HAL
open science

Influence des caracteristiques physiques du substrat sur les systemes racinaires de plantes ornementales cultivees en conteneurs ou en pots

Florian Lemaire, J.L. Papin

To cite this version:

Florian Lemaire, J.L. Papin. Influence des caracteristiques physiques du substrat sur les systemes racinaires de plantes ornementales cultivees en conteneurs ou en pots. Agronomie, 1989, 9 (8), pp.795-801. hal-02728406

HAL Id: hal-02728406

https://hal.inrae.fr/hal-02728406v1

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Agronomie (1989) 9, 795-801
© Elsevier/INRA

Agronomie

Influence des caractéristiques physiques du substrat sur les systèmes racinaires de plantes ornementales cultivées en conteneurs ou en pots

F. Lemaire, avec la collaboration technique de J.-L. Papin

INRA, station d'agronomie, Beaucouzé, 49 000 Angers, France

(reçu le 8 juin 1988, accepté le 30 mai 1989)

Résumé — Dans les cultures de plantes ligneuses ornementales en pots et conteneurs, la présence d'une paroi rigide provoque des déformations racinaires connues, telles que le «chignon» ou spiralisation des racines orthotropes, particulièrement du pivot; la présence de substrat peut aussi être la cause de modifications dans l'architecture racinaire.

Des essais ont été réalisés en minirhizotrons remplis de substrats à caractéristiques physiques connues : tourbe blonde, sable, perlite, vermiculite, avec des boutures de *Pelargonium* x *hortorum*.

La tortuosité et l'angle α avec la verticale sont les deux paramètres utilisés pour apprécier les modifications de la morphologie racinaire par la présence du substrat.

La tortuosité augmente quand on passe d'un matériau à structure fibreuse (tourbe) ou lamellaire (vermiculite) à un matériau de structure granulaire (sable, perlite); ce qui s'explique par une résistance à la pénétration plus élevée.

Une orientation presque verticale du système racinaire est notée dans la tourbe alors qu'elle est presque horizontale dans la vermiculite. Ces différences d'orientation sont reliées à la structure des matériaux, qui engendre une anisotropie, dans le cas de la vermiculite, et une indéformabilité plus grande, dans le cas du sable et de la perlite, qui empêchent l'action du géotropisme de se manifester comme dans la tourbe.

caractéristiques physiques – substrat – racine – plante ornementale – culture hors-sol

Summary — Influence of the physical characteristics of substrate on the root systems of ornamental plants grown in pots and containers. *In the culture of woody ornamental plants in pots and containers, the presence of a rigid wall is responsible for known root deformations such as curling; the presence of substrate can be also a factor in modifying the root system.*

Experiments were conducted in minirhizotrons filled with substrates of known physical characteristics (moss peat, sand, perlite, vermiculite) where cuttings of Pelargonium x hortorum *had rooted.*

The tortuosity and the α angle of incidence with the vertical were the two parameters used to assess modifications in root morphology by the substrate.

Tortuosity increases from peat (fibrous) or vermiculite (foliated) to sand and perlite (granular); it can be explained by a higher degree of penetration strength.

A nearly vertical direction of the root system is noted in peat whereas it is nearly level in vermiculite. Those differences in the root directions are linked to the material structure, resulting in an anisotropy in the case of vermiculite and a greater rigidity in the case of sand and perlite which prevent the geotropic action seen in peat.

physical characteristics – substrate – roots – ornamental plants – soilless cultures

INTRODUCTION

Les cultures de plantes ornementales en conteneurs connaissent un essor considérable en France depuis une dizaine d'années. Le fait de produire des plantes en imposant un volume limité au développement des racines pose des problèmes. Le système racinaire, dont la caractéristique essentielle est d'augmenter de volume, se trouve dans un support de culture remplissant plus ou moins le volume du pot ou du conteneur, dont les parois sont rigides.

Des études nombreuses ont été réalisées sur les conséquences de la présence d'une paroi rigide sur l'architecture racinaire : Riedacker (1978), Franclet (1980) ont décrit les mécanismes de déformation racinaire qui conduisent à la formation d'un «chignon» par spiralisation du

pivot chez un certain nombre d'essences ornementales et forestières; de plus, Marien & Drouin (1977) ont montré l'influence de la section et de la profondeur du récipient de culture sur l'importance du système racinaire et sur la croissance des plantes.

Le support de culture présent dans le récipient possède des caractéristiques mécaniques, physiques, physico-chimiques et chimiques qui dépendent de sa nature et de sa granulométrie. Minier & Bellion (1977) ont observé que les enracinements de plantes cultivées dans des supports de culture tels que la tourbe, le sable de Loire, la vermiculite avaient des aspects différents. Vartanian (1975) a constaté que le nombre et la ramification des racines dépendaient de l'humidité du milieu de culture : plus le milieu est humide, plus les racines sont nombreuses et ramifiées. Biran & Eliassaf (1980a) ont montré que dans le cas d'un support de culture très aéré (mélange tourbe-scories volcaniques, rapport volumique 1/3) la distribution des racines suivant la profondeur du pot était décroissante avec le genre *Erythrina* (à enracinement superficiel), alors qu'elle était croissante dans le cas du genre *Quercus* (à enracinement pivotant).

D'autre part, ces mêmes auteurs (1980b) ont mis en évidence, au moyen de différents dispositifs, l'effet favorable d'une aération renforcée d'un substrat déjà aéré (scories volcaniques – vermiculite, rapport volumique 8/2), sur le poids des racines du *Ficus benjamina* dans tout le volume du pot.

Peu de travaux ont été menés sur les effets du support de culture sur la morphologie des racines. Dans cet article, de tels effets seront mis en évidence.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel végétal

Des boutures de *Pelargonium* x *hortorum* cultivar Rapsodie prélevées sur des pieds-mères sains, indemnes de bactérioses, ont été utilisées comme modèle pour les raisons suivantes : croissance rapide des racines, importance du système racinaire développé, dimension des racines (diamètre élevé).

Matériel support de culture

Divers matériaux, utilisés couramment comme supports de culture, ont été choisis : tourbe blonde, sable de Maine, perlite, vermiculite ainsi que des mélanges binaires de certains de ces matériaux.

Les caractéristiques physiques et chimiques ainsi que la granulométrie sont données dans le Tableau I. Les techniques utilisées pour mesurer ces propriétés ont été décrites par Van Dijk (1976), Verdonck *et al.* (1977). La caractérisation physique a été obtenue par le laboratoire de Chimie et de Science du sol de l'ENITHP. L'indice de résistance à la pénétration a été mesuré à l'aide d'un pénétromètre de section 1 cm^2.

Technique de culture

Les boutures sont placées dans des minirhizotrons (Riedacker, 1974) : 2 parois transparentes en matière plastique de 60 cm de longueur et 25 cm de hauteur séparées par un espace de 1 cm d'épaisseur.

Tableau I. Caractéristiques physiques, physico-chimiques des supports de culture employés.

	Produit de base				*Mélange*		
	Sable	*Tourbe blonde fine*	*Vermiculite*	*Perlite*	*Sable + Tourbe (1/1)*	*Sable + Vermiculite (3/1)*	*Sable + Vermiculite (1/3)*
Masse volumique apparente sèche (kg · dm^{-3})	1,63	0,08	0,12	0,09	ND	1,39	0,60
Masse volumique humide (kg · dm^{-3})	2,26	0,69	0,72	0,45	1,56	2,01	1,36
Porosité	38,3	94,4	95,4	96,0	66,5	47,4	76,3
Volume eau (%) pF1	31,7	78	42,3	34,3	55	33,4	44,7
pF 1.5	5,6	53,5	37,4	28,9	30	14,0	35,5
pF 2	4,6	35,9	34,5	21,1	20,5	12,9	31,8
Volume air (%) à pF1	6,6	16,4	53,1	61,7	11,5	13,9	31,5
Rapport air/eau à pF1	0,20	0,21	1,25	1,79	0,17	0,41	0,70
Eau disponible	27,1	42,1	7,8	13,2	35,5	20,4	12,8
pH H_2O	8,7	4,6	8,1	7,5	6,1	8,5	8,2

Les supports de culture ne sont pas enrichis à l'exception de la tourbe blonde, qui a reçu du carbonate de calcium pour neutraliser l'acidité trop élevée.

Les substrats installés dans le minirhizotron sont maintenus humides par arrosages en surface; ils reposent sur une couche de sable humide. Des mesures en début et fin d'expérience ont montré que l'humidité au centre du minirhizotron n'avait pas varié. Afin d'éviter un déssèchement trop important de la surface dans le cas du sable, une couche superficielle de 0,5 cm de tourbe a été mise en place après installation des boutures.

Le minirhizotron est une technique d'observation des racines non destructive : la croissance et les déformations racinaires peuvent être suivies et dessinées sur les parois transparentes, puis photocopiées afin d'effectuer les mesures décrites dans le paragraphe suivant. Cependant, la faible épaisseur de substrat (1 cm) peut privilégier les effets d'interface entre le substrat et les parois au détriment de ceux du support de culture.

Mesures effectuées

Indice de tortuosité des racines

Cet indice, défini par Morlat *et al.* (1981), est le rapport

$$It = \frac{L - LO}{LO} \times 100$$

où L représente la longueur réelle d'une racine entre 2 points A et B et LO, la longueur du segment AB. Les distances sont mesurées à l'aide d'un curvimètre sur des racines ayant au moins 10 mm de longueur.

Angle α par rapport à la verticale

La direction des racines est repérée par rapport à la verticale au moyen de mesures d'angle α au rapporteur. Les mesures ainsi effectuées sont rangées en classes d'angles allant de 10° en 10°.

Lorsque le plus grand pourcentage de racines se trouve dans des classes d'angles inférieurs à 30°, cela caractérise une orientation orthotrope des racines, alors qu'une orientation plagiotrope pourra être reconnue quand le plus grand nombre de racines se trouve dans des classes d'angles supérieurs à 60°.

Interprétation statistique

Sur les données paramétriques, une analyse de variance a été effectuée. Sur les données non paramétriques, le test d'information proposé par Arbonnier (1966) a été employé (comparaison de la valeur de 2I à la valeur χ^2, significative au seuil de probabilité choisi).

RÉSULTATS ET COMMENTAIRES

Indice de tortuosité des racines

Dans les matériaux de base

Le Tableau II montre les résultats obtenus lors de 3 essais. Les 4 matériaux se classent ainsi suivant les valeurs croissantes de l'indice de tortuosité : tourbe; vermiculite; perlite; sable.

Il apparaît que les matériaux à structure granulaire (sable, perlite) déforment plus les racines que les matériaux à structure fibreuse ou lamellaire (tourbe, vermiculite).

La considération des masses volumiques sèches ou humides (Tableau I) ne permet pas d'expliquer l'effet plus déformant du sable et de la perlite. Par contre, l'arrangement des particules dans le volume du minirhizotron conduit à des édifices plus ou moins résistants à la pénétration des racines. Les indices de résistance à la pénétration, mesurés dans le matériau humide, sont les plus élevés dans la perlite (1,65 kg/cm^2) et le sable (1,52 kg/cm^2) et les plus faibles dans la tourbe (0,75 kg/cm^2) et la vermiculite (0,50 kg/cm^2).

Tableau II. Indice de tortuosité des racines en fonction du matériau employé comme support de culture.

	Produit de la base				*Mélange*		
	Sable	*Tourbe*	*Vermiculite*	*Perlite*	*Sable +Tourbe (1/1)*	*Sable +Vermiculite (1/3)*	*Sable + Vermiculite (3/1)*
Essai n° 1	7,14	2,15	4,56	5,23	5,02	–	–
Essai n° 2	9,77	4,19	6,25	10,16	4,44	–	–
Essai n° 3	6,43	4,51	4,56	6,14	5,33	–	–
Moyenne	7,78 a	3,61 c	5,12 bc	7,17 ab	4,93 bc	–	–
Essai n° 4	5,78	–	4,30	–	–	4,61	4,59

Les nombres suivis de la même lettre ne diffèrent pas significativement les uns des autres au seuil de 5%.

Dans les mélanges de ces matériaux de base

Les mélanges suivants ont été réalisés : sable-tourbe dans le rapport volumique 1/1; sable-vermiculite dans les rapports volumiques 3/1 et 1/3.

Si un matériau fibreux (tourbe) ou lamellaire (vermiculite) est mélangé à un matériau granulaire (sable), l'indice de tortuosité diminue (essai n° 4, Tableau II), ce qui s'explique par une diminution de la résistance à la pénétration : sable-tourbe 1/1 : 0,85 kg/cm^2; sable-vermiculite 3/1 : 1,09 kg/cm^2; sable-vermiculite 1/3 : 1,22 kg/cm^2.

Angle d'incidence des racines

Dans les matériaux purs

La Figure 1 donne, à titre d'exemple, les diagrammes fréquentiels de répartition des racines obtenus dans les 4 matériaux. Le Tableau III montre les résultats du test 2I effectué sur les diagrammes obtenus lors des 3 essais.

Le diagramme de répartition des racines dans la tourbe est différent de ceux obtenus dans la vermiculite (3 fois sur 3), dans le sable et la perlite (2 fois sur 3); le diagramme dans la vermiculite est différent de celui dans la perlite (3 fois sur 3) et dans le sable (2 fois sur 3); la perlite et le sable ont des diagrammes de répartition semblables 2 fois sur 3.

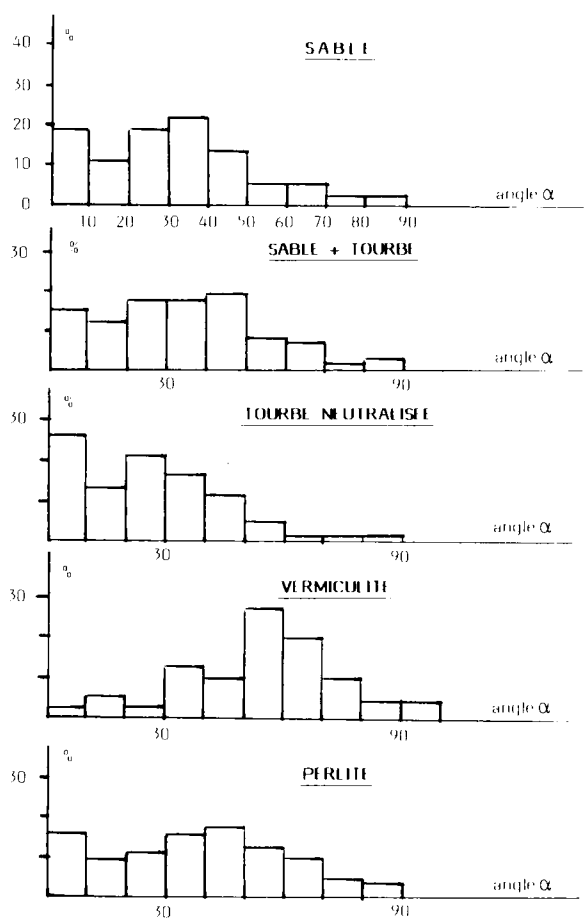

Fig. 1. Diagrammes de répartition des classes d'angle d'incidence α des racines dans les différents matériaux.

Le Tableau IV montre que, dans la tourbe neutralisée, les racines ont une orientation orthotrope, puisque, en moyenne, 52,1% des angles α ont une valeur inférieure ou égale à 30°.

– dans la vermiculite, les racines ont une orientation plagiotrope, puisque, en moyenne, seulement 20,2% des angles α ont une valeur inférieure ou égale à 30°.

– dans le sable et la perlite, les orientations sont intermédiaires, puisque, en moyenne, 38,5 et 37,8% des angles α sont inférieurs ou égaux à 30°.

Les matériaux à structure granulaire (sable et perlite) ont sensiblement la même action sur l'orientation des racines alors que les 2 matériaux à structure fibreuse ou lamellaire, tourbe et vermiculite, ont des effets opposés.

Dans les mélanges de matériaux

Du sable a été ajouté à la tourbe ou à la vermiculite. Les conséquences sur la répartition des angles α d'incidence et sur le pourcentage de racines ayant un angle α inférieur ou égal à 30° sont les suivants :

Cas de l'addition de sable à la tourbe, matériau à orientation orthotrope des racines

Le diagramme de répartition des angles α est différent de celui de la tourbe et du sable 2 fois sur 3 (Tableau III). Le pourcentage de racines ayant un angle inférieur ou égal à 30° diminue par rapport à la tourbe (Tableau IV).

Cas de l'addition de sable à la vermiculite, matériau à orientation plagiotrope des racines

La Figure 2 montre les diagrammes de répartition des racines obtenus quand on ajoute 25 et 75% de sable en volume à la vermiculite. Les diagrammes de répartition dans la vermiculite pure et dans les 2 mélanges avec le sable sont hétérogènes, les autres étant homogènes (Tableau III). Le pourcentage de racines ayant un angle inférieur à 30° augmente avec la proportion croissante de sable ajouté à la vermiculite (Tableau IV). L'effet plagiotrope de la vermiculite s'atténue et même un effet orthotrope apparaît quand 75% de sable sont ajoutés à la vermiculite.

Tableau III. Résultats du test 2 î effectué sur la répartition des angles α d'incidence mesurés dans les matériaux et leurs mélanges.

	n° essai	*Vermiculite*	*Perlite*	*Sable*	*Tourbe*	*Sable + Tourbe (1/1)*	*Sable + Vermiculite (1/3*	*Sable + Vermiculite (3/1)*
	1		≠	≠	≠	≠		
	2		≠	=	≠	≠		
Vermiculite	3		≠	≠	≠	≠		
	4						≠	≠
	1			≠	≠	≠		
Perlite	2			=	≠	≠		
	3			=	=	=		
	1				≠	≠		
	2				≠	≠		
Sable	3				=	=		
	4						=	=
	1					≠		
Tourbe	2					≠		
	3					=		

= homogène; ≠ hétérogène à 5%

Tableau IV. % d'angles α ≤ 30° dans les différents matériaux et mélanges.

	Produit de base				*Mélange*		
	Sable	*Tourbe*	*Vermiculite*	*Perlite*	*Sable + Tourbe (1/1)*	*Sable + Vermiculite (1/3)*	*Sable + Vermiculite (3/1)*
Essai n° 1	35,5	43,4	24,7	33,8	27,3	–	–
Essai n° 2	31,4	51,3	24,6	43,4	44,9	–	–
Essai n° 3	48,6	61,7	11,3	36,4	44,4	–	–
Moyenne	38,5 a	52,1 a	20,.2 b	37,8 a	38,8 a	–	–
Essai n° 4	34,4	–	22,8	–	–	33.9	56.7

Les nombres suivis de la même lettre ne diffèrent pas significativement les uns des autres au seuil de 5%.

DISCUSSION

Les notions de porosité interparticulaire et intraparticulaire ne permettent pas d'expliciter les différences observées, puisque la tourbe et la vermiculite les possèdent toutes les deux (Gras, 1985).

L'effet du pH ne peut pas être invoqué, puisque l'apport de sable à la vermiculite permet d'atténuer l'effet plagiotrope de la vermiculite sans variation de pH.

Les 2 matériaux diffèrent par des caractéristiques physiques, le rapport air/eau à pF 1 et la disponibilité en eau : la tourbe a une forte disponibilité en eau, une faible aération; la vermiculite a une faible disponibilité en eau, une forte aération. Ceci amène à considérer la dimension des pores. Si on admet avec Bourrier & Pedro (1979) que le diamètre moyen des pores est de 300 μm à pF 1 et de 30 μm à pF2, on peut donc estimer la dimension des pores ouverts et leur pourcentage, exprimés par rapport à la porosité totale de chacun des matériaux étudiés (Tableau V). Ainsi, il apparaît que la tourbe possède une répartition régulière des pores de différentes dimensions, alors que la vermiculite contient 53,1% de pores de diamètre supérieur à 300 μm, donc ouverts à pF1. De plus, la tourbe possède une proportion plus élevée (24,5%) de pores se vidant entre pF1 et pF1.5 que la vermiculite (4,9%). Or, les conditions expérimentales (base de la bouture située à 20 cm de la partie inférieure du minirhizotron) font que la bouture se trouve dans la zone à pF 1.3, où 40,9% des pores de la tourbe sont supérieurs à 100 μm et ouverts, contre 58% pour la vermiculite. Comme les racines primaires de

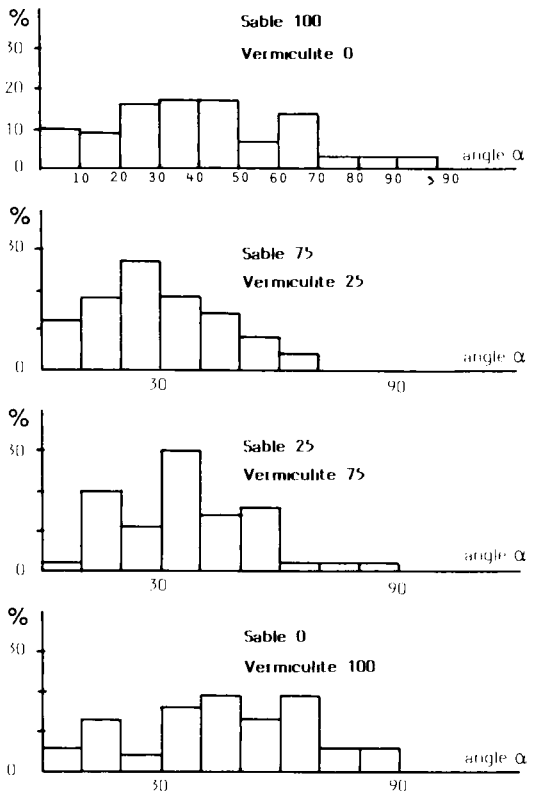

Fig. 2. Diagrammes de répartition des classes d'angle d'incidence α des racines dans différents mélanges de vermiculite et de sable.

Pelargonium ont un diamètre d'environ 200 μm, elles peuvent donc pénétrer facilement dans les 2 milieux. Le diamètre des pores n'intervient donc pas directement. La disponibilité en eau plus forte dans la tourbe que dans la vermiculite les expérimentations réalisées, car l'alimentation en eau a toujours été assurée à un niveau convenable.

L'explication peut être trouvée dans la structure des matériaux. En effet, la tourbe est formée de fibres élastiques non orientées et déformables; la vermiculite est constituée de lamelles orientées plus ou moins horizontalement lors de la mise en place dans le minirhizotron. Les matériaux granulaires (sable et perlite) sont responsables de l'orientation des racines la plus aléatoire, alors qu'ils conditionnent fortement la tortuosité par leur indice de résistance à la pénétration élevée.

Cela est montré par l'effet d'un apport de sable à la vermiculite ou à la tourbe : l'introduction de cet élément aléatoire d'orientation des racines se traduit par une diminution de l'orientation plagiotrope ou orthotrope de celles-ci.

CONCLUSION

Les matériaux employés pour la fabrication des supports de culture agissent sur la morphologie racinaire. Ainsi, les matériaux à structure granulaire déforment plus les racines (tortuosité) que les matériaux à structure fibreuse ou lamellaire, parce qu'ils opposent une résistance plus grande à la pénétration des racines.

L'orientation verticale ou horizontale des racines dépend plus de la structure du matériau que de certaines caractéristiques physiques (disponibilité en eau, rapport air/eau à pF1) ou de la

Tableau V. Répartition des dimensions des pores exprimée en pourcentage de la porosité totale des différents matériaux.

	Sable	*Tourbe*	*Vermiculite*	*Perlite*
Porosité totale	38,3	94,4	95.4	96,0
Pores > 300 μ ouverts à pF1	6,6	16,4	53.1	61,7
Pores 300 μ < ø < 100 μ se vidant entre pF1 et pF1,5	26,1	24,5	4,9	5,4
Pores 100 μ < ø < 30 μ se vidant entre pF1,5 et pF2	1	17,6	2,9	7,8

dimension des pores. La structure orientée de la vermiculite crée une anisotropie du milieu racinaire. Par contre, pour les 3 autres matériaux plus isotropes, c'est la rigidité de l'arrangement de leurs éléments dans le volume qui est responsable de l'orientation des racines : la structure granulaire indéformable empêche l'action du géotropisme de se manifester comme dans la structure fibreuse de la tourbe.

Ces déformations racinaires dues aux supports de culture, bien que moins importantes apparemment que celles provoquées par la présence de la paroi rigide du conteneur, peuvent avoir des conséquences sur le fonctionnement racinaire à court et long termes. Durant la phase de culture en pots et conteneurs, l'exploration moins complète et plus superficielle de la vermiculite par les racines peut engendrer des problèmes de nutrition minérale suivant les techniques d'irrigation utilisées. Lors de la réinsertion des plantes cultivées en conteneurs dans le milieu naturel, l'orientation des racines induite par le substrat peut conditionner le type et la rapidité de la colonisation racinaire dans le sol; ce qui peut être à l'origine de la crise dite de transplantation.

RÉFÉRENCES

Arbonnier P. (1966) L'analyse de l'information. Aperçu théorique et applications à la loi multinomiale. *Ann. Sci. For.* 23 (4), 949-1017

Biran I. & Eliassaf A. (1980a) The effect of container shape on the development of roots and canopy of woody plants. *Sci. Hortic.* 12, 183-193

Biran I. & Eliassaf A. (1980b) The effect of container size and aeration conditions on growth of roots and canopy of woody plants. *Sci. Hortic.* 12, 385-394

Bourrier G. & Pedro G. (1979) La notion de pF, sa signification physico-chimique et ses implications pédogénétiques. I. Signification physico-chimique. Relation entre le pF et l'activité de l'eau. *Sci. Sol* 4, 313-322

Franclet A. (1980) *La Motte Roulée. Utilisation des Ecorces en Pépinière Ornementale à Travers un Nouveau Système Alliant Etroitement le Conteneur et le Substrat de Culture.* Hortiforum 1980, Orléans, Hortimat (4-2) 1-17

Gras R. (1985) Propriétés physiques des substrats. *In: Les Cultures Hors Sol* ; les ATP de l'INRA. INRA, 409 pp

Marien J.N. & Drouin G. (1977) Etudes sur les conteneurs à parois rigides (leur action sur les végétaux). *Ann. AFOCEL* 137-161

Minier R. & Bellion C. (1977) Problèmes rencontrés par les pépiniéristes lors du bouturage. *Compte rendu des séminaires du Groupe d'Etude des Racines, Octobre 1977*, Angers, 5, 2e partie, 29-34

Morlat R., Puissant A., Asselin C., Léon H. & Remoué M. (1981) Quelques aspects de l'influence du milieu édaphique sur l'enracinement de la vigne. Conséquences sur la qualité du vin. *Sci. Sol* 2, 125-145

Riedacker A. (1974) Un nouvel outil pour l'étude des racines et de la rhizosphère : le minirhizotron. *Ann. Sci. For.* 31 (2), 129-134

Riedacker A. (1978) Etude de la déviation des racines horizontales ou obliques issues de boutures de peuplier qui rencontrent un obstacle : applications pour la conception de conteneurs. *Ann. Sci. For.* 35 (1), 1-18

Van Dijk H. (1976) Physical characterization of peat products and plant substrates. *In: Document Interne*, Institute for Soil fertility of Groningen, 1-10

Vartanian N. (1975) Diversité morphologique du système racinaire en relation avec l'humidité édaphique. C. R. des Séminaires du Groupe d'Etude des Racines. Octobre 1974, Nancy; Octobre 1975, Grenoble.T. 2, 166-179

Verdonck O., Cappaert I. & de Boodt M. (1977) Physical characterization of horticultural substrates. *Acta Hortic.* 82, 191-200