
Soumis le : 02 Août 2011
 Forme révisée acceptée le : 28 Novembre 2011
 Email de l'auteur correspondant :
 hamidamine2003@gmail.com

Valorisation des matières résiduelles et de la biomasse forestière au Maroc : Compostage et confection de substrats organiques pour la production de plants forestiers

Abdelhamid GUEDIRA^a, Mohammed S. LAMHAMED^b, Badr SATRANI^a, Mohamed BOULMANE^a, Mohamed SERRAR^c, Allal DOUIRA^d

^a Centre de Recherche Forestière, Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification, Charia Omar ibn Khattab, B.P. 763 Agdal, Rabat, Maroc.

^b Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700, rue Einstein, Québec (PQ), Canada G1P 3W

^c Station Régionale des Semences d'Azrou ; BP : 269, Azrou : 53100, Maroc.

^d Laboratoire de Botanique et de Protection des Plantes, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Kénitra, Maroc

Résumé

Le but de cet article est de décrire une méthode de compostage de matières résiduelles forestières. Quatre types de matériaux forestiers ont été compostés (résidus de cônes de *Cedrus atlantica*, et de la biomasse verte : feuilles et branches de *Quercus rotundifolia*, d'*Acacia mollissima* et des branches avec aiguilles de *Pinus halepensis*). Une différence nette de profils de température et des propriétés physico-chimiques a été observée entre les quatre types de composts. Ces différences sont intimement liées à l'origine de la matière première à composter, le rapport C/N, l'humidité et la demande en oxygène du compost. La durée de compostage a été réduite par comparaison aux travaux antérieurs, de 3/4 à 1/2. Les propriétés physico-chimiques des composts sont nettement améliorées par rapport à celles du terreau. Dans le cadre d'un essai préliminaire, les résultats sont forts encourageants quant à l'utilisation de ces composts pour produire des plants de chêne vert de bonne qualité morpho-physiologique.

Mots clés : pépinière forestière, terreau, compost, qualité de plants, durée de compostage

Abstract

The objective of this article is to describe a method of composting residual forest material. Four types of forest materials were composted (cones of *Cedrus atlantica* and green biomass residues: leaves and branches of *Quercus rotundifolia* and *Acacia mollissima* as well as needled branches of *Pinus halepensis*). Net differences in the physico-chemical properties and temperature profiles were observed among the four types of compost. These differences are closely related to the nature of the material used for composting, the C/N ratio, the moisture content and the oxygen demand of the compost. Composting time was significantly reduced in comparison to previous studies. The physico-chemical properties of the compost are significantly better than to the forest soil. Within the context of the preliminary test, the results are strongly encouraging with respect to the use of different composts to produce oak seedlings of high morpho-physiological quality.

Keywords: forest nursery, forest soil, compost, seedling quality, composting time.

1. Introduction

La forêt marocaine connaît une dégradation annuelle de 31.000 ha/an. Afin de rétablir l'équilibre des différents écosystèmes forestiers et d'inverser la tendance de la

dégradation continue, le gouvernement marocain a engagé depuis plus d'un demi siècle un programme de reboisement ambitieux pour reconstituer et consolider les rôles multiples de la forêt. Un plan directeur de reboisement a été adopté dont l'objectif est de reboiser 50.000 ha/an tout en permettant un développement

économique et social des différentes régions du Maroc [1].

Pour améliorer la production de plants forestiers produits dans les différentes pépinières forestières marocaines, des efforts ont été consentis en matière de modernisation de la filière des semences forestières, notamment par la création en 2000 de plusieurs centres de semences modernes, l'intégration de certaines nouvelles techniques de production (conteneurs rigides, systèmes d'irrigation, ombrière,...etc.) et l'établissement des normes et critères de qualité des plants.

Cependant, la production de plants dans les pépinières forestières marocaines, par son rôle stratégique dans les reboisements, connaît des contraintes liées à la qualité des substrats utilisés dans les pépinières forestières. Plusieurs pépinières trouvent des difficultés de s'approvisionner de façon continue en terreau forestier. Face à cette situation, elles utilisent du substrat d'origine minérale dont les propriétés physico-chimiques influencent négativement la croissance des plants. En plus, le terreau forestier constitue une source d'agents pathogènes qui affectent négativement la qualité des plants produits en pépinière, ainsi que leur performance en site de reboisement [2]. L'usage du terreau forestier, composante fertile du sol forestier, connaît une rareté en certaines régions pour subvenir aux besoins grandissants des pépinières forestières. L'utilisation de différents substrats non standards entre et même au sein de la même pépinière rend difficile voire impossible d'établir des normes de qualité des plants spécifiques aux essences forestières. Ceux ci constituent une entrave majeure à l'amélioration et à la généralisation des techniques modernes de production de plants dans les pépinières forestières [3,4]. Pour pallier aux inconvénients de ces substrats non standard, l'utilisation de la tourbe/vermiculite est difficile à envisager à l'échelle nationale à cause de son prix de revient élevé. De ce fait, le recours au compostage de la biomasse forestière verte et des résidus sylvicoles constitue une alternative qui a donné de bons résultats à l'échelle opérationnelle dans plusieurs pays [5, 6, 7] et constitue un moyen de maintenir une certaine stabilité des propriétés physico-chimiques des substrats entre les années de production. À cet égard, le stock en bois dans les forêts marocaines s'élève à 160.964.765 m³ dont le chêne vert représente 45% et le cèdre 11% [8, 9] Une biomasse résiduelle importante (foliaire, cônes et petites branches) non estimée reste après chaque exploitation. Le compostage de la matière végétale permet la décomposition biologique de ces résidus organiques en produits stables, humifiés et exempts d'agents pathogènes [10, 11, 12].

Au Maroc, les premiers travaux de compostage de la biomasse forestière ont été réalisés dans les années 80-90 dans les pépinières forestières de Rabat et Azrou. La maturité n'était atteinte qu'après 16 à 24 mois de compostage selon les essences. D'autres travaux ont été

réalisés en Tunisie en mélange avec des boues des stations d'épuration, source d'azote, en vue de diminuer la durée de compostage [4, 13]. Cependant, divers travaux [14] ont révélé que l'utilisation des boues de stations d'épuration pose un problème sérieux en matière de santé humaine (métaux lourds, pesticides et autres polluants). Des travaux de compostage avec ajout du nitrate d'ammonium [6] ont permis d'éviter l'addition des boues et de diminuer la durée de compostage tout en garantissant une protection de la santé humaine, de la chaîne trophique et de l'environnement.

Le défi de ce projet consiste à tester différents types de matières organiques résiduelles des exploitations, de manière à trouver un compost dont les caractéristiques physico chimiques sont proches de celles de la tourbe et à optimiser la dégradation de la matière organique en vue de raccourcir de façon significative la durée de compostage. La présente étude porte sur i) la faisabilité et l'optimisation de la durée de compostage des matières résiduelles des cônes de cèdre, des branches et des feuilles d'*Acacia mollissima* et du chêne vert, ainsi que les aiguilles du pin maritime et ii) l'évaluation de la qualité des composts et de leur utilisation dans la production de plants forestiers.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel végétal et compostage

Quatre types de compost ont été choisis selon la disponibilité de la matière première : les résidus de cônes de cèdre après extraction des semences au Centre de Semences d'Azrou -Direction Régionale des Eaux et Forêts du Moyen Atlas Occidental, Maroc. De la matière organique fraîche, est récoltée après élagage telle que : les feuilles sur les petites branches de chêne vert et aiguilles sur les petites branches de pin d'Alep (les branches ne dépassant pas les 2,5 cm de diamètre) ont été collectées dans la forêt Aïn Kahla, Moyen Atlas Occidental. Pour les branches d'*Acacia mollissima*, elles ont été prélevées de la forêt de la Mâmora (Rabat). La préparation des composts s'est déroulée dans la pépinière d'Azrou (Direction Régionale des Eaux et Forêts du Moyen Atlas Occidental, Maroc) pour une période de cinq mois, entre mai et septembre 2009. Afin d'accélérer la décomposition des branches broyées des différents types de matière végétale, le mélange de la biomasse foliaire verte par rapport à la biomasse ligneuse (volume/ volume) était respectivement de l'ordre de 60-65 / 40-35 (% , v/v) selon l'approche décrite par Lamhamedi, [15].

2.2. Broyage, mise en andin et ajout de fertilisants azotés

Les quatre types de matière végétale ont été broyés à l'aide d'un broyeur (modèle ZQF-5025B, China-Electric-Wood Chipper, Chine) doté d'un système de deux couteaux et de douze marteaux dont la puissance est de 18,2 KW. Des tamis de différentes dimensions de mailles ont été placés, selon le besoin, à la sortie de la matière organique broyée. Les dimensions du broyat sont préalablement déterminées selon la dimension des mailles du tamis. Le premier broyage a été réalisé sans tamis et l'édification des andins est effectuée sur une aire protégée à l'aide d'une couverture en plastique en vue de produire un compost exempt de propagules et d'agents pathogènes. Cette aire présentant une légère pente pour faciliter le drainage et l'écoulement des produits phénoliques produits lors de l'opération de compostage.

Les andins construits ont une forme de trapèze de base (longueur : 3 m, largeur : 2 m et hauteur : 1,5 m, Photo 1-A). Lors de la mise en andin, le broyat a été ajouté par couches successives de 20 cm d'épaisseur, de manière à faciliter l'édification des andins et l'ajout du nitrate d'ammonium. Dans le but d'accélérer les processus de dégradation des composts, le rapport C/N des andins a été maintenu entre 25 et 35 par l'ajout de nitrate d'ammonium [16 ; 6] à raison de 3 Kg/ m³ de broyat en deux applications successives. La première et la deuxième application sont respectivement effectuées lors de l'édification des andins et du premier retournement. En ce qui concerne les résidus des cônes de cèdre, quatre applications à base du nitrate d'ammonium ont été nécessaires à cause de la matière lignifiée et fibreuse des cônes. Généralement, le nitrate d'ammonium était dilué dans une solution aqueuse à raison de 1,5 Kg/ 20 L d'eau /m³ (500 g d'azote/20 L d'eau /m³). Cette solution est appliquée à l'aide d'un arrosoir tout en permettant d'ajouter l'azote et d'augmenter l'humidité du broyat à 50-60%.

2.3. Suivi de la température, retournement et rebroyage avec tamis

Un suivi quotidien des températures a été réalisé pour chaque type de compost, à l'aide d'un thermomètre à sonde de 90 cm de longueur, inséré à mi-hauteur de l'andin selon un angle de 45 °C (Photo 1-B). Cinq mesures ont été prises dans chaque andin, la première au centre et les autres dans les quatre côtés. Ce suivi de température a pour objectif la caractérisation des différentes phases de compostage (mésophile, thermophile, refroidissement et maturation) et l'optimisation des retournements. Ces retournements permettent d'améliorer l'oxygénation de l'andin et l'humectation du compost afin de maintenir une humidité de 60%. A la fin du compostage, un re-broyage a été

effectué avec le même broyeur muni d'un tamis de maille de 1 cm² pour homogénéiser la taille des particules.

2.4. Analyses physico-chimiques et bio essai

Dans chaque andin, cinq échantillons représentatifs ont été prélevés à mi-hauteur de l'andin et ont été mélangés pour constituer un échantillon composite. Après séchage à 65°C, broyage et tamisage à 2 mm, les trois échantillons composites/ type de compost ont été analysés conformément aux méthodes décrites par Duchaufour [17]. Il s'agit principalement de la mesure du pH, la détermination de la teneur en carbone organique par la calcination à 600 °C pendant 4 heures, le dosage d'azote total en utilisant la méthode de Kjeldahl [18]. La conductivité électrique qui indique la quantité de sels minéraux dissous dans l'eau a été déterminée à partir des extraits filtrés d'une suspension substrat-eau (1 :10) à l'aide d'un conductimètre (modèle Consort C532) et la capacité de rétention en eau qui peut retenir un substrat après un égouttement de 48 heures [19]. Les analyses physico-chimiques des quatre composts ont été effectuées au laboratoire du Centre de la Recherche Forestière (CRF, Maroc).

Le bio-essai permet de vérifier l'absence des substances phénoliques toxiques des composts. Des tests de germination de deux légumineuses (lentilles et pois chiches) sensibles aux substances phénoliques ont été conduits sur les quatre types de composts purs (résidus de cônes de cèdre, feuilles sur leurs petites branches de chêne vert, d'*Acacia mollissima* et les aiguilles vertes sur leurs petites branches de pin d'Alep). Les graines des légumineuses ont été préalablement trempées dans l'eau pendant quatre heures. L'ensemencement dans des portoirs rigides de 38 alvéoles, à raison de trois graines par alvéole et d'un portoir pour chaque type de compost et chaque espèce de légumineuse.

2.5. Essai préliminaire de production de plants

Afin d'évaluer la qualité des différents types de composts (résidus de cônes de cèdre, feuilles et branches d'*Acacia mollissima*, de chêne vert et aiguilles et branches de pin d'Alep), des plants de chêne vert (*Quercus rotundifolia*) ont été produits dans des portoirs dont les alvéoles ont été remplies par des substrats à base des quatre différents composts purs. Cet essai préliminaire a été installé en chambre de croissance. Deux portoirs de 38 alvéoles de 300cc pour chaque type de compost ont été ensemencés par les glands de chêne vert (provenance Bensmim-Azrou, récolte 2009). Les plants ont été éclairés par une lumière artificielle de 180±15 µmol.m⁻².s⁻¹ pendant 16 h à 20 °C sous une humidité relative de 65±5 % pendant 4 mois.

2.6. Analyses statistiques

Les analyses statistiques relatives aux analyses physico-chimiques ont été effectuées par une analyse de variance (logiciel SPSS 11.5). Les comparaisons des moyennes des différentes variables entre les différents composts ont été effectuées à l'aide du test de Duncan au seuil de 5%.

3. Résultats et discussion

3.1. Compostage de la biomasse forestière

Tout au long de la durée de compostage des différentes sources de matière organiques et après chaque retournement, l'évolution des températures moyennes journalières des andains a montré la présence des principales phases de compostage, notamment les phases : mésophile (< 40°C) ou phase de démarrage, thermophile (40 à 70 °C), refroidissement et maturité (Figure 1). Une variation nette a été enregistrée dans les profils de la température en fonction de la nature de la matière première à composter, du rapport C/N, de l'humidité et de la demande en oxygène du compost.

En effet, le suivi de la température moyenne dans l'andain à base d'*Acacia mollissima*, a montré des pics allant jusqu'à 65 °C, suivi de ceux de chêne vert et du pin d'Alep aux alentours de 60 et 59 °C respectivement, alors que celui des résidus de cônes de cèdre, a montré des maximums beaucoup plus faibles ne dépassant pas 48 °C (Figure 1). L'évolution de la température en fonction du temps diffère d'un compost à l'autre (Photo 1-C), selon la nature et la structure de la matière organique; *Acacia mollissima* à feuilles velues, bipennées avec folioles courtes et abondantes, coriaces pour celles du chêne vert, en aiguilles pour le pin d'Alep et les écailles de cônes de cèdre sont lignifiées et fibreuses.

Généralement, 4 retournements étaient suffisants pour le compost de pin d'Alep, 5 retournements pour les composts à base d'*Acacia mollissima* et de chêne vert, alors que pour les résidus de cônes de cèdre il fallait au minimum 6 retournements (Figure 1). L'augmentation de la température est très rapide surtout en présence de la matière verte. Elle atteint un maximum au bout de cinq, six et huit jours respectivement pour le chêne vert, le pin d'Alep et *Acacia mollissima*, alors que pour les résidus de cônes de cèdre, malgré l'apport du nitrate d'ammonium, l'augmentation des températures reste faible (Figure 1). En plus, l'élévation de la température est favorisée par

l'oxygénation et l'humidification facteurs indispensables au processus de compostage [10, 20, 21]. Au fur et à mesure que le compost se rapproche au stade de la maturité, que l'augmentation de la température devient de plus en plus faible et beaucoup moins rapide [10, 12].

L'addition du nitrate d'ammonium, combiné au broyage et au maintien de la température des andains dans l'intervalle des deux premières phases (mésophile et thermophile), ont permis de diminuer de façon significative la durée de compostage des composts d'une année -une année et demi à une durée de 3 ; 3,5 ; 4 et 6 mois respectivement pour le pin d'Alep ; le chêne vert ; l'*Acacia mollissima* et les résidus de cônes de cèdre. Un compost mature a été obtenu avec une durée de quatre mois grâce à l'utilisation du nitrate d'ammonium qui a donné d'excellents résultats dans les opérations de compostage de la biomasse forestière à base d'*Acacia cyanophylla* en Tunisie [6].

Les résultats obtenus suggèrent une variation du degré de fermentation des substrats, la matière organique à base d'*Acacia mollissima* est beaucoup plus fermentescible que celle du chêne vert, moyennement pour le pin d'Alep et peu fermentescible pour les résidus de cônes de cèdre [10].

Après maturation, l'opération de rebroyage avec un tamis de maille 1 cm de diamètre a permis d'homogénéiser les dimensions des composts. Lors de la maturation, les andains ont perdu environ les 2/3 de leur volume d'origine. Ce facteur de tassement est dû à la dégradation de la matière organique et à la diminution de la porosité au niveau des andains. Par ailleurs, le rendement final en compost mûre après tamisage a été évalué à 40% du broyat frais de départ, avec une couleur marron foncée à noire et par une odeur de terre caractéristique (photos 1-A).

Le compostage permet une bonne « stérilisation » de la matière organique [23, 24, 25, 26] tout en permettant une destruction totale des germes pathogènes, des parasites vecteurs de maladies et des graines de mauvaises herbes, par la chaleur biologique (photo 1- B et C), la production de substances antifongiques et par la toxicité de certains composés formés lors de la décomposition. Ainsi, l'utilisation d'un substrat à base de compost permettra d'éviter la présence d'agents pathogènes que peut contenir le terreau forestier. Dans certaines pépinières marocaines, les pertes de plants occasionnées par les champignons pathogènes peuvent dépasser parfois 80% [27]. À cet égard, le compostage peut diminuer de façon significative les coûts engendrés par les moyens de lutte contre les agents pathogènes et les mauvaises herbes qui affectent négativement la qualité morphologique et physiologique des plants forestiers [28].

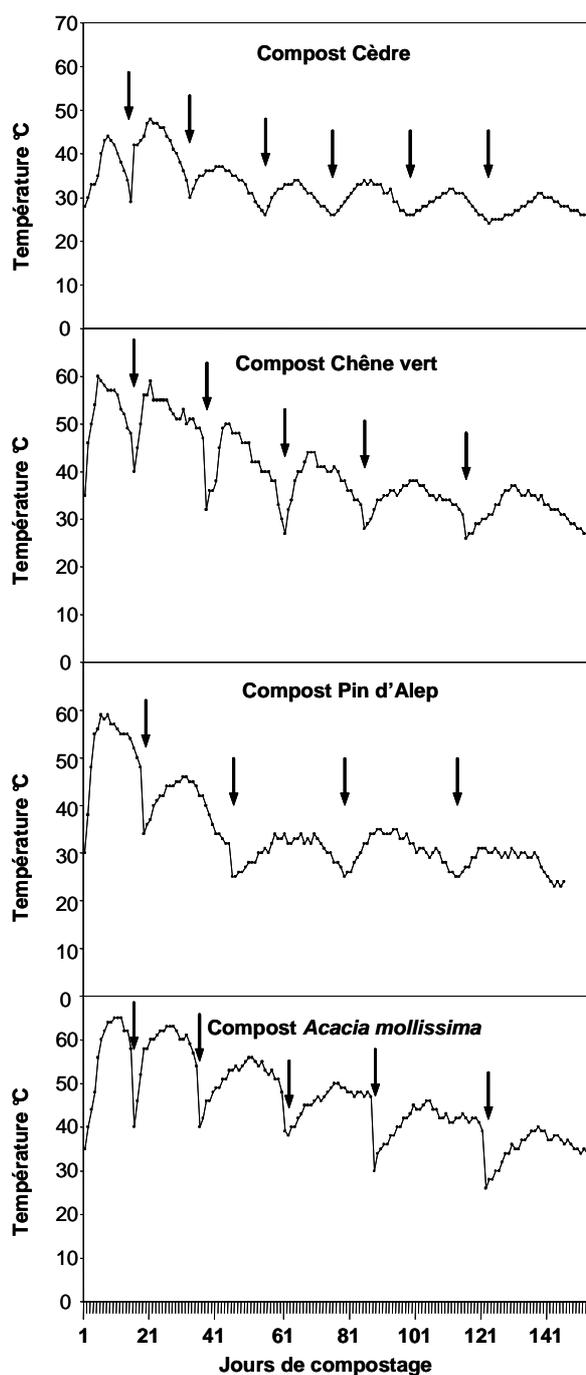
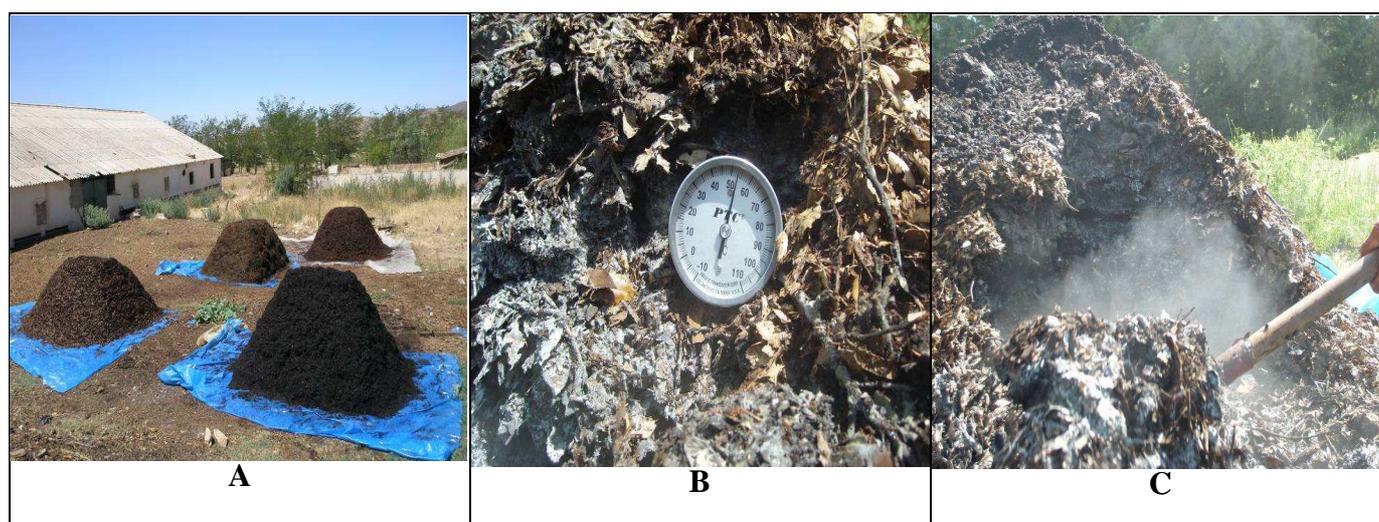


Fig.1- Évolution de la température à l'intérieur des andins des différents types de compost. Les flèches indiquent les jours de retournements et d'humectation des composts. : Chaque point représente la moyenne de cinq mesures de température déterminées à l'aide d'un thermomètre à sonde d'une longueur de 90 cm.



Photos 1.

A: Andins des quatre types de composts (Cônes de cèdre, branches et feuilles de chêne vert, d'*Acacia mollissima* et aiguilles et branches de pin d'Alep).

B: Thermomètre à sonde pour le suivi de la température au niveau des andins.

C: Dégagement de chaleur lors des premiers retournements des andins.

3.2. Tests de bio-essais et maturité des composts

L'évolution de la température des composts des andins, après retournement et humectation est un bon indicateur indirect de la maturité des composts [29]. Elle est devenue presque stable au niveau des andins aux voisinages de la température ambiante après plusieurs mois de compostage (Figure 1). Cette maturité se caractérise par la stabilité du compost, qui est associée au degré d'activité microbienne et au potentiel de production des composés volatiles odorants [30]. L'immaturité est souvent associée à la phytotoxicité due aux substances phénoliques qui affectent négativement la croissance des

plants [31]. La maturité des composts produits est confirmée par les résultats des bio-essais qui consistent à faire germer les graines des espèces sensibles (pois chiches et lentilles) dans les composts à l'état pur (Photo 2). Le pourcentage de germination était de 100% pour les deux légumineuses quel que soit le type de compost (résidus de cônes de cèdre, feuilles et branches d'*Acacia mollissima*, de chêne vert et aiguilles et branches de pin d'Alep). La germination et la bonne qualité des semis indiquent que les composts sont dépourvus de substances phénoliques qui peuvent entraver la germination et la croissance des plants [32].



Photo 2.- Essai de germination des lentilles (bas de la photo) et des pois chiches (haut de la photo) dans les portoirs remplis des quatre types de composts (Cônes de cèdre, branches et feuilles de chêne vert, d'*Acacia mollissima* et aiguilles et branches de pin d'Alep).

3.3. Propriétés physico-chimiques des composts

L'analyse des propriétés physico-chimiques des quatre composts réalisés ont montré, un pH eau légèrement acide à neutre (6,09 - 6,52). La plupart des plantes ont une croissance optimale lorsque le pH est compris entre 5,5 - 6,5 ; la majorité des éléments nutritifs sont assimilables dans cet intervalle de pH [33], au-delà de cette zone, le pH peut entraîner des problèmes nutritionnels. Une importante richesse en matière organique (88,6 – 93,3 %) a été déterminée dans les quatre composts (Tableau 1). Cependant, pour l'azote, le compost du chêne vert mature présente une meilleure concentration en azote par comparaison aux composts d'*Acacia mollissima* et du pin d'Alep (Tableau I). Par contre, le terreau forestier et le compost de cônes ont montré des concentrations relativement faibles. Cette variation en source d'azote se répercute sur le rapport C/N (Tableau I) et doit être prise en considération lors de l'élaboration des programmes de fertilisation afin de tenir

compte des prélèvements de l'azote par les microorganismes [34].

En ce qui concerne la capacité de rétention en eau (CRE), le compost du chêne vert a plus de réserves en eau car il retient 1,7 plus que le terreau, suivi du compost d'*Acacia mollissima* et de celui des cônes de cèdre (Tableau 1). Les composts de cônes de cèdre et du terreau forestier ont montré une salinité relativement faible par comparaison aux composts du chêne vert, d'*Acacia mollissima* et du pin d'Alep (Tableau 1). La conductivité électrique (CE) peut être un bon indicateur de la teneur des composts en nutriments, souvent quand celle ci est élevée, cela signifie plus d'éléments minéraux. Selon les auteurs un compost est considéré de bonne conductivité électrique lorsque la CE est inférieure à 100 (mmoh/cm³) alors que d'autres travaux ont montré que la CE doit être inférieure à 400 (mmoh/cm³) [33 ; 34].

Tableau I. Composition physico-chimique des différents composts et substrats.

Type de compost	pH H ₂ O	pH KCl	%MO	%C	%N	C/N	CRE %	CE (mmoh/cm ³)
Cônes de Cèdre	6,09± 0,06 a*	5,61± 0,03 a	93,9±0,6 c	54,3±0,4 c	0,60±0,03 a	4914 :1	141,94±2,60 a	223±10 a
Pin d'Alep	6,52± 0,02 c	6,22± 0,01 c	89,7±0,8 bc	51,9±1,1 bc	1,68±0,1 b	1604 :1	215,38±4,25 b	456±15 c
<i>Acacia mollissima</i>	6,19± 0,04 b	5,90± 0,05 b	89,1±1,3 bc	51,5±2,08 b	2,07±0,11 c	1282 :1	270,69±3,37 c	627±9 d
Chêne vert	6,48± 0,03 c	6,24± 0,04 c	88,6±1,1 b	51,2±1,8 b	3,09±0,5 d	850 :1	358,41±5,67 d	466±12 c
Terreau	7,05± 0,08 d	6,32± 0,04 d	20,5±0,7 a	10,5±0,4 a	0,60±0,03 a	184 :1	209,04±3,12 b	265±8 b

* Verticalement, les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Duncan (p<0,05). CRE : Capacité de rétention en eau, CE : Conductivité électrique, MO : matière organique, C : carbone, N : azote.

4. Essai préliminaire de production de plants

Dans le but d'avoir une idée sur les différents substrats préparés à base des quatre composts, un essai préliminaire de quatre mois, en chambre de culture et sous condition contrôlées a été réalisée pour la production de plants de chêne vert. Les résultats de cet essai sont limités uniquement à l'observation à l'œil nu de la croissance des plants et l'importance du développement du système racinaire pour les quatre types de composts à l'état pur (Photo 3). Selon les observations, on a remarqué, qu'il y a

une différence entre les types de composts évalués dont certains ont affecté positivement la croissance des plants.

Dans le cadre de la mise au point d'un substrat standard de bonne qualité à base de compost (densité, porosité, capacité de rétention en eau, capacité d'échange cationique, exempt d'agents pathogènes) différentes compositions et différentes proportions de substrats seront confectionnées et évaluées pour les différents types de composts en pépinière quant à leurs effets sur les variables morphologiques et physiologiques des plants de différentes espèces forestières. Des travaux sur l'évaluation économique du compostage de la biomasse forestière en relation avec la production de plants forestiers à une échelle opérationnelle dans des pépinières

forestières modernes ont montré que ces opérations sont rentables [36]. Cependant, il reste à optimiser les propriétés physico-chimiques des substrats selon l'abondance de la matière organique et les spécificités de chaque essence afin de produire des plants de très haute

qualité morpho-physiologiques à l'échelle opérationnelle [37]. Les résultats de ces travaux feront l'objet d'un prochain article.



Photo3. Exemple de plants de chêne vert produits dans des substrats à base de compost pur.

Remerciements

Bellouadi Khalid, technicien au (CSA); Krich Naceur, technicien au (CSA); Arabat El maati, technicien au (CRF) et les lecteurs du manuscrit sont vivement remerciés pour leur contribution à la réalisation de ce travail.

Bibliographie

- [1] M. El Yousfi, 2008. Production des plants forestiers au Maroc: Etat actuel et perspectives de modernisation des pépinières en vue de produire des plants de qualité. ENFI, Salé, Maroc 11 Mars 2008.
- [2] M. S. Lamhamedi et J. A. Fortin, 1994. La qualité des plants forestiers : Critères d'évaluation et performances dans les sites de reboisement. In Actes de la première journée nationale sur les plants forestiers. Ed. M. Abourouh Centre de Recherche et d'Expérimentation Forestière, Rabat, Maroc. 35-55.
- [3] AEFCS, 1996. Evaluation des pépinières forestières : Rapport de synthèse. Rabat : Administration des Eaux & Forêts et de la Conservation des Sols. 34 p.
- [4] M. S .Lamhamedi , M. Ksontini, B. Fecteau, J. A. Fortin Et M. Chantal, 1995. Eléments de réflexion sur le substrat d'élevage des plants dans trois pépinières forestières pilotes en Tunisie ; Projet

Bird : N. 3601 TUN. Direction Générale des Forêts, Tunisie. Pampev Internationale, Montréal, Canada. 16 p.

- [5] G. E. Fitzpatrick, 2001. Compost utilization in ornamental and nursery crop production systems. 135-150. In: Stoffella P. J. et Kahn B. A., (Eds.), Compost utilization in horticultural cropping systems. Lewis Publishers, New York, USA.
- [6] Y. Ammari, M.S. Lamhamedi, N. Akrimi, A. Zine El Abidine, 2003. Compostage de la biomasse forestière et son utilisation comme substrat pour la croissance de plants en pépinières forestières modernes. Revue de l'I.N.A.T., **18** (2) : 99-119.
- [7] Y. Ammari, M.S. Lamhamedi, N. Akrimi, A. Zine El Abidine, 2006. Influence de divers substrats à base de compost sur le statut nutritionnel et la capacité de croissance racinaire de plants de pin pignon. Annales de l'INRGREF, **9** (2) : 148-171.
- [8] Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification; 1999. Inventaire Forestier National Royaume du Maroc.
- [9] O. Mhirit et F. Benchekroun 2006. Les écosystèmes forestiers et péri forestiers : Situation, enjeux et perspectives pour 2025. 397-468.
- [10] M Mustin., 1987. Le compost : Gestion de la matière organique, Ed. Dubusc F., Paris. 954p.
- [11] F. Adani, Genevini. P.L, Gasperi F. and Tambone F., 1999. Composting and humidification. Compost Science & Utilisation, **14** (1): 24-33.
- [12] P. J. Stoffella et B. A. Kahn, (Eds.) 2001. Compost utilization in horticultural cropping systems Lewis Publishers, New York, USA, 413 p.

- [13] M. A. Oueslatti, M. Ksontini, M. Haddad et Y. Charbonnel, 1995. Compostage des branches d'*Acacia cyanophylla* et des boues fraîches des stations d'épuration d'eaux usées. Rev. Fore. Fran. **5** : 523-529.
- [14] P. Becquart, 2001. Des virus et des boues d'épuration. Biofutur 212: 62-65.
- [15] M. S. Lamhamedi, S. Bertrand et B. Fecteau, 1999. Fondements théoriques et pratiques du compostage des branches et des écorces des essences forestières et leur utilisation dans les pépinières forestières en Tunisie ; Projet fonds nordique NIB/NDF. Direction Générale des Forêts, Tunisie. Pampev Internationale, Montréal, Canada. 35 p.
- [16] M. Leth, H.E.K. Jensen and J.J.L. Iversen, 2001. Influence of different nitrogen sources on composting of Miscanthus in open and closed systems. Compost Science & Utilisation. **9** (3) : 197-205.
- [17] P. Duchaufour., 1970. Précis de pédologie. Edition Masson, Paris, France. 459p.
- [18] J. Kjeldahl, 1883. Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. Z. Anal. Chem., **22**: 366-382.
- [19] M. Pansu et J. Gautheyrou, 2003. L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale p.609 (Eds.) Springer- Verlag, France.
- [20] H.W. Dalzell, A.J. Biddestone, K.R. Gray and K. Thurairajan, 1988. Soil management: Compost production and use in tropical environments. FAO Soils Bulletin 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 177 p.
- [21] M. Day, K. Shaw and M. Krzymien, 1999. Composting odours: What can chemistry tell us. In proceedings of the International composting symposium. Warman P.R. and B.R. Taylor Eds.. Vol 2. september 19-23. Halifax/ Dartmouth Nova scotia, Canada, 532-611.
- [22] Hartz T.K. and C. Gianni 1998. Duration of composting of yard wastes both physical and chemical characteristics of compost and plant growth. HortScience **33** (7): 1192-1196.
- [23] A.C. Grundy, M. Green et M. Lennartsson, 1998. The effect of temperature on the viability of weed seeds in compost. Compost Science & Utilisation. **3**: 26-33.
- [24] H.J.A. Hoitink, M.S. Krause et D.Y. Han, 2001. Spectrum and mechanisms of plant disease control with composts. 263-274 ; In Stofella, P.J. et B.A. Kahn (Eds.). Compost utilization in horticultural cropping systems. Lewis Publishers, New York, USA.
- [25] M. Ozores-hapton, T.A. Obreza et P.J. Stofella, 2001. Weed control in vegetable crops with composted organic mulches. 275-286. In Stofella, P.J. et B.A. Kahn (Eds.). Compost utilization in horticultural cropping systems. Lewis Publishers, New York, USA.
- [26] S. Scheuerell et W. Mahaffee, 2002. Compost tea: Principals and prospects for plant disease control. Compost Science & Utilization **1**: 65-72.
- [27] M. Abourouh, M.S., Lamhamedi et J.A. Fortin, 1995. Techniques de la mycorhization en pépinière des plants forestiers. Centre de la Recherche Forestière; Rabat, Maroc, 37p.
- [28] M. S. Lamhamedi, Y. Ammari, B. Fecteau, J. A. Fortin et H. Morgaolis, 2000. Problématique des pépinières forestière en Afrique du nord et stratégies d'orientation. Cahiers Agriculture **9** : 369-380.
- [29] M. Day et Shaw K., 2001. Biological, chemical and physical precesses of composting. 17-50. In Stoffela, P.J. et Kahn, B. A. (Eds). Compost utilization in horticultural cropping systems. Lewis publishers, New York, USA.
- [30] T. Eggen and O. Vethe, 2001. Stability indices for different composts. Compost Science & Utilisation, **9** (1): 19-26.
- [31] H.V. Hue and J. Liu, 1995. Predicting compost stability. Compost Science & Utilisation, **3** (2): 8-15.
- [32] D.M. Sullivan et R.O. Miller, 2001. Compost quality attributes, measurements, and variability. 95-120. In Stofella, P.J. et B.A. Kahn (Eds.). Compost utilization in horticultural cropping systems. Lewis Publishers, New York, USA.
- [33] C. Chong et P Purvis, 2006. Use of paper-mill sludges and municipal compost in nursery substrates. International Plant Propagators' society, Combined Proceedings 55: 428-432.
- [34] D.L Thomas et N. Khadduri 2008. Composting applications in forest and conservation nurseries. Forest Nursery Notes .USDA. (**28**) 2: 9-18.
- [35] J. Pousset, 2000. Engrais verts et fertilité des sols. Ed. Agridecisions, Paris. 287p.
- [36] S. Mtar, H. Lassoued, et M. Poirier . 1996. Étude préliminaire sur les coûts de certains aspects reliés à la culture de semis forestiers en récipients. Montréal : Pampev Internationale, Direction Générale des Forêts, Tunis, Projet Banque mondiale N° 3601. 19 p.
- [37] M. Bakry, M.S. Lamhamedi, H. Margolis, J. Caron, A. Zine El Abidine, D. Stowe et M. Bellaka. 2011. Are composts from shredded leafy branches of fast-growing forest species suitable as nursery growing media in arid regions? New Forests **43**:267-286