



## CARACTÉRISATION PHYSICO-HYDRIQUE DES SUBSTRATS DE CULTURE À BASE DE MÉTHACOMPOST AVICOLE POUR UNE MEILLEURE VALORISATION

M'SADAK Y., BEN M'BAREK A.

Département du Génie des Systèmes Horticoles et du Milieu Naturel. Université de Sousse. Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem, BP 47, 4042 Chott Mariem, Tunisie

msadak.youssef@yahoo.fr

### RÉSUMÉ

Les pépinières hors sol récemment installées s'orientent de plus en plus vers la substitution de la tourbe par le compost et/ou le méthacompost. Cette solution intéressante présente certaines limites concernant les qualités physiques et donc hydriques. Deux voies possibles d'amélioration physique : Variation de la granulométrie du substrat ou son utilisation avec un autre substrat améliorateur. C'est cette dernière qui fait partie intégrante de cette étude, ayant pour objectif essentiel l'évaluation directe des paramètres physiques et hydriques de quelques substrats de croissance en ayant recours notamment à une table à succion.

Les substrats à base de mélange tourbe et méthacompost avicole affiné ne peuvent pas être considérés comme de bons substrats de croissance, à cause de leur porosité d'aération insuffisante (substrats rétenteurs), ce qui justifie leur mélange, selon des proportions adéquates, avec le compost sylvicole brut qui a une porosité d'aération plus élevée (substrat aérateur). De point de vue hydrique, le méthacompost avicole à l'état pur, présente la plus faible disponibilité en eau, mais sa capacité de rétention en eau est très proche de la tourbe usagée. L'incorporation partielle restreinte à raison de 10% de méthacompost avicole et de 10% de compost sylvicole semble optimale dans les conditions expérimentales considérées.

**Mots clés :** Pépinière moderne, Substrat de croissance, méthacompost avicole, compost sylvicole, qualité physique, comportement hydrique.

## ABSTRACT

The aboveground nurseries recently installed are moving increasingly towards the replacement of peat by compost and / or methacompost. This interesting solution has some limitations on the physical comportement and therefore and water quality. Two possible routes of physical improvement: Variation of the particle size of the substrate or its use with another enhancer substrate. It is the latter which is an integral part of this study, whose primary aim is the direct evaluation of the physical parameters and of water some growth substrates by recourse to a suction table.

Substrates based mixing peat and poultry methacompost refined cannot be considered good growth substrates because of their porosity of insufficient ventilation (substrates retainers), which justifies their mixture along appropriate proportions with the forestry crude compost which has a higher porosity aeration (substrate aerator). Point of water to the poultry methacompost pure has the lowest water availability, but its ability to retain water is very close to the old peat. The restricted at 10% of methacompost poultry and 10% compost forestry partial incorporation seems optimal under the experimental conditions considered.

**Keywords:** Modern nursery, Growth substrate, Methacompost poultry, Compost forestry, Physical quality, Water behavior.

## INTRODUCTION

Plusieurs études ont montré que les composts, produits de divers déchets (fumiers d'animaux, écorces de pin, déchets verts) ont des effets bénéfiques dans les systèmes de production en pépinières (Kahn et al., 2005) et pourraient ainsi servir comme substitut partiel ou total de la tourbe dans les substrats de culture (Van Der Gaag et al., 2007), afin de réduire les coûts de production des substrats et tout en respectant les normes d'une agriculture durable (Hoitink et al., 1997). En Tunisie, l'utilisation du compost comme substrat horticole pour la production des plants n'est pas encore bien pratiquée par les producteurs qui comptent toujours sur la tourbe importée (Kerkeni, 2008).

La tourbe couramment utilisée dans la fabrication des substrats horticoles est une ressource non renouvelable (Gauthier et al., 1998 ; Van Der Gaag et al., 2007). Face à ce constat, quelques orientations méritent d'être discutées. Il serait intéressant de développer la recherche de produits alternatifs d'origine naturelle ou manufacturée, fibreux ou granulaires et d'inciter à l'emploi des produits de substitution partielle, qui sans perdre les avantages de la tourbe, permettent d'en limiter les quantités employées.

Le digestat, Co-produit secondaire de la Biométhanisation, peut être utilisé comme matière première pour le compostage de déchets organiques solides

(fientes de volailles, fumiers de bovins), comme il peut être épandu directement sur les sols agricoles comme fertilisant. Le conditionnement de ce digestat permet l'obtention d'un digestat solide, appelé méthacompost et d'un digestat liquide, appelé jus de process (M'Sadak et al., 2010; M'Sadak et al., 2011).

Les pépinières modernes installées ces dernières années se dirigent de plus en plus vers le remplacement de la tourbe par les produits issus des traitements biologiques de la biomasse animale (méthacompost avicole) et/ou végétale (compost sylvicole brut). Cette solution intéressante présente certaines limites concernant les qualités physique, hydrique et chimique. En effet, la qualité et la composition du substrat de culture jouent un rôle important dans l'obtention des plants de qualité. Actuellement, on recherche à utiliser un compost de bonne porosité totale, d'aération et de rétention en eau et possédant une capacité de retenir et rendre disponible pour le plant les éléments nécessaires pour sa croissance (M'Sadak et al., 2012a). 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. 2013).

Dans cette vision, M'Sadak et al. (2014a) ont entrepris un travail expérimental qui s'est intéressé à une tentative d'optimisation physico-hydrigue du compost sylvicole, produit au niveau de la pépinière forestière moderne de Chott-Mariem (Sousse, Tunisie) 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 même, M'Sadak et al. (2014b) ont tenté d'optimiser physico-hydrigiquement le compost sylvicole en question, en ayant recours à 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). Une telle substitution partielle a permis d'améliorer 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. La disponibilité en eau a été la contrainte majeure pour le substrat de référence CSB.

Dans le même esprit, la présente étude se propose de déterminer certains critères de qualité physico-hydrigue de quelques substrats confectionnés à base de tourbe en mélange avec Méthacompost Avicole (MCA) et/ou Compost

Sylvicole Brut (CSB), s'avérant utiles pour une meilleure valorisation agronomique en pépinière maraîchère. Il s'agit d'une substitution partielle de la tourbe importée (substrat de référence) par le MCA et/ou le CSB, produits localement.

## **MATERIEL ET METHODES**

### **Substrats mis à l'essai**

Dans l'ensemble, douze substrats de culture (trois purs et neuf à base de mélange) ont été considérés et analysés en grande partie à propos de leurs propriétés physiques et hydriques.

#### ***Substrats purs***

##### **Tourbe brune**

Il existe différents types de tourbes caractérisées par leurs diverses origines et compositions botaniques (Zuhang et al., 1984), par le degré de décomposition et la granulométrie (Michel, sd). La tourbe utilisée lors de cette étude est de la tourbe brune de type KLASMANN.

##### **Compost sylvicole brut**

Le compost utilisé lors de cette investigation est du CSB, produit sur la plateforme de compostage rattachée à la pépinière forestière moderne de Chott Mariem, à partir de la mise en fermentation aérobie du rebroyat des branches fraîches d'*Acacia cyanophylla*, obtenu à partir d'un double broyage séparé (simple broyage à couteaux suivi d'un simple broyage à marteaux avec grille de calibrage à trous ronds de 30 mm de diamètre).

##### **Méthacompost avicole**

Le MCA (sous-produit solide), objet de cette recherche, est issu de la biométhanisation industrielle de la biomasse avicole. Le digesteur industriel, produisant ce résidu, fait partie d'un projet pilote de production de biogaz localisé à Hammam Sousse (région de Sousse). Ce projet a été réalisé en 2000 dans le cadre de la nouvelle stratégie adoptée par l'Agence Nationale des Énergies Renouvelables (ANER) qui vise le développement des systèmes industriels de biogaz. Selon ALCOR et AXENNE (2003) et M'Sadak et al.

(2012a). Il s'agit d'un digesteur d'une capacité de 300 m<sup>3</sup>, alimenté en continu quotidiennement par 10 m<sup>3</sup> de substrat composé d'environ de 2/3 d'eau et 1/3 de fientes avicoles.

### **Substrats à base de mélange**

Le choix du substrat dans la production maraîchère hors sol est très important. Présentement, la tourbe importée est la principale composante des substrats utilisés en pépinière grâce à ses caractéristiques attirantes. Elle possède une rétention très élevée, c'est pourquoi d'autres matières y sont souvent adjointes en mélange.

À partir de trois substrats purs cités précédemment, on a conçu neuf mélanges, tout en substituant partiellement la tourbe par le MCA et/ou par le CSB (% volume). On a utilisé différentes combinaisons de Tourbe, du MCA et du CSB pour voir si le MCA pourrait réellement être un substitut de la Tourbe. Les mélanges testés sont répartis en deux séries ( de SB à SE et de SA' à SE') présentées dans le tableau 1.

**Tableau 1** : Identification et composition de mélanges confectionnés

| <b>Mélanges T + MCA</b> |            |              | <b>Mélanges T + MCA + CSB</b> |            |              |              |
|-------------------------|------------|--------------|-------------------------------|------------|--------------|--------------|
| <b>Substrats</b>        | <b>% T</b> | <b>% MCA</b> | <b>Substrats</b>              | <b>% T</b> | <b>% MCA</b> | <b>% CSB</b> |
| <b>SA</b>               | 100        | 00           | <b>SA'</b>                    | 80         | 10           | 10           |
| <b>SB</b>               | 90         | 10           | <b>SB'</b>                    | 70         | 20           | 10           |
| <b>SC</b>               | 80         | 20           | <b>SC'</b>                    | 60         | 20           | 20           |
| <b>SD</b>               | 75         | 25           | <b>SD'</b>                    | 50         | 20           | 30           |
| <b>SE</b>               | 70         | 30           | <b>SE'</b>                    | 50         | 30           | 20           |

### **Propriétés physiques et hydriques**

Les principales propriétés physiques et hydriques que devrait posséder un substrat de culture sont relatées ci-après avec une brève description de chacune d'elle. Trois échantillons de chaque substrat ont été prélevés et leur analyse a servi pour la détermination de différents paramètres physico-hydriques des substrats. Les analyses physiques et hydriques ont été accomplies à l'Institut de l'Olivier de Sousse (Laboratoire des Systèmes de Productions Oléicoles et Fruitières).

### **Masse volumique apparente sèche**

La masse volumique apparente sèche (mva) correspond à la masse de l'unité de volume à l'état sec. La mesure de mva a été réalisée sur les divers substrats mis en œuvre. Elle consiste à mettre les échantillons dans l'étuve à une température de 105°C pendant 24 H pour déterminer la masse sèche (AOAC, 1990). Elle est déterminée en appliquant la formule suivante :

$$mva (g / cm^3) = \frac{Ms - Mc}{V}$$

Avec : Ms : Masse sèche de l'échantillon (g) ; Mc : Masse de la capsule vide (g) ; V : Volume de la capsule (100 cc).

### **Porosité totale**

La porosité ou l'espace poral correspond à l'évaluation des espaces vides par rapport à l'encombrement total d'un substrat (Morard, 1995 ; Michel, sd). La Porosité totale (Pt) est exprimée par un rapport entre le volume d'espaces vides (Vv) au volume total ou volume apparent (Va). Le volume apparent correspond à la somme du volume de la phase solide et du volume des vides. La Pt est difficile à mesurer directement. Il en existe, en effet, plusieurs formulations qui diffèrent légèrement les unes des autres (Morard, 1995). Parmi lesquelles, on a employé celle de Gras utilisée par Mustin (1987) et qui est exprimée par la formule ci-après :

$$Pt(\%) = 95,83 - 32,43mva$$

### **Matière Sèche**

La mesure de la MS se fait par rapport à la matière à son état initial. En effet, les substrats de culture, objets de cette étude, ont subi une phase de dessèchement à l'air ambiant. L'échantillon (20 g) est séché à l'étuve à 105°C pendant 24 H (AOAC, 1990). Le pourcentage de MS est calculé par la formule suivante :

$$MS(\%) = 100 \times P_1 / P_2$$

Avec : P<sub>1</sub> : Poids sec après séchage à l'étuve (g) ; P<sub>2</sub> : Poids avant séchage (g).

### **Humidité Spécifique**

La méthode utilisée est celle normalisée par l'ISO 11465 (1993). Celle-ci consiste en un prélèvement d'une quantité maximale de l'échantillon, de

préférence supérieure à  $100,0 \pm 0,1$  g et sa mise à l'étuve à  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à poids constant, pendant environ 24 H. L'Humidité Spécifique (HS) du substrat est déterminée en appliquant la formule suivante :

$$HS(\%) = 100 \times \frac{P_1 - P_2}{P_2}$$

Avec :  $P_1$  : Poids humide avant séchage à l'étuve (g) ;  $P_2$  : Poids sec après séchage à l'étuve (g).

### ***Teneur en eau à la Saturation***

La Teneur en eau à la Saturation (TS) est déterminée en appliquant la formule suivante :

$$TS(\%) = 100 \times \frac{P_2 - P_1}{P_1}$$

Avec :  $P_1$  : Poids avant saturation (g) ;  $P_2$  : Poids après saturation (g).

La simple expression de la teneur en eau du substrat de culture ne suffit pas pour renseigner sur la quantité d'eau mise à disposition de la plante. L'étude des variations de teneurs en eau en fonction du potentiel matriciel, couramment appelé «courbe de pF», permet d'obtenir des informations complémentaires.

### **Détermination des propriétés des flux d'eau et d'air des substrats**

#### **Utilité des courbes pF**

L'énergie avec laquelle l'eau est retenue par le milieu poreux va dépendre de la qualité du substrat, mais aussi de son humidité : pour chaque matériau, on obtient une courbe caractéristique (Gras, 1981 ; Gras & Aigus, 1982) couramment appelée courbe de pF (potentiel of Free energy).

La construction de ces courbes pour chaque type de substrat permet de les comparer et de les caractériser en fonction de leurs propriétés hydriques. Dans le domaine de la croissance des plantes, les forces de succion exercées par les racines correspondent à une hauteur d'eau comprise entre 0 et 20 cm. En fait, on utilise le logarithme décimal de cette succion (Gras, 1981 ; Morard, 1995 ; Morel et al., 2000) :

$$\text{Log}10 = pF$$

### **Établissement au laboratoire des courbes pF**

Pour établir des courbes de pF à des fins horticoles, on opère le plus souvent par dessiccation d'un produit qui a été au préalable amené à saturation complète. On soumet alors l'échantillon à une pression gazeuse ou une succion correspondant à la valeur choisie. L'eau en excès par rapport à cette valeur de pression est évacuée au travers d'un milieu poreux 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. L'essai consiste à mettre les échantillons dans le dispositif expérimental (table à succion). Les échantillons des substrats sont mis en contact avec une colonne d'eau par l'intermédiaire d'une couche de sable saturée d'eau. Rappelons que l'on opère par dessiccation d'un produit qui a été au préalable amené à saturation complète et on soumet alors l'échantillon à une succion correspondant à la valeur choisie. Le potentiel hydrique de l'échantillon se met en équilibre avec la pression hydrostatique de la colonne d'eau. Une telle technique est physiquement limitée à -100 mbar (pF 2) : Un bac à sable pour la détermination du pF de 0 à 2. Ces potentiels hydriques sont obtenus en créant une série de dépressions et surpressions. Le pesage de chaque échantillon après ajustement rend le contenu d'eau pour chaque tension. Chaque substrat est représenté par deux capsules dont chacune représente une répétition.

### **Capacités de rétention en eau et en bac**

La détermination de la quantité d'eau d'un substrat disponible pour les racines des plantes est un phénomène relativement complexe. Pour aboutir à une estimation réaliste, plusieurs paramètres doivent être pris en considération : teneur en eau, ...

Après saturation totale d'un substrat par l'eau, on laisse drainer librement tout le liquide excédentaire. On aboutit à une stabilisation de l'ensemble du poids du substrat et de l'eau retenue, appelée capacité de rétention en eau. Elle correspond à l'équilibre entre les forces capillaires et la force de gravité (par différence de pesée avec le matériau sec) pour obtenir la teneur en eau. Lorsqu'ils sont placés dans des récipients, les substrats constituent des massifs poreux, qui se terminent de façon abrupte à leur base, à la différence de beaucoup de sols en place. Cette particularité modifie la rétention d'eau dans le massif, ce qui a nécessité l'introduction en horticulture d'une nouvelle notion, la capacité en bac. La capacité en bac est l'humidité moyenne d'un massif de substrat qui a été préalablement saturé et laissé en drainage libre, une fois que l'écoulement de l'eau sous forme liquide a cessé (Gras, 1981).

L'Humidité Volumique (HV) à pF 1, par exemple, est déterminée en ayant recours à la formule suivante :



$$HV \text{ à } pF1(\%vol) = \frac{\text{Poids à } pF1 - \text{Poids sec total}}{\text{Volume de la capsule}}$$

### Teneur en air

D'après Michel (sd), l'aération du matériau est appréciée par la capacité en air qui correspond à l'eau non ou très peu retenue dans la porosité la plus grossière et donc rapidement libre à l'air (potentiel de l'eau < -1 kPa). Selon Gras (1981), la teneur en air est déterminée après établissement de la courbe pF. Elle est complémentaire de la teneur en eau, puisque ces deux fluides se partagent l'espace poral. On a donc la relation ci-après donnée par Morard (1995) :

$$Pt(\%vol) = \text{Teneur en eau } (\%vol) + \text{Teneur en air } (\%vol)$$

D'où :

$$\text{Teneur en air à } pF1(\%vol) = Pt(\%vol) - HV \text{ à } pF1(\%vol)$$

### Disponibilité en Eau

Michel (sd) définit la Disponibilité en Eau (DE) comme étant les quantités d'eau retenues dans la porosité du substrat pour des forces de rétention compatibles avec les capacités d'extraction racinaire définies pour une gamme de potentiels comprise entre -1 kPa (pF 1) et -10 kPa (pF 2). Elle est déduite, d'après la relation suivante :

$$\text{Disponibilité en Eau (DE)} = \text{Teneur en eau à } pF 1 - \text{Teneur en eau à } pF 2$$

Afin de juger d'une façon pertinente les substrats testés, il est important de rappeler les caractéristiques théoriquement « optimales » d'un substrat de culture qui sont indiquées dans le tableau 2 ci-après.

**Tableau 2 :** Principales caractéristiques physiques et hydriques d'un support de culture (Lemaire et al., 1989 ; Morel et al., 2000)

| Paramètres  | Normes à respecter |
|---|--------------------|
| <b>Porosité totale</b> (% Volume)                     | > 88               |
| <b>Capacité de rétention en air à pF 1</b> (% Volume) | 20 à 30            |
| <b>Capacité de rétention en eau à pF 1</b> (% Volume) | 55 à 70            |
| <b>DE</b> (% Volume)                                  | 20 à 30            |

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Détermination de la masse volumique apparente sèche et de la porosité totale

Les systèmes horticoles de culture hors sol se caractérisent par un volume de dimensions réduites mis à disposition des racines (pot ou conteneur). En raison de cette spécificité, et ainsi de la faible inertie thermique, hydrique et minérale de ces systèmes de culture, le support de culture doit toutefois assurer (comme pour le sol en place) les fonctions physiques d'ancrage de la plante (Michel, sd). Un des principaux rôles du substrat est de fournir un support à la plante. Il doit donc être suffisamment lourd pour permettre la stabilité de la plante et des contenants en culture sans toutefois être trop lourd, rendant la manutention difficile et augmentant les coûts de transport (Comtois et Légaré, 2004).

Les résultats obtenus (Tableau 3) montrent que la plupart des substrats confectionnés sont suffisamment lourds pour permettre une meilleure stabilité des plants, et entre autres, la résistance mécanique des substrats. Il reste à vérifier les constatations relevées par Lamhamdi et al. (1997) qui affirment que la mva a des conséquences directes sur la croissance et la morphologie des racines. Les valeurs relevées de la mva varient fortement entre les différents substrats. Elles oscillent entre 0,18 et 0,44 g/cm<sup>3</sup>, or la mva d'un substrat de culture varie habituellement entre 0,08 et 0,40 g/cm<sup>3</sup>. Les mélanges confectionnés présentent, à l'exception de SD (75% T + 25% MCA) et SE (70% T + 30% MCA), des valeurs conformes aux normes exigées pour les supports de culture. Morel et al. (2000) considèrent un substrat comme satisfaisant si sa mva varie entre 0,10 et 0,30 g/cm<sup>3</sup>. De ce fait, tous les mélanges confectionnés à l'exception de SA' (80% T + 10% MCA + 10% CSB), au contraire, ne respectent pas les normes établies.

Il n'existe pas, au préalable, des risques de tassement. En effet, le tassement correspond à une dégradation des propriétés structurales initiales en fonction du temps. Cette évolution aboutit à une zone au fond du substrat où les racines ont des difficultés à pénétrer et où l'oxygénation est impossible.

La tourbe à l'état pur (SA) présente la mva la plus faible. Elle possède ainsi une structure légère qui favorise l'ancrage des racines. Le MCA, par opposition à la tourbe, présente une mva très élevée et qui dépasse largement les valeurs habituelles relatives aux supports de culture. Ce matériau peut être classé comme substrat lourd. Il présente le degré de compactage le plus important. Il ne peut pas dans aucun cas être utilisé à l'état pur, car il peut poser des contraintes majeures quant à son emploi pour l'élevage hors sol des plants maraîchers.

La compaction ou compactage du substrat est exprimée par la masse volumique apparente. Cette variable est fortement influencée par la nature des particules. Selon FAC (2005), pour le cas d'un compost destiné à être utilisé en

horticulture, la masse volumique sèche doit être comprise entre 0,434 et 0,836 g/cm<sup>3</sup>. Le MCA, dans ce cas, est considéré comme bon substrat et peut être employé par conséquent convenablement en agriculture.

Selon N'Dayegamiye et al. (1994), cité par Kerkeni (2008), les valeurs élevées de la densité sont en relation avec la maturité. Elle augmente avec la maturité du compost.

La Pt des substrats peut être aussi influencée par les dimensions des particules, les propriétés physiques et chimiques et la nature du mélange. La qualité et la composition du substrat de culture jouent un rôle important dans l'obtention des plants de qualité. D'après Morard (1995), actuellement, on recherche à utiliser un compost de bonnes Pt, Porosité d'aération (Pa) et Porosité de rétention (Pr). Un bon substrat de culture possède un ordre de grandeur de la Pt de 80 à 90% pour la tourbe brune (Gras & Aigus, 1982), mais elle peut atteindre 95% (CPVQ, 1993 ; Morel et al., 2000). Les valeurs obtenues de Pt pour les divers substrats (Tableau 3) donnent, ainsi, une pleine satisfaction. Elles sont supérieures à 81%.

Le MCA à l'état pur possède une insuffisante Pt qui peut être due à ses dimensions granulométriques relativement grosses (par manque d'affinage). Dans ce cas, Pr peut diminuer et Pa peut augmenter. L'addition du MCA et/ou du CSB au substrat de culture diminue Pt. Le substrat le plus poreux (85%) est celui formé de 90% tourbe et 10% MCA. Le substrat qui présente Pt la plus basse (81%) est constitué de 70% tourbe et 30% MCA. Ces résultats s'accordent avec les travaux de Shen et Gladis (2006) cités par Kerkeni (2008) qui ont trouvé que l'augmentation du volume d'un compost de pin dans un substrat de culture basé sur la tourbe diminue Pt du milieu de 73 à 58%.

Il n'existe pas jusqu'à présent des matériaux réellement alternatifs à la tourbe en termes de qualité physique. Néanmoins sont disponibles des nombreux produits complémentaires (notamment pour permettre une meilleure aération du substrat) qui peuvent être ajoutés à celle-ci et qui contribuent donc indirectement à une diminution de l'utilisation de la tourbe dans les supports de culture horticoles (Michel, sd). Les résultats de la mva comme ceux de la Pt peuvent être influencés par la variation du degré de compactage d'un substrat à l'autre lors du remplissage des capsules utilisées pendant la réalisation de tests correspondants.

**Tableau 3** : Résultats de l'évaluation de la masse volumique apparente et de la porosité totale

| Substrats | mva (g/cm <sup>3</sup> )       | Pt (%)                          |
|-----------|--------------------------------|---------------------------------|
| MCA       | 0,78 ± 0,03 <sup>a</sup>       | 70,54 ± 0,91 <sup>h</sup>       |
| SA        | 0,18 ± 0,00 <sup>h</sup>       | 90,00 ± 0,00 <sup>a</sup>       |
| SB        | 0,33 ± 0,04 <sup>g</sup>       | 84,97 ± 1,15 <sup>b, c</sup>    |
| SC        | 0,38 ± 0,01 <sup>d, e, f</sup> | 83,67 ± 0,23 <sup>c, d, e</sup> |
| SD        | 0,44 ± 0,02 <sup>b, c</sup>    | 81,73 ± 0,69 <sup>f, g</sup>    |
| SE        | 0,46 ± 0,02 <sup>b</sup>       | 80,91 ± 0,45 <sup>g</sup>       |
| SA'       | 0,30 ± 0,02 <sup>g</sup>       | 86,11 ± 0,46 <sup>b</sup>       |
| SB'       | 0,35 ± 0,01 <sup>e, f</sup>    | 84,48 ± 0,45 <sup>c, d</sup>    |
| SC'       | 0,35 ± 0,02 <sup>e, f, g</sup> | 84,65 ± 0,69 <sup>b, c, d</sup> |
| SD'       | 0,39 ± 0,03 <sup>c, d, e</sup> | 83,18 ± 0,92 <sup>d, e, f</sup> |
| SE'       | 0,40 ± 0,01 <sup>c, d</sup>    | 82,86 ± 0,46 <sup>e, f</sup>    |

### Appréciation de quelques propriétés hydriques initiales

Les résultats relevés (Tableau 4) affirment que la tourbe est un substrat riche en eau, c'est pour cela que son HS est relativement importante par rapport aux divers autres substrats. Le MCA, au contraire, est considéré comme substrat sec. Il faut tenir compte que les trois substrats purs (Tourbe, MCA et CSB) ont subi, avant la confection des substrats, une étape de séchage à l'air ambiant. Ce séchage influe considérablement sur les résultats obtenus pour le MCA que pour les autres substrats. Il s'agit donc de l'humidité minimale que peut contenir un substrat.

Le MCA employé comme substitut partiel de la tourbe est un facteur de variation d'une grande importance. Son intégration, même en faible pourcentage, a un effet hautement significatif et considérable sur l'humidité des substrats. Les divers mélanges se comportent tous presque de la même manière. L'analyse statistique montre que la composition du substrat a un effet hautement significatif sur ce paramètre. Il y a une chute remarquable des valeurs de l'humidité, suite au recours à la pratique des mélanges. Elle est de l'ordre de 73,2% suite à l'introduction de 10% du MCA avec la tourbe. En effet, les valeurs relatives aux substrats confectionnés sont très proches de celles obtenues pour le MCA (6,7%), malgré que ce matériau soit présent en faible proportion. L'emploi du MCA nécessite de tenir compte de ses caractéristiques

et de prendre les précautions nécessaires. La faible humidité des substrats exige d'adapter des arrosages fréquents à faible dose afin d'assurer une alimentation hydrique optimale à la plante.

Les teneurs en MS obtenus varient entre 69,8 et 93,3%. Selon les directives de l'ASIC, rapportées par Fuchs et al. (2001), un bon compost doit avoir une teneur en MS > 50% (% MF). En se référant à ces normes, tous les substrats étudiés répondent aux normes. Par contre, en se référant aux normes admises par FAC (1995), la teneur en MS doit être comprise entre 40,8 et 71,1% (% MF), ce qui laisse suggérer que cette teneur en MS dépend, outre de l'état de maturité et de la proportion des éléments composants le substrat.

**Tableau 4 :** Pourcentages relevés de matière sèche et de saturation

| <b>Substrats</b> | <b>HS (%)</b> | <b>MS (%)</b>                   | <b>TS (%)</b>  |
|------------------|---------------|---------------------------------|----------------|
| <b>MCA</b>       | 6,69          | 93,31 ± 0,15 <sup>a</sup>       | 99,02 ± 1,74   |
| <b>CSB</b>       | -             | -                               | 251,76 ± 9,59  |
| <b>SA</b>        | 30,22         | 69,78 ± 0,93 <sup>f</sup>       | 164,06 ± 3,17  |
| <b>SB</b>        | 10,4          | 89,60 ± 0,13 <sup>e</sup>       | 338,86 ± 4,23  |
| <b>SC</b>        | 8,21          | 91,79 ± 0,26 <sup>b, c</sup>    | 282,21 ± 9,25  |
| <b>SD</b>        | 9,82          | 90,18 ± 1,38 <sup>d, e</sup>    | 243,81 ± 0,33  |
| <b>SE</b>        | 7,43          | 92,57 ± 0,04 <sup>a, b</sup>    | 205,81 ± 0,62  |
| <b>SA'</b>       | 8,82          | 91,18 ± 0,39 <sup>c, d</sup>    | 322,02 ± 0,93  |
| <b>SB'</b>       | 7,95          | 92,05 ± 0,141 <sup>b, c</sup>   | 279,35 ± 4,96  |
| <b>SC'</b>       | 7,82          | 92,18 ± 0,04 <sup>a, b, c</sup> | 269,00 ± 14,05 |
| <b>SD'</b>       | 8,85          | 91,15 ± 0,07 <sup>c, d</sup>    | 239,92 ± 9,33  |
| <b>SE'</b>       | 8,33          | 91,67 ± 0,18 <sup>b, c</sup>    | 206,26 ± 9,94  |

On remarque que les taux de MS sont plus élevés chez les substrats de la deuxième série. L'ajout de CSB a donc un effet très considérable sur l'élévation du taux de MS. Pour le cas d'un compost seul, si ses teneurs dépassent 50%, elles s'expliquent par l'état de maturité et donc de leur dessèchement en cas des composts âgés. Les résultats peuvent s'expliquer encore par le fait, qu'au cours du compostage et avec l'augmentation de la température (phase thermophile), les composts perdent une grande quantité d'eau et se dessèchent. L'état sec du CSB peut être apprécié même par toucher.

La tourbe, considérée comme substrat rétenteur d'eau, présente le taux de saturation (% TS) le plus faible par rapport aux autres substrats. Ce résultat peut être expliqué par l'humidité très élevée de la tourbe employée lors de

l'expérimentation réalisée. C'est une tourbe fraîche ne subissant aucun traitement préalable, alors que les autres substrats ont subi une phase de dessèchement. Il s'agit donc du % TS minimal que peut posséder la tourbe. Le séchage favorise l'augmentation du % TS du substrat. Le % TS le plus élevé est relatif donc à SB (339%) ayant le pourcentage de présence de la tourbe le plus élevé (90%). Le % TS le plus bas est enregistré dans le cas du MCA (99%). D'après les résultats obtenus, l'intégration du MCA et/ou du CSB permet de réduire le % TS des substrats (Tableau 4). Le recours au mélange d'un substrat rétenteur avec un autre aérateur présente une solution convenable quant à l'amélioration des caractéristiques hydriques du substrat.

### **Principales caractéristiques hydriques déduites à partir des courbes pF**

#### ***Teneurs en eau***

Le substrat a pour rôle de maintenir un environnement propice pour la germination et la croissance des jeunes plantules. Il doit répondre à certains critères tels que une bonne capacité de retenir l'eau, à drainer et à se réhumidifier facilement (Zuhang et al., 1984). L'emploi d'un substrat de culture performant s'avère donc indispensable. Selon Blanc (1987), pour avoir un tel substrat, il faut bien maîtriser auparavant les paramètres de porosité (Pa et Pr).

La tourbe est largement employée en pépinière comme un composant principal des substrats de culture grâce à sa grande capacité de rétention d'eau (Leclerc, 2001). La tourbe, utilisée lors de cette étude, est caractérisée par une rétention en eau moyenne égale à 52,25%.

L'analyse statistique relatée (Tableau 5) révèle que la composition du substrat et le type de mélange ont un effet significatif sur la variation de la teneur en eau du substrat. C'est l'addition du MCA ou du CSB qui a un effet sur l'augmentation de la teneur en eau. Le MCA présente une capacité de rétention en eau très proche de celle de la tourbe. Il existe une différence, de la capacité de rétention en eau à pF 1, entre la tourbe seule employée comme Témoin (SA) et les divers substrats confectionnés. L'introduction du MCA permet d'améliorer considérablement les teneurs en eau des substrats. Tous les substrats à base de mélange (T + MCA) répondent aux normes exigées par Morel et al. (2000) qui donnent une fourchette allant de 55 à 70%. Ils sont considérés donc comme des bons supports de culture en termes de capacité de rétention en eau. Les résultats sont expliqués par le fait que le MCA et la tourbe sont considérés comme des substrats rétenteurs. Leur mélange favorise la rétention d'eau, d'où la nécessité du recours à leur mélange avec un substrat aérateur tel que le CSB qui a permis de réduire davantage la teneur en eau des substrats impliqués (Tableau 5). Dans ce cadre, il est à noter qu'aucun substrat n'a toutes les qualités recherchées. Certains producteurs ou expérimentateurs utilisent des mélanges, dont le plus courant est un matériau à faible capacité de rétention en eau avec un autre ayant

une bonne capacité de rétention. D'autres préfèrent un seul matériau, dont ils connaissent bien les qualités et les défauts (Zuhang et al., 1984), tel que la tourbe.

**Tableau 5 :** Effet de différentes combinaisons sur les teneurs en eau

| <b>Substrats</b> | <b>Teneur en eau<br/>à pF 1 (%)</b> | <b>Teneur en eau<br/>à pF 2 (%)</b> | <b>DE (%)</b>                  |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>MCA</b>       | 54,35 ± 0,02 <sup>f, g</sup>        | 49,25 ± 0,08 <sup>c, d</sup>        | 5,10 ± 0,10 <sup>e</sup>       |
| <b>SA</b>        | 53,42 ± 1,30 <sup>g</sup>           | 46,50 ± 1,10 <sup>d</sup>           | 6,92 ± 0,20 <sup>d</sup>       |
| <b>SB</b>        | 70,71 ± 0,31 <sup>a</sup>           | 60,38 ± 1,13 <sup>a</sup>           | 10,33 ± 0,82 <sup>a</sup>      |
| <b>SC</b>        | 69,2 ± 1,20 <sup>a, b</sup>         | 60,32 ± 0,11 <sup>a</sup>           | 9,60 ± 1,08 <sup>a, b</sup>    |
| <b>SD</b>        | 66,29 ± 1,01 <sup>b, c</sup>        | 57,35 ± 0,17 <sup>a</sup>           | 8,95 ± 0,84 <sup>a, b, c</sup> |
| <b>SE</b>        | 67,46 ± 2,79 <sup>a, b, c</sup>     | 57,25 ± 2,38 <sup>a</sup>           | 10,21 ± 0,41 <sup>a</sup>      |
| <b>SA'</b>       | 60,86 ± 2,47 <sup>d, e</sup>        | 53,075 ± 1,66 <sup>b</sup>          | 7,78 ± 0,81 <sup>b, c, d</sup> |
| <b>SB'</b>       | 63,36 ± 3,15 <sup>c, d</sup>        | 53,96 ± 2,17 <sup>b</sup>           | 9,40 ± 0,98 <sup>a, b</sup>    |
| <b>SC'</b>       | 58,14 ± 2,60 <sup>e, f</sup>        | 50,88 ± 2,21 <sup>b, c</sup>        | 7,26 ± 0,39 <sup>c, d</sup>    |
| <b>SD'</b>       | 55,37 ± 0,34 <sup>f, g</sup>        | 48,08 ± 1,01 <sup>c, d</sup>        | 7,29 ± 1,34 <sup>c, d</sup>    |
| <b>SE'</b>       | 61,06 ± 1,22 <sup>d, e</sup>        | 52,95 ± 0,81 <sup>b</sup>           | 8,11 ± 0,41 <sup>b, c, d</sup> |

Le paramètre HV est très important pour la germination des semences qui nécessitent une humidité élevée durant les premiers stades de germination (Castillo et al., 2004, cité par Kerkeni, 2008). Ceci montre l'importance du choix convenable du volume de méthacompost et de compost qu'il faut rajouter au substrat (tourbe) pour favoriser les meilleures conditions de germination. Le mélange de la tourbe avec un matériau organique tel que le MCA ou le CSB pourrait diminuer, d'après les résultats, l'utilisation de la tourbe de plus de 30%. La DE (Tableau 5) d'un substrat représente la quantité d'eau retenue par le substrat et facilement utilisable par la plante. Elle doit être au moins égale à 20% (Lemaire et al., 1989), ou environ 30% pour les tourbes blondes et 25% pour les tourbes brunes (Morel et al., 2000). Elle oscille entre 6,92% (SA) et 10,33% (SB). La faible réduction de l'humidité, entre pF 1 et pF 2, influe considérablement sur les résultats de la DE qui se trouvent trop éloignés de ceux couramment retenus pour les supports de culture de qualité (en particulier, la tourbe). Ce critère de qualité présente le défaut majeur des substrats confectionnés. Les très faibles DE exigent d'adapter une irrigation fréquente et à faible dose.

Les résultats obtenus peuvent être dus à la présence du phénomène d'hystérèse. En effet, la relation entre le potentiel hydrique et la teneur en eau n'est pas univoque et monotone et peut être obtenue de deux façons, d'une part, par dessèchement ou désorption en partant de l'échantillon du substrat saturé d'eau et on applique une succion croissante pour avoir des unités faibles, et d'autre part, par humidification ou sorption en partant de l'échantillon sec que l'on humidifie progressivement.

Les échantillons de départ ont subi un léger dessèchement à l'air ambiant avant saturation et application de diverses succions. Le dessèchement à l'étuve est réalisé à la fin de l'expérience après construction des courbes de pF. Il s'agit donc des cas de dessèchement ou désorption. Il en résulte dans ce cas des tassements et des variations de porosité liées aux pertes en MS. Pour des résultats plus fiables et plus corrects, il convient, dans l'avenir, de partir d'un échantillon sec (séché à l'étuve avant de commencer l'expérience) et de suivre les différentes réponses hydriques des substrats, il s'agit dans ce cas de l'humidification ou sorption.

### ***Teneurs en air***

La teneur en air d'un milieu n'a de sens que si l'humidité est précisée. La teneur en air est minimum à la capacité en bac, si l'on exclut la phase de drainage rapide après saturation. Elle est d'une importance particulière, puisqu'elle correspond aux conditions les plus défavorables pour l'aération. Seule la capacité de rétention en air à pF 1 des mélanges SA' à SE' (Tableau 6) est conforme à la norme adoptée par Morel et al. (2000) qui exige une fourchette entre 20 et 30%. En effet, l'introduction du CSB permet d'améliorer l'aération des substrats en question par rapport aux autres mélanges. Le recours au mélange d'un ou de plusieurs constituants ensemble selon les ratios adéquats ne peut pas être une solution définitive pour optimiser les paramètres physiques et hydriques à l'échelle du substrat. On peut aussi avoir recours à l'ajustement de la granulométrie par criblage et/ou affinage.

Les résultats de l'évaluation de la porosité du MCA sont comparables à ceux du test standard de porosité réalisés sur MCAA et MCAA' (M'Sadak et al., 2012a) ou sur Méthacompost Bovin (M'Sadak et al., 2010) qui ont montré que ces méthacomposts répondent aux normes de porosités Pt et Pr, toutefois, leur Pa est moins importante et au-dessous des normes de porosité retenues pour les substrats de culture. Il s'agit donc des substrats rétenteurs et qui doivent être incorporés partiellement avec un substrat aérateur comme le CSB pour confectionner des mélanges adéquats. Devant une telle situation, le méthacompost, quelque soit son origine, ne peut être qu'un substitut partiel de la tourbe à faible proportion.

L'incorporation du MCAA et du MCAA' s'est avérée positive dans des proportions bien précises et l'orientation vers leur mélange permet un bon



équilibre entre Pr et Pa, surtout à raison de 20% avec le CSB pour la confection des substrats de culture destinés pour les pépinières forestières (M'Sadak et al., 2012a). Lors de la présente étude, l'incorporation du MCA avec la tourbe à raison de 10% a donné les meilleurs résultats de porosité.

En plus de l'approche expérimentale basée sur l'évaluation des biodisponibilités en eau (Pr) et en air (Pa) dans les substrats de culture, on peut s'attacher à développer une autre approche modélisatrice complémentaire, afin de coupler l'ensemble des phénomènes préalablement décrits et de les relier aux besoins hydriques et gazeux de la plante, en développant un modèle de circulation d'eau et d'oxygène dans les substrats au voisinage des racines.

**Tableau 6 :** Effet de différentes combinaisons sur les teneurs en air

| <b>Substrats</b> | <b>Teneur en air à pF 1</b> | <b>Teneur en air à pF 2</b>   |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| <b>MCA</b>       | 16,19 ± 0,90 <sup>d</sup>   | 21,29 ± 0,99 <sup>e</sup>     |
| <b>SA</b>        | 36,585 ± 1,30 <sup>a</sup>  | 43,51 ± 1,10 <sup>a</sup>     |
| <b>SB</b>        | 14,26 ± 0,83 <sup>d</sup>   | 24,59 ± 0,01 <sup>e</sup>     |
| <b>SC</b>        | 13,755 ± 1,42 <sup>d</sup>  | 23,35 ± 0,34 <sup>e</sup>     |
| <b>SD</b>        | 15,43 ± 1,70 <sup>d</sup>   | 24,38 ± 0,86 <sup>e</sup>     |
| <b>SE</b>        | 13,45 ± 3,24 <sup>d</sup>   | 23,66 ± 2,83 <sup>e</sup>     |
| <b>SA'</b>       | 25,25 ± 2,93 <sup>b,c</sup> | 33,03 ± 2,12 <sup>b,c,d</sup> |
| <b>SB'</b>       | 21,125 ± 2,69 <sup>c</sup>  | 30,53 ± 1,72 <sup>c,d</sup>   |
| <b>SC'</b>       | 26,51 ± 1,91 <sup>b</sup>   | 33,77 ± 1,52 <sup>b,c</sup>   |
| <b>SD'</b>       | 27,81 ± 1,26 <sup>b</sup>   | 35,1 ± 0,08 <sup>b</sup>      |
| <b>SE'</b>       | 21,8 ± 1,68 <sup>c</sup>    | 29,91 ± 1,27 <sup>d</sup>     |

## CONCLUSION

La substitution partielle de la tourbe par le méthacompost avicole (MCA) dans la confection des substrats de croissance des plants maraîchers, constitue un des objectifs recherchés lors de cette investigation. Le MCA (issu de la fermentation anaérobie) et le compost sylvicole (issu de la fermentation aérobie) peuvent être utilisables comme substituts partiels de la tourbe.

Concernant les propriétés physiques des substrats confectionnés, on peut dire que le MCA a une faible porosité d'aération (Pa) et une porosité de rétention (Pr) plus élevée (substrat rétenteur), par contre, le compost sylvicole CSB possède une Pa élevée (substrat aérateur) et une disponibilité en eau faible.

Ainsi, l'équilibre entre les teneurs en air et en eau des substrats peut être corrigé en jouant sur la taille des particules. En effet, l'incorporation du CSB s'est avérée positive dans des proportions bien précises et elle a permis un bon équilibre entre Pa et Pr.

L'utilisation de la tourbe en mélange avec du MCA et/ou du CSB comme substrats de culture s'avère encourageante et performante en termes de richesse globale en éléments fertilisants. Cette richesse est plus intéressante dans le cas de mélange tourbe et MCA. Elle pourrait constituer un bon indice pour réduire le nombre de fertigrations actuellement pratiquées lorsque la tourbe est utilisée seule à l'état pur, d'où, le double intérêt du MCA comme substrat rétenteur d'eau (rôle physique) et riche en éléments fertilisants (rôle chimique). Il est important de tenir compte de leur effet résiduel pour piloter la fertigation en pépinière hors sol.

Concernant le comportement hydrique des substrats, on peut déduire entre autres que le méthacompost avicole à l'état pur présente la plus faible disponibilité en eau, mais sa capacité de rétention en eau est très proche de la tourbe utilisée, jugée de mauvaise qualité (en stock, depuis deux ans).

On peut dire que cette étude a permis de démontrer que le méthacompost avicole possède un réel potentiel d'utilisation pour la préparation des substrats de culture et que la taille des particules (et la porosité d'air en résultant) pouvaient créer des effets apparents de phytotoxicité. Il pourrait être une alternative à la tourbe. Par contre, des recherches complémentaires sont nécessaires, afin d'évaluer l'effet de cette composante sur la croissance d'un grand nombre d'espèces végétales. Il semble que les espèces répondent différemment à l'incorporation du méthacompost avicole dans les substrats de culture.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALCOR et AXENNE (2003). Étude stratégique pour le développement des énergies renouvelables en Tunisie- Bilan des réalisations, Rapport final de l'Agence Nationale des Énergies Renouvelables (ANER), 148-157.
- ANDRE J.P. (1987). Propriétés chimiques des substrats. In: Les Cultures Hors Sol, D. Blanc, Ed. INRA, Paris, France, 127-147.
- AOAC (1990). Official methods of analysis. Edition: Association of Official Analytical Chemist (AOAC), Washington, DC, 16<sup>ème</sup> édition.
- BLANC D. (1987). Les cultures hors sol : Ouvrage collectif. Publication de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), 2<sup>ème</sup> édition revue et corrigée, 409 p.
- COMTOIS M., LÉGARÉ M. (2004). La fertilisation des plantes ligneuses cultivées en contenant. Programme Horti-2002, Direction de l'Innovation Scientifique et Technologique, 57 p.

- CPVQ (1993). Pépinières, Culture en conteneurs, Substrats. Document Technique réalisé par le Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ), Canada, 19 p.
- FAC (1995). Compost and sewage sludge : Guidelines and Recommendations of the Research Center for Agricultural Chemistry and Environmental Science with respect to waste fertilizers. EDMZ Art. In: Fuchs J.G., Baier U., Berner A., Mayer . TAMMI L., SCHLEISS K. (2006). Potential of different composts to improve soil fertility and plant health. ORBIT: Part 2, 507-517.
- FUCHS J.G., GALLI U., SCHLEISS K., WELLINGER A. (2001). Caractéristiques de qualité des composts et des digestats provenant du traitement des déchets organiques, Association Suisse des Installations de Compostage (ASIC) & Forum Biogaz Suisse, 26 p.
- GAUTHIER F., GAGNON S., DANSEREAU B. (1998). Incorporation de résidus organiques dans un substrat tourbeux pour la production d'impatiens et de géraniums, Can. J. Plant Sci. 78, 131-138.
- GRAS R. (1981). Influence de l'épaisseur des massifs poreux sur leur rétention d'eau. Capacités en bac, Rev. Sc. Sol, 171-186.
- GRAS R., AIGUS I. (1982). Quelques propriétés physiques des substrats horticoles. PHM-Revue Horticole, 51-53.
- GRAS R. (1987). Propriétés physiques des substrats. In : Cultures Hors Sol, D. Blanc, Ed. INRA, Paris, France, 79-126.
- HOITINK H.A.J., STONE A.G., HAN D.Y. (1997). Suppression of plant diseases by composts, HortScience, Vol. 32, n°2, 184-187.  
<http://hortsci.ashspublications.org/content/32/2/184.full.pdf+html>
- ISO (1993). Qualité du sol : Détermination de la teneur pondérale en MS et en eau : Méthode gravimétrique, International Standardisation Organisation (ISO), 4 p.
- KAHN B.A., HYDE J.K., COLE J.C., STOFFELLA P.J., GRAETZ D.A. (2005). Replacement of a peat-lite medium with compost for Cauliflower transplant production, Compost Science & Utilization, 13, 175-179.
- KERKENI A. (2008). Contribution à la valorisation des composts et des jus de composts : Incidence sur la fertilisation et la protection phytosanitaire de quelques espèces légumières, Thèse Agriculture Durable pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques de l'Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem (ISA-CM), Tunisie, 158 p.
- LAMHAMDI M.S., FORTINN J.A., AMMARI Y., BEN JALLOUN S., POIRIER M., FECTEAU B., BOUGACHA A., GODIN L. (1997). Évaluation des composts, des substrats et de qualité des plants (*Pinus pinea*, *Punis halepensis*, *Cupressus sempervirens* et *Quercus suber*) élevés en conteneurs. Rapport technique : Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie. Publication de DGF de Tunisie et Pampev Internationale Ltée, Québec, Canada, 121 p.
- LECLERC B. (2001). Guide des matières organiques : Fumier de bovin : p. 204-206- Fumier de poulet de chair : p. 219-221- Fiente de poule pondeuse : p.

225-227- Lisier de bovin : p. 228-230- Lisier de poule pondeuse : p. 238-240. Guide Technique de l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB), 2<sup>ème</sup> édition.

LEMAIRE F., DARTIGUES A., RIVIÈRE L.M., CHARPENTIER S. (1989). Cultures en pots et conteneurs : Principes agronomiques et applications, Éditions INRA, Paris & PHM-Revue Horticole, Limoges, France, 181 p.

MICHEL J.Ch. (sd). Les propriétés physiques des tourbes : Une qualité majeure à leur utilisation comme support de culture. Sciences Agronomiques Appliquées à l'Horticulture (SAGAH), INRA-INH, Université d'Angers, France, 7 p.

MORARD P. (1995). Les cultures végétales hors sol. S.A.R.L., Publications Agricoles AGEN, Paris, France, 9-11.

MOREL P., PONCET P., RIVIÈRE L.M. (2000). Les supports de culture horticoles : Les matériaux complémentaires et alternatifs à la tourbe, Éditions INRA, Paris, France, 84 p.

M'SADAK Y., BEN M'BAREK A., BARAKET S. (2010). Agronomic interest of the residues of rural biomethanisation applied to the bovine biomass. Displays, ISOFAR /MOAN Symposium: Soil Fertility and Crop Nutrition Management in Mediterranean Organic Agriculture, 23-25 March 2010, Sousse, Tunisia.

M'SADAK Y., BEN M'BAREK A., ZOGHLAMI R.I., BARAKET S. (2011). Caractérisation des Co-produits de la Biométhanisation appliquée à la biomasse animale, Revue des Energies Renouvelables Vol. 14, n°2, 343-356.

M'SADAK Y., BEN M'BAREK A., TAYACHI L. (2012a). Possibilités d'incorporation du méthacompost avicole dans la confection des substrats de culture à base de compost sylvicole en pépinière forestière, Revue Nature & Technologie, n° 6, 59-70.

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, n° 8, 44-54.

M'SADAK Y., ELOUAER M.A., DHAHRI M. (2013). Caractérisation physique des substrats de croissance pour une meilleure adaptation à la filière horticole en Tunisie, Revue Nature & Technologie, n° 9 (B), 27-34.

M'SADAK Y., EL AMRI A., MAJDOUB R., BEN ALI M. (2014a). Caractérisations physique et hydrique des substrats de culture des plants forestiers en conteneurs, Larhyss Journal, n° 17, 7-20.

M'SADAK Y., EL HICHRI N. (2014b). Hydro-physical characterizations of compost for optimal conception of growth substrates in forest nurseries, Larhyss Journal, N° 18, 125-141.

MUSTIN M. (1987). Le compost : Gestion de la matière organique. Édition François Dubusc, Paris, France, 954 p.

VAN DER GAAG D.J., VAN NOORT F.R., STAPEL-CUIJPERS L.H.M., DE KREIJ C., TERMORSHUIZEN A.J., VAN RIJN E., ZMORA-NAHUM SH., CHEN Y. (2007). The use of green waste compost in peat-based potting

mixtures: Fertilization and suppressiveness against soilborne diseases, *Scientia Horticulturae*, 114, 289-297.

ZUHANG H., MUSARD M., DUMOULIN J., THICOIPE J.P., LETARD M., VAYSSE P., ADAM D. (1984). Cultures légumières sur substrats : Installations et conduite, Publication du Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (CTIFL), Paris, France, 215 p.