



Revue semestrielle – Université Ferhat Abbas Sétif 1

REVUE AGRICULTURE



Caractérisations physique et hydrique des substrats de croissance à base de compost pour pépinières forestières

Physical and hydric characterizations of growth substrates based of compost for forestry nurseries

Youssef M'Sadak^(1*) et Mohamed Aymen Elouaer ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université de Sousse, Institut Supérieur Agronomique de Chott-Mariem, Sousse - Tunisie

^(1*) E-mail: msadak.youssef@yahoo.fr

ARTICLE INFO

Reçu : 03/02/2016

Accepté : 15/07/2106

Mots Clés :

Compost sylvicole, Co-compost, porosités, masse volumique apparente sèche, comportement hydrique.

Key words:

Forestry compost, Co-compost, porosity, dry bulk density, hydraulic behavior.

RÉSUMÉ

Plusieurs travaux de recherche ont démontré l'importance de l'utilisation du compost pour la production des plants forestiers en conteneurs. Dans ce cadre, la présente étude tente une optimisation physico-hydrique des substrats de culture à base de compost sylvicole brut en mélange avec un Co-compost d'origine animale ou oléicole. L'apport des Co-composts a été réalisé selon différentes proportions afin de déterminer les mélanges ayant les caractéristiques optimales physiques (porosité totale, d'aération et rétention; masse volumique apparente sèche) et hydriques (courbes pF, disponibilité en eau, temps de réhumectation) pour la croissance des plants forestiers. Les résultats ont révélé que les incorporations de 20% de Co-compost cunicole affiné, 50% de Co-compost oléicole affiné, 50% de Co-compost ovin criblé et 50% de Co-compost bovin criblé avec le compost sylvicole ont donné relativement les meilleurs résultats. Le compost sylvicole brut seul a présenté une bonne teneur en air et une disponibilité insuffisante en eau. En mélange avec le Co-compost oléicole, il a prouvé une teneur non satisfaisante en air, mais la disponibilité en eau était bonne.

Abstract

Several research studies have shown the importance of compost using for containers seedlings production. In this context, the present study attempts to optimize physically and moisture content of growing media formed of forestry crude compost mixed with olive oil and livestock manure wastes Co-compost. The contribution of co-compost was carried out according to different proportions to determine mixtures that have the best physical characteristics (total porosity, aeration and retention, dry bulk density) and moisture content (pF curves, water availability, time of rewetting) for optimum forest seedling growth. The results have shown that the incorporation of 20% refined rabbit Co-compost, 50% refined olive oil wastes Co-compost, 50% ovine screened Co-compost and 50% cattle screened Co-compost with forestry compost have shown the relatively better results. The raw forestry compost showed good air content and insufficient moisture content. Mixed with Olive oil wastes Co-compost, he proved an unsatisfactory air content, but water availability was good.

1 Introduction

Dans le cadre de la modernisation des pépinières forestières en Tunisie, le premier défi consistait à trouver une solution de rechange à l'utilisation du terreau forestier en vue d'améliorer les pratiques culturales et la qualité des plants produits en pépinière forestière. Pour éviter le recours aux importations des substrats (tourbe, vermiculite, perlite, etc.), une attention particulière a été accordée au compostage de la biomasse forestière (écorces de pins, branches d'acacia et de maquis) en pépinière forestière (Ammari et al. 2003).

Le recours au compostage des déchets sylvicoles et agricoles a donné d'excellents résultats en matière de confection des substrats de croissance destinés à la production des plants en pépinières horticoles et forestières (Lemaire et al. 1989 ; Landis 1990 ; Miller et Jones 1995 ; Rose et al. 1995 ; Fitzpatrick 2001 ; M'Sadak et al. 2012a ; M'Sadak et al. 2013a).

En outre, le compostage permet la décomposition biologique et la stabilisation des substrats organiques (Mustin 1987 ; Haug 1993 ; Stoffella et Kahn 2001). La bonne connaissance des caractéristiques physico-chimiques et hydriques du substrat de culture permet d'expliquer et de prévoir le transfert des éléments minéraux entre phase solide et solution nutritive, en particulier, lorsque le milieu est physico-chimiquement actif (Lemaire et al., 1989). En pépinière forestière, les propriétés physiques du substrat de culture comptent parmi les facteurs déterminants de la qualité biologique des plants (André 1987 ; Gras 1987 ; M'Sadak et al. 2012b ; M'Sadak et al. 2013b). Vu la difficulté de leur modification après installation des jeunes plants, ces caractéristiques s'avèrent plus importantes que les propriétés chimiques. Elles influent directement sur l'ensemble des fonctions racinaires des plants, notamment sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux (Landis et al. 1990).

Dans cette perspective, M'Sadak et al. (2014) ont entrepris un travail expérimental qui s'est intéressé à une tentative d'optimisation physico-hydrique du compost sylvicole, produit au niveau de la pépinière forestière moderne de Chott-Mariem-Sousse, en variant sa granulométrie par différentes techniques (simple, double ou triple) et différentes méthodes (sur refus ou sur tamisat) de criblage, en vue de mettre au point un substrat à base de tamisat sylvicole adéquat pour l'élevage en conteneurs des plants forestiers. Les résultats des contrôles expérimentaux, visant l'évaluation des propriétés physiques et hydriques du compost sylvicole brut et des tamisats issus du criblage vibrant appliqué, ont montré que la plupart de ces derniers présente une forte porosité d'aération, une faible teneur en eau et une faible disponibilité en eau. Les substrats essayés peuvent être classés comme très aérés et à faible disponibilité en eau, exigeant ainsi des doses d'arrosage faibles et à forte fréquence. De ce fait, le présent travail tente une autre piste en s'intéressant à la mise au point d'un substrat de croissance, à base d'un mélange de compost sylvicole brut (issu de broyat d'*Acacia cyanophylla*) et de Co-compost (à base de biomasse végétale broyée et de déjections animales), adéquat pour l'élevage hors sol des plants forestiers feuillus en conteneurs suite à une évaluation directe des caractéristiques physiques et hydriques de plusieurs substrats considérés purs et en mélange pour une meilleure optimisation physico-hydrique.

2 Matériel et Méthodes

2.1 Substrats purs de culture mis à l'essai

Dans la pépinière forestière moderne de Chott-Mariem, Sousse (Tunisie), le broyat des branches d'*Acacia cyanophylla* composté est le principal matériau entrant dans la composition des substrats actuels de culture pour les essences forestières produites. L'expérimentation réalisée consiste à introduire des constituants de compositions différentes en mélange avec le broyat des branches d'*Acacia cyanophylla* composté en vue de mettre au point un substrat de culture adapté pour la croissance des essences forestières. Les différents substrats purs mis à l'essai sont donnés ci-après.

Substrat 1 : Compost sylvicole brut (CSB), constitué par les branches d'*Acacia cyanophylla* broyées successivement par un broyeur simple à couteaux et par un broyeur simple à marteaux avec une grille de calibrage à trous ronds de maille 30 mm, utilisé comme substrat standard (témoin).

Substrat 2 : Co-compost cunicole affiné (CC1), issu d'un compostage conjoint de 70% fientes cunicoles et 30% broyat de branches d'oliviers, suivi d'un broyage d'affinage après maturation.

Substrat 3 : Co-compost oléicole affiné (CC2), issu d'un compostage conjoint de 70% broyat de branches d'oliviers et 30% fientes cunicoles, suivi également d'un broyage d'affinage après maturation.

Substrat 4 : Co-compost ovin criblé (CC3), issu d'un compostage conjoint de 75% fumier ovin et 25% broyat de branches ornementales de *Ficus nitida*, suivi d'un criblage manuel après maturation à la maille carrée 15 mm.

Substrat 5 : Co-compost bovin criblé (CC4), issu d'un compostage conjoint de 75% fumier bovin et 25% broyat de palmes ornementales de *Washingtonia filifera*, suivi d'un criblage manuel après maturation à la maille 15 mm.

Notons que le diamètre mis au broyage des branches d'oliviers était inférieur à 3 cm, tout en utilisant un broyeur simple à couteaux à tambour hacheur, équipé d'une grille de calibrage à trous ronds de maille 30 mm pour le broyage de la biomasse oléicole et un broyeur simple à marteaux pour l'affinage du compost produit. En outre, le broyage de la biomasse ornementale a été assuré par un broyeur combiné en adoptant le simple broyage à marteaux pour les branches de diamètre inférieur à 3 cm ainsi que pour les palmes. Le double broyage (couteaux-marteaux) a été réservé aux branches de diamètre inférieur à 8 cm.

2.2 Confection des mélanges

Les mélanges, au nombre de 16, ont été confectionnés en substituant:

* Dans un premier temps, le CSB par le Co-compost cunicole affiné (CC1) selon 4 ratios différents, d'où, l'obtention de 4 mélanges (en volume) ci-après.

M1 : 80% CSB + 20% CC1

M2 : 70% CSB + 30% CC1

M3 : 60% CSB + 40% CC1

M4 : 50% CSB + 50% CC1

* Dans un deuxième temps, le CSB par le Co-compost oléicole affiné (CC2) selon les ratios appliqués dans le cas précédent, d'où, la préparation de 4 mélanges (en volume) ci-après.

M5 : 80% CSB + 20% CC2

M6 : 70% CSB + 30% CC2

M7 : 60% CSB + 40% CC2

M8 : 50% CSB + 50% CC2

* Dans un troisième temps, le CSB par le Co-compost ovin criblé (CC3) selon les ratios appliqués auparavant, d'où, la préparation de 4 mélanges (en volume) ci-après.

M9 : 80% CSB + 20% CC3

M10 : 70% CSB + 30% CC3

M11 : 60% CSB + 40% CC3

M12 : 50% CSB + 50% CC3

* Dans un quatrième temps, le CSB par le Co-compost bovin criblé (CC4) selon les ratios appliqués précédemment, d'où, la préparation de 4 mélanges (en volume) ci-après.

M13 : 80% CSB + 20% CC4

M14 : 70% CSB + 30% CC4

M15 : 60% CSB + 40% CC4

M16 : 50% CSB + 50% CC4

Le tableau 1 ci-après récapitule la dénomination et la composition de tous les substrats de croissance ayant fait l'objet de l'étude mise en œuvre.

2.3 Biotest de détection de la phytotoxicité des substrats

Ce biotest a pour objectif d'évaluer le degré de la maturation du compost sylvicole brut produit à la pépinière. Les 4 Co-composts étudiés, âgés d'environ 12 mois ont été jugés mûrs et n'ont pas fait partie intégrante de l'appréciation mise en œuvre. Un tel biotest caractérise la germination et la croissance durant 28 jours des plantes-tests (haricot, orge, pois chiche et maïs) cultivées en conteneurs. Ces plantes ont été choisies sur la base de leur sensibilité au degré de maturité du compost. En effet, l'haricot traduit la phytotoxicité par un jaunissement des feuilles et une croissance presque nulle; l'orge est utilisée, car il perd tout pouvoir germinatif pour une concentration de 15 millimoles d'acide acétique. Le pois chiche est choisi en raison de sa réponse rapide et pour la facilité de manipulation de ses racines. Le maïs traduit vite la phytotoxicité par un rougissement rapide des plantules.

Tableau 1 : Substrats de croissance testés à l'état pur ou en mélange

N°	Légende	Signification	Observations
1	CSB	Compost sylvicole brut	Substrats de culture purs
2	CC1	Co-compost cunicole affiné	
3	CC2	Co-compost oléicole affiné	
4	CC3	Co-compost ovin criblé	
5	CC4	Co-compost bovin criblé	
6	M1	80%CSB + 20%CC1	Mélange CSB + CC1
7	M2	70%CSB + 30%CC1	
8	M3	60%CSB + 40%CC1	
9	M4	50%CSB + 50%CC1	
10	M5	80%CSB + 20%CC2	Mélange CSB + CC2
11	M6	70%CSB + 30%CC2	
12	M7	60%CSB + 40%CC2	
13	M8	50%CSB + 50%CC2	
14	M9	80%CSB + 20%CC3	Mélange CSB + CC3
15	M10	70%CSB + 30%CC3	
16	M11	60%CSB + 40%CC3	
17	M12	50%CSB + 50%CC3	
18	M13	80%CSB + 20%CC4	Mélange CSB + CC4
19	M14	70%CSB + 30%CC4	
20	M15	60%CSB + 40%CC4	
21	M16	50%CSB + 50%CC4	

Pour chaque espèce végétale considérée, on a utilisé 4 conteneurs (soit 15 cavités x 4 = 60 plantes-tests), soit 16 conteneurs au total.

Les paramètres mesurés au cours du biotest sont la durée et le pourcentage de germination ainsi que la croissance radriculaire des plantes-tests.

La mesure de l'élongation radriculaire est plus fiable que la germination pour détecter la phytotoxicité. Cette mesure est également intéressante par rapport à celle de la croissance en hauteur des plantules, 15 jours après le début de germination de deux légumineuses (pois chiche et haricot), adoptée généralement par les pépiniéristes forestiers.

2.4 Caractérisation physique des substrats

La caractérisation physique effectuée a touché particulièrement les paramètres suivants: porosité totale, d'aération et de rétention; masse volumique apparente sèche.

2.4.1 Test standard de porosité

Mode opératoire

Ce test a été conduit sur les 5 substrats purs ainsi que sur les 16 mélanges de compost sylvicole brut avec les Co-composts, soit 63 tests élémentaires de porosité (21 substrats de culture x 3 répétitions). L'ensemble de trois cavités représente une répétition (soit 9 cavités pour 3 répétitions). A partir de ce test, on a déterminé les 4 mélanges (un pour chaque mélange CSB + Co-compost) qui respectent le mieux les normes de porosité.

Pour déterminer la porosité d'un substrat, on suit la méthode standard suivante:

- Obstruer les trous de drainage du conteneur et le remplir avec de l'eau (volume d'eau = volume du conteneur).
- Enlever l'eau et remplir 3 cavités parmi 15 avec le substrat sec.
- Verser de l'eau très lentement sur toute la surface des cavités jusqu'à ce que l'eau apparaisse à la surface.
- Attendre environ une heure et rajouter de l'eau si nécessaire (volume d'eau versée = volume des pores : air et eau).
- Dégager les trous de drainage et recueillir l'eau qui s'écoule pendant 5 à 10 minutes (volume d'eau recueillie = volume des pores : air).

Variables mesurées

Volume total (VT) : Il s'agit du volume d'eau versée dans les trois cavités.

Volume de pores (VA) : Il représente le volume d'eau versée, volume des pores : air et eau.

Volume de la phase gazeuse (VR) : C'est le volume d'eau acquis après dégagement des trous de drainage, le volume d'eau obtenu correspond au volume de la phase gazeuse.

Paramètres étudiés

Les paramètres de porosité ont été déterminés comme suit.

$$\text{Porosité totale } P_t (\%) = (V_A/V_T) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Porosité d'aération } P_a (\%) = (V_R/V_T) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Porosité de rétention } P_r (\%) = P_t - P_a \quad (3)$$

Compte tenu du climat sec de la Tunisie, la rétention est généralement favorisée sur l'aération des substrats. Ainsi, dans les conditions Tunisiennes, on a retenu les règles d'appréciation suivantes : $P_t \geq 50\%$, $P_a \geq 20\%$ et $P_r \geq 30\%$. Celles-ci ont été inspirées des Normes Canadiennes (CPVQ 1993).

2.4.2 Masse volumique apparente sèche

La mesure de la masse volumique apparente a été exécutée pour les substrats purs ainsi que pour les mélanges retenus à partir du test standard de porosité. Elle consiste à mettre les échantillons dans l'étuve à une température de 105°C pendant 24 heures pour déterminer la masse sèche. La masse volumique apparente (Mva) est exprimée par la formule suivante :

$$M_{va} = (M_s - M_c) / V \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (4)$$

M_s = Masse de l'échantillon sec en g.

M_c = Masse de la capsule vide en g.

V = Volume de la capsule : 100 cc.

On dispose de la règle d'appréciation (Clauzel 1997) ci-après pour la comparaison des résultats relevés.

$$0,08 < M_{va} \text{ (g/cm}^3\text{)} < 0,40$$

2.4.3 Caractérisation hydrique des substrats

La caractérisation hydrique mise en œuvre a porté essentiellement sur les paramètres suivants : Courbes pF, disponibilité en eau et temps de réhumectation.

2.4.3.1 Courbes pF

- **Considérations générales**

Concernant les courbes pF, on opère par dessiccation d'un produit qui a été préalablement amené à saturation complète et on soumet alors l'échantillon à une succion correspondant à la valeur choisie (tableau 2) en ayant recours à une table à succion. L'eau en excès par rapport à cette valeur de pression est évacuée à travers un milieu (couche de sable) dont les caractéristiques sont telles que la pression d'entrée d'air dans le milieu saturé soit supérieure à la pression d'utilisation. Lorsque l'équilibre est atteint, la teneur en eau de l'échantillon est déterminée par pesée.

La courbe pF est un indicateur spécifique des propriétés hydriques d'un substrat (Lemaire et al. 1990). La plupart des techniques d'analyse utilise le concept de la courbe pF pour caractériser hydriquement un substrat (Mongondry 1996).

Tableau 2 : Valeurs de pF et de succion établies à partir de la table à succion

Valeur de pF	0,0	0,4	1,0	1,5	1,7	2,0
Valeur de Succion (mbar)	-1,0	-2,5	-10,0	-31,6	-50,0	-100,0

- **Matériel et substrats utilisés**

Afin d'établir les courbes de pF et d'estimer la porosité totale à partir de la masse volumique apparente, les échantillons ont été placés dans la table à succion. Ils ont été mis en contact avec une colonne d'eau par l'intermédiaire d'une couche de sable saturée d'eau. Le potentiel hydrique de l'échantillon testé se met en équilibre avec la pression hydrostatique de la colonne d'eau. Une telle technique est physiquement limitée à 100 mbar (pF2).

L'expérimentation a été accomplie sur 9 substrats : 5 substrats purs (CSB, CC1, CC2, CC3, CC4) et 4 mélanges (CSB + Co-compost) retenus à partir du test standard de porosité ayant des caractéristiques physiques satisfaisantes.

L'essai a été réalisé en capsules de 100 cc. Chaque substrat est représenté par 3 capsules, soit, 3 répétitions.

- **Mode opératoire**

- Peser les capsules vides (Mv) ;

- Remplir les capsules avec le substrat et peser l'ensemble ;
- Placer les capsules dans la table à succion et mettre le régulateur de pression à pF 0 ;
- Ouvrir le robinet de la bouteille d'alimentation en eau et de la table à succion jusqu'à élévation de la hauteur d'eau dans la table à 1 cm ;
- Fermer le robinet de la bouteille d'alimentation et celui de la table à succion et attendre la saturation des échantillons;
- Après saturation et évacuation de l'eau par le robinet de la table à succion, peser les pF 0,4 ; pF 1 ; pF 1,5 ; pF 1,7 ; pF 2, mettre le régulateur de pression au niveau du pF voulu. Le robinet de la table à succion est orienté vers la droite. Après 24 heures, peser chaque fois les masses des capsules relatives à chaque pF.

- **Paramètres étudiés**

- * **Courbe de succion pF**

C'est la relation entre le potentiel hydrique du substrat et sa teneur en eau volumique

$$\text{Volume d'eau pour chaque pF} = [(MpF - Mv - Ms) / V] \times 100 \quad (5)$$

MpF = Masse de l'échantillon pour chaque pF.

Mv = Masse de la capsule vide.

Ms = Masse de la matière sèche de l'échantillon après séchage à 105°C pendant 24 heures.

V = Volume de la capsule : 100 cc.

- * **Porosité totale (Pt)**

La porosité totale (Pt) a été déterminée par la formule de Gras (Gras et Agius 1983) donnée ci-après.

$$Pt (\% \text{ volume apparent}) = 95,83 - 32,43 Mva \quad (6)$$

Mva = Masse volumique apparente

- * **Teneur en air à pF1 (Pa)**

$$Pa (\%) = Pt - Pe \quad (7)$$

Pt = Porosité totale

Pe = Teneur en eau à pF 1

2.4.3.2 Disponibilité en eau

La Disponibilité en eau (DE) est exprimée par la relation ci-après.

$$DE = (pF 1 - pF 2) \times 100 \quad (8)$$

pF 1 : correspond à une humidité proche de la capacité en bac ;

pF 2 : c'est la valeur à laquelle l'irrigation est déclenchée.

Il est à noter qu'une tentative préliminaire a été également réalisée en vue de déterminer la dose d'irrigation nécessaire et les possibilités de rétention de certains substrats, à partir de la disponibilité en eau. L'évaluation mise en œuvre a concerné le substrat pur témoin (CSB) et les 4 mélanges retenus auparavant : M1, M8, M12 et M16.

2.4.3.3 Temps de réhumectation

La technique choisie pour la mesure de réhumectation ou mouillabilité d'un substrat est la mesure du temps de pénétration d'une goutte d'eau (Water Drop Penetration Time : W.D.P.T.).

Le temps de réhumectation est évalué pour les 5 substrats purs (CSB, CC1, CC2, CC3, CC4) ainsi que pour les 4 mélanges retenus précédemment : M1, M8, M12 et M16. La mesure a été effectuée sur 6 cavités pour chaque substrat, soit, 2 cavités par répétition.

2.5 Analyses statistiques

Les résultats relevés relatifs aux diverses analyses physico-hydriques des substrats ont subi l'analyse de la variance (ANOVA) et la comparaison des moyennes par le Test de Duncan en ayant recours au logiciel SPSS (13.0). Les différences ont été considérées significatives au seuil de 5% (Moyennes suivies de lettres différentes). Les moyennes suivies de la même lettre ne se diffèrent pas significativement selon le test Duncan au seuil de 5% ($P > 0,05$).

3 Résultats et Discussion

3.1 Biotest de détection de la phytotoxicité des substrats

Le tableau 3 montre l'évolution du pourcentage cumulé de germination des semences-tests (Haricot, Pois chiche, Orge et Maïs), pendant 28 jours, ensemencés en même temps ainsi que la longueur moyenne des radicules (cm) au cours du temps, installées sur le compost sylvicole brut mis à l'essai.

Tableau 3 : Résultats du biotest de différentes espèces dans le compost sylvicole brut

Plante-test	Durée de germination (j)	Taux de germination (%)	Longueur moyenne des radicules (cm)
Haricot*	12 ^a	91 ^c	14 ^b
Pois chiche	8 ^b	92 ^c	12 ^c
Orge	7 ^c	98 ^a	15 ^{ab}
Maïs**	12 ^a	94 ^b	16 ^a

(*) Absence de jaunissement des plantules d'Haricot. (***) Absence de jaunissement des plantules de Maïs.

(**) Les moyennes suivies de la même lettre ne se diffèrent pas significativement selon le test de Duncan au seuil de 5%.

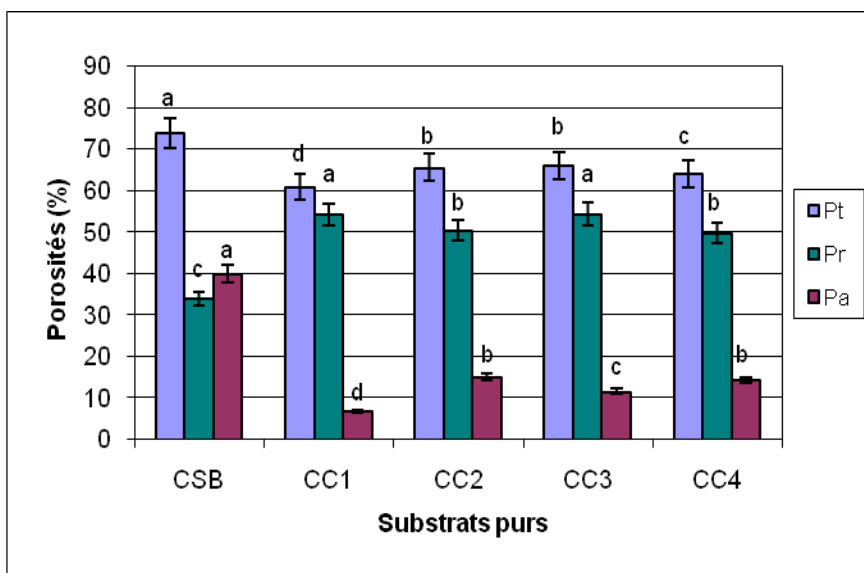
On constate que le biotest réalisé a donné une germination élevée supérieure à 90% pour toutes les plantes-tests. De même, on remarque que les différentes espèces utilisées ont une bonne élongation racinaire permettant une meilleure croissance de la partie aérienne (tableau 3). On peut dire donc que le compost sylvicole brut testé peut être considéré mûr. Ceci pourrait s'expliquer par la non présence des substances phytotoxiques inhibant la croissance des espèces cultivées. Par ailleurs, il y a lieu de rappeler que les Co-composts étudiés n'ont pas subi de biotest en raison de leur maturité marquée (environ 12 mois d'âge). Le problème de phytotoxicité ne se pose pas pour de tels substrats.

Plusieurs auteurs suggèrent que l'inhibition de la germination et de la croissance par le compost peut être attribuée à la salinité ou à la concentration élevée d'acides organiques (Chanyasak et al. 1983 ; Manios et al. 1989). Les composés volatiles ainsi que les acides aliphatiques libérés lors de la décomposition des résidus végétaux imposent des effets phytotoxiques sur la germination et la croissance des plants (Toussoun et al. 1968 ; Chen et al. 2004). La croissance remarquable des plants peut être attribuée à la bonne qualité du compost testé qui contient probablement des substances bénéfiques à la croissance (Morel et al. 2000).

3.2 Évaluation directe de la porosité à partir du test standard

3.2.1 Cas des substrats de culture purs

La figure 1 illustre la variation des porosités totale, d'aération et de rétention des substrats de culture purs testés.



(*) Les moyennes suivies de la même lettre ne se diffèrent pas significativement selon le test de Duncan au seuil de 5%.

Figure 1 : Variation des porosités totale, d'aération et de rétention des substrats de culture purs

Les résultats obtenus ont montré que ces substrats ont tous une porosité totale satisfaisante ($P_t > 50\%$) avec une légère élévation pour le compost sylvicole brut (74%). Au contraire, pour la porosité d'aération, les substrats ont des comportements variables. On a noté une valeur assez élevée pour le compost sylvicole brut qui contient en effet des particules grossières engendrant un drainage très rapide, par conséquent, une faible quantité d'eau est retenue par le substrat qui sera mis à la disposition des racines.

Concernant les Co-composts, la porosité d'aération est largement inférieure aux normes ($P_a > 20\%$) du fait de la présence en grandes proportions des particules fines. Ceci est vrai pour le Co-compost CC1 qui possède une très faible porosité d'aération (6,8%). Ainsi, le ressuyage du substrat est très lent et il y aura risque d'asphyxie pour les plantes.

Quant à la composante porosité de rétention, elle est liée à celle d'aération; toute augmentation de la teneur en air provoque un abaissement de la teneur en eau.

En résumé, l'utilisation notamment de l'un des Co-composts purs considérés pourrait présenter des problèmes de retard de croissance des plants en conteneurs. Il s'avère intéressant d'incorporer en proportions adéquates du Co-compost jouant le rôle de rétention d'eau avec le compost sylvicole brut qui est considéré comme substrat aérateur pour avoir un mélange qui tient en compte les exigences des plants et les contraintes d'irrigation fertilisante.

Il convient de signaler que chaque porosité étudiée a présenté des différences significatives qui apparaissent nettement au niveau de la figure 1 : Les moyennes suivies des lettres distinctes se différencient significativement en se basant sur leur comparaison suivant le test de Duncan au seuil de 5%.

3.2.2 Cas du mélange CSB + CC1

La figure 2 montre la variation de la porosité totale et de la porosité d'aération du mélange compost sylvicole brut avec Co-compost cunicole affiné.

Ces résultats dévoilent qu'il est intéressant d'incorporer le Co-compost CC1 à raison de 20% avec le CSB. En effet, le mélange constitué de 80% CSB + 20% CC1 a présenté des porosités totales et d'aération acceptables. A l'opposé, on a noté une diminution de la porosité d'aération au-dessous des normes pour les autres mélanges. On constate qu'il s'agit d'une incorporation à faible proportion de CC1 du fait que ce dernier est affiné, d'autant plus qu'il est constitué d'un taux de Fientes Cunicoles largement supérieur à celui du broyat de branches d'oliviers. En réalité, on assiste à un remplissage des vides du CSB par les particules fines du CC1. Il convient dans l'avenir, de tester ce type de mélange en utilisant les deux constituants relatifs à l'état brut. L'utilisation de CC1 brut pourrait améliorer davantage le taux d'incorporation.

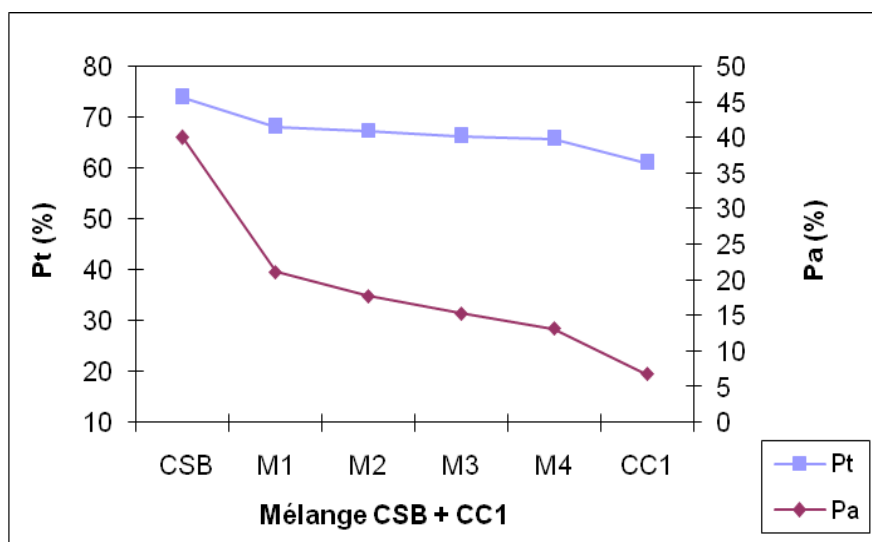


Figure 2 : Variation des porosités totale et d'aération du mélange CSB + CC1

3.2.3 Cas du mélange CSB + CC2

La figure 3 relate la variation de la porosité totale et de la porosité d'aération du mélange compost sylvicole brut avec Co-compost oléicole affiné.

On constate qu'avec l'augmentation du pourcentage de Co-compost CC2 dans le mélange, la porosité d'aération est devenue satisfaisante (22%) pour le mélange 50% CSB + 50% CC2. De même pour la porosité totale, qui est devenue égale à 67%.

Vu que le Co-compost CC2 contient seulement 30% fientes cunicoles et 70% broyat de branches d'olives, il s'est avéré qu'on peut l'incorporer au CSB en proportion supérieure à celle de Co-compost CC1.

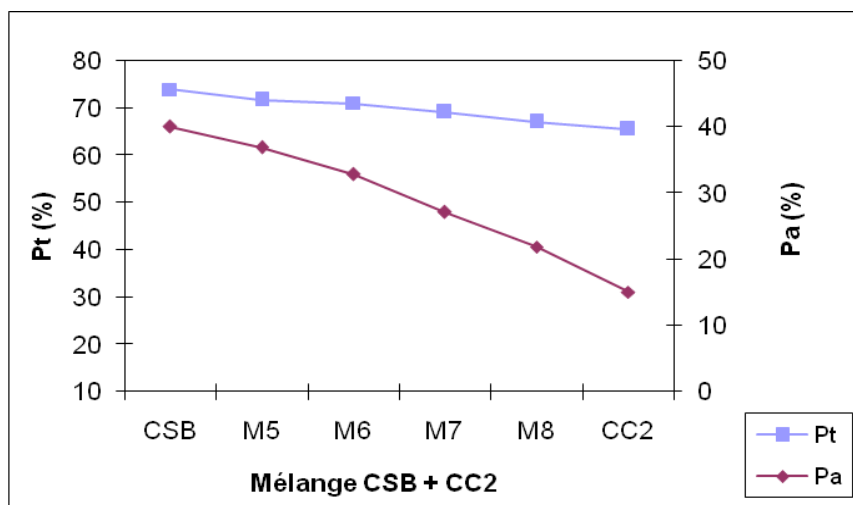


Figure 3 : Variation des porosités totale et d'aération du mélange CSB + CC2

3.2.4 Cas du mélange CSB + CC3

La figure 4 donne la variation de la porosité totale et de la porosité d'aération du mélange compost sylvicole brut + Co-compost ovin criblé.

Lorsque l'on apporte une proportion de 20 à 30% de CC3 au CSB, on remarque une légère amélioration de la porosité d'aération du mélange, mais qui reste toujours supérieure aux normes. A partir de l'apport de 40%, les mélanges ont présenté une porosité de rétention acceptable par rapport au Témoin.

En tenant compte des propriétés chimiques intéressantes de CC3, une incorporation de 50% de CC3 peut s'avérer bénéfique pour la culture des espèces forestières en pépinière. En revanche, c'est le mélange 50% CSB + 50% CC3 qui est retenu comme le meilleur substrat de point de vue porosité dans ce cas.

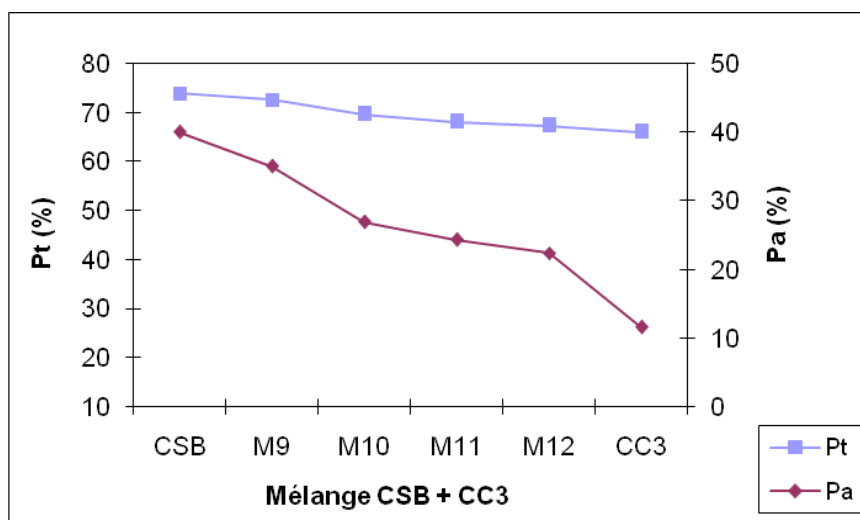


Figure 4 : Variation des porosités totale et d'aération du mélange CSB + CC3

3.2.5 Cas du mélange CSB + CC4

La figure 5 indique la variation de la porosité totale et de la porosité d'aération du mélange compost sylvicole brut avec Co-compost bovin criblé.

Les résultats acquis ont révélé que le mélange constitué de 50% CSB + 50% CC4 donne le meilleur résultat au niveau de la porosité d'aération (22%). Pour les autres mélanges, la porosité d'aération est amplement au-dessus de la norme.

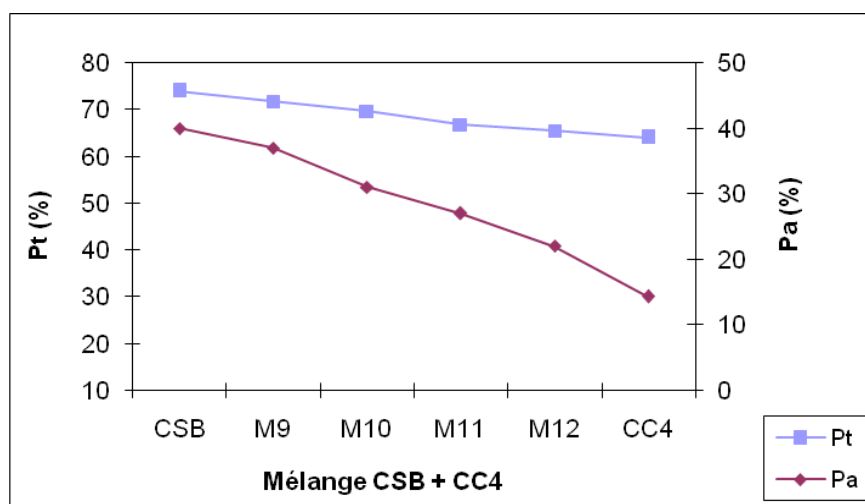


Figure 5 : Variation des porosités totale et d'aération du mélange CSB + CC4

3.3 Évaluation de la masse volumique apparente

Les résultats présentés dans le tableau 4 montrent que le CSB détient la masse volumique apparente (M_{va}) la plus faible du fait qu'il dispose d'un pourcentage élevé des vides. Cette légèreté ne pose aucun problème d'ancrage des racines. Par contre, pour les Co-composts (CC1, CC2, CC3, CC4), la masse volumique apparente est relativement importante. Elle est la plus élevée pour le CC1 (dépassant la limite supérieure de $0,4 \text{ g/cm}^3$), ce dernier se caractérise par un degré de compaction élevé et peut affecter l'enracinement des plantes. En outre, on a constaté une masse volumique apparente acceptable pour les autres mélanges. Cette observation peut être attribuée à une interaction entre les Co-composts et le CSB, ce qui a permis d'augmenter la porosité des mélanges, et par conséquent, favoriser facilement l'étalement des racines dans le conteneur. Clauzel (1997) rapporte que plus la M_{va} est faible, plus la porosité est forte, ce qui est tout à fait conforme avec les résultats trouvés. Selon Lamhamedi et al. (1997), la M_{va} augmente la résistance mécanique du substrat. Une telle résistance a des conséquences directes sur la croissance et la morphologie des racines.

Tableau 4 : Masse volumique apparente des différents substrats testés

Substrat	CSB	CC1	CC2	CC3	CC4	M1	M8	M12	M16
$M_{va} (\text{g/cm}^3)$	0,24 ^{ef}	0,44 ^a	0,33 ^c	0,40 ^b	0,42 ^{ab}	0,23 ^f	0,25 ^e	0,24 ^{ef}	0,27 ^d

3.4 Évaluation indirecte de la porosité à partir des mesures au laboratoire

Les résultats dévoilés dans le tableau 5 illustrent les caractéristiques physiques et hydriques trouvées pour tous les 9 substrats analysés.

Les courbes pF établies représentent pour chaque succion la répartition de l'air et de l'eau dans le substrat. L'interprétation de ces courbes se base le plus souvent sur la valeur de la teneur en air et en eau à pF1, car elle se rapproche de la disponibilité en eau qui correspond à la différence d'humidité du substrat entre pF1 et pF2. Le Tableau 5 résume les caractéristiques physico-hydriques des substrats ayant subi l'analyse hydrique. Ces résultats ont été déduits à partir de chacune des courbes pF dressées pour chaque substrat considéré.

Afin de juger de façon appropriée les substrats testés, il est important de rappeler les caractéristiques optimales d'un substrat de culture (Morel et al. 2000).

* Porosité totale > 88%.

* Porosité de l'air à pF1 = 20 à 30%.

* Capacité de rétention en eau à pF1 = 55 à 70%.

* Eau facilement disponible (pF1-pF2) = 20 à 30%.

Les meilleurs mélanges retenus de point de vue porosités (avec les substrats purs) pour l'évaluation de la porosité sont :

M1 : 80% CSB + 20% CC1

M8 : 50% CSB + 50% CC2

M12 : 50% CSB + 50% CC3

M16 : 50% CSB + 50% CC4

Tableau 5 : Caractéristiques physico-hydrriques des substrats testés

Substrat	Porosité Totale (%)	Teneur en air à pF1 (%)	Teneur en eau à pF2 (%)	Disponibilité en eau (%)
CSB	88,0	23,1	64,9	18,1
CC1	81,5	16,7	64,8	16,3
CC2	85,0	11,3	73,7	24,1
CC3	83,0	11,3	71,7	7,2
CC4	82,2	10,8	71,4	10,6
M1	88,4	22,7	65,7	21,8
M8	87,7	15,1	72,6	27,8
M12	88,0	20,3	67,7	22,3
M16	87,0	21,0	66,1	20,8

D'après le tableau 5, on peut noter que les substrats de culture retenus ont des paramètres de porosité totale proches de la norme, à l'exception de M1, substrat unique répondant à la valeur exigée (Morel et al. 2000).

Concernant la porosité de l'air à pF1 et la capacité de rétention en eau à pF1, seulement 4 substrats sont corrects pour l'un et l'autre des paramètres considérés. Pour les mélanges (M1, M12 et M16), ils ont une teneur en air et en eau élevées, de même, leur disponibilité en eau est acceptable. En effet, c'est le substrat M1 qui répond le mieux aux normes des caractéristiques physico-hydrriques fixées.

Bien que le CSB montre des teneurs en air et en eau conformes, soit respectivement 23,1% et 64,9%, sa disponibilité en eau est relativement faible (18,1%).

Compte tenu des caractéristiques physiques des Co-composts, ils sont loin d'être utilisés purs comme substrat de culture du fait qu'ils possèdent des teneurs en air faible, soit 10,8% pour le CC4 et une disponibilité en eau faible, soit 7,2% pour CC3; mais au contraire une teneur en eau élevée.

Partant des constatations physico-hydrriques faites, on peut dire que le substrat M8 est déconseillé à cause d'un manque d'aération, alors que les trois autres mélanges se sont révélés satisfaisants et méritent d'être retenus pour la production des plants forestiers. Le substrat de référence CSB s'est montré performant, cependant sa disponibilité limitée en eau implique que son exploitation à l'état brut n'est pas préconisée dans son état actuel d'emploi.

3.5 Dose d'arrosage et potentialités de rétention des substrats

A la lumière des résultats obtenus précédemment, on peut calculer la dose et le temps d'irrigation relatifs à chaque substrat, afin d'assurer une alimentation hydrique optimale des plants. Compte tenu de la difficulté d'avoir une connaissance exacte des limites de référence, on a essayé de déterminer des ordres de grandeur qui peuvent être utiles au raisonnement de l'irrigation. Les travaux réalisés en pépinière par le Centre National Interprofessionnel d'Horticulture de Chambourcy en France, ont montré qu'il convient d'adopter une dose d'irrigation correspondant au tiers de la disponibilité en eau (DE). Cette dose, appelée dose stricte d'irrigation, permet, à la fois, d'exploiter correctement le réservoir hydrique du substrat et de garder une marge de teneur en eau en cas de besoin, sans prendre le risque de pénaliser la croissance de la plante (Lemaire et al. 1989).

L'arrosage des plants dans la pépinière forestière moderne de Chott Mariem est assurée par des asperseurs possédant un patron d'arrosage carré (8m x 8m), qui fonctionnent avec un débit de 5 l/mn/asperseur et ayant un coefficient d'uniformité CU = 75%, évalué lors de l'expérimentation réalisée.

Dans un premier temps, il convient de déterminer la dose stricte d'irrigation (DSI) pour un litre de substrat. Par la suite, cette dose sera calculée au m².

$$DSI \text{ au } m^2 = \text{Nombre de cavités}/m^2 \times \text{Volume des cavités} \times DSI. \quad (9)$$

Avec, Nombre de cavités/ m² = 225 et Volume par cavité = 345 ml.

Dans un deuxième temps, afin d'apporter effectivement dans le substrat la dose stricte d'irrigation calculée comme il est indiqué précédemment, il faudra que la quantité d'eau étalée sur l'aire de culture soit égale à cette dose majorée du coefficient de captage de la table de culture qui n'est autre que le CU estimé à 75% (Tableau 6).

Tableau 6 : Dose d'irrigation et temps d'aspersion pour les mélanges étudiés et le Témoin

Substrat	Dose stricte d'irrigation ml/litre de substrat	Dose stricte d'irrigation au m ² (l/m ²)	Temps d'aspersion nécessaire
M1	72,7	5,6	4 h 58mn
M8	92,7	7,2	6 h 24mn
M12	74,4	5,8	5 h 9mn
M16	69,4	5,4	4 h 48mn
CSB	60,4	4,7	4 h 10mn

En définitive, la gestion de l'arrosage consiste à apporter dans le substrat la dose stricte d'irrigation (l/m²) chaque fois la plante l'a consommée. La fréquence des apports est généralement déterminée en tenant compte de la consommation des végétaux.

3.6 Temps de réhumectation des substrats

3.6.1 Cas des substrats purs

Le tableau 7 met en évidence le temps de réhumectation des substrats de culture purs. L'humectation de ces substrats se fait en temps assez variable. Pour le CSB, on a noté que la pénétration de l'eau est assez courte par rapport aux autres substrats du fait qu'il présente des particules grossières, ce qui donne au compost une bonne mouillabilité. Pour les Co-composts, l'humectation demande un temps plus au moins long surtout pour le Co-compost CC3.

Tableau 7 : Temps de réhumectation des substrats de culture purs

Substrats de culture purs	Temps de réhumectation (s)
CSB	90
CC1	145
CC2	120
CC3	160
CC4	100

3.6.2 Cas des mélanges CSB + Co-compost

Le tableau 8 met en relief le temps de réhumectation des substrats à base de mélange compost sylvicole brut et Co-compost. Le temps de réhumectation des mélanges considérés est supérieur à celui des substrats purs, en raison de la forte influence de l'hétérogénéité de la surface des matériaux utilisés (taille et géométrie des pores).

Le mélange CSB + CC1 met plus de temps pour se réhumecter que les autres mélanges, par conséquent, on devrait assurer un temps d'irrigation plus important pour atteindre la capacité en bac. Le comportement en réhumectation de ces mélanges est fortement influencé lors de leur dessiccation.

On note que la dessiccation de ces substrats va de pair avec l'acquisition d'un caractère hydrophobe. Il apparaît que l'acquisition de ce caractère dépend du pourcentage présent de déjections animales (fumiers ou fientes). Les mélanges qui contiennent un pourcentage faible de fumier sont plus mouillables. Pour l'ensemble des mélanges, il est nécessaire d'éviter une dessiccation trop intense, afin d'éviter la détérioration de leurs propriétés physiques.

Tableau 8 : Temps de réhumectation des substrats à base de mélange CSB + Co-compost

Substrats de culture purs	Temps de réhumectation (s)
M1	90
M8	145
M12	120
M16	160

4 Conclusion

Le compostage des déchets sylvicoles constitue une solution de substitution face à l'utilisation du terreau forestier ou agricole et aux importations de la tourbe pour la production hors sol des plants forestiers. D'après les résultats essentiels de cette étude, il s'est avéré que l'incorporation des Co-composts cunicole affiné, oléicole affiné, ovin criblé et bovin criblé à raison respectivement de 20%, 50%, 50% et 50% au compost

sylvicole brut (CSB) améliore dans l'ensemble les propriétés physiques et hydriques du substrat obtenu. On peut dire qu'il existe une complémentarité entre CSB et chaque Co-compost incorporé dans le mélange élaboré sur le plan qualité physique, puisque l'on a noté une amélioration de la porosité des mélanges confectionnés. Par ailleurs, il convient de noter que le mélange du CSB avec du Co-compost en proportions égales pourrait être intéressant aussi bien sur le plan physique que sur le plan hydrique.

En outre, il est à signaler que l'allure des courbes de variation des porosités totale et d'aération est presque similaire dans les quatre cas considérés de mélange du CSB avec Co-compost.

Par ailleurs, l'analyse physico-hydrique des substrats a pu dégager les meilleurs mélanges de point de vue porosité totale, teneurs en air et en eau à pF1 et disponibilité en eau, à savoir : M1 (80% CSB + 20% CC1), M12 (50% CSB + 50% CC3) et M16 (50% CSB + 50% CC4). La disponibilité en eau a été la contrainte majeure pour le substrat de référence CSB.

Références Bibliographiques

- Ammari, Y., Lamhamedi, M.S., Akrimi, N., Zine El Abidine, A., 2003. Compostage de la biomasse forestière et son utilisation comme substrat de croissance pour la production de plants en pépinières forestières modernes. *Revue de l'I.N.A.T* 18 (2) : 99-119. www.mern.gov.qc.ca/publications/.../Lamhamedi.../I-N-A-T-18-2-.pdf
- André, JP., 1987. Propriétés chimiques des substrats". In: Les Cultures Hors Sol, Denise Blanc, France, Éd. INRA, 127-147.
- Chanyasak, V., Katayama, A., Hirai, M.F, Mori, S., Kubota, H., 1983. Effects of compost maturity on growth of Komatsuna (*Brassica Rapa* var. pervidis) in Neubauer's pot. *Soil Science and Plant Nutrition* 29, 251-259.
- Chen, Y., De Nobili, M., Aviad, T., 2004. Stimulatory effects of humic substances on plant growth". In: Functions and Management of Soil Organic Matter in Agro-ecosystems (Edited by F.R Magdoff and R.R Weil). *CRC Press*, Boca Raton, FL, USA, p. 103-124.
- Clauzel, J.M., 1997. L'analyse physique du substrat, outil méconnu du producteur hors sol", Bordeaux, Laboratoire d'Analyses et de Conseils Agronomiques, Lettre d'information, 3 p.
- CPVQ, 1993. Pépinières, "Culture en conteneurs", Substrats, Document Technique, Conseil des Productions Végétales du Québec, Canada, 19 p.
- George E Fitzpatrick, 2001. Compost utilization in ornamental and nursery crop production systems", Stoffella P J et Kahn B , Compost utilization in horticultural cropping systems, edited by Stoffella P J & Kahn B A (Eds.), Lewis Publishers, New York, USA, 135-150.
- Gras, R., 1987. Propriétés physiques des substrats". In : Cultures Hors Sol, Denise Blanc, France, Éd. INRA, 79-126.
- Gras, R., Agius, I., 1983. Quelques propriétés physiques des substrats horticoles, PHM *Revue Horticole*, (234), 11-13.
- Haug, R.T., 1993. *Practical handbook of compost engineering*, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA, 752 p.
- Lamhamedi, M.S., André Fortin J., Ammari, Y., Ben Jelloun, S., Poirier, M., Fecteau, B., Bougacha, A., Godin, L. 1997. Évaluation des composts, des substrats et de la qualité des plants élevés en conteneurs", Éd. Direction Générale des Forêts et Pampev International, Projet Bird N° 3601, Tunis, 121 p.
- Landis, T.D., 1990. Growing media". In: Containers and growing media. Vol 2. Agriculture-Handbook. Washington DC, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 674 p.
- Lemaire, F., Dartigues, R., Rivière, L.M., Charpentier, S., 1990. Cultures en conteneurs et en pots: *Principes agronomiques et applications*", Éd. I.N RA, 184 p.
- Lemaire, F., Dartigues, A., Rivière, L.M., 1989. Cultures en pots et conteneurs : Principes Agronomiques et Application, Éd. INRA, Paris, France, 210 p.
- M'Sadak, Y., Ben M'Barek, A., Tayachi, L., 2013a. Comportement des plants d'Acacia installés sur des substrats à base de compost sylvicole avec ou sans méthacompost avicole dans une pépinière moderne en Tunisie, *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 5 (1) : 38-50. jfas.info/index.php/JFAS/article/view/95
- M'Sadak, Y., El Amri, A., Majdoub, R., Ben Ali, M., 2014. Caractérisations physique et hydrique des substrats de culture des plants forestiers en conteneurs, *Larhyss Journal*, 17, 7-20.
- M'Sadak, Y., Elouaer, M.A., Dhahri, M., 2013b. Caractérisation physique des substrats de croissance pour une meilleure adaptation à la filière horticole en Tunisie, *Revue Nature & Technologie*, Numéro 9 (B): 27-34.
- M'Sadak, Y., Elouaer, M.A., El Kamel, R., 2012a. Évaluation des substrats et des plants produits en pépinière forestière", *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, 313(3), 61-71. bft.cirad.fr/revues/notice_fr.php?dk=566986.
- M'Sadak, Y., Elouaer, M.A., El Kamel, R., 2012b. Comportement physique des composts, des tamisats et des mélanges pour une meilleure exploitation en pépinière: Caractérisation physique des composts bruts, criblés et

en mélange. *E-Revue de Génie Industriel*, 8, 44-54. <http://www.revue-genieindustriel.info/document.php?id=1607>.

Manios, V.I., Tsikalas, P.E., Siminis, H.K., 1989. Phytotoxicity of olive tree leaf compost in relation to the organic acid concentration. *Biological Wastes*, 27: 307-317.

Miller J.H., Jones, N., 1995. Organic and compost-based growing media for tree seedlings nurseries". World Bank technical paper, n° 264, 75 p.

Mongondry, C., 1996. *Méthodes d'analyse des supports de cultures horticoles*, Étude critique des projets de norme, Mémoire de fin d'études MST Université d'Angers.

Morel, P., Poncet, L., Rivière, L.M., 2000. *Les supports de culture horticoles*, Éd. INRA, Paris, France, 87 p.

Mustin, M., 1987. *Le compost- Gestion de la matière organique*, Éd. François Dubusc, 954 p.

Rose, R., Haase, D.L., Boyer, D., 1995. *Organic matter management in forest tree nurseries: theory and practice*". In: Nursery Technology Cooperative, Oregon State University, 73 p.

Stoffella, P.J., Kahn, B.A., 2001. *Compost utilization in horticultural cropping systems*, Lewis Publishers, New York, USA, 413 p.

Toussoun, T.A., Weinhold, A.R., Linderman, R.G., Patrick, Z.A., 1968. Nature of phytotoxic substances produced during plant residue decomposition in soil. *Phytopathology*, 58, 41-45.