

# LES CULTURES HORS SOL

Ouvrage collectif  
dirigé par Denise BLANC





# LES CULTURES HORS SOL

Ouvrage collectif  
dirigé par Denise BLANC

COLLECTION

2<sup>e</sup> édition revue et corrigée

© INRA, Paris, 1987

ISBN : 2-85340-936-8

## Avant-propos

*Pour les physiologistes, les cultures sans sol, ont une longue histoire qui commence aux environs de 1860. Ce n'est cependant qu'en 1940 qu'est définitivement établie la liste exhaustive des éléments indispensables à la croissance normale de la plante hors de son milieu naturel. Dès lors, l'introduction des techniques de culture hors sol dans le domaine agricole peut être envisagée. Elles y font effectivement leur entrée, à cette même époque, timidement et seulement dans des situations exceptionnelles. Ce n'est que depuis une dizaine d'années qu'elles connaissent un tel essor. Les raisons de ce développement sont multiples. La principale en est d'ordre pathologique : elles peuvent apporter en effet une solution le plus souvent définitive aux problèmes de fatigue des sols, responsables en culture intensive sous serre d'une baisse irréversible de la productivité.*

*Cependant le transfert d'une technique de laboratoire, à la serre industrielle constitue un changement d'échelle qui n'est pas sans présenter des risques, d'autant qu'il est assorti de contraintes nouvelles. En concurrence avec les techniques de culture traditionnelle, les cultures hors sol doivent allier performance agronomique, niveau qualitatif et compétitivité économique.*

*C'est vers ce triple objectif qu'ont été orientées les recherches engagées dans le cadre d'une Action Thématique "CULTURES HORS SOL" programmée par la Direction Scientifique de l'INRA et encouragée par la Caisse Nationale du Crédit Agricole.*

*Le présent ouvrage est le compte rendu des résultats de travaux de recherches pluridisciplinaires. Il s'adresse aux enseignants, techniciens et professionnels qui y trouveront les données nécessaires à une meilleure maîtrise de ces nouvelles techniques.*

*En tant que responsable scientifique de cette Action Thématique Programmée, je tiens à remercier tous mes collègues scientifiques et ingénieurs qui ont participé avec enthousiasme à l'élaboration des programmes, à la réalisation des travaux.*

*La synthèse de leurs résultats et de leur réflexion constitue la matière de cet ouvrage collectif dont la réalisation matérielle a été assurée par Mme Claudie SIROTTI à laquelle je tiens à exprimer ici mes plus vifs remerciements.*

Denise BLANC



# Sommaire

INTRODUCTION	7
<b>I-PARTIE : Les substrats</b>	
Les substrats - Inventaire, caractéristiques, ressources J. MOINEREAU, P. HERRMANN, J.C. FAVROT et L.M. RIVIERE	15
Propriétés physiques des substrats R. GRAS	79
Propriétés chimiques des substrats J.P. ANDRE	127
<b>II-PARTIE : Les exigences de l'espèce</b>	
<i>Adaptation des solutions nutritives</i>	
pH du milieu et réaction de la plante - Différences spécifiques et variétales Richard BRUN et Maryse MONTARONE	153
Influence de la concentration saline de la solution nutritive sur la réaction de la plante Richard BRUN et M. MONTARONE	171
Cinétique de l'absorption hydrique et minérale - Composition ionique des solutions Richard BRUN et Denise BLANC	203
Influence de la température des racines sur la croissance et la nutrition des plantes P. CORNILLON	221
<i>Quelques exemples de solutions nutritives</i>	
Fertilisation de la tomate en culture hors sol en région méditerranéenne B. JEANNEQUIN	235
Fertilisation du concombre cultivé sur laine de roche J.M. LEFEBVRE	237
Fertilisation de l'œillet et du gerbera cultivés en bacs sur substrats Richard BRUN	241
<b>III-PARTIE : Les systèmes de culture</b>	
Les systèmes de culture hors sol en maraîchage B. JEANNEQUIN, Robert BRUN, C. GUIMBARD et J. CORRE	251
Les systèmes de culture hors sol en production florale Richard BRUN	281

<b>Analyse critique des systèmes de culture hors sol avec et sans recyclage des solutions. Conséquences au niveau des contrôles analytiques</b> Christiane LESAINT	299
<b>IV-PARTIE : Les aspects phytosanitaires</b>	
<b>Les problèmes pathologiques en culture hors sol</b> Yvonne COUTEAUDIER, J. LOUVET et C. ALABOUVETTE	321
<b>La désinfection des substrats</b> R. TRAMIER	333
<b>V-PARTIE : La qualité de la production</b>	
<b>La qualité de la tomate. Influence de la nature du substrat et de la nutrition</b> Simone MARS, Christiane OTTO et Denise BLANC	347
<b>La qualité de la tomate. Approche méthodologique et influence des systèmes de culture</b> M. BURET et F. DUPRAT	361
<b>Maîtrise des résidus nitriques dans la salade en culture hors sol</b> S. ADAMOWICZ	389
<b>Substrats industriels et métaux lourds. Contrôle d'une éventuelle contamination de la plante</b> Denise BLANC	397



## Introduction

Les recherches engagées dans le cadre de l'ATP se devaient de répondre à cinq objectifs :

**1°) Inventorier et caractériser les ressources françaises en matériaux dont l'utilisation en tant que substrat était envisageable**, ceci afin de nous affranchir de l'importation massive de tourbe blonde considérée à l'origine comme le substrat de culture idéal et de ce fait largement utilisée. Une enquête nationale auprès des industriels a permis de recenser les résidus et sous-produits disponibles, en même temps qu'était réalisée une estimation des réserves françaises en matériaux naturels (tourbe, pouzzolane, tuf). Leur caractérisation a nécessité la mise au point d'une méthodologie permettant d'en apprécier les propriétés physiques et chimiques et d'en prévoir le comportement en culture.

**2°) Définir les exigences des principales espèces pour lesquelles les techniques de culture hors sol** présentaient un intérêt certain. Ces données sont indispensables à l'élaboration de systèmes performants, sur le plan technique et économique. En effet, si, en culture traditionnelle, la plante doit s'adapter à un milieu naturel qui, même amendé et fertilisé, ne présente que rarement les caractéristiques d'un milieu idéal, en culture hors sol, il est permis d'envisager une adaptation du milieu aux exigences de l'espèce. Cette adaptation peut se faire au niveau du choix du substrat, au niveau de la composition de la solution nutritive, au niveau du système de culture. Dans la recherche d'une optimisation des conditions de production, l'acquisition des connaissances sur les besoins de l'espèce est un préalable indispensable.

**3°) Mettre au point des systèmes de culture techniquement et économiquement performants.** Les contraintes régionales (conditions climatiques, qualité de l'eau disponible, possibilités d'approvisionnement en substrat etc...) jouent, au niveau des performances d'un système de culture, un rôle très important qui interdit dans bien des cas la simple transposition d'une technique d'une région à l'autre. Ainsi une adaptation à nos régions de production des systèmes mis au point dans les pays nordiques s'est avérée nécessaire et a justifié des recherches particulières. Deux stations expérimentales de l'INRA situées l'une en Bretagne, l'autre dans les Pyrénées Orientales ont permis de conduire de telles études régionales.

**4°) Tester du point de vue pathologique la fiabilité des matériaux et des systèmes et en assurer la maîtrise.** La réceptivité des substrats aux agents pathogènes, leur aptitude à la désinfection, les modalités de diffusion des maladies en fonction des systèmes mis en oeuvre ont fait l'objet d'études en laboratoire et sur le terrain afin de mesurer les risques liés aux systèmes et en limiter les effets.

**5°) Comparer enfin la qualité des produits récoltés à ceux de l'agriculture traditionnelle.** L'étude a été limitée à la comparaison de la qualité des produits à la récolte, dans différents systèmes de culture. Seuls des critères positifs ou négatifs, aisément quantifiables, de la qualité nutritionnelle ont fait l'objet d'études systématiques.

La diversité des actions à mener impliquait la contribution d'une équipe pluridisciplinaire. Agronomes, pédologues, physiciens et chimistes du sol, pathologistes, technologues, ingénieurs d'expérimentation et de conception ont mis leurs efforts en commun, dans le cadre d'une étroite concertation. Le présent ouvrage est une synthèse des réponses qu'ils apportent aux objectifs qu'ils s'étaient fixés.

## **I - Les substrats**



## Les substrats

Le terme de substrat en agriculture s'applique à tout matériau, naturel ou artificiel qui, placé en conteneur, pur ou en mélange, permet l'ancrage du système racinaire et joue ainsi vis-à-vis de la plante, le rôle de support. Certains substrats dits enrichis qui contribuent en outre à l'alimentation de la plante, n'ont pas été pris en compte dans le présent ouvrage, dont l'objet est limité aux seules "cultures hors sol" entièrement dépendantes sur le plan nutritionnel de l'apport quasi continu de solutions minérales.

En tant que support de la plante, tout matériau solide peut éventuellement être utilisé comme substrat dans la mesure où il est compatible avec un développement normal du système racinaire. Dans le cadre d'une enquête lancée au niveau national pour recenser les matériaux divers, résidus ou sous-produits industriels, qui seraient localement disponibles et de ce fait économiquement intéressants, la compatibilité entre les divers matériaux recensés et le développement racinaire a été apprécié grâce à un test cultural rapide (fig. 1). Ce test permet de comparer au bout d'un temps déterminé le développement racinaire d'un semis de blé dans le matériau testé et dans un substrat de référence constitué par du sable siliceux inerte calibré, toutes autres conditions étant égales par ailleurs. Ce test préliminaire a permis de ne retenir dans nos études ultérieures que les matériaux ne présentant à priori aucun caractère de phytotoxicité (tableau 1).

L'inventaire des matériaux pouvant servir de substrat ou entrer dans la composition de mélanges complexes montre la diversité des produits actuellement disponibles. La gamme est large et variée dans laquelle le producteur peut faire son choix.

Ce choix est plus généralement arrêté sur la base de critères économiques qu'en fonction de critères techniques, encore que les uns et les autres soient souvent interdépendants. En effet, la densité du matériau influe sur le coût de son transport et des infrastructures qu'elle impose. De même sa résistance mécanique et sa plus ou moins grande réceptivité aux agents pathogènes, déterminent sa longévité, et intervient de ce fait sur l'amortissement des installations. Bien qu'indirectement déterminantes dans le choix du substrat, ces données physiques et biologiques sont nécessaires. Elles complètent l'inventaire des matériaux.

TABLEAU 1 : Développement des parties aériennes et des racines de jeunes plants de blé dans différents matériaux, exprimée en pour cent par rapport à une culture témoin sur sable siliceux inerte calibré.

Age	11 jours		22 jours		Age	11 jours		22 jours	
organes	parties aériennes	racines	parties aériennes	racines	organes	parties aériennes	racines	parties aériennes	racines
<u>LAITIER BOULETE DE HT FOURNEAU</u>					<u>RESIDUS DE DISTILLERIE</u>				
4 - 10 mm	93	65	88	74	Rafles	70	37,5	72	42,5
8 - 12 mm	120	94	100	78	Marc épépiné	60	25,0	54	32
<u>RESINES PHENOLIQUES</u>					Marc de rétrocession	65	50,0	54	35,7
∅					Pulpes humides	50	25	32	21,4
< 1 mm	80	50	87	79	Pulpes séchées et broyées	25	0	35	0
~ 5 mm	80	100	78	43	Marc épépiné + Pulpe humide	60	37,5	34	14,3
<u>TUF VOLCANIQUE</u>					<u>MOUSSE UREE FORMOL</u>				
	120	100	112	96	% Formol				
<u>RESIDUS DE PARFUMERIE</u>					1 %	50	75	37,8	42,9
mousses diverses					1,2 %	30	37,5	48,6	57,0
chêne	30	0	23,5	8,7	1,4 %	70	75	54,0	60,7
	40	0	42,6	0	1,6 %	43	31,3	47,3	57,0
<u>PLEVRE DE BOIS</u>					<u>TOURBE "INTERMINES"</u>				
durée compostage					échantillon fibreux superficiel	nd	nd	140,5	125
0	66,5	76,5	56	47,8	<u>TEMOIN</u>				
1 an	140	82,4	132	113	sable siliceux inerte	100			
3 ans	133	94,0	131	100					

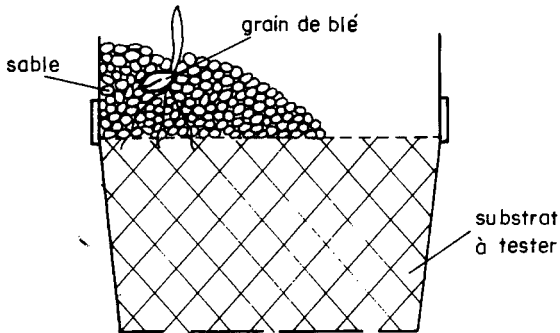


figure 1 : Dispositif pour test de phytotoxicité.

Siège du développement des racines, le substrat doit présenter des caractéristiques compatibles avec leur activité métabolique. Celle-ci met en jeu des processus respiratoires qui impliquent la présence dans le milieu racinaire d'une phase gazeuse facilement renouvelable. Son volume et la rapidité des échanges avec l'atmosphère dépendent de la structure physique du substrat. Cette même structure lui confère une capacité de rétention pour l'eau qui constitue un paramètre important dans la conduite des irrigations. Les propriétés physiques des matériaux ont été étudiées dans leur incidence sur la répartition des phases gazeuse et liquide dans la masse du substrat en place.

L'inertie chimique absolue du substrat, souhaitée pour une meilleure maîtrise de la nutrition est chose rare. Des réactions entre le substrat et la phase liquide, interviennent alors, qui modifient la composition de la solution nutritive. Les divers mécanismes susceptibles d'intervenir sont analysés et illustrés à l'aide d'exemples. La connaissance de la réactivité chimique des matériaux non inertes permet d'en définir les conditions d'utilisation dans les techniques de culture hors sol et d'élargir ainsi la gamme des matières premières utilisables.





# Les substrats - Inventaire, caractéristiques, ressources

J. MOINEREAU, P. HERRMANN, J.C. FAVROT\* et L.M. RIVIERE\*\*

## MATERIAUX ORGANIQUES NATURELS.

### I. LES TOURBES :

Sont considérés comme tourbes proprement dites, des matériaux d'origine végétale, essentiellement organiques, plus ou moins humifiés, ne renfermant pas ou très peu de contaminations minérales (moins de 10 %).

#### Origine et composition :

Le seul examen des tourbes et de leurs conditions de gisement est à la base de diverses classifications qui prennent l'un ou l'autre des critères suivants comme élément de référence :

- la **nature des végétaux** qui occupent les tourbières et/ou en sont à l'origine : mousses (sphaignes, hypnes, polytrics), plantes vasculaires (fougères, prêles), plantes à fleurs (joncs, laiches ou carex, roseaux phragmites, molinies, typha, trèfles d'eau...) et feuillus (pin sylvestre, aulne, bouleau) ;
- la **fibrosité et le degré de décomposition du matériau** : la classification française des sols par exemple, distingue les tourbes fibreuses (fibrists), semi-fibreuses (hemists) et humifiées (saprists). La quantité de fibres, leur finesse et le degré de décomposition, sont en corrélation avec les propriétés fondamentales des tourbes, notamment le comportement mécanique (élasticité, retrait), hydrique (rétention d'eau, réhumectation après dessiccation, aération) et chimique (capacité d'échange cationique, teneur en azote et rapport carbone/azote). Le degré de décomposition peut être apprécié macroscopiquement (échelle d'humification de VON POST) ou microscopiquement (rapport fibres/plasma humique, cf. BOTTRAUD, 1980) ;
- l'**aspect général** : tourbes mousseuses, gazonneuses, fibreuses, terreuses, schistoïdes...
- la **couleur** : blonde ("havane"), brune (brun clair, brun chocolat, brun foncé), noire ;
- la **morphologie des tourbières** : bombées, plates, etc...
- la **localisation géographique et topographique** : tourbières de montagne, de pente, de haute vallée, de vallée, de plaine, de forêts et de bois flottés, marine.

---

\* Laboratoire de Science du Sol, ENSAM - CRAM, 34060 Montpellier Cédex.

\*\* Laboratoire de Science du Sol, ENITAH - 49045 Angers Cédex.

Ces divers critères ne sont évidemment pas indépendants. Au plan horticole, la classification "commerciale", entérinée par l'usage, fait surtout appel à la couleur, à l'origine des tourbes et à leur pH. Ainsi sont souvent associés dans cette classification (NEAU, 1976) :

<u>Couleur</u>	<u>Végétaux originels</u>	<u>pH</u>
blonde	sphaignes	3,8 - 4,5
brune	sphaignes + eriophorum	4,5 - 5,5
noire	carex	5,5 - 6,5
noire	roseaux phragmites	7,0 - 7,5

La composition biochimique des tourbes dépend de la nature du végétal et de son état de décomposition (tableau 1).

Tableau 1 : Composition biochimique des tourbes en % de matière sèche (d'après DOMERGUE-GRETER, 1981).

	TOURBE ACIDE A SPHAIGNES		TOURBE EUTROPHE A MOUSSES	
	Fraîche	Décomposée	Fraîche	Décomposée
Hémicellulose	50 %	10 %	32 %	2 %
Cellulose	25 %	15 %	15 %	2 %
Lignine	10 %	20 %	23 %	15 %
Bitumes (cires, résines)	2 %	8 %	2 %	8 %
Humus	0	30 %	0	50 %
Divers	13 %	17 %	28 %	23 %

(en % de masse sèche)

Les cendres minérales contiennent des silicates (quartz, micas, argiles) du carbonate de calcium (jusqu'à 10 % dans les tourbes eutrophes), des sulfures (0,1 % à 0,5 % de soufre), des oxydes de fer et divers éléments (aluminium, magnésium, phosphore) en faibles quantités. L'azote est à 80 % sous forme organique, dont 40 % de peptides et de protéines (PUUSTJARVI et ROBERTSON, 1975).

#### Propriétés physiques et physico-chimiques :

Parmi les données tirées de tests physiques, mécaniques et d'analyses chimiques, les plus utilisées pour caractériser les tourbes sont :

- la densité apparente qui passe de 0,05 - 0,2 pour les tourbes blondes à 0,5 pour les tourbes noires (terreuses) ;

- la densité de solide : 1,40 à 1,65 pour des tourbes françaises (BOTTRAUD, 1980) ;
- la porosité totale qui varie de 90-95 % (tourbe blonde) à 40 % (tourbes noires très décomposées) ;
- la rétention en eau : d'après RAVOUX et PETER (1973), 100 g de tourbe sèche et peu décomposée absorbent 1000-1500 g d'eau (tourbe à sphaignes), 700-800 g (tourbe à carex) et 400-500 g (tourbe de plaine) ;
- le taux de cendres : 5 % (tourbes acides) à 10 % (tourbes eutrophes non contaminées) ;
- le rapport C/N : 40-50 (tourbes blondes) à 20 (tourbes noires) ;
- le pH eau : 3,8 pour les tourbes acides à 7,5 pour les tourbes eutrophes ;
- la capacité d'échange cationique, qui varie largement en fonction du matériau (pH, teneur en cendres, fibrosité, degré d'humification) ;
- le retrait après dessiccation et la capacité de réhumectation qui varient du simple au double selon la finesse et le degré d'humification des tourbes (REDLICH et VERDURE, 1975).

Le tableau 2 résume les caractéristiques des deux types extrêmes de tourbes. Noter que les propriétés chimiques peuvent varier considérablement selon l'état hydrique du matériau (hydraté en place, desséché, réhumecté). C'est le cas pour le pH et la capacité d'échange cationique des tourbes humifiées, riches en gels humiques, qui en se déshydratant irréversiblement perdent une partie de leurs propriétés de surface. Dans les mêmes conditions de mesure (pH, cation échangé, rapport solide/solution constant) la C.E.C peut varier de 100 % entre un échantillon frais et le même échantillon desséché puis réhumecté. De plus les colloïdes organiques sont des échangeurs à charges variables fortement dépendantes du pH du milieu (compte rendu J.P. ANDRE).

Si les tourbes blondes offrent des caractéristiques généralement supérieures à celles des tourbes brunes ou noires et sont considérées depuis longtemps comme des supports de culture idéaux, il faut avec L.M. RIVIERE (tableau 3) nuancer ce jugement car les propriétés d'une tourbe sont avant tout influencées par la finesse du matériau et sa fibrosité (ANDRE, 1981). Les tourbes blondes, fines et pauvres en fibres, ont une rétention en eau élevée mais une faible aération et se rétractent au cours du ressuyage (15 % de perte du volume de 10 à 100 mbars). En outre, après une dessiccation poussée (cas des balles de tourbes du commerce), la réhumectation est très lente et l'aération peut atteindre une valeur inférieure au seuil limite (15 % volumique à 10 mbars) lorsque cette réhumectation dure trop longtemps. La tourbe blonde peut avoir un comportement correct en début de culture et constituer ensuite un milieu asphyxiant.

Dans le choix des tourbes, on donnera la priorité à celles qui présentent la fibrosité la plus importante et dont la texture est la plus grossière. Ces caractéristiques dépendent du gisement exploité mais aussi du mode d'exploitation (briquettes ou fraisage) et du traitement industriel (réglage des broyeurs, conditionnement). Les tourbes fines ou humifiées, blondes ou brunes, conviennent pour des mélanges à base de graviers poreux et stables (pouzzolane, tuf, granules d'argiles expansées) si leur proportion reste inférieure à 50 % du volume total (FOURNIER, 1979 ; MARION, 1982). Les tourbes noires, riches en colloïdes humiques hydratés, peuvent être employées dans les mélanges après dessiccation, retrait, prise en masse puis broyage, procédés qui leur confèrent de nouvelles propriétés beaucoup plus constantes qu'à l'état "naturel" : on parle alors de "sables organiques" (FRANCLET et DECHAMPS, 1976).

**Tableau 2** : Caractéristiques comparées des tourbes blondes et noires (moyennes d'après divers auteurs).

	TOURBES BLONDES	TOURBES NOIRES
Porosité	90 - 95 %	85 %
Teneur en air après ressuyage	12,6 %	4,3 %
Retrait après dessiccation totale	25 - 40 %	70 - 90 %
Perte de volume après dessiccation-réhumectation	10 - 25 %	50 - 75 %
Capacité de rétention (100 mbars)	10 à 15 fois son poids	4 à 5 fois son poids
Masse volumique	162 kg/m <sup>3</sup>	333 kg/m <sup>3</sup>
Quantité de matière sèche par unité de volume	55 - 75 g/l	100 à 250 g/l
Degré de décomposition	pas décomposé à faiblement décomposé	fortement décomposé à complètement décomposé
pH	2,5 à 4,5	4 à 7,5
Capacité d'échange cationique	100 à 150 meq/100g m.s.	50 à 250 meq/100g m.s.