** Le compost, Gestion de la matière organique. Edition François Dubusc. 954 p.
- Nasr, N., 2003.** Importance de la diversité génétique du palmier dattier dans la conservation des oasis et l'amélioration des conditions de vie des population oasiennes au maghreb. Atelier sur la protection intégrée (IPM) du palmier dattier dans les pays de l'Afrique du Nord. Tozeur, Tunisie, 11-13 Décembre.
- N'Dagamiye, A., 2000.** Valeur agronomique des biosolides de papetières : effet sur la production des cultures et la qualité des sols. Colloque sur les biosolides. Les biosolides : une richesse pour nos sols, Montebello, 16 et 17 mars 2000. Montebello, 22-44.
- N'Dayegamiye, A., Royer,R., Audess, P., 1997.** Nitrogen mineralization and availability in manure composts from Québec biological farms. Can. J. of Soil Sci., 77:345-350.
- Nicolardot, B., Chaussod, R., Morel, J.L., Gukert, A., Benistant, D., Catroux, G., Germon, J.C., 1986.** Appréciation simple de la maturité des composts urbains en relation avec leurs effets sur la production végétale. Agronomie, 6: 819-827.
- Nicolardot, B., Germon,J. C., Chaussod,R., Catroux G., 1982.** Une technique simple pour déterminer la maturité des composts urbains. Compost-Information, 10:2-4.
- Nixon, R. W., Carpenter, J. B., 1978.**Growing dates in the United States. Agri. Info. Bull, 207: 21-23.
- Nogales, R., Mingorance, MD., Elvira, C., Benitez, E., 1996.** Agricultural Use of Municipal Solid Waste Composts and Vermicomposts: Effect on Soil Properties. Orcazette, 4: 5-8.
- Nuntagij, A., Kaemmerer, M., Bailly, JR., Andre, L., 1990.** Composés phénoliques et fixation non symbiotique d'azote au cours de la biodégradation de composé lignocellulosique. Agrochimica, 34: 311-320.
- OEPP/EPPO, 2003.** *Fusarium oxysporum* f.sp.*albedinis*. Bulletin, 33: 265-269.
- Pansu, M., Gautheyrou, J., 2003.** L'analyse du sol. Minéralogique, organique et minérale, éd. IRD, springer -Verlag France, 1993p. ISBN: 2-287-59774-3.
- Paré, T., Dinel, H., Schnitzer, M., Dumontet, S., 1998.** Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure. Biol. Fertil. Soils, 26:173-178.
- Paredes, C., Bernal, M.P., Cegarra, J., Roig, A., 2002.** Bio-degradation of olive mill wastewater

sludge by its co-composting with agricultural wastes. *Bioresour Technol*; 85:1–8.

Patel, J.J., Brown, M.E., 1969. Interaction of *Azobacter* with rhizosphere and root surface microflora. *Plant and soil*, 31: 273-281.

Patrick, Z.A., Toussoun, T.A., 1965. Plant residues and organic amendments in relation to biological control. *Ecology of soil Borne Plant Pathogens. Prelude to Biological control*. Eds. KF Baker, Snyder W.C. University of California Press., 440-459.

Park, C., Paultz, J., Baker, R., 1988. Biocontrol of *Fusarium* wilt of cucumber resulting from interactions between *Pseudomonas putida* and non pathogenic isolates of *Fusarium Oxysporum*. *Phytopathology*, 78: 190-194.

Pedneault, A., 1994. Les effets du compost sur les plantes. Québec Vert, Octobre. 18-20.

Pera, J., Calvet, C., 1989. Suppression of *Fusarium* wilt of carnation in a composted pine bark and a composted olive pomace. *Plant. Dis.* 73 : 699-700.

Pereau-Leroy, P., 1957. Recherches d'un test de sensibilité des variétés des palmiers dattier à la fusariose. *Fruits*, 12 : 53-56.

Pereau-Leroy, P., 1958. Le Palmier dattier au Maroc. Min .Agric. Maroc, Service. Rech. Agron. et Inst Français Rech. Fruit Outre Mer, (I.F.A.C), 142 p.

Pérez-Piqueres, A., Edel-Hermann, V., Alabouvette, C., Steinberg, C., 2006. Response of soil microbial communities to compost amendments. *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 460-470.

Peters, S., Koschinsky, S., Schwieger, F., Tebbe, C.C., 2000. 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.*, 66 : 930-936.

Peyron, G., 2000. Cultiver le palmier dattier. Cirad; Montpellier, France, 110p.

Phae, C.G., Sasaki, M., Shoda, M., Kubota, H., 1990. Characteristics of *Bacillus subtilis* isolated from compost suppressing phytopathogenic microorganisms. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 36 : 575-586.

Phae, C.G., Shoda, M., 1990. Expression of the suppressive effect of *Bacillus subtilis* on phytopathogens in inoculated composts. *J. Ferment. Bioeng.*, 6 : 409-414.

Plat, J.Y., 1981. Valorisation par compostage des boues industrielles du délainage. Thèse de Docteur- ingénieur. INP Toulouse, 219p.

Poincelot, R., 1974. A scientific examination of the principles and practice of composting. *Compost sci.*, 15 : 24-31.

Poincelot, R., 1975. The biochemistry and methodology of composting. *Conn. Agri. Exp. Stat. Bull.* n° 754, 18p.

Pommel, B., Just C., 1977. La valorisation agricole des déchets. I. Le compost urbain. Ministère de l'agriculture. INRA, Bordeaux. 70p.

Popenoe, P.B., 1924. The date palm in antiquity. *The scient.Month.* XIX Coachella California, 313-325.

- Postma, J., Montanari, M., Van den Boogert, P.H.J.F., 2003.** Microbial enrichment to enhance the disease suppressive activity of compost. *European Journal of Soil Biology*, 39: 157-163.
- Potvin, D., Bernard, Y., 1995.** Recherche de techniques de compostage adaptées à une gestion optimale des fumiers: rapport final.. Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ). Québec: Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. 334 p.
- Provenzano, M. R., Senesi, N., Piccone, G., 1998.** Thermal and spectroscopic characterization of composts from municipal solid wastes. *Compost Science & Utilization*, 6, 3:67-73.
- Rajasekaran, P., Sampathkumar, M., 1981.** Physico-chemical and microbiological properties of plant wastes treated with sewage sludge. *Agricultural wastes*, 3: 267-275.
- Randle, Pe., Hays, Wa., 1972.** Progress in experimentation on the efficiency of composting and compost. *Mushroom Sci*; VIII:790-793.
- Raviv, M., 1998.** Horticultural Uses of Composted Material. *Acta. Hort.*, 469: 225-234.
- Richard, T.L., Hamelers, H.V.M., Veeken, A., Silva, T., 2002.** Moisture relationships in composting processes. *Compost Science & Utilization*, 10, (4):286-302.
- Rijckeboer, J., Vaes, K., Vanwysberghe, L., Coosemans, J., 2002.** The suitability of mature biowaste and yard waste composts as carrier substrates for bacterial and fungal biocontrol agents. In: Michel, F.J., Rynk, R.F., Hoitink, H.A.J. (Eds.), *Proceedings of the International Symposium Composting and Compost Utilization*, Columbus, Ohio, 6-8 May, disc format. JG Press, Emmaus, USA.
- Riou., 1988.** Bioclimatologie des oasis. Séminaire sur les systèmes agricole oasiens. Tozeur, Tunisie, 19-21 novembre.
- Rivieres, I.M., 1980.** Importance des caractéristiques physiques des substrats horticoles II. *PHE- Revue horticoles*, 233: 61-65.
- Robertson, F. A., W. C. Morgan., 1995.** Mineralization of C and N in organic materials as affected by duration of composting. *Aust. J. Soil. Res.*, 33: 511-524.
- Roletto, E., Chiono, R., Barberis, E., 1985.** Investigation on humic matter from decomposing poplar bark. *Agricultural Wastes*, 12, : 261-272.
- Roseau, M., 1933.** L'eau et les chlorures. Contribution à l'étude du palmier dattier dans ses rapports avec les éléments du sol. *Journées du dattier*, Touggourt.
- Rosen, C.J., Halbach, T.R., Swanson, B.T., 1993.** Horticultural uses of municipal solid waste composts. *Hort. Technol.*, 3 (2): 167-173.
- Rouxel, F., Alabouvette, C., Louvet, J., 1979.** Recherches sur la résistance des sols aux maladies. IV : mise en évidence du rôle des *Fusarium* autochtones dans la résistance d'un sol à la fusariose vasculaire du melon. *Ann. Phytopathol.*, 70 : 412-417.
- Rouxel, F., 1978.** Etude de la résistance microbiologique des sols aux fusarioses vasculaires: Application aux sols de la basse vallée de la Durance. Thèse d'état. Université Dijon. 151p.

Rynk, R., 2003. The art in the science of composting. *Compost Science & Utilization*, 11: 94-95.

Saaidi, M., 1979. contribution à la lutte contre le Bayoud, fusariose vasculaire du palmier dattier. Thèse d'université. Dijon-France. 140pp.

Sabaou, N., 1979. Le palmier dattier et la fusariose. VI: Antagonisme d'*Aspergillus flavus* vis-à-vis de *Fusarium oxysporum*. F.sp. *albedinis*. *Bull. Soc. Hist. Afr. Nord.*, 68: 37-44.

Sabaou, N., Amir, H., Bounaga, D., 1980. Le palmier dattier et la fusariose. X. Dénombrement des actinomycètes de rhizosphère; leur antagonisme vis-à-vis de *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. *Ann. Phytopathol*, 12: 253-257.

Sabaou, N., Bounaga, N., 1987. Actinomycètes parasites de champignons: étude des espèces, spécificité de l'action parasitaire au *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. *Can.J. microbiol.*, 33: 445-451.

Sabaou, N., Bounaga, N., Bounaga, D., 1983. actions antibiotiques, mycolytique et parasitaire de deux actinomycètes envers *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* et autre formae spéciales. *Can. J. microbiol.*, 29: 194-199.

Sabaou, N., 1980. Antagonisme de deux actinomycètes vis-à-vis du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* et d'autre champignon. Thèse de magister, U.S.T.H.B., Alger. In Maslohy My A. 1989.

Sadaka, S., Taweel A.El. 2003. Effect of aeration and C/N ratio on household waste composting in Egypt. *Compost Science & Utilization*, 11, 1:36-40.

Sanchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C., Bernal, M.P., 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the rugers system and its effects on pH, EC, and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*, 78: 301-308.

Schonfeld, J., Gelsomino, A., Van Overbeek, L.S., Gorissen, A., Smalla, K., Van Elsas J.D., 2003. Effect of compost addition and simulated solarisation on the fate of *Ralstonia solanacearum* biovar 2 and indigenous bacteria in soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 43: 63-74.

Schulze, K.L., 1958. Rate of oxygen consumption and respiratory quotients during the aerobic decomposition of a synthetic garbage. *Proc. 13th Ind. Waste Conference. Purdue. Univ. Compost science*, 1: 36-40.

Schulze, K.L., 1961. Continuous thermophilic composting. *Appl. Microbiol.*, 10: 108-122.

Schumann, G.L., Soares, H., Holden, C.M., Switzenbaum, M.S., 1993. Relationship of traditional parameters of compost stability to turfgrass quality. *Environmental Technology*, 14:257-263.

Sedra, My.H., 1985. potentiel infectieux et réceptivité de quelques sols de palmeraie à la fusariose vasculaire du palmier dattier (Bayoud) causé par *Fusarium oxysporum*. F.sp. *albedinis*. Thèse de 3ème cycle agronomie. IAV. Hassan II. Rabat. 99p.

Sedra, My.H., 1993. lutte contre le Bayoud, Fusariose vasculaire du palmier dattier causée par *Fusarium oxysporum*. F.sp. *albedinis* : sélection des cultivars et clones de qualité résistants et réceptivité des sols de palmeraies à la maladie. Thèse de doctorat d'état. Université Cadi Ayyad. Marrakech, Maroc. 128p.

Sedra, My.H., 1995. Problèmes phytosanitaires du palmier dattier en Mauritanie et propositions de

moyens de lutte. Rapport de mission d'expertise effectuée en Mauritanie du 8 au 16 juin 1995. Réseau de recherche & développement du palmier dattier (BI, FIAD, FADES, ACSAD /Syrie. Cité par Sedra, My.H., 2005a. la maladie du Bayoud du palmier dattier en Afrique du Nord: Diagnostic et caractérisation. Actes du symposium International sur le développement Durable des Systèmes oasiens du 08 au 10 mars. Erfoud Maroc. B. Boulanouar et C. Kradi (Eds).

Sedra, My.H., 1996. Résultats de prospections effectuées dans la vallée Ait Mansour (Région de Tiznint-Tafraoute au sud du Maroc). Rapport de mission, INRA-Maroc.

Sedra, My.H. 1999a. Identification et caractérisation des cultivars du palmier dattier en Mauritanie. Rapport de mission de consultation d'expert, 30/6/99-23/7/99, OADA.

Sedra, My.H., 1999b. Prospection et importance du bayoud en Mauritanie et action urgentes à prendre pour lutter contre la maladie. Rapport de mission de consultation FAO effectuée du 19/10/99 au 18/11/99 en République Islamique de Mauritanie et proposition de projet de lutte contre le bayoud dans ce pays. Projet de Développement des oasis, phase II, FAO/UFT/MAU/020/MAU'.

Sedra, My.H. 2003. Le bayoud du palmier dattier en Afrique du nord, FAO, RNE/SNEA-Tunis. Edition FAO sur la protection des plantes. Imprimerie Signes, Tunis, Tunisie, 125p.

Sedra, My.H., 2005a. la maladie du Bayoud du palmier dattier en Afrique du Nord: Diagnostic et caractérisation. Actes du symposium International sur le développement Durable des Systèmes oasiens du 08 au 10 mars. Erfoud Maroc. B. Boulanouar et C. Kradi (Eds).

Sedra, My.H., 2005b. caractérisation des clones sélectionnés du palmier dattier et prometteurs pour combattre la maladie du Bayoud. Actes du symposium International sur le développement Durable des Systèmes oasiens du 08 au 10 mars. Erfoud Maroc. B. Boulanouar et C. Kradi (Eds).

Sedra, My.H., Bah, N., 1993. La fusariose vasculaire du palmier dattier. Développement saprophytique et comportement du *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* des différents sols de palmeraies. Al Awamia; 82 : 53-70.

Sedra, My H., Maslouhy, My A., 1995. La fusariose vasculaire du palmier dattier (Bayoud). II. Action inhibitrice des filtrats de culture de six microorganismes antagonistes isolés des sols de la palmeraie de Marrakech sur le développement in vitro de *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis*. Al Awamia, 90: 1-8.

Sedra, My.H., Rouxel, F. 1989. Résistance des sols aux maladies. Mise en évidence de résistance d'un sol de la palmeraie de Marrakech aux fusarioses vasculaires. Al Awamia, 66 : 35-54.

Seekins, B., 1996. Field test for compost maturity. BioCycle, 72-75.

Sela, R., Goldrat, T., Avnimelech, Y., 1998. Detreming optimal maturity of compost used for land application. Compost Sci. Util., 6 : 83-88.

Senesi, N., 1989. Composted materials as organic fertilizers. Sci. Tot. Environ.,81-82: 521-542.

Sening, C., 1963. The effect of aqueous leaf extracts in the autumn on the growth and activity of cellulose. Decomposing microorganisms. Zbl. Bakt, 117: 13-40.

Serra-Wettling, C., Houot, S., Alabouvette, C., Rouxel, F., 1997. sùpressiveness of municipal solid waste composts to plant diseases induced by soilborne pathogens. Modern Agriculture and the Environment, 373-381.

Serra-Wittling, C., 1995. Valorisation de composts d'ordures ménagères en protection des cultures: Influence de l'apport de composts sur le développement des maladies d'origine tellurique et le comportement de pesticides dans un sol. Mémoire de thèse pour l'obtention du diplôme de docteur de l'INA-PG, 220p.

Serra-Wittling, C., Barriuso, E., Houot, S., 1996. Impact of composting type on composts organic matter characteristics. In *The Science of composting*, de Bertoldi et al. ed. (Blackie Academic and Professional, Bologne).

Shalipour, A., McConnell, D.B., Smith, W.H., 1992. Uses and benefits of MSW compost: a review and an assessment. *Biomass and Bioenergy*, 3 (3-4): 267-279.

Simard, R.R., Baziramakenga, R., Yelle, S., Coulombe, J., 1998. Effects of de-inking paper sludges on soil properties and crop yields. *Can. J. Soil Sci.* 78, 689-697.

Simard, R.R., Lalande, R., Gagnon, B., Parent, G., 1999. Beneficial Use of Paper-Mill Residue Compost in a Potato/Spring Wheat Rotation. P.R. Warman et B.R. Taylor (éditeurs). *Proceeding of ICS*, 99. 716-736.

Siminis, H.I., Manios, V.I., 1990. Mixing peat with MSW compost. *Bio. Cycle.*, 60-61.

Smars, S., Beck-Friis, B., Jonsson, H., Kirchmann H., 2001. An advanced experimental composting reactor for systematic simulation studies. *J. agric. Engng Res.*, 78, (4) : 415-422.

Solano, M.L., Irirate, F., Ciria, P., Negro, M.J., 2001. Performance characteristics of three aeration systems in the composting of sheep manure and straw. *J Agric Eng Res*, 79 : 317-29.

Soudi, B., 2001. Compostage des déchets ménagères et valorisation du composts, Cas des petites et moyennes communes au MAROC. *Agriculture et environnement*, Ed IAV Hassan II Rabat MAROC. 104 p.

Soumaré, M., Tack, F.M.G., Verloo, M.G., 2003. Effects of municipal solid waste compost and mineral fertilization on plant growth in two tropical agricultural soils of mali. *Bioresource technology*, 86: 15-20;

Steinberg, C., Edel-Hermann, V., Guillemaut, C., Pe´rez-Piqueres, A., Singh, P., Alabouvette, C., 2004. Impact of organic amendments on soil suppressiveness to diseases. In: Sikora, R.A., Gowen, S., Hauschild, R., Kiewnick, S. (Eds.), *Multitrophic Interactions in Soil and Integrated Control IOBC wprs Bulletin*, 27: 259-266.

Stevenson, F.J., He, X.T., 1990. Nitrogen in humic substances as related to soil fertility. In: *Humic substances in soil and crop sciences*. Eds Maccarty P., Clapp C.E., Malcolm R.L. and Bloom P.R. International humic substances society: 91-109.

Strom, P.F., 1985. Identification of thermophilic bacteria in solid-waste composting. *Appl. Environ. Microbiol.*, 50 : 906-913.

Swingle, W.T., 1904. The date palm and its utilization in the south western state U.S.P. 663. U.S. Dep. Of Agri. Bureau of plant. Industry. Bull. N° 53, 155P.

Tantaoui, A., Ouinten, M., Geiger, J.P., Fernandez, D., 1996. Characterization of a single clonal lineage of *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis* causing Bayoud disease of date palm in Morocco.

Phytopathology, 86 (7) : 787-792.

Tantaoui, A., 1993. Identification rapide et première évaluation de la variabilité du fusarium oxysporum f.sp. albedinis par la compatibilité végétative Alawamia, 82: 25-37.

Tester, C., 1990. Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sandy soil. Soil. Sci. Soc. Am. J., 54: 827-831.

Tichy, V., 1982. Physiological and morphological responses of plants to the presence of humus substances. Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Purk. Brun., 12, (8): 401- 406.

Tiquia, SM., Tam, N.F.Y., Hodgkiss, I.J., 1996. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. Environ. Pollut., 93: 249-256.

Tomati, U., Galli, E., Fiorelli, F., Pasetti, L., 1996. Fertilizers from Composting of Olive-Wastewaters. International Biodeterioration & Biodegradation, 155-162.

Tomati, U., Galli, E., Pasetti, L., Volterra, E., 1995. Bioremediation of olive mill waste-waters by composting. Waste Manage Res.,13: 509–518.

Toutain, G., 1965. Note sur l'épidémiologie du Bayoud en Afrique du Nord. Al awamia, 15 : 37-45.

Toutain, G., 1968 a. Mission Bayoud à Figuig. Ministère de l'agriculture, Royaume du Maroc, Direction de la recherche agronomique, Marrakech; 22p.

Toutain, G., 1968 b. Essai de comparaison de la résistance au Bayoud des variétés de Palmier dattier. 2. Notes sur l'expérimentation en cours concernant les variétés Marocaines et Tunisiennes. Al Awamia, 27 : 75-78.

Toutain, G., 1973. Production du palmier dattier – 3. Destination de la datte marocaine. Alawamia, 48 : 1-23.

Toutain, G., 1974. La micro-exploitation phoenicicole saharienne face au développement. Alawamia, 52: 1-23.

Toutain, G., 1979. éléments d'agronomie saharienne – de la recherche au développement. Imprimerie JOUVE, Paris, 277p.

Toutain, G., Dollé, V., Ferry, M., 1989. Situation des systèmes oasiens en régions chaudes. Cahier de recherche et développement. 22. 3-14

Trankner, Andreas, 1992. Use of agricultural and municipal organic wastes to develop suppressiveness to plant pathogens. ATTRA: Appropriate Technology Transfer for Rural Areas. (<http://www.attra.org/attra-pub/PDF/comptea.pdf>). In Znaidi, I.E.A., 2002. Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes. (<http://orgprints.org/3064/01/Etude.pdf>)

Traoré, O., Sinaj, S., Frosard, E., 2001. Disponibilité du phosphore de composts issus de déchets organiques pour le trèfle blanc (Trifolium repens). Cahiers d'études et de recherches francophones. Agricultures, 10: 389-396.

Tuitert, G., Szczech, M., Bollen, G.J., 1998. Suppression of Rhizoctonia solani in potting mixtures amended with compost made from organic household waste. Phytopathology, 88: 764-773.

Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., Itavaara, M., 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. *Bioresour. Technol.*, 72 : 169-183.

Tuomela, M; Olivanen, P., Hatakka, A., 2002. degradation of synthetic ¹⁴C-lignin by various white-rot fungi in soil. *Soil Biol Biochem.*, 34: 1613-1620.

Van Bruggen, A.S., Duineveld, T.L.J., 1995. Proceedings of a workshop on biological and integrated control of root diseases in soilless cultures. Dijon, France, 184-188.

Van Soest, P.J., 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. *J. Association of Official Agricultural Chemists*, 46: 829-835.

Van Soest, P.J., Win, R.H., 1968. Determination of lignin and cellulose in acid. Detergent fiber with permanganate. *J. Association of Official Agricultural Chemists.*, 51: 780-785.

Vaughan, D., Malcolm, R.E., 1985. Influence of humic substances on growth and physiological processes. In : soil organic matter and biological activity. Eds Vaughan D. and Malcon R.E., Kluwer academic Publishers Group, Netherland: 37-75.

Veeken, A.H.M., Blok, W.J., Curci, F., Coenen, G.C.M., Termorshuizen, A.J., Hamelers, H.V.M., 2005. Improving quality of composted biowaste to enhance disease suppressiveness of compost-amended, peat-based potting mixes. *Soil Biology & Biochemistry*, 37: 2131-2140.

Veeken, A.H.M., Adani, F., Nierop, K.G.J., De Jagar, P.A., Hamelers, H.V.M., 2001. Degradation of biomacromolecules during high-rate composting of wheat straw-amended feces. *J. Environ. Qual.*, 30 : 1675-1684.

Voland, R.P., Epstein, A.H., 1994. Development of suppressiveness to diseases caused by *Bacillus subtilis* in soils amended with composted and noncomposted manure. *Plant Dis.*, 5: 461-466.

Waksman, S.A., Cordon, T.C., Hulpoi, N., 1939. Influence of temperature upon the microbiological population and decomposition processes in composts of stable manure. *Soil Sci.*, 47: 83-114.

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

Wiley, J.S., Gartrell, F.E., Smith, H.G., 1966. Concept and design of the joint U.S. public health service. Tennessee Valley Authority Composting Project. Johnson City. Tennessee. *Compost Sci.*, 7 (2): 11-14.

William, F., Brinton, Ph.D., 2000. Compost quality Standards & Guidelines. Woods End Research Laboratory, Inc Decembre, 41p.

Willson, G. B., 1989. Combining raw materials for composting. *BioCycle*, 30:82-83.

Wu, L., Ma, L.Q., 2002. Relationship between compost stability and extractable organic carbon. *J. Environ. Qual.*, 31: 1323-1328.

Wu, L., Ma, L. Q., Martinez, G.A., 2000. Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. *J. Environ. Qual.*, 29:424-429.

- Yao, S., Merwin, I.A., Abawi, G.S., Thies, J.E., 2006.** Soil fumigation and compost amendment alter soil microbial community composition but do not improve tree growth or yield in an apple replant site. *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 587-599.
- ZAID, O., 1992.** Figuig (MAROC ORIENTAL). Aménagement traditionnel et les mutations de l'espace oasien. Thèse de doctorat. Université Sorbonne PARIS.
- Zeytin, S., Baran, A., 2003.** Influences of composted hazelnut husk on some physical properties of soils. *Bioresource Technology*, 88: 241-244.
- Zhang, W., Hand, D.Y., Dick, W.A., Davis, K.R., Hoitink, H.A.J., 1998.** Compost and compost water extract-induced systemic acquired resistance in cucumber and Arabidopsis. *The American Phytopathological Society*, 88: 450-455.
- Zheljzakov, V.D., Warman, P.R., 2004.** Source-separated municipal solid waste compost application to swiss chard and basil. *Environ. Qual.*, 33: 542-552.
- Zinati, G., 2000.** Finding an alternative to the methyl bromide system. *Biocycle*, 41(8): 66-67.
- Znaidi, I.E.A., 2002.** Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes. Rapport, master of science degree mediterranean organic agriculture, 104 p. (<http://orgprints.org/3064/01/Etude.pdf>)
- Zougmoré, R., Mandoc, A., Stroosnijder, L., 2004.** Effect of soil and water conservation and nutrient management on the soil-plant water balance in semi-arid Burkina Faso. *Agricultural Water Management*, 65: 103-120.
- Zougmoré, R., Zida, Z., Kambou, N.F., 2003.** Role of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semiarid Burkina Faso. *Soil & Tillage Research*, 71: 143-149
- Zuconni, F., Forte M., Monaco A., De Bertholdi M., 1981.** Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*, 22: 54 -57.

ANNEXES

Annexe 1 :

Milieu de KOMADA pour l'isolement de *Fusarium*:

Eau distillée	900 ml
Asparagine ($C_4H_8N_2O_3 \cdot H_2O$)	2 g
Sulfate de magnésium ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	0,5g
Chlorure de potassium (KCl)	0,5 g
Galactose ($C_6H_{12}O_6$)	20 g
Phosphate dipotassique (K_2HPO_4)	1 g
Acide éthylène diamine téraacétique ($C_{10}H_{14}N_2O_8Na_2$)	0,005 g
Agar –Agar	15 g
L'ajustement de pH à 4 a été effectué par l'acide phosphorique	10%

Solution des antibiotiques : a été ajoutée après autoclavage et refroidissement de milieu (environ 40°C)

Oxgall (Bile bovine)	0,5 g
Tetraborate disodique	0,5 g
Sulfate de streptomycine	0,65 g
Penta-chloronitrobenzene (PCNB)	1,5 g
Eau distillée	100 ml

Annexe 2:

Reactif vanadomolybdique:

200 ml de la solution d'héptamolybdate d'ammonium

200 ml de la solution monovanadate d'ammonium

135 ml d'acide nitrique concentré

465 ml d'eau distillée

Solution d'héptamolybdate d'ammonium : on dissout dans l'eau chaude 100 g d'héptamolybdate d'ammonium tétrahydraté $[(NH_4)_6Mo_7 \cdot 4H_2O]$. On ajoute 10 ml d'hydroxyde d'ammonium ($d = 0,91$) et on complète à 1 litre avec l'eau distillée.

Solution de monovanadate d'ammonium : on dissout 2,35 g de monovanadate d'ammonium (NH_4VO_3) dans 400 ml d'eau distillée chaude, on ajoute lentement 20 ml

d'acide nitrique dilué (7 ml d'acide nitrique concentré + 13 ml d'eau) et on complète à 1 litre avec l'eau distillée.

Annexe 3:

Milieu PCA: "Plate Counte Agar": gélose pour dénombrement:

Tryptone	5 g/l
Extrait autolytique de levure	2,5 g/l
Glucose	1 g/l
Agar Agar bactériologique	12 g/l

Annexe 4:

Milieu PDA:

Extrait de pomme de terre	4 g/l
Glucose	20 g/l
Agar Agar bactériologique	15 g/l

Annexe 5:

Milieu gélosé à base de peptone et d'extrait de levure:

Peptone	5g/l
Extrait de levure	3 g/l
Agar- Agar	15 g/l

Annexe 6:

Milieu CZAPECK:

Nitrate de sodium (NaNO ₃)	2 g/l
Hydrogénophosphate de potassium (K ₂ HPO ₄)	1 g/l
Sulfate de magnésium (Mg SO ₄)	0,5 g/l
Sulfate de fer (Fe SO ₄)	0,01 g/l
Sulfate de zinc (ZnSO ₄)	0,01 g/l
Chlorure de potassium (KCl)	0,5 g/l
Sulfate de cuivre (CuSO ₄)	0,005 g/l
Saccharose	30 g/l

L'ajustement de pH à 4 a été effectué par l'acide citrique 30%.

Annexe 6:

Coloration Gram (Larpen et Larpen-Gourgaud, 1990) :

Après la fixation d'un frottis à la chaleur, la lame a été recouverte de violet de gentiane pendant une minute, puis lavée à l'eau. Par la suite, ce frottis a été mis en contact pendant une minute avec quelques gouttes de lugol puis rincé à l'eau. La décoloration a été effectuée par l'alcool pendant 30 secondes. Après lavage à l'eau, la recoloration a été réalisée par la fuchsine diluée à 10% pendant 2 à 3 minutes puis la lame a été séchée sous la flamme du bec bunsen.

Lugol :

Iode	1 g
KI	2 g
Eau distillée	100 ml

Fuchsine

Fuchsine basique	10 g
Acide phénique	50 g
Alcool éthylique 90°	100 ml
Eau distillée	1000 ml

RESUME

La palmeraie de Figui, d'une superficie de 700 hectares, produit une biomasse des sous produits de 8.000 tonnes chaque année dont 30% sont générés par les palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera* L) détruits par *Fusarium oxysporum* f.sp. *albedinis*. Ces sous-produits ont été compostés en présence des taux différents du fumier bovin, de l'urée ou de l'azote ammoniacal. Le maintien d'une humidité adéquate de 60 à 70%, nécessaire au bon déroulement du processus de compostage, a nécessité l'apport de 11,4 litres d'eau par kg des sous-produits secs. Au cours du processus de compostage et quel que soit le taux du fumier ou de l'azote dans les andains, le pH reste stable et relativement basique de 8,2 à 8,7. A l'inverse, le rapport C/N et la granulométrie diminuent progressivement et la conductivité électrique chute de 25 à 30%. L'évolution des températures internes dans les différents andains dépend du volume de fumier ajouté au mélange : une phase mésophile caractérisée par une augmentation rapide de la température, suivie d'une phase thermophile, qui dure 30 jours où la température reste élevée entre 50 et 70°C pour les andains riches en fumier. L'ajout des composés azotés, l'urée ou l'azote ammoniacal n'a rien changé dans l'évolution de ces températures.

Dans les andains contenant du fumier, l'agent pathogène *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*, responsable de la fusariose vasculaire du palmier dattier (Bayoud) a été complètement éliminé pendant la phase thermophile et des fréquences élevées de retournement accélèrent relativement sa disparition. A l'inverse, la présence de l'azote ammoniacal favorise la prolifération de l'agent pathogène d'environ 62%. Les expérimentations réalisées sur des morceaux des rachis des palmes infectées par *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*, montrent bien qu'il suffit d'incuber les sous-produits infectés pendant 6 heures à 70°C ou pendant 12h à 60°C pour détruire complètement l'agent pathogène logé dans ces sous-produits.

L'évaluation de la qualité du compost a été réalisée par la détermination des paramètres physico-chimiques et biologiques du compost mûr. Ce compost homogène et stable est caractérisé par un pH neutre de 7,5, une conductivité électrique de 9,6 mS/cm, un rapport C/N de 20 et une faible granulométrie. Sa capacité de rétention en eau (75%), sa porosité totale (78%) et sa densité réelle (1600 g/l) sont supérieures à celles de la tourbe. Par contre, son taux de matière organique (38%) est inférieur à celui de la tourbe et cette matière organique est composée essentiellement de l'hémicellulose (23%), cellulose (24%), lignine et cutine (28) et éléments solubles (25%). Ses teneurs en macro-éléments (Na, Mg, K, Ca, P₂O₅) et en micro-éléments nutritifs (Cr, Cu, Ni, Zn, Pb) sont importantes. Cependant, les teneurs de ces éléments traces métalliques sont beaucoup plus inférieures à celles autorisées par les normes des pays producteurs du compost.

La maturité du compost a été confirmée par un indice de minéralisation du carbone de 3% et par un indice de stabilité biologique de 59%. Le compost ne montre aucune phytotoxicité, le taux de germination des graines de cresson (*Lepidium sativum*) atteint 95%. L'absence de phytotoxicité est confirmée aussi par la bonne croissance des plants de tomate, de courgette et du palmier dattier dans des mélanges de substrat contenant le compost et il semblerait que le compost pourra avoir des effets synergiques avec la tourbe sur la croissance des plantes.

La présence du compost mûr dans le substrat de culture protège le palmier dattier sensible contre l'attaque de l'agent pathogène *Fusarium oxysporum* fsp *albedinis*. Cette protection est due à l'effet antagoniste de la microflore du compost constituée principalement par des champignons appartenant aux genres *Penicillium* et *Aspergillus* et par des bactéries du genre *Bacillus*. L'utilisation de ce compost comme amendement organique a montré également une amélioration du rendement des cultures tests.

Mots clés :

Oasis de Figui, palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) – *Fusarium oxysporum* f.sp. *Albedinis*, Bayoud, sous-produits, compostage, compost, maturité, potentialité agronomique, antagoniste, paramètres physico-chimiques, indice biologique, phytotoxicité, qualité du compost.
