



Caracterisation physique et mecanique des substrats artificiels de culture

Gwendal Monnier

► **To cite this version:**

Gwendal Monnier. Caracterisation physique et mecanique des substrats artificiels de culture. DGRST-73-7-18-77, 1975. hal-02859003

HAL Id: hal-02859003

<https://hal.inrae.fr/hal-02859003>

Submitted on 8 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.

I. N. R. A.
Station de Science du Sol
CRA d'AVIGNON
84140 MONTFAVET

Gérard M O N N I E R

CARACTERISATION PHYSIQUE ET MECANIQUE DES
SUBSTRATS ARTIFICIELS DE CULTURE

Compte rendu de fin d'étude
d'une recherche financée
par la
Délégation Générale
à la recherche scientifique
et technique

Juillet 1975

Action urgente "localisation"
n° 73. 7. 18 77

RESUME SIGNALETIQUE

Les méthodes actuellement utilisées pour la caractérisation physique des substrats, qui dérivent sans adaptation de celles mises au point pour les sols, sont le plus souvent inopérantes pour des matériaux trop différents qualitativement et quantitativement et utilisés pour d'autres objectifs pratiques.

Après avoir défini les bases de méthodes mieux adaptées, on a pu les appliquer à quelques substrats-types et procéder ainsi à l'évaluation de leurs qualités ou limitations physiques et mécaniques réelles.

Un des principes essentiels découle de la grande déformabilité de la plupart des milieux poreux considérés : leur état ne peut alors être défini et leurs propriétés prévues, indépendamment de l'état de contrainte hydrique et mécanique dans lequel ils se trouvent.

TABLE DES MATIERES

Introduction	p. 1
Rappel des objectifs	p. 2
Matériel expérimental	p. 2-3
Caractéristiques physiques et hydriques	p. 3
Caractéristiques de ressuyage.	
Comportement des substrats à la dessiccation.	
Conductivité hydraulique en milieu saturé.	
Disponibilité de l'eau dans les substrats.	
Caractéristiques mécaniques	p. 7
Comportement à la consolidation	
Etude de la relaxation	
Amélioration des propriétés physiques et mécaniques d'un sol de serre	p. 8
Conclusion	p. 10

I N T R O D U C T I O N

On assiste actuellement à une extension des cultures - au sens large du terme - sur substrats artificiels. Ceux-ci peuvent être définis comme des mélanges à dosages déterminés de matériaux naturels et (ou) synthétiques dont on attend par rapport au sol des performances accrues ou plus spécialisées dans des domaines divers tels que l'urbanisation (cultures sur dalles, espaces verts,...), les activités de loisirs (terrains de sport, hippodromes,...), les productions maraichère et florale.

Leurs propriétés physiques et mécaniques déterminent très largement le comportement global des substrats. Or, actuellement, les techniques utilisées pour leur préparation et leur emploi relèvent d'approches empiriques et dispersées. Par ailleurs, les méthodes de caractérisation des substrats sont directement inspirées de celles mises au point pour les sols en place et s'avèrent insuffisantes. Enfin, une part importante en volume et en valeur des substrats utilisés dans le Sud de la France en culture maraichère et florale est constituée par de la tourbe importée du Nord de l'Europe et le coût du produit rendu sur place incite à rechercher soit des substrats de remplacement, soit, surtout, des techniques d'utilisation moins onéreuses.

Au moment de la mise en route du programme qui fait l'objet de ce compte rendu, c'est-à-dire à la fin de 1973, une première étape d'enquête sur les performances que les diverses catégories d'utilisateurs attendent des substrats artificiels du point de vue physique et mécanique avait été engagée. Elle a été poursuivie et les résultats serviront de base aux interprétations et jugements que l'on trouvera ci-après.

Une première étude bibliographique avait montré la rareté et le caractère inégal des études de portée générale dans ce domaine tant en France qu'à l'étranger. Les données les plus fréquemment disponibles concernent des résultats culturels trop globaux pour orienter une recherche d'amélioration de telle ou telle propriété.

Une collection de constituants minéraux et organiques utilisés ou possibles et de formules de substrats complexes était en cours. Les matériaux rassemblés ont été utilisés au cours de l'étude.

Enfin, il convient de rappeler que l'action concernée par l'aide à la recherche était une "Action urgente Localisation". Les commentaires concernant la situation de l'équipe décentralisée figurent au rapport scientifique annuel de 1974.

RAPPEL DES OBJECTIFS.

Les recherches rapportées ici tendaient à définir les caractéristiques physiques et mécaniques optimales des substrats de culture.

Au plan des applications, étaient visés:

- L'évaluation des substrats actuellement utilisés,
- La recherche de nouveaux substrats,
- La mise au point de techniques adaptées aux différentes utilisations envisageables.

Du point de vue de la conduite des recherches, de tels objectifs impliquaient nécessairement la mise au point d'une méthodologie complète d'évaluation avant toute tentative d'expérimentation culturale et d'optimisation de la préparation des substrats ou des techniques culturales.

C'est donc cet aspect primordial du programme qui, dans le délai limité qui nous était imparti, a fait l'objet de la plus grande partie du travail accompli.

Toutefois, nous avons abordé un thème plus directement appliqué qui concerne :

- l'amélioration physique et mécanique d'un sol de serre et dont les résultats seront présentés dans la dernière partie de ce rapport.

MATERIEL EXPERIMENTAL.

Le choix des substrats types a été orienté par le souci d'élargir la gamme de variation des comportements physiques et mécaniques principaux tout en ne retenant que des produits bien définis et susceptibles d'être fournis aux utilisateurs à qualité constante.

Nous avons ainsi retenu :

- une tourbe blonde à sphaigne d'origine allemande ;
- une tourbe noire à carex de l'Aubrac ;
- une vermiculite ;
- une perlite expansée ;
- une pouzzolane ;
- un terreau de soutrage.

Divers matériaux de référence ont été utilisés suivant les propriétés étudiées :

- un sable grossier quartzeux,
- une montmorillonite rendue monoionique Ca^{++} ,
- un sol de limon argileux.

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET HYDRIQUES.

1/ Caractéristiques de ressuyage.

Le dispositif de mesure était conçu de façon à simuler le comportement d'une couche de substrat de 15 à 20 cm d'épaisseur dans différentes conditions :

- utilisation en conteneurs ou sur fond de plastique drainé,
- utilisation sur fond de sable ou sur sol de texture moyenne.

Une synthèse des résultats obtenus fait l'objet du tableau de l'annexe I .

1₁ A saturation apparente, les porosités totales des 6 substrats étudiés sont très sensiblement plus élevées que celles des sols les plus poreux (sols argileux à smectites) dans les mêmes conditions hydriques. Elles varient de plus de 95 % (perlite, vermiculite, tourbe à sphaigne) à 73 % pour la pouzzolane. A titre de référence indiquons qu'une montmorillonite calcique à état pur ne présenterait, pour des conditions comparables, qu'une porosité de l'ordre de 65%.

1₂ En présence d'une barrière de potentiel totale à la base du massif, situation n'autorisant qu'un ressuyage par drainage gravitaire, les taux de saturation restent très élevés pour les deux tourbes et, à un moindre degré, pour le terreau de soutrage. Ces matériaux ne présentent donc pas de pores de très grande dimension ($> 100 \mu$).

Au contraire, le massif de pouzzolane caractérisé par une porosité d'arrangement des grains de très grande dimension (quelques dixièmes de mm de rayon hydraulique équivalent) manifeste un drainage libre très important puisque sa teneur volumique en eau à la fin de l'écoulement n'est plus que de 10 % environ.

La vermiculite (agrégats de 4 à 5 mm) et la perlite (grains de 2 à 5 mm) ont un comportement intermédiaire et présentent dès ce stade du ressuyage des teneurs en air satisfaisantes.

1₃ Des ressuyages successifs sur sable grossier, sable fin et limon argileux susceptibles d'exercer des pressions de succion croissantes de 10 g à plusieurs centaines de grammes permettent de distinguer 3 groupes :

- La pouzzolane, la tourbe noire et le terreau qui ne comportent que moins de 10 % de porosité correspondant à toute cette gamme de potentiel.

- La perlite et la vermiculite pour lesquels cette tranche de porosité correspond à environ 15 %.

- La tourbe blonde à sphaigne pour laquelle près de 30 % de son volume apparent est occupé par de l'eau à faible potentiel.

1₄ Teneur en air.

Au cours du ressuyage la plus ou moins grande rigidité du massif commande les entrées d'air très élevées pour la tourbe à sphaigne, la vermiculite, la perlite et la pouzzolane, faibles pour le terreau, très faibles pour la tourbe noire.

De cette partie du programme, il ressort les conclusions provisoires suivantes :

- La capacité de rétention en eau d'un substrat n'est pas - comme on peut l'admettre avec une approximation raisonnable dans le cas des sols en place - une caractéristique intrinsèque. Elle dépend des propriétés de la sous couche poreuse ou de son absence (conteneurs ou substrat sur film plastique). Cette influence dépend à son tour de la nature du substrat.

- Les spectres de porosité des matériaux étudiés sont très variables. Certains traduisent une très forte proportion de pores grossiers (pouzzolane) donc une capacité d'aération forte et une faible rétention d'eau quelque soit le mode d'utilisation à l'état pur. D'autres, dont la tourbe noire est le meilleur exemple, comprennent essentiellement des pores très fins.

- Enfin, la plupart des substrats étudiés peuvent être valablement considérés comme "rigides" en l'absence de contrainte mécanique ; telles sont la tourbe à sphaigne, la perlite, la vermiculite et la pouzzolane. Ceci implique que toute perte d'eau entraîne une entrée d'air dans les massifs qu'ils constituent. La tourbe noire au contraire manifeste un retrait notable de l'ordre de 15 à 20 % au début de son ressuyage ; l'allure du phénomène indique que les premières entrées d'air dans le massif ne s'effectuent qu'à la fin du ressuyage sur le matériau le plus fin mis en essai (un limon argileux).

2/ Comportement des substrats à la dessiccation.

Abandonnés à la dessiccation en surface à la fin de leur ressuyage sur limon argileux les substrats étudiés ont présenté trois types distincts de comportement :

- Pour des raisons opposées, la pouzzolane (porosité d'arrangement des grains très grossiers) et la tourbe noire (porosité très fine) se sont fortement desséchées sur 20 cm sans que, à l'équilibre apparent, n'apparaisse de gradient d'humidité en fonction de la profondeur.

- La perlite et la vermiculite ont présenté au contraire un phénomène de "self mulching" accusé se traduisant par une dessiccation poussée en surface alors que la couche 10-20 cm conservait 60 % de l'eau présente au début de l'évaporation.

- La tourbe à sphaigne a manifesté des propriétés intermédiaires de conductivité hydraulique à la dessiccation.

Dans les conditions de l'expérience (pouvoir évaporant de l'air compris entre 1 et 2 mm par jour) les humidités critiques vis à vis de la conductivité hydraulique des massifs qui correspondent au point d'inflexion des profils hydriques conduisent au classement suivant par ordre de conductivité décroissante :

- tourbe noire,
- tourbe blonde,
- perlite et vermiculite

3/ Conductivité hydraulique en milieu saturé.

Les mesures de perméabilité effectuées à l'issue des essais oedométriques qui seront rapportés plus loin, montrent que pour les deux tourbes et pour la vermiculite il existe une large plage de porosité dans laquelle la conductivité hydraulique est une fonction exponentielle de l'indice des vides.

Ce résultat devrait permettre d'éviter des mesures directes particulièrement délicates pour des matériaux difficiles à saturer au laboratoire.

Relation entre la conductivité hydraulique ($k \text{ cm sec}^{-1}$) et l'indice des vides (e).

Tourbe à sphaigne	$k = 6 \cdot 10^{-5} \exp(0,47e)$	$15 > e > 6$
Vermiculite	$k = 6,5 \cdot 10^{-6} \exp(0,87e)$	$10 > e > 4,5$
Tourbe noire	$k = 1,5 \cdot 10^{-9} \exp(2,9e)$	$e < 6$

4/ Disponibilité de l'eau dans les substrats.

Compte tenu des performances escomptées à partir de cultures sur substrat artificiel la notion de point de flétrissement est secondaire par rapport à celle de "réserve facilement utilisable" (R F U).

On sait qu'il s'agit là d'une notion synthétique faisant intervenir dans le cas des sols, outre les caractéristiques physiques du matériau, des paramètres climatiques tels que l'évapotranspiration potentielle et des caractéristiques liées au végétal (intensité et profondeur de l'enracinement).

Dans le cas des substrats de nombreuses observations conduisaient à penser que la pression osmotique de la solution était susceptible d'intervenir de façon déterminante dans la disponibilité de l'eau. En effet les réserves hydriques étant très importantes (cf. comportement au ressuyage ci-dessus) on pouvait s'attendre à des accroissements de concentration suffisants pour élever le potentiel osmotique jusqu'à un niveau critique.

De fait, une expérience conduite sur 6 substrats initialement enrichis à 2 niveaux, le matériel végétal étant une plantule de haricot, a montré que dans le cas général le ralentissement de la consommation en eau correspondant à l'épuisement de la R F U intervenait à des humidités supérieures dans le cas d'une fertilisation initiale élevée.

Les tableaux figurant en annexe II et III montrent toutefois que ce phénomène - qui n'apparaît pas dans le cas d'un sol (cf. comportement du limon calcaire) - présente une intensité très différente selon les substrats :

Très net dans le cas de la tourbe à sphaigne, de la perlite et du sable, il est faible pour la vermiculite et devient négligeable dans le cas de la tourbe brune.

En fait, la limitation de la disponibilité en eau par accroissement du potentiel osmotique intervient d'autant plus que l'accroissement quotidien de concentration de la solution est plus élevé. Ce dernier est de l'ordre de 15 à 20 % pour les substrats sensibles alors qu'il reste inférieur à 10 % dans le cas de la tourbe brune et du sol de limon.

Enfin, l'expérience montre clairement que les mesures d'humidité au point de flétrissement permanent - (potentiel matriciel de 16 bars) satisfaisantes dans le cas du limon et du sable - deviennent inopérantes pour les autres substrats vraisemblablement en raison des difficultés qu'on éprouve à assurer un contact satisfaisant entre ces matériaux à structure primaire grossière et la membrane de l'appareil de Richards. Cette caractéristique devra être évaluée soit par un test biologique soit par intrapolation entre les mesures sur plaques poreuses et les mesures après équilibre de tension de vapeur.

De cette partie du programme il ressort, outre la nécessité confirmée et précisée d'adapter les méthodes classiquement utilisées en Science du Sol, l'importance de l'interaction type de substrat X niveau de fertilisation sur l'alimentation hydrique de la plante.

Pour ce qui est de la comparaison entre substrats, la tourbe à sphaigne apparaît très supérieure à tous les autres dans le domaine des propriétés physiques (absence de retrait, perméabilité élevée) et hydriques (réserve et disponibilité en eau élevée).

CARACTERISTIQUES MECANIQUES.

Elles ont été évaluées à partir d'essais oedométriques.

1/ Comportement à la consolidation.

Les caractéristiques mécaniques de base (pression de consolidation, indice de compression, module oedométrique et coefficient de compression volumétrique) figurent en annexe IV et V.

Ils font apparaître la très grande facilité de consolidation de la tourbe à sphaigne opposé au caractère "terreux" à cet égard de la tourbe brune et même de la vermiculite. Enfin, on notera que la pression minimum et l'indice de compression élevés dans le cas de la perlite suggèrent l'absence d'une véritable déformation mais plutôt une rupture des grains intervenant aux environs de 165 g cm^{-2} , suivie d'un effondrement du massif.

2/ Relaxation. (cf. Annexe IV).

La suppression de la charge induit une relaxation. Celle-ci, nulle dans le cas de la perlite - ce qui confirme l'hypothèse émise au paragraphe précédent - et très faible pour la montmorillonite qui manifeste ainsi son comportement "plastique" *, est particulièrement importante dans le cas de la tourbe à sphaigne.

De plus ce dernier substrat présente une relaxation "élastique" * (relation linéaire entre la relaxation relative et la pression de consolidation) dans un domaine de contrainte très étendu. Ce n'est en effet qu'au delà de 1 kg cm^{-2} que son comportement devient "élastoplastique" *.

Cette propriété est une garantie en ce qui concerne la teneur en air des mottes d'élevage même lorsqu'elles sont fabriquées par consolidation à pression élevée dans le but de leur conférer une cohésion suffisante.

* Les termes "plastiques" et "élastiques" sont mis entre guillemets, car appliqués à des comportements à l'équilibre.

AMELIORATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES D'UN SOL DE SERRE.

Dans de nombreux cas des serres sont installées sur des sols ne présentant pas les propriétés physiques et mécaniques compatibles avec la productivité attendue d'installations couteuses en infrastructure et en entretien.

Si l'amendement des sols de serres peut se situer dans des limites économiques moins étroites que celles qui sont imposées aux terrains de grande culture, encore doit-on rechercher des solutions pratiques et efficaces et financièrement acceptables.

Pour cela nous avons comparé l'application à un sol sablo-limoneux de propriétés médiocres, de deux traitements susceptibles de réaliser ces conditions : l'un à base de fumier de bovin, l'autre d'une tourbe à sphaigne voisine de celle qui a été étudiée dans les chapitres précédents.

L'ensemble des résultats figure au tableau de l'annexe VI.

Plusieurs types d'information peuvent être retirés des données recueillies :

- Tout d'abord l'absence de production d'"humus" à partir de la tourbe - mais son maintien sous forme de fragments organiques non liés à la fraction minérale du sol.

- Ce résultat explique l'absence d'accroissement de stabilité structurale évaluée par le test spécifique de stabilité après prétraitement au benzène - dans le cas de cet amendement -.

- Le fumier de bovin, par contre, produit une matière organique liée et, corrélativement, accroît la stabilité structurale par diminution de mouillabilité (mécanisme d'action classique des matières organiques du -ou apportées au- sol).

- Par contre, la diminution de sensibilité au compactage est sensible pour les deux types d'amendement ; elle est même plus forte dans le cas de la tourbe.

Cette amélioration du comportement se retrouve au niveau de l'état physique "in situ" en fin de cycle cultural. Les deux traitements augmentent de façon significative la porosité d'assemblage élémentaire et surtout la porosité structurale.

De telles différences n'ont pas qu'une signification purement statistique. Elles correspondent à des performances physiques et mécaniques accrues. Leur explication, connue dans le cas du fumier (modification des caractéristiques hydriques et mécaniques du complexe argile-matières organiques), est dans le cas de la tourbe à rechercher à la lumière des propriétés de relaxation "élastique" mises en évidence au chapitre précédent.

Le choix entre ces deux types d'amendement ne peut être effectué dès maintenant. La durée de l'effet doit être prise en compte et plusieurs années d'expérience sont nécessaires pour cela.

CONCLUSION

L'étude d'une petite collection de substrats couvrant une large gamme de propriétés hydriques, physiques et mécaniques a permis de confirmer l'inadaptation des méthodes de caractérisation classiques en Science du sol appliquées aux substrats.

L'une des difficultés essentielles, à cet égard, tient à la déformabilité importante des milieux poreux (les tourbes et la vermiculite notamment). Contrairement à ce qui est, en première approximation, possible pour la plupart des sols, leur état ne peut être défini indépendamment de l'état de contrainte mécanique ou hydrique dans lequel ils se trouvent.

Au niveau même de l'expression des résultats, cette observation a des conséquences : c'est ainsi, par exemple, que la notion d'indice des vides doit se substituer à la notion de "porosité".

Après avoir défini les bases de méthodes mieux adaptées, nous les avons appliquées à quelques substrats et nous avons cherché à en tirer une évaluation de leur comportement physique et mécanique réel.

Il ressort de cette évaluation que la tourbe blonde à sphaigne présente un ensemble de qualités difficiles à dépasser. Tout au plus, l'effort peut-il porter désormais :

- d'une part, sur des améliorations de détails liées à des "effets-textures" obtenus par mélange de substrats.

- d'autre part et surtout, sur les conditions d'utilisation.

Enfin, les premiers éléments de réponse aux possibilités d'améliorer très profondément les propriétés de sols de serre par apport de cette même tourbe sont très encourageants.

Annexe I

Caractéristiques de ressuyage de différents substrats

Caractéristiques	Humidité volumique %			Porosité %			Teneur en air %		
	air	S.G.	s.f.	air	S.G.	s.f.	air	S.G.	s.f.
Après ressuyage sur									
Tourbe blonde	82,4	83,0	69,1	95	94,5	94,4	12,6	11,5	25,3
Tourbe noire	81,0	80,6	77,7	85,3	84,2	83,9	4,3	3,6	6,2
Vermiculite	56,1	51,0	47,3	96,1	96,0	96,0	40,0	45,0	48,7
Perlite	40,2	34,8	32,0	97,0	96,9	96,9	56,8	62,1	64,9
Terreau de soutrage	67,2	65,3	63,9	77,5	77,0	76,2	10,3	11,7	12,3
Pouzzolane	11,1	8,5	8,3	73,1	72,2	71,6	62	63,7	63,3

- Caractéristiques initiales -

Substrats	γ_d	Hp %	Hv %	Potentiel matriciel g cm ⁻¹	Porosité totale %	Taux de saturation %
Tourbe blonde	0,078	810	63,2	25	95,3	66
Tourbe brune	0,250	245	61,2	200	85,9	71
Vermiculite	0,250	245	61,2	200	91,0	66
Perlite	0,107	235	25,8	25	95,3	27
Sable quartzeux	1,25	14,3	17,9	25	52,8	30
Limon calcaire	1,10	31,2	34,3	800	58,5	60

Annexe III

Disponibilité de l'eau dans les substrats

Caractéristiques à l'humidité critique et au flétrissement permanent

	Hp %	R.F.U. % vol.	R.F.U. % de RT	Pression * osmotique de la solution	Humidité pondé- rale au flétris- sissement permanent	Hp % à PF 4,2
Tourbe blonde	I	28,0	43,3	1,35	80	185
	II	20,0	32,2	2,4	60	
Tourbe brune	I	17,0	28,2	1,10	38,8	85
	II	16,5	27,0	2,3	36,1	
Vermiculite	I	22,0	36,4	1,25	9,5	120
	II	19,0	31,3	2,3	11,5	
Perlite	I	8,5	34,8	1,28	3,6	-
	II	6,6	27,2	2,2	11,3	
Sable quartzueux	I	6,4	36,0	1,27	0,5	1,8
	II	4,4	24,0	2,1	0,7	
Limon calcaire	I	6,8	20,2	0,95	10,2	9,8
	II	6,8	20,2	1,90	9,8	

* Pression osmotique initiale : Solution I = 0,8 Atm. - Solution II = 1,6 Atm.

Résultats applicables à des cultures sur dalle à enracinement dense

Substrats	Réserve facilement utilisable (volume %)	Épaisseur (cm) de substrat équivalent à 50 mm de R.F.U.	Densité humide à la capacité de rétention	Poids de substrat contenant 50 mm de R.F.U. kg m ⁻²
Tourbe à sphaigne (floratory)	28	18	0,71	130
Tourbe noire à carex	17	30	0,86	260
Vermiculite	22	22	0,86	190
Perlite	8,5	60	0,365	220
Sol de limon argileux	6,8	70	1,41	1 000

Annexe IV

Caractéristiques de consolidation des substrats

	Pression de consolidation g cm ²	Indice de compression	Pression limite de relaxation "élastique" g cm ²	Coefficient de relaxation cm ² g ⁻¹
Tourbe blonde	70	6,2	1 000	3,3 10 ⁻⁴
Tourbe brune	85	2,0	400	2,4 10 ⁻⁴
Vermiculite	105	5,0	2 000	0,8 10 ⁻⁴
Perlite	165	13,2	-	0
Montmorillonite Ca ⁺⁺	100	6,0	400	1,4 10 ⁻⁵
Limon calcaire	225	0,4	2 000	2,5 10 ⁻⁴

Pressions g cm ⁻²	Module oedométrique g cm ⁻² x 10 ⁻³							Coefficient de compression volumétrique (mm)						
	T. Bl.	T. N.	V.	P.	M.	L.		T. Bl.	T. N.	V.	P.	M.	L.	
50	0,5	-	-	-	-	-								
100	0,7	-	-	-	-	-								
200	1,250	-	-	-	-	-								
400	1,2	-	-	-	0,7	12,0		8,5		-	-	14,0	1,2	
800	2,1	4,0	1,75	2,7	-	-		4,8	2,5	5,6	3,7	-	-	
1 600	3,600	-	-	-	3,2	8,0		2,7	-	-	-	3,3	0,8	
3 200	6,9	10,0	6,0	6,4	-	-		1,4	1,0	1,7	1,5	-	-	

Traitements	Témoin sans apport	Fumier de bovin 400 T/ha	Tourbe à sphaigne 40 T/ha
<u>Matière organique du sol</u>			
C ‰ lié	3,8 (100)	5,8 (152)	3,85 (101)
C ‰ libre	1,4 (100)	10,1 (720)	3,70 (265)
<u>Sensibilité au compactage</u> (E = 6 kg cm/cm ³)			
Limite de plasticité (humidité %)	9,4	12,0	12,5
Porosité minimale (%)	33,4	35,2	37,5
Humidité de plus grande sensibilité (%)	14,5	16,1	16,8
<u>Etat physique en fin de culture</u>			
Porosité d'assemblage	36,0	38,9	38,9
Porosité structurale	4,5	9,8	9,8
Stabilité structurale Agb %	0,8 (100)	4,5 (560)	0,7 (90)

Annexe VI

Amélioration des propriétés d'un sol de serre

sablo limoneux par apport massif d'amendements organiques.