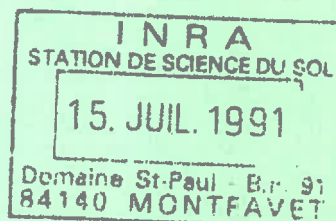


E.S.I.T.P.A.

TH - 027
HC22

Mémoire de fin d'études
1986



**Etude de l'influence de la
compacité et du potentiel hydrique
du sol sur les nécroses racinaires
de tomates**

**contribution à la mise au point d'une
méthode**

Annick Moreau

**station de recherches sur
la flore pathogène dans le sol
I.N.R.A. DIJON**

A MES PARENTS

Cette étude entre dans le cadre d'une collaboration entre la station de recherches sur la flore pathogène dans le sol de l'I.N.R.A. de DIJON, et la station de science du sol de l'I.N.R.A. de MONTFAVET.

Je tiens à remercier :

- Monsieur LOUVET, directeur de la station de recherches sur la flore pathogène dans le sol de l'I.N.R.A. de DIJON, qui a bien voulu m'accueillir dans sa station,*
- Monsieur BOUHOT, maître de stage, qui m'a proposé cette étude et m'a aidée dans sa réalisation,*
- Madame CORBERAND pour son assistance technique.*

Mais également :

- Monsieur STENGEL, directeur de la station de science du sol de l'I.N.R.A. de MONTFAVET, qui a bien voulu m'accueillir dans sa station durant cinq semaines,*
- Monsieur BOURLET pour son assistance en ce qui concerne la partie science du sol de cette étude.*

Mes remerciements vont aussi à Messieurs les membres du jury et à toutes les personnes qui m'ont permis, soit par leur collaboration technique, soit par leur soutien moral, de réaliser cette étude.

Enfin, je n'oublie pas celle qui a été ma collaboratrice pendant de longues soirées : la T.T.X. 35 de Cii Honeywell Bull.

RESUME

Ce travail a consisté en l'étude de la relation tripartite : agents pathogènes-tomate-facteurs physiques du sol, dans le but d'étudier d'éventuelles interactions entre les facteurs physiques du sol et l'état sanitaire des racines.

Notre objectif principal est la mise au point d'une méthode permettant la standardisation et le contrôle de la porosité structurale de la terre où sont cultivées les tomates. Les deux sols utilisés sont fatigués pour la tomate. Les agrégats obtenus après calibrage de la terre sont humectés, puis compactés. Les éprouvettes de terre fabriquées sont placées sur des tables à dépressions ce qui permet la culture de tomate à un potentiel matriciel de l'eau contrôlé.

Les observations et mesures du développement des plantes et de l'état sanitaire des racines, ne mettent pas en évidence d'interactions entre états physiques du sol et état sanitaire des racines. Par contre, apparaissent une forte diminution des Pythium, et une augmentation des Fusarium oxysporum isolés de racines nécrosées lorsqu'on applique à la terre les potentiels hydriques matriciels (-25 et -100 mb) et les indices de porosité structurale (0,1-0,2-0,3) étudiés.

SOMMAIRE

<u>INTRODUCTION</u>	1
---------------------------	---

LA FATIGUE DES SOLS

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA FATIGUE DES SOLS	3
1. Historique	3
2. Définitions	4
3. Symptômes et manifestations au champ	4
3.1 L'exemple de la tomate	4
3.2 En général	5
4. Les causes possibles	5

POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL, COMPACTITE DU SOL ET NECROSES RACINAIRES

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ETAT PHYSIQUE DU SOL ET LES CHAMPIGNONS PATHOGENES DU SOL	7
1. Le potentiel hydrique et les champignons pathogènes du sol	7
1.1 Effets sur la croissance des agents pathogènes	8
1.2 Effets sur l'interaction agents pathogènes-antagonistes	9
1.3 Effets sur l'interaction hôte- agents pathogènes	9
2. La compacité du sol et les champignons pathogènes du sol	10

LES CHOIX ET BUTS DES TRAVAUX	12
MATERIEL ET METHODES	13
1. La plante	13
2. Les sols	13
2.1 Types de sols	14
2.2 Conclusions du test à deux niveaux réalisé en 1985	14
2.2.1 Principe de ce test	
2.2.2 Sol 6A	
2.2.3 Sol 9A	
3. Conditions générales de l'expérimentation	15
4. Préparation des échantillons de terres avant le semis des tomates	16
4.1 Préparation des agrégats	16
4.2 Humectation des agrégats	16
4.2.1 Objectifs	
4.2.2 Détermination du potentiel d'humectation	
4.2.3 Humectation des agrégats et maintien au potentiel choisi	
4.3 Réalisation des éprouvettes de terre	19
4.3.1 Objectifs	
4.3.2 Le compactage	
5. Conservation des agrégats et des éprouvettes de terre	21
6. Mise en place des essais	21
7. Vérifications du potentiel hydrique en cours de végétation	22
RESULTATS	24
1. Premier essai réalisé avec la terre 6A	25
1.1 Développement des plantes	25
1.1.1 Poids secs	
1.1.2 Enracinement	

1.2 Etat sanitaire des racines	27
1.3 Résumé des résultats obtenus	28
2. Deuxième essai réalisé avec la terre 6A	29
3. Essai réalisé avec la terre 9A	30
3.1 Développement des plantes	30
3.1.1 Poids secs	
3.1.2 Enracinement	
3.2 Etat sanitaire des racines	31
3.3 Résumé des résultats obtenus	32
DISCUSSION	33
1. Critiques de la méthode	33
1.1 Critiques et bilan	33
1.2 Conclusion	36
2. Interprétation des résultats obtenus	37
2.1 Très forte contrainte biologique pour 6A	37
2.2 Mise en évidence d'un effet du compactage pour 6A	38
2.3 Comparaison des résultats obtenus pour chaque terre	38
2.3.1 Hypothèse d'une contrainte biologique différente entre les terres	39
2.3.2 Hypothèse d'une carence nutritionnelle pour 6A	
2.3.3 Hypothèse d'une interaction entre nature des sols et facteurs physiques des sols	
2.4 Conclusion	41
<u>CONCLUSION</u>	43
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	45
<u>ANNEXES</u>	

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Lorsque le développement d'une culture est anormal au point de réduire le rendement, certains invoquent une mauvaise structure du sol, d'autres l'action des agents pathogènes, d'autres encore des facteurs climatiques défavorables. Chacun a tendance à se cantonner dans sa spécialité.

Mais ces comportements sont à réviser depuis qu'a été mis en évidence le phénomène de la fatigue des sols. Même si pour certains elle reste un mythe, ou si pour d'autres elle permet de classer tous les problèmes inexplicables, la fatigue des sols est, malheureusement, réelle et fait l'objet à l'I.N.R.A. de DIJON d'études très poussées.

Déjà 400 cas de fatigue des sols ont été examinés et ont donné lieu à un diagnostic qui a pour but de mettre en évidence les facteurs limitants spécifiques à chaque cas. Presque tous les facteurs d'élaboration du rendement sont à prendre en compte. Mais certains apparaissent plus souvent que d'autres puisque dans 70% des cas étudiés, la composante biologique est limitante; alors que dans 50% des cas c'est l'aspect physico-chimique du sol. Dans certains cas ces deux facteurs sont donc en relation.

Dans le cadre d'un groupe de travail sur la fatigue des sols de culture de tomates dans la vallée du Rhône, la station de recherches sur la flore pathogène dans le sol de l'I.N.R.A. de DIJON et la station de science du sol de l'I.N.R.A. de MONTFAVET ont décidé de se pencher ensemble sur ce sujet en associant leurs compétences et leurs connaissances. L'étude présente est le fruit de cette collaboration.

L'originalité de cette étude par rapport à celles existantes est qu'elle s'intéresse à la fois aux agents pathogènes, à la plante et aux conditions physiques du sol (ici le potentiel hydrique et la compacité du sol). Ceci dans le but de mettre en évidence l'existence, et dans ce cas de les approfondir, ou l'absence de relations entre l'état physique du sol et l'état sanitaire des racines.

Mais avant d'arriver à un test de "routine" il y a toute une phase de mise au point d'un système expérimental permettant de travailler avec la plante, les agents pathogènes et le sol, et répondant aux contraintes fixées par les physiciens du sol et par les pathologistes. Cette mise au point est l'objectif principal de ce travail.

Si la méthode n'est pas encore totalement au point, des améliorations sont encore possibles, les premiers résultats obtenus nous ont permis de tirer des hypothèses explicatives intéressantes. Elles sont cependant à considérer avec réserve car non encore vérifiées.

**LA
FATIGUE
DES
SOLS**

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA FATIGUE DES SOLS

1. HISTORIQUE

Même si les premiers travaux concernant la fatigue des sols ne datent que des années 1950, c'est un problème qui est ressenti depuis l'Antiquité. Afin de laisser les sols se reposer, les agronomes de la Grèce antique préconisaient un assolement biennal blé/jachère. C'est à l'époque de la civilisation romaine qu'est apparue la notion de rotation; la jachère était remplacée par une culture qui épuisait moins le sol. Cette évolution se poursuit jusqu'à la disparition de la jachère au profit d'une culture améliorante. Le début de cette intensification fourragère correspondrait à un capitulaire de Charlemagne conseillant le remplacement de la jachère par une culture de lupin.

Les premiers travaux sur la fatigue des sols datent des années 1950, et sont l'oeuvre d'HOESTRA aux Pays Bas, de GILLES en Belgique, de SCOTTO LA MASSESE en France et de SAVORY en Grande Bretagne. Le phénomène est complexe, ces chercheurs l'ont perçu, même s'ils considèrent que les nématodes en sont la cause principale. A partir des années 1970, des producteurs se réunissent, des spécialistes dressent une liste des causes possibles et des chercheurs (I.N.R.A. Dijon) mettent au point un diagnostic de la fatigue des sols. Aujourd'hui, le problème est loin d'être résolu et depuis quelques années, agriculteurs, ingénieurs et chercheurs ont formé des groupes de travail sur plusieurs cultures (fraisier, blé, asperge, etc...) afin de rassembler leurs compétences et leurs connaissances. En effet, il n'existe que très rarement des sols dont la fatigue affecte plusieurs espèces végétales. Les syndrômes sont, en général, spécifiques à un couple sol-plante.

2. DEFINITIONS

Au fur et à mesure de l'avancement des travaux, les définitions de la fatigue des sols s'affinent, mais toutes traduisent bien la complexité du phénomène. Pour GILLES (1968) "la fatigue des sols résulterait d'une rupture d'équilibre dans le complexe vivant que constitue le sol". C'est avec SCOTTO LA MASSESE (1970) qu'apparaît l'influence de la monoculture dans l'installation d'une fatigue. Il la définit comme la réduction du développement de certaines cultures lorsqu'elles occupent consécutivement, à deux ou à plusieurs reprises certains sols, et dont l'origine reste inexplicée. "L'origine reste inexplicée..." en fait il faut parler de plusieurs origines comme le fait remarquer BOUHOT (1982a) : "la fatigue des sols se définit comme une perturbation de la fertilité des sols due à des causes multiples, celles-ci pouvant intervenir simultanément ou successivement ou se cumuler au niveau du système cultural".

Dans le cas de la fatigue des sols, le changement est grand par rapport à l'idée que l'on se fait habituellement des traitements, il n'y a pas de solution miracle et définitivement efficace.

3. SYMPTOMES ET MANIFESTATIONS AU CHAMP

3.1 L'exemple de la tomate

Dans le cas de la tomate, on peut observer (BOUHOT, DUMAS, 1982):

- pour le système racinaire : un faible développement, un aspect chétif, un nombre réduit de racines, des racines de faible diamètre, courtes et peu ramifiées, et des nécroses plus ou moins étendues.
- pour le système aérien : une allure chétive, une croissance lente, une réduction de la surface foliaire, une faible production totale de matière sèche, la présence de parasites, et de faibles rendements.

MILIEU EXTERIEUR

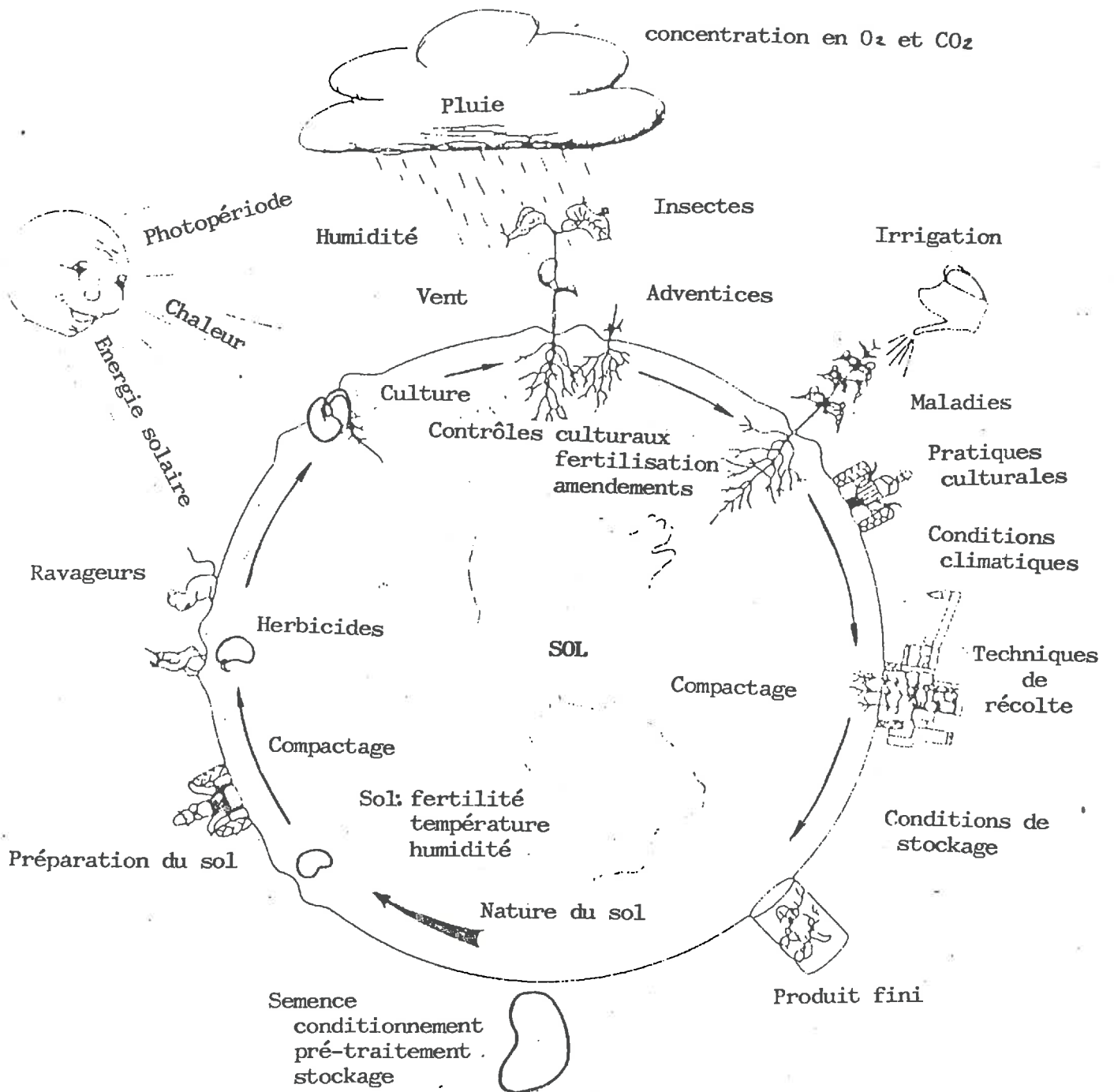
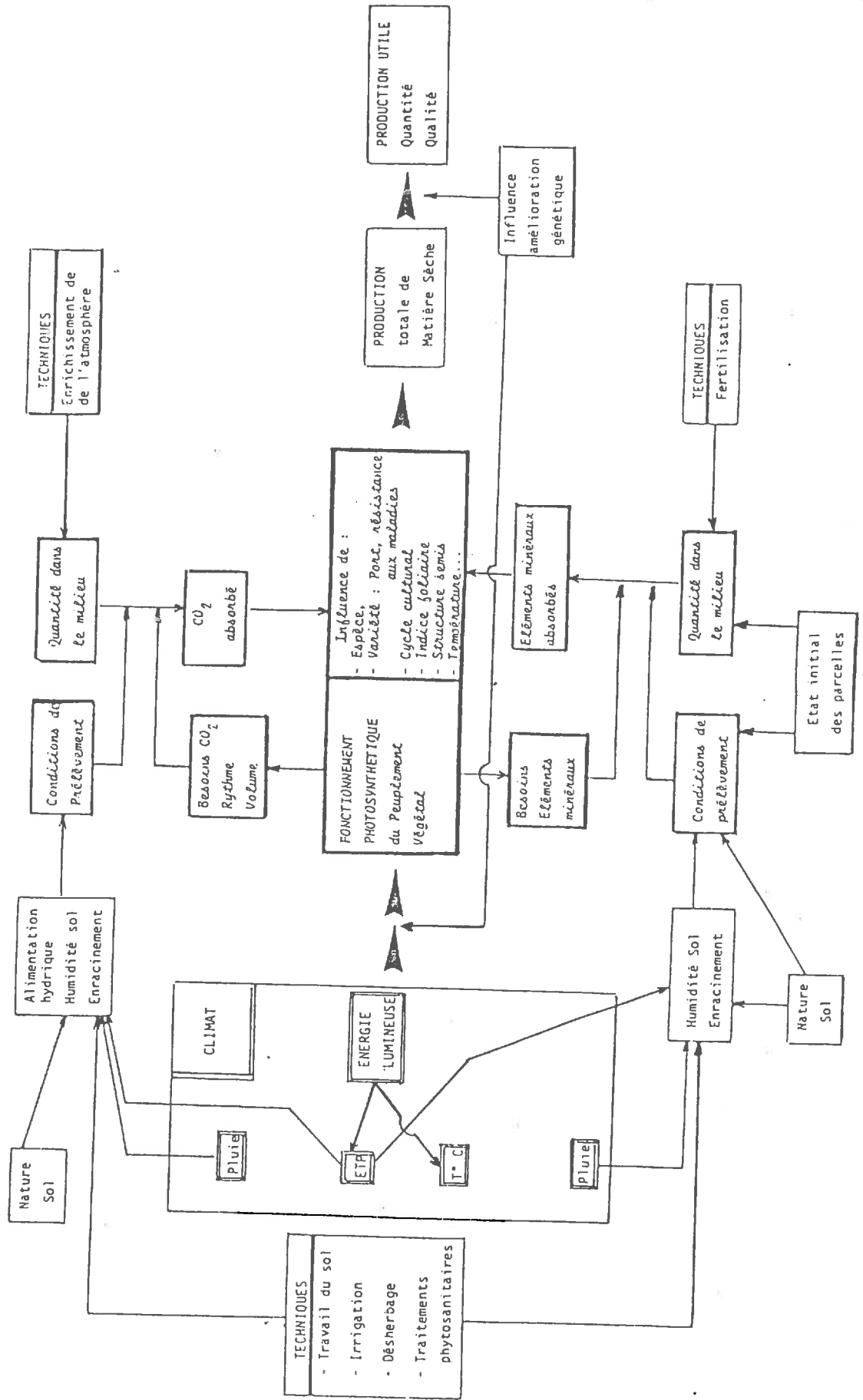


fig 1 : SCHEMA DES FACTEURS POUVANT AFFECTER LE RENDEMENT
(TROUSE, 1971)

fig 2 : LE SCHEMA D'ELABORATION DU RENDEMENT
 (SEBILLOTTE, 1978; CAPILLON, SEBILLOTTE, 1979)



3.2 En général

En général, la plante cultivée ne fait que mettre en évidence un état particulier du sol qui correspond à une perturbation de ses potentialités. Au champ, la fatigue ne se traduit pas par quelque chose de caractéristique (BOUHOT, 1983). On peut observer des plafonnements anormaux, des chutes ou des irrégularités anormales de rendement. On note souvent un mauvais état sanitaire des racines, des ralentissements de végétation, de faibles développements, des jaunissements.

4. LES CAUSES POSSIBLES

La fatigue des sols se traduit donc par des anomalies de rendement. Or l'élaboration du rendement met en jeu un ensemble de facteurs plus ou moins interdépendants (fig 1 et 2). La plupart de ces facteurs peuvent intervenir dans l'installation d'une fatigue :

- facteurs abiotiques inhérents au sol (PIERRE, 1983) :
 - structure
 - pH
 - alimentation minérale
 - matière organique
 - substances phytotoxiques (provenant des végétaux)

- facteurs biotiques (PIERRE, 1983) :
 - micro-organismes (champignons, bactéries)
 - nématodes
 - substances résultant des pesticides

Le test à deux niveaux (principe en ANNEXE n^o 2 a) mis au point par BOUHOT (BOUHOT, BONNEL, 1979) permet une approche pluridimensionnelle de la fatigue.

Notons encore que la monoculture apparaît comme une situation favorable à l'expression de la fatigue des sols car cette dernière semble liée aux mémoires de la parcelle (SEBILLOTTE, 1983). La répétition de certaines pratiques culturales a des effets qui s'enregistrent dans ces mémoires.

De plus TARDIEU (1973) fait remarquer que sous un couvert végétal naturel, c'est à dire en présence d'une macroflore bien diversifiée, la microflore l'est encore plus. Dans le cas d'une monoculture prolongée, donc d'une macroflore peu riche, la population microbienne sera moins diversifiée. L'équilibre biologique est alors perturbé.

Près de 400 cas de fatigue de sol ont été examinés au centre I.N.R.A. de Dijon. Dans 60 à 70% des cas un des facteurs limitants est un mauvais état sanitaire des racines. Dans environ 50% des cas un des facteurs limitants est un état physico-chimique du sol insatisfaisant.

Dans certaines situations ces deux facteurs sont donc en relation. L'étude présente, qui laisse volontairement de côté l'état chimique du sol, a pour but d'en savoir plus sur les relations qui peuvent exister entre l'état physique du sol et l'état sanitaire des racines. Seules deux composantes de l'état physique du sol seront étudiées : le potentiel hydrique et la compacité du sol.

**POTENTIEL HYDRIQUE
DU SOL,
COMPACITE DU SOL,
ET NECROSES
RACINAIRES.**

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ETAT PHYSIQUE DU SOL
ET LES CHAMPIGNONS PATHOGENES DU SOL

1. LE POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL ET LES CHAMPIGNONS PATHOGENES DU SOL

Déjà SIMMONDS (1941) pour les céréales, et BERKELEY (1944) pour les cultures non céréalières, s'intéressent à l'influence de l'humidité du sol sur la gravité des nécroses racinaires. Il ressort de leurs études que pratiquement toutes les nécroses racinaires sont favorisées par une humidité excessive du sol. Que ce soient les nécroses racinaires de pois causées par Rhizoctonia et Aphanomyces, celles de betterave sucrière par Phoma et Fusarium, celles de canne à sucre, d'ananas, de noisetier, de hêtre, ... elles sont toutes plus graves dans des conditions de drainage insuffisant. Ces auteurs invoquent comme causes la faible aération du sol, qui du fait des dégradations anaérobies, provoque la présence de produits toxiques, mais aussi une plus grande sensibilité du système racinaire de l'hôte. Plus tard, SCHONEWEISS (1975) propose les mêmes raisons (stress dû au déficit en oxygène, accumulation de substances toxiques) pour expliquer que la plupart des maladies racinaires sont favorisées par les sols humides.

On peut classer ainsi les effets du potentiel hydrique sur les maladies dûes aux champignons du sol :

- effets sur la croissance des agents pathogènes,
- effets sur l'interaction agents pathogènes-antagonistes,
- effets sur l'interaction hôte-agents pathogènes.

1.1 Effets sur la croissance des agents pathogènes

Plusieurs auteurs s'accordent à dire que les pourritures causées par Pythium et Phytophthora sont favorisées par des sols presque saturés.

Les résultats concernant l'effet du potentiel hydrique sur certaines phases du cycle de vie des agents pathogènes du sol existent surtout pour Phytophthora. L'humidité du sol est reconnue pour être un des facteurs les plus importants qui influence la sporulation et l'infestation des plantes par Phytophthora spp. BERNHARDT et GROGAN (1982) montrent que pour P. parasitica il y a formation abondante de sporanges entre -25 et -300 millibars (mb), mais qu'elle est presque nulle en sol saturé. Pour P. megasperma et P. cryptogea, la germination des sporanges est maximale après les 3-4 jours à -15 mb qui suivent une humectation à 0 mb. GISI et al. (1980) notent que la production de sporanges par P. cinnamomi est possible entre -15 et -2 500 mb avec un optimum à -160 mb. La croissance du mycélium de Phytophthora semble être stoppée à un potentiel matriciel compris entre -20 et -35 mb, et la production de sporanges est limitée entre -2 et -5 bars (b).

Pour les Pythium, GRIFFIN (1963) suggère que P. ultimum profite des humidités élevées dans le sol car il est plus tolérant que ses antagonistes aux faibles échanges gazeux. KOUYEAS (1964) montre que Pythium spp. sont plus à même de coloniser les tissus végétaux dans un sol au potentiel hydrique compris entre -0,4 et -1 b, alors que d'autres champignons comme Penicillium, Aspergillus et Trichoderma prédominent à -3,8 b. ROUHANI (1984) rappelle qu'à l'origine, les phycomycètes avaient une vie aquatique, que l'eau libre est un élément déterminant dans le sol pour le déplacement des zoospores et leur propagation autour des racines, et que dans ces conditions humides les oosphères commencent rapidement leur activité. D'après HANCOCK (1981) l'humidité du sol influence la perte de viabilité des propagules au laboratoire. Au champ, la population de Pythium ultimum est relativement stable durant des mois dans les sols quand l'humidité est faible et que les températures sont modérées. Il semblerait donc que le développement soit favorisé par des potentiels hydriques élevés alors que la conservation du champignon demande des potentiels moyens à faibles.

En ce qui concerne les attaques dues aux Fusarium, les auteurs sont partagés. Il semble que les fusarioses racinaires soient plus sévères dans les sols humides (COOK, PAPENDICK, 1972) alors que COLHOUN (1973) associe les attaques de fusarioses les plus graves aux sols secs. KRAFT et ROBERTS (1969) font une comparaison entre Pythium ultimum et Fusarium solani, et montrent que ce dernier cause significativement plus de dommages que P. ultimum quand les plantes doivent extraire l'humidité du sol. Enfin pour SUNG et COOK (1981) la germination des macroconidies, ascospores et chlamydospores de Fusarium roseum var. graminearum, var. culmorum et var. avenaceum est maximale de 0 à -20 b, alors que au fur et à mesure que le potentiel hydrique diminue par rapport à cette fourchette, la croissance mycélienne est meilleure.

1.2 Effets sur l'interaction agents pathogènes-antagonistes

Un changement dans le potentiel hydrique provoquant une accélération de la croissance d'un agent pathogène dans une certaine proportion aurait certainement une influence moindre s'il affectait tous les microorganismes dans la même mesure. Un tel changement place l'agent pathogène en dominant ou en dominé dans la compétition avec les autres microorganismes, en particulier avec ceux qui lui sont antagonistes (COOK, PAPENDICK, 1972).

1.3 Effets sur l'interaction hôte-agents pathogènes

L'agent pathogène n'est pas le seul à être influencé par le potentiel hydrique. Il ne faut pas oublier que la réceptivité des plantes aux maladies est sous la dépendance de phénomènes dans lesquels l'eau du sol intervient : nutrition, asphyxie racinaire, exudations racinaires, affaiblissement des racines... (LOUVET, 1984).

C'est donc l'ensemble des interactions entre hôte, agents pathogènes et microorganismes qui est concerné. C'est pour cela qu'il est difficile de savoir si le déficit, ou l'excès, d'eau prédispose la plante aux maladies, ou si les manifestations pathogènes constatées résultent d'infestations préalablement établies.

2. LA COMPACTITE DU SOL ET LES CHAMPIGNONS PATHOGENES DU SOL

Peu de travaux ont été faits sur l'influence de la compacité du sol sur l'état sanitaire des racines, ou même sur la pathologie végétale en générale.

Les études réalisées sur la compacité du sol en rapport avec la physiologie végétale ont permis de déterminer les conséquences d'un compactage sur le sol. Nombreux sont les auteurs affirmant qu'il en résulte une augmentation de la densité apparente (VOORHEES et al., 1975, WARKENTIN, 1971). Ce dernier note également une diminution du niveau d'aération. En effet, la perméabilité du sol à l'air décroît ainsi que la porosité totale (DEJOU, DEKIMPE, 1984), ce qui entraîne une baisse de la diffusion d'oxygène à la fois vers les racines et les micro-organismes.

Au niveau de la plante, O'NEIL et CARROW (1986) ont remarqué des perturbations du système racinaire avec une concentration des racines dans les horizons non compactés (en général en surface), ainsi qu'un ralentissement de l'élongation. HUISMAN (1982) pense que des densités élevées de racines là où les champignons sont les plus nombreux (horizons supérieurs) augmentent les chances de contacts racines-agents pathogènes. Notons que pour DREW et LYNCH (1980) les effets d'une aération pauvre dans une couche saturée ne sont pas très différents de ceux d'une résistance mécanique à la pénétration des racines dans une couche compactée. Mais ces effets sont aggravés par la présence d'agents pathogènes qui, comme les Fusarium, peu dangereux sur des racines saines le sont beaucoup plus en présence d'un sol compacté ou mal drainé. Pour ces deux auteurs, une mauvaise aération du sol prédispose la plante aux attaques.

Lors d'expérimentations en laboratoire, GANGOPADHYAY et al. (1982) prouvent que la survie de Macrophomina phaseolina est mauvaise dans le cas de densités apparentes élevées. Elle l'est également à des densités moindres mais à de fortes humidités. Ils en concluent qu'à long terme, une densité apparente élevée et une forte humidité du sol contribuent significativement à diminuer la survie de M. phaseolina.

En ce qui concerne Phytophthora spp., FULTON et al. (1961) montrent, sous serre, que ces agents pathogènes ont une plus grande incidence quand les sols infestés sont compactés. Plus récemment GRAY et POPE (1986) ont publié des résultats montrant qu'au champ, le nombre de plantes tuées par Phytophthora est plus grand en sols compactés qu'en sols non compactés. Ils font apparaître que sous les conditions de végétation de l'Illinois, les nécroses racinaires dues à Phytophthora spp. sont favorisées par une compacité élevée du sol. Ils attribuent ce phénomène au fait que le compactage crée un environnement favorable au développement de l'agent pathogène et/ou influe sur le système racinaire de l'hôte.

D'autre part, STOLZY et al. (1965) suggèrent que les zoospores de Phytophthora spp. ont besoin de pores remplis d'eau d'au moins 40 à 60 μ de diamètre pour se déplacer. Ceci voudrait dire qu'une des conséquences du compactage du sol, à savoir la variation de la taille des pores et de leur distribution, aurait une influence sur la propagation de certains champignons pathogènes.

Tous ces travaux restent vagues, peu précis. Il en ressort cependant que la compacité du sol a une influence sur l'agent pathogène mais affaiblit en même temps la plante. Là encore il est difficile de distinguer ces deux facteurs.

En conclusion de cette étude bibliographique on peut remarquer que les travaux concernant à la fois l'état physique du sol et l'état sanitaire des racines sont rares, et que de toute façon, ils ont été réalisés dans une optique différente de la nôtre. Il s'agit le plus souvent d'expérimentations sur un champignon pathogène donné en l'absence d'un hôte. Quelquefois le système racinaire est mis en présence d'un agent pathogène; mais l'ensemble agents pathogènes-racine-sol est peu étudié.

LES CHOIX ET BUTS DES TRAVAUX

Le travail présent se distingue de ceux examinés dans l'étude bibliographique qui précède puisqu'il tient compte des agents pathogènes, de la plante et des conditions physiques du sol :

- les agents pathogènes : les sols utilisés sont naturellement infestés et sont, de plus, très fatigués pour la tomate, donc avec un problème pathologique mal défini.
- la plante : il s'agit de la tomate car cette étude entre dans le cadre "fatigue de sols tomate de la vallée du Rhône".
- les conditions physiques du sol : nous ferons varier le potentiel hydrique du sol (2 potentiels matriciels différents) et la compacité (3 porosités différentes).

Le but final est l'observation de l'état sanitaire des racines. Pour cela, il s'agit de trouver une méthode qui permette à la fois le contrôle du potentiel hydrique, de la compacité du sol, et la survie de la plante et des agents pathogènes.

MATERIEL ET METHODES

1. LA PLANTE

L'influence de l'humidité et de la compacité du sol est étudiée sur le système racinaire de la tomate de plein champ (variété Earlymech). On utilise des semences germées. Pour cela les graines sont placées dans une boîte de Petri, sur deux papiers filtres imbibés de 7 ml d'eau stérile. Le tout est mis à l'étuve à 25 ° C pendant 48 h. Ceci permet d'avoir une levée plus homogène et un gain de temps au niveau de l'occupation du matériel.

2. LES SOLS

Les sols utilisés proviennent de la vallée du Rhône. Ils ont été choisis car ils diffèrent l'un de l'autre, et tous deux présentent des signes de fatigue pour la culture de tomate. De plus ils sont connus puisqu'ils font partie d'un ensemble de sols qui ont fait l'objet, en 1985, d'un diagnostic de fatigue des sols. Ce diagnostic se fait à partir de trois sources d'informations :

- une enquête sur le terrain auprès de l'agriculteur qui permet d'en savoir plus sur le passé et l'état actuel de la parcelle,

	6A	9A
pH	7,8	7,6
Calcaire total (%)	54,0	20,0
C.E.C. (meq/Kg)	88,0	154,0
M.O. (%)	19,1	24,1
Argile (%)	24,0	33,0
Limon fin (%)	34,0	20,0
Limon grossier (%)	22,0	16,0
Sable fin (%)	15,0	17,0
Sable grossier (%)	5,0	14,0

**TAB 1 : PRINCIPAUX RESULTATS DES
ANALYSES DE TERRES**

- des analyses granulométriques et nématologiques classiques,
- le test biologique à deux niveaux (BOUHOT, 1981) et ses annexes (isolements, potentiel mycorhizogène, etc...).

Cela permet à chaque niveau de détecter les facteurs limitants potentiels.

2.1 Types de sols (analyse des sols en ANNEXE n^o 1a)

L'un des sols a été prélevé à l'est d'Orange et l'autre dans la région de Carpentras. Ils sont respectivement appelés 6A et 9A. Les prélèvements ont été faits dans la couche allant de la surface à 35 cm de profondeur.

Sol 6A : ce sol d'alluvions fluviales est un limon argileux (tab 1), un peu battant, à forte teneur en calcaire et dépourvu de cailloux.

Sol 9A : ce sol est une argile limono-sableuse, stable et non battante à teneur calcaire modérée (tab 1). La valeur de la capacité totale d'échange de ce sol est telle que l'on peut supposer que sa teneur en argiles gonflantes n'est pas négligeable (ANNEXE n^o 1b). De ce fait sa réhumectation et sa mise à l'équilibre aux potentiels hydriques choisis nécessiteront des temps plus longs que pour 6A. De plus le sol est très caillouteux.

2.2 Conclusions du test à deux niveaux réalisé en 1985

2.2.1 Principe de ce test (ANNEXE n^o 2a)

2.2.2 Sol 6A (ANNEXE n^o 2b)

L'état sanitaire des racines des tomates ayant poussé dans ce sol est très mauvais. L'I.N.R. (Indice de Nécroses Racinaires, ANNEXE n^o 3) est de 2,76 (maximum de l'échelle de notation : 3,00 ANNEXE

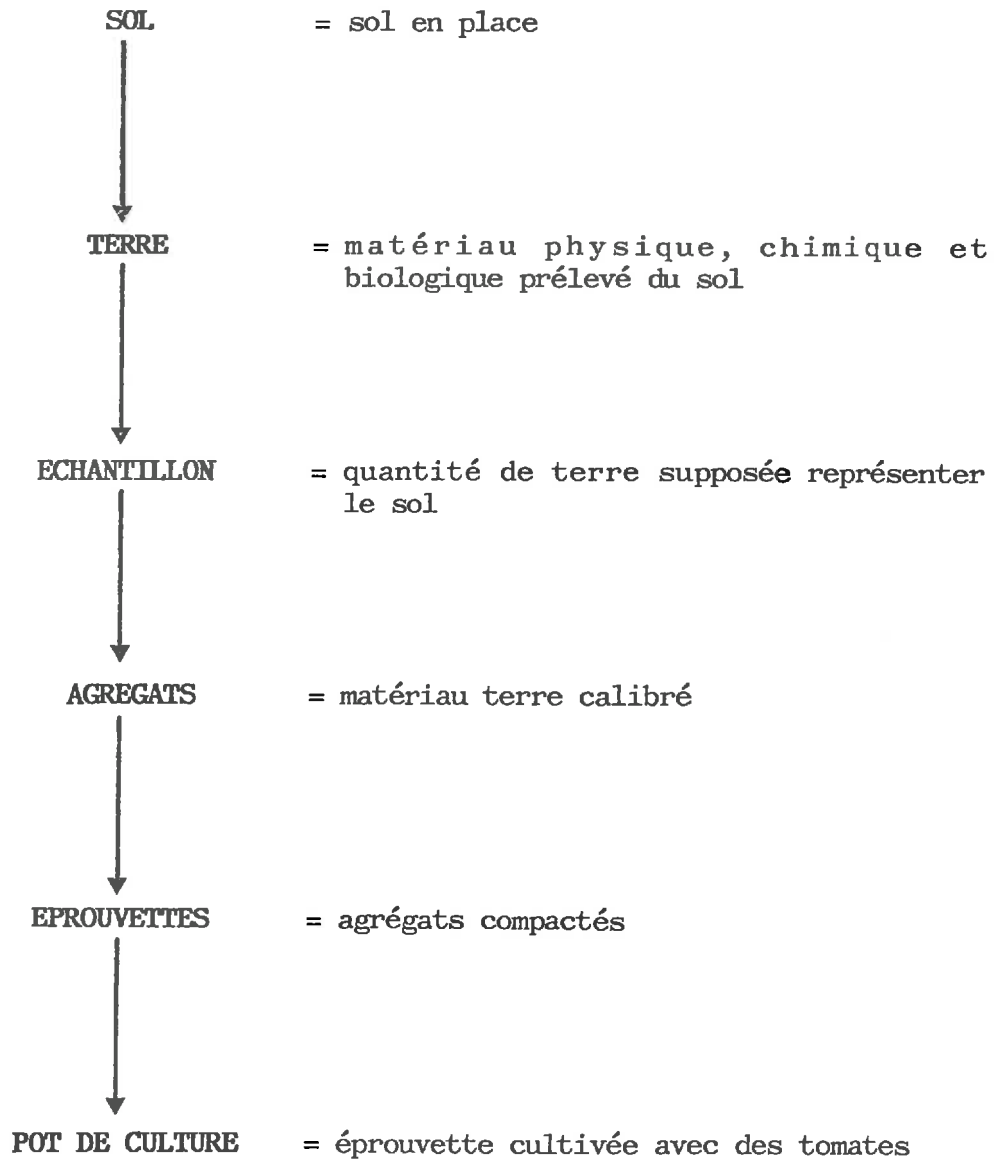


fig 4 : DEFINITION DE QUELQUES TERMES EMPLOYES

n ° 3)). D'autre part, les poids de matière sèche vont en faveur d'une hypothèse biologique, et l'action du traitement "solution nutritive" n'est pas négligeable. L'hypothèse double biologique-nutritionnelle émise à l'issue du premier niveau est confirmée par le deuxième niveau. Cette étude datant de 1985, un potentiel nécrotique racinaire (P.N.R. = potentiel d'un sol à induire des nécroses racinaires sur la plante; BOUHOT, 1982b) a été repris en juin 1986 pour voir s'il y a eu une évolution. L'I.N.R., égal à 2,86, a peu varié.

2.2.3 Sol 9A (ANNEXE n ° 2c)

Au niveau racinaire, ce sol est moins infesté que le précédent, l'I.N.R. est de 1,46. Le test réalisé en 1986 montre qu'il a augmenté, puisqu'il passe à 1,98. C'est encore l'hypothèse double biologique-nutritionnelle qui est retenue lors du premier niveau et qui est confirmée par le deuxième.

3. CONDITIONS GENERALES DE L'EXPERIMENTATION

L'expérimentation consiste à positionner la terre dans des pots (218 ml) en lui appliquant différentes contraintes physiques et à y faire pousser des tomates afin d'examiner leur comportement. Ceci amène l'emploi de termes précis dont les définitions figurent ci-contre (fig 4).

Les expérimentations ont lieu dans une chambre climatisée; le milieu étant clos, l'atmosphère peut être contrôlée :

- photopériode : 13h,
- température : diurne : 25-26 ° C, nocturne : 20 ° C,
- luminosité : 15000 lux,
- hygrométrie : au début des expérimentations, l'humidité de l'air oscillait entre 50 et 70%. Lors de la première période de végétation, et afin de limiter au maximum l'évaporation au niveau des feuilles et de la surface des pots, l'humidité relative a été haussée au maximum (70-90%).

4. PREPARATION DES ECHANTILLONS DE TERRE AVANT LE SEMIS DES TOMATES

Cette opération se déroule en plusieurs étapes :

- préparation des agrégats,
- humectation des agrégats,
- réalisation des éprouvettes de terre.

et a pour but une standardisation et un contrôle de la compacité et du potentiel hydrique des éprouvettes.

Les quelques définitions et principes de physique du sol nécessaires pour une bonne compréhension de cette partie figurent en annexe (ANNEXE n^o 4)

4.1 Préparation des agrégats

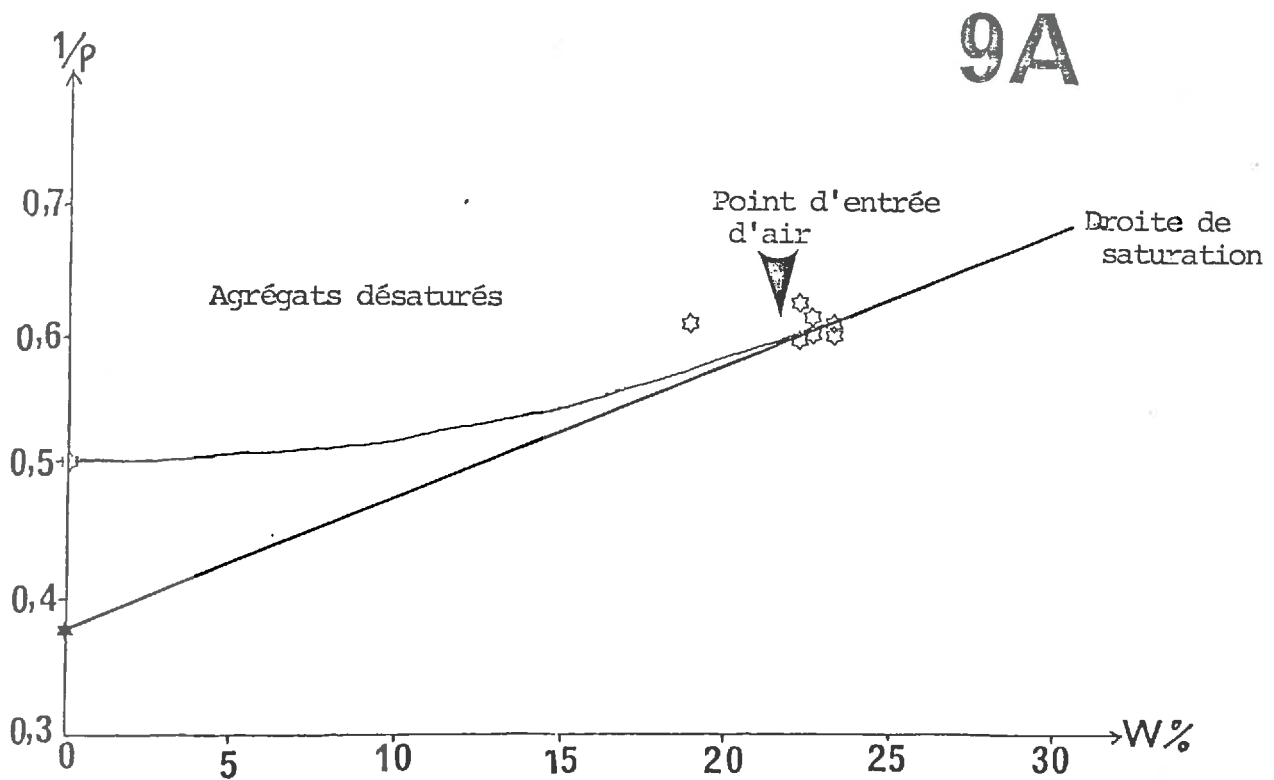
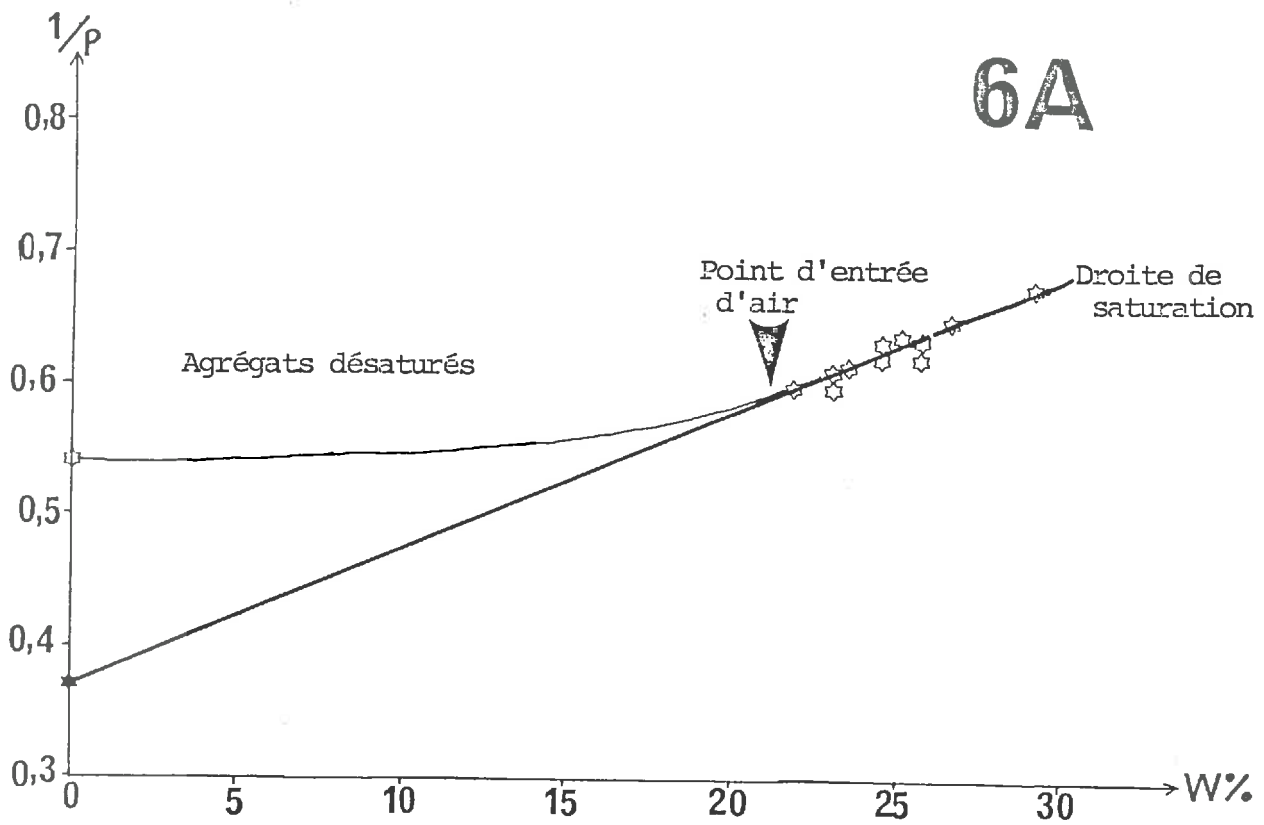
Il s'agit de préparer un milieu homogène tout en laissant la terre à son état textural naturel. La taille des agrégats doit être comprise dans une étroite fourchette; de plus le rapport volume de l'agrégat le plus gros/volume du pot doit être le plus petit possible. Pour répondre à ces contraintes, les terres sont tamisées, mécaniquement, entre 2 et 3 mm.

Après avoir été séchée à l'air, la terre est concassée par petits coups successifs. La quasi totalité des agrégats passe au travers du tamis de 3 mm. Un deuxième tamisage à 2 mm est réalisé. Seuls sont gardés les agrégats de diamètre compris entre 2 et 3 mm.

4.2 Humectation des agrégats

4.2.1 Objectifs

Afin de faciliter le compactage des agrégats, mais aussi de permettre le contrôle du potentiel et de la teneur en eau, les agrégats doivent être saturés en eau. Mais ils ne doivent pas éclater, ce qui empêcherait le contrôle des vides structuraux, ou former une boue car la présence d'eau libre génèrerait le compactage



ρ = densité
 W = humidité

fig 5 : COURBES DE RETRAIT

4.2.2 Détermination du potentiel d'humectation

Nous ne travaillons que sur le potentiel matriciel de l'eau dans le sol. La courbe de retrait (fig 5) réalisée incomplètement pour chaque terre et l'observation des agrégats ont permis de déterminer le potentiel d'humectation optimal. Il sera aussi proche que possible, mais supérieur, au point d'entrée d'air.

Les courbes de retrait : les agrégats sont saturés à un potentiel correspondant à une faible succion (-15 mb), puis ils sont soumis à des dépressions croissantes (jusqu'à -100 mb) ce qui provoque leur dessiccation. Pour chaque potentiel, des mesures d'humidités et de densités sont faites. Les points obtenus sont placés par rapport à la droite de saturation (construite à partir de la mesure de la densité de solide, ANNEXE n ° 5). On vérifie alors si les agrégats sont toujours saturés.

Remarque 1 : nous avons vu que les deux sols sont différents. Pour 6A les mesures de densités et d'humidités sont faites après 24 h d'équilibre au potentiel étudié. Le délai sera de 48 h pour 9A car la circulation de l'eau est plus lente (ANNEXE n ° 6).

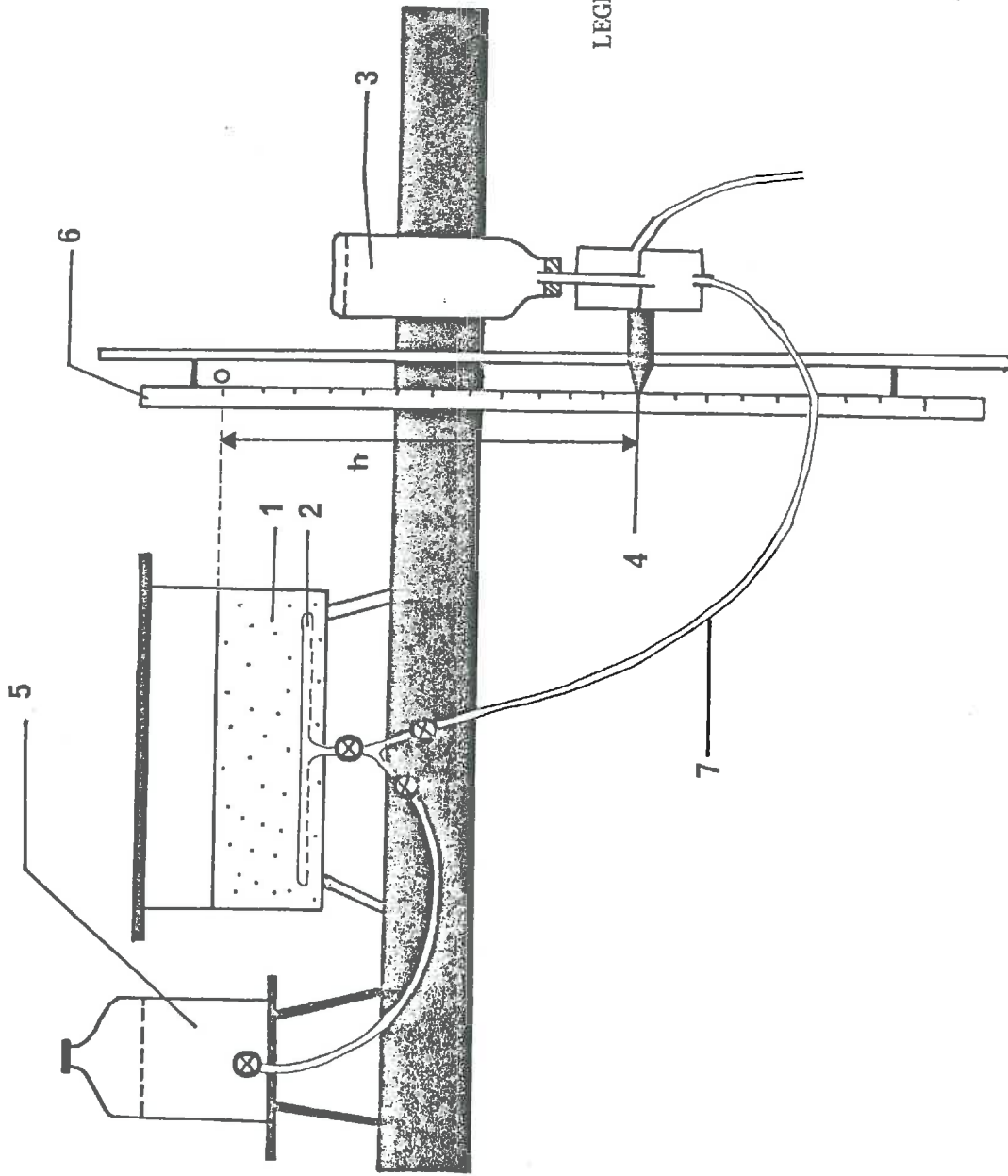
Remarque 2 : suite à un incident survenu au cours des essais, toute la gamme de potentiels n'a pu être étudiée pour 9A.

Les observations : le premier potentiel retenu était de -20 mb. Les essais ultérieurs, réalisés à Dijon, donnant des agrégats boueux et difficilement manipulables, cette valeur a été remplacée par -25 mb.

4.2.3 Humectation des agrégats et maintien au potentiel choisi

Le matériel utilisé est d'un principe équivalent à celui qui a permis de réaliser les essais pour la détermination des courbes de retrait. Ce sont des tables à dépressions. Les tables utilisées (4 au total) permettent de travailler dans une gamme de potentiels allant de 0 à -100 mb. Il en existe d'un autre type qui permet de travailler entre -100 et -500 mb. En annexe (ANNEXE n ° 7) se trouve un mode d'emploi détaillé des tables du premier type.

Principe : (fig 6 et photo 1) la table à dépressions comprend un bac



LEGENDE

- 1 bac contenant le sable
- 2 rampe d'arrivée d'eau
- 3 vase de Mariotte (réservoir)
- 4 curseur de réglage du potentiel
- 5 bouteille d'eau
- 6 règle graduée en cm
- 7 tuyau

**fig 6 : SCHEMA DE LA TABLE A DEPRESSIONS
ALLANT DE pf 0 A pf 2.0**

- les 24 h supposées suffisantes pour l'obtention de l'équilibre en dessiccation (réalisation des courbes de retrait) étaient nettement sous estimées.
- le phénomène d'hystérésis fait qu'il est impossible d'obtenir les mêmes valeurs d'humidité tant en humectation qu'en dessiccation, et qu'à partir d'un seuil l'humidité n'augmente plus ou que très lentement.

La vérification du potentiel matriciel des agrégats supposés à l'équilibre en utilisant un microtensiomètre (RICHARDS, 1949) a donné la valeur de -39 mb alors que la table était réglée sur -20 mb. Les trois hypothèses présentées plus haut sont acceptables sans que l'on puisse dire laquelle a la plus grande importance. Cependant, par rapport au potentiel de départ (agrégats séchés à l'air : -1 000 b) la différence entre -20 et -39 mb est minime. D'autre part ce phénomène est reproductible, il fera partie de nos hypothèses de travail. Compte tenu de sa teneur en argile, pour 9A, l'hystérésis risque d'être plus accentuée.

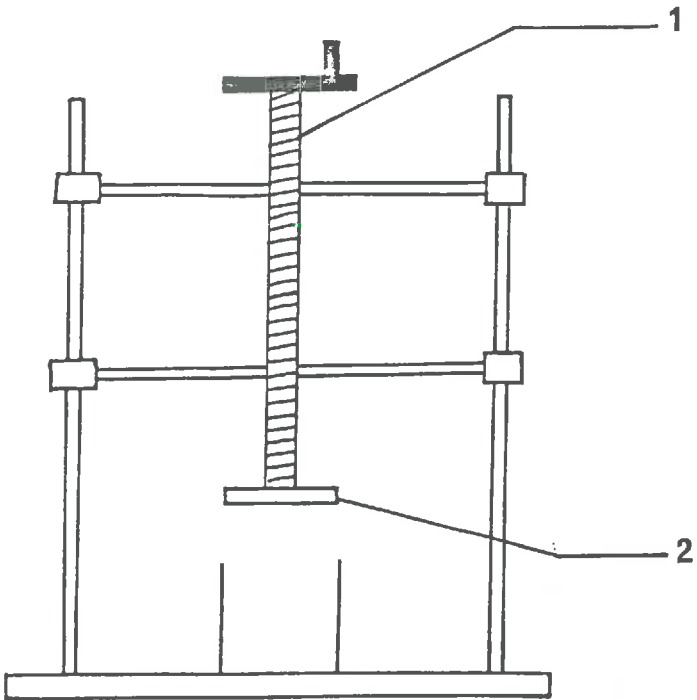
4.3 Réalisation des éprouvettes de terre

4.3.1 Objectifs

Notre but est de réaliser des éprouvettes de terre d'une porosité connue et uniformément répartie sur toute la hauteur. Les dimensions retenues sont les suivantes : 60 mm pour la hauteur et 68 mm pour le diamètre. Il faut que l'humidité et les vides soient répartis de façon homogène dans la masse de l'éprouvette.

4.3.2 Le compactage

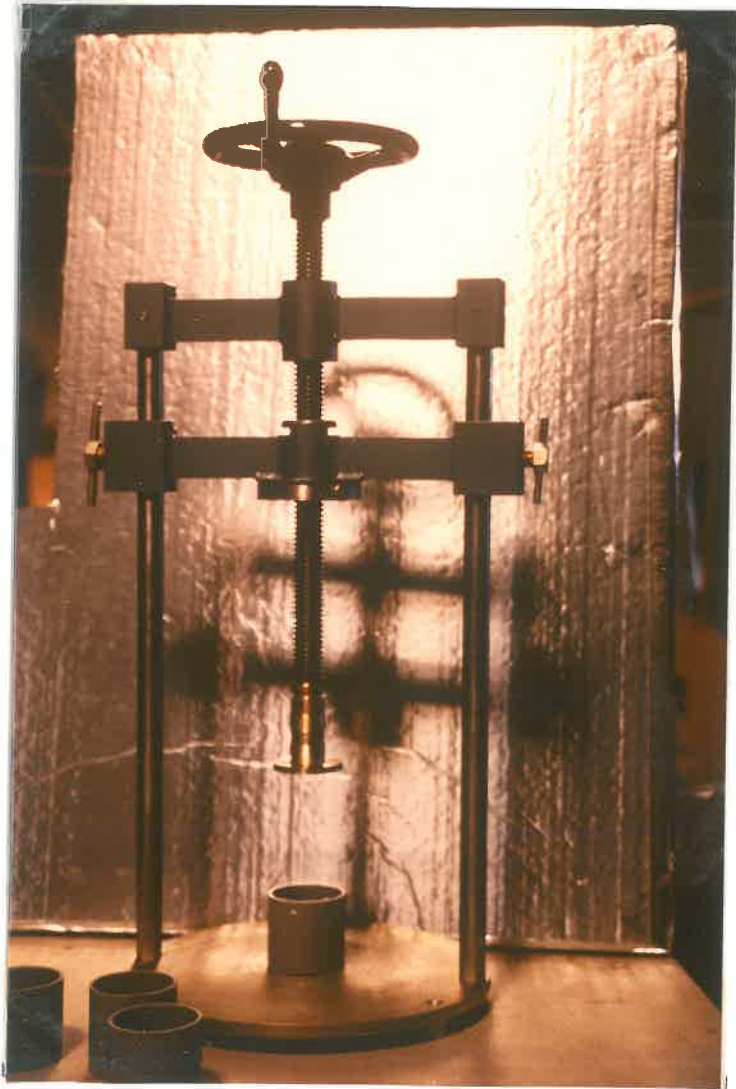
Principe : à une porosité texturale connue est ajoutée une porosité structurale variable. Connaissant l'humidité des agrégats, leur densité de solide, le volume de l'éprouvette, la masse de terre à compacter est calculée en fonction de la porosité choisie (ANNEXE n ° 4).



LEGENDE 1 vis sans fin
 2 piston

fig 7 : SCHEMA DE LA PRESSE

PHOTO 2
PRESSE UTILISEE



Matériel : la presse (fig 7 et photo 2) est d'un principe simple. Une vis sans fin 1 descend le piston 2 jusqu'à 130 mm par rapport à la base. Un système de cales permet de rehausser cette base jusqu'à la hauteur désirée. Les pots, qui doivent être sans fond pour être placés sur les tables à dépressions, sont des segments de tubes de P.V.C.

Quatre types de compactages ont été testés (fig 8). Les mesures d'humidités réalisées sur quatre niveaux de plusieurs éprouvettes ont montré que l'humidité est bien répartie (il n'y a pas de différence significative).

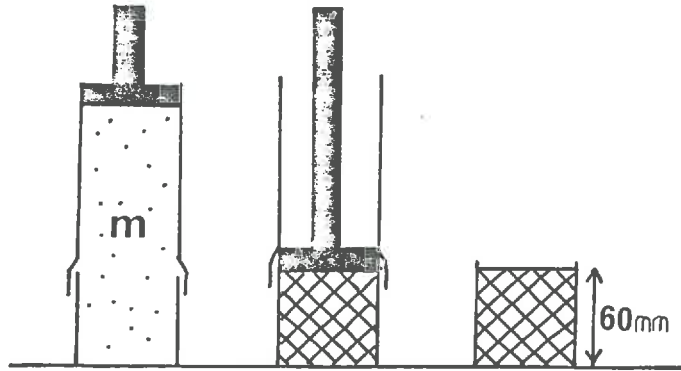
En ce qui concerne la porosité, la méthode adoptée initialement (mesure du volume de l'échantillon par sa poussée hydrostatique dans le pétrole, ANNEXE n ° 8) s'est révélée être inadaptée. Les résultats obtenus sont très proches de la porosité texturale car lors des manipulations les gros pores se vident et ne sont donc pas pris en compte. Finalement les mesures ont été faites par la méthode à la paraffine (ANNEXE n ° 9).

En valeur relative, les résultats sont dans l'ensemble médiocres (fig 8). Il n'y a pas une bonne homogénéité. Mais nous ne savons pas si en valeur absolue les différences ont une grande influence sur le système racinaire. De plus les photographies (fig 9) des éprouvettes, prises aux U.V., montrent qu'il y a une différence entre les deux sols et que, dans certains cas, l'effet bordure du pot et l'interface entre les deux zones de compactage sont marqués.

En fonction des résultats obtenus (fig 8), deux types de compactage ont été retenus :

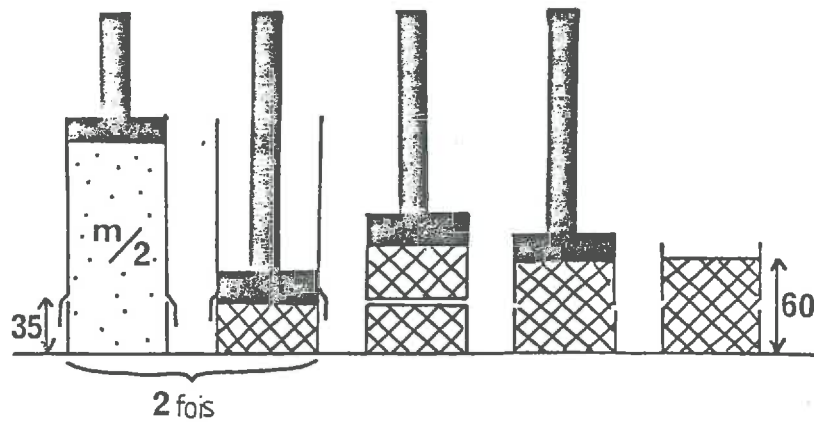
indice des vides structuraux = 0,1type IV
 indice des vides structuraux = 0,2type IV
 indice des vides structuraux = 0,3type III

COMPACTAGE DE TYPE I



est	es		Δ	\bar{e}_s	Δ (%)
	haut	bas			
0,1	0,106	0,183	0,077	0,145	53,1
0,2	0,193	0,292	0,099	0,243	40,8
0,3	0,255	0,363	0,108	0,309	34,9

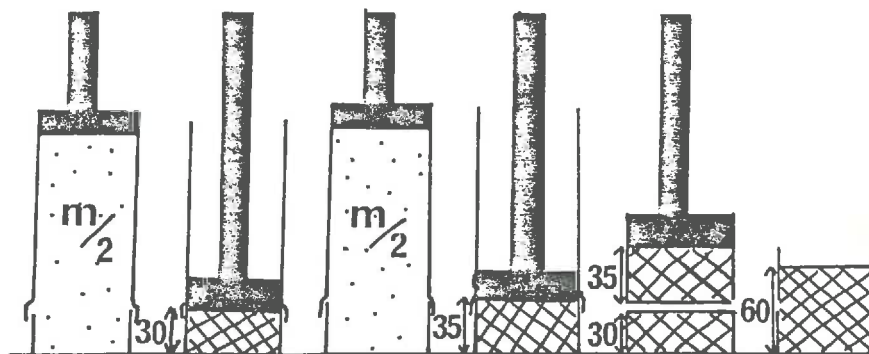
COMPACTAGE DE TYPE II



est	es		Δ	\bar{e}_s	Δ (%)
	haut	bas			
0,1	0,119	0,201	0,08	0,160	51,3
0,2	0,173	0,273	0,100	0,223	44,8
0,3	0,276	0,322	0,046	0,299	15,4

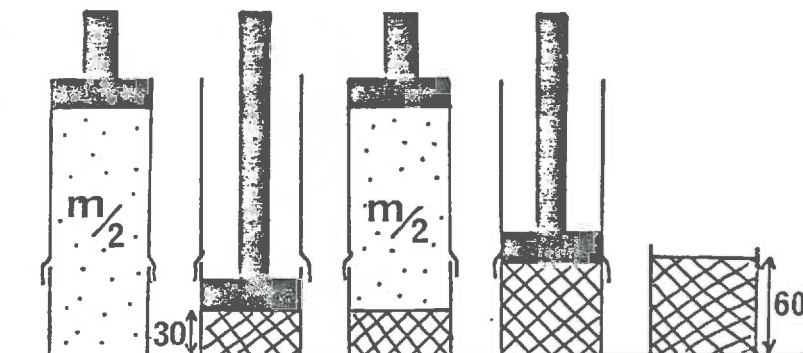
**fig 8 : TYPES DE COMPACTAGES ET RESULTATS
DES MESURES DE POROSITE STRUCTURALE**

COMPACTAGE DE TYPE J.II



e_{st}	e_s		Δ	\bar{e}_s	$\Delta (\%)$
	haut	bas			
0,1	0,038	0,070	0,032	0,054	59,3
0,2	0,185	0,144	0,041	0,165	24,9
0,3	0,275	0,193	0,082	0,234	35,0

COMPACTAGE DE TYPE IV



e_{st}	e_s		Δ	\bar{e}_s	$\Delta (\%)$
	haut	bas			
0,1	0,128	0,086	0,042	0,108	38,9
0,3	0,263	0,154	0,109	0,209	52,3

LEGENDE



- m = masse d'agrégats à compacter
- e_{st} = indice de porosité structurale théorique
- e_s = indice de porosité structurale mesuré
-  terre non compactée
-  terre compactée



PHOTO 3 : POSITIONNEMENT DES EPROUVETTES SUR LA TABLE

cal

al
e
,1

1
s
ones

5. CONSERVATION DES AGREGATS ET DES EPROUVETTES DE TERRE

Pour certaines séries, compte tenu des temps d'humectation requis et de la capacité limitée des tables à dépressions, il y a un temps mort entre l'humectation des agrégats et la mise en place des éprouvettes. Il s'agit de conserver la terre, sous forme d'agrégats ou d'éprouvettes, sans qu'il y ait ni proliférations microbiennes, ni variations de l'humidité.

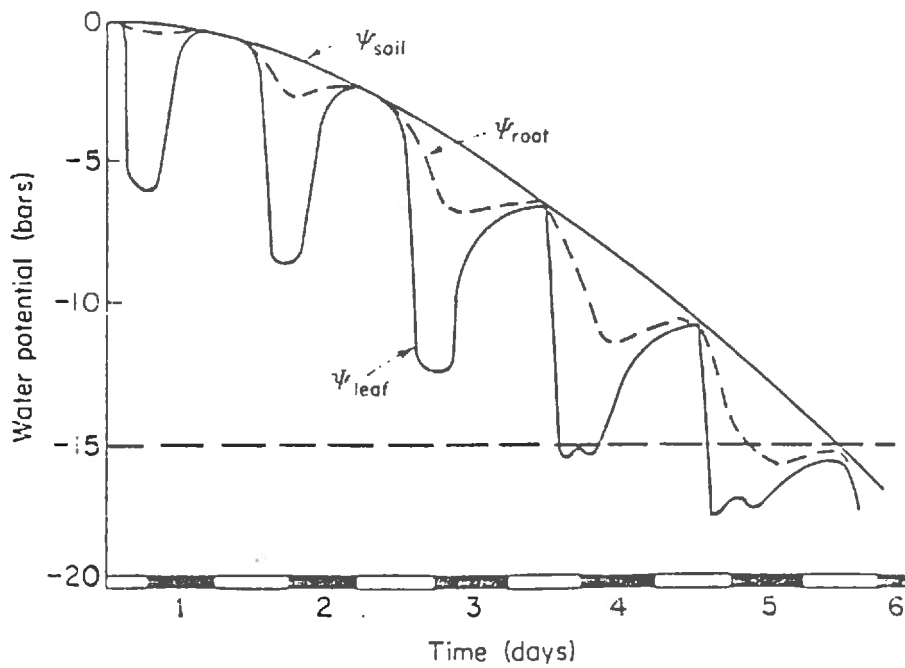
La terre humectée est conservée dans un emballage étanche en chambre froide à 6 ° C. Etant donné les risques de modifications de la flore microbienne, la conservation est limitée à 20 jours. Le sac contenant les agrégats est transporté sur un support rigide pour éviter le compactage des agrégats du fond. D'autre part des problèmes de condensation sont apparus ce qui pose la question de l'homogénéité de l'humidité dans la masse de terre. Des mesures d'humidité réalisées sur des éprouvettes après 20 jours de conservation ont montré qu'elle varie peu par rapport à l'humidité de départ (lors du tassement).

6. MISE EN PLACE DES ESSAIS

Sur chaque table à dépressions sont placées, au hasard, 24 éprouvettes de terre (soient 8 répétitions par porosité) ce qui nécessite 10 à 12 kg d'agrégats humectés (donc 4 cycles d'humectation). Avant la mise en place, un film de plastique noir est tendu sur le bac à sable. A l'aide d'un embout chauffé 24 trous sont faits. Cette opération a pour but de limiter toute évaporation indésirable au niveau du sable. Dans chacun des 24 trous est positionnée une éprouvette (photo 3). Les éprouvettes sont bien appuyées sur la surface du sable de façon à ce que le contact éprouvette-sable soit le plus étroit possible (pour permettre la circulation de l'eau et assurer la continuité du système). Avant le semis,

es	NOCTURNE (mb)	DIURNE (mb)	
	sans plastique	sans plastique	avec plastique
0,1	60	90	30
0,2	110	150	60
0,3	150	200	90

**TAB 2 : POTENTIELS HYDRIQUES MESURES
AVEC DES MICROTENSICOMETRES**



**fig 11 : VARIATIONS DU POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL, DES FEUILLES
ET DES RACINES D'UNE PLANTE POUSSANT DANS UN SOL NON IRRIGUE
(SLATYER, 1967)**

et pour qu'elles se mettent à l'équilibre, les éprouvettes restent 4 à 5 jours au potentiel auquel est réglée la table concernée (-25 ou -100 mb). Durant cette période, le couvercle du bac évite les pertes par évaporation au niveau de la surface des éprouvettes.

Les semences utilisées sont prégermées. Dans chaque pot sont placées 5 graines, germe vers le bas. Le germe doit être le plus petit possible pour limiter les risques de le casser. Une fois que la graine est en place, elle est coincée avec de la terre du pot pour éviter, compte tenu des faibles indices des vides, que ce soit la graine qui remonte au lieu que la racine pénètre dans le pot. Ce n'est que lorsque les plantules sortent de terre que le couvercle du bac est enlevé.

7. VERIFICATIONS DU POTENTIEL HYDRIQUE EN COURS DE VEGETATION

La période de végétation dure 5 semaines à partir du semis. Les vérifications du potentiel sont effectuées avec des microtensionnètres. Elles ont été réalisées sur les deux sols à trois porosités différentes. Les résultats sont similaires pour les deux sols. Lors de la première semaine de végétation, le potentiel étudié (-25 mb) a été maintenu pour les trois porosités. Par la suite, un gradient apparaît en fonction de l'indice de porosité structurale (tab 2); mais tous les potentiels mesurés sont très inférieurs à -25 mb. Afin de savoir si ce déficit est dû à une évaporation excessive à la surface des pots, ou à un approvisionnement en eau insuffisant, un plastique noir avec de petites ouvertures en croix pour passer les plantes a été installé sur le bac, réduisant ainsi l'évaporation au maximum. Le potentiel hydrique diminue sensiblement (tab 2), il y a une amélioration sans qu'il y ait un retour à -25 mb. On peut en conclure que même en éliminant le facteur évaporation à la surface des pots, le maintien du potentiel n'est pas possible. Ceci est encore infirmé par le fait que lorsqu'il ne reste plus que 8 pots sur la table, le potentiel, quelque soit la porosité du pot, se situe entre -25 et -40 mb.

D'autre part, un autre facteur s'avère incontrôlable : les variations du potentiel dues aux variations de l'évaporation au niveau de la plante au cours d'une journée (fig 11).

Ajoutons que ces mesures ont été faites dans des cas où les plantes étaient très peu développées par rapport à la normale. Dans des conditions normales de végétation (sol non fatigué, porosité suffisante, drainage suffisant) il est probable que les potentiels mesurés soient encore inférieurs.

Toutes ces remarques seront à prendre en compte lors de l'interprétation des résultats étant donné les incertitudes qu'elles introduisent.

RESULTATS

Toutes les données brutes se situent en annexe (ANNEXES n ° 10 et 11) sous forme de tableaux.

Pour chaque sol et pour chaque potentiel hydrique (-25 ou -100 mb) des dépouillements ont lieu à la 3^{ème}, à la 4^{ème} et à la 5^{ème} semaine après le semis. Afin de mesurer (ou d'estimer) la croissance des plantes et l'état sanitaire des racines, les critères suivants sont pris en compte :

- poids de matière sèche de la partie aérienne et de la partie souterraine des plantes (24 h à 105 ° C),
- longueur des systèmes racinaires,
- pourcentage de longueur de racines nécrosées par rapport à la longueur totale du système racinaire (notation à la loupe binoculaire à l'aide d'un quadrillage, grossissement fois 6),
- I.N.R.

En plus, des isolements fongiques sont réalisés sur des racines nécrosées après 5 semaines de culture.

6A

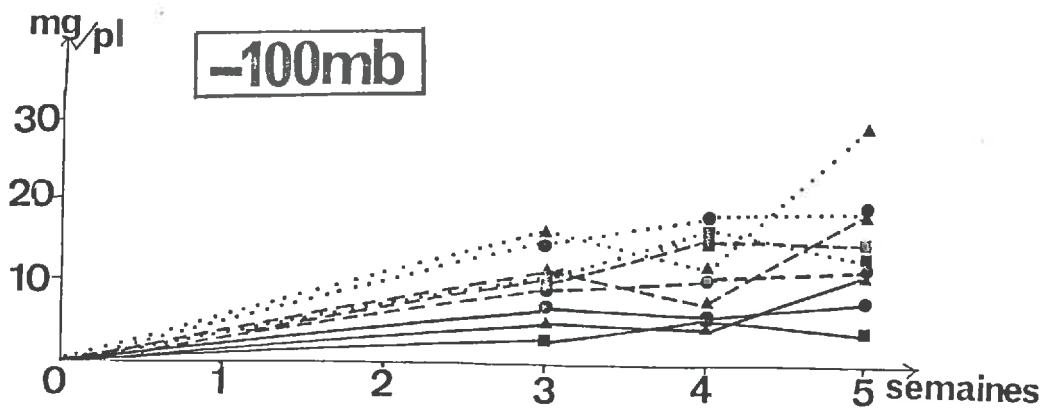
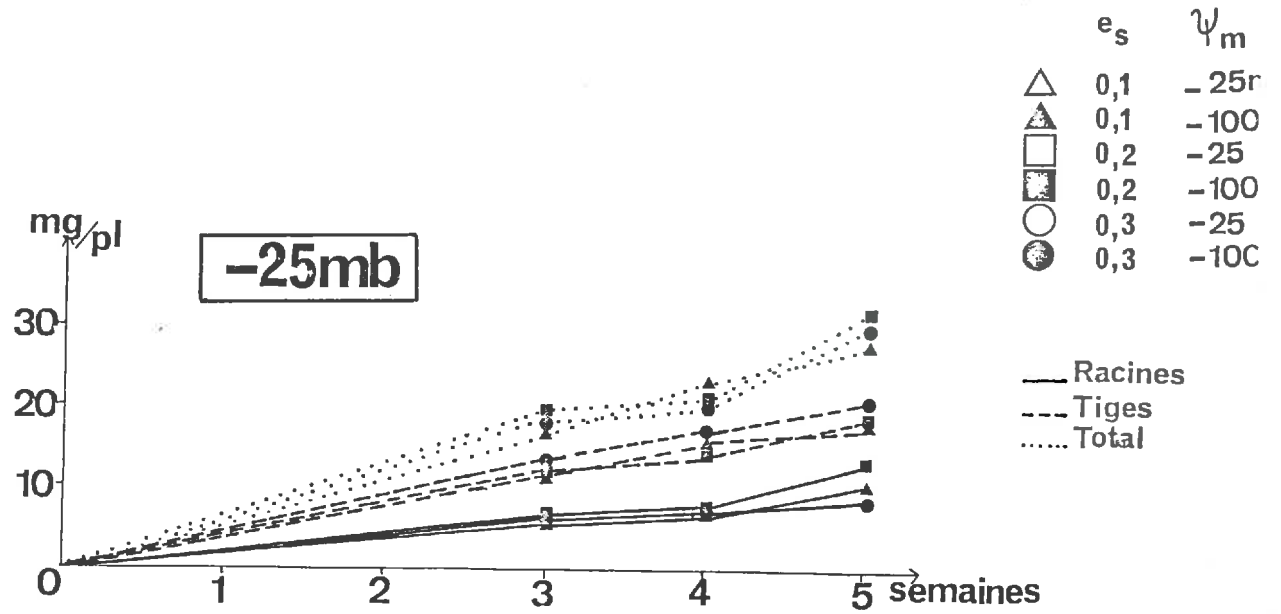


FIG 12 : POIDS DE MATIERE SECHE : EVOLUTIONS
EN FONCTION DU TEMPS ET DES
CONSTRAINTES PHYSIQUES

Poids secs totaux

	Somme des carrés	ddl	Variance	F _{cal}	F _{tab5%}	Obser.
Entre potentiels hydriques	195,9	1	195,9	1,1	5,99	N.S.
Entre porosités structurales	58,7	2	29,3	0,2	5,14	N.S.
Interaction	165,9	2	83,0	0,4	5,14	N.S.
Résiduelle (erreur)	1116,6	6	186,1	-	-	-

Poids secs racinaires

	Somme des carrés	ddl	Variance	F _{cal}	F _{tab5%}	Obser.
Entre potentiels hydriques	25,3	1	25,3	0,7	5,99	N.S.
Entre porosités structurales	18,4	2	9,2	0,3	5,14	N.S.
Interaction	56,1	2	28,1	0,8	5,14	N.S.
Résiduelle (erreur)	211,9	6	35,3	-	-	-

TAB 3 : POIDS DE MATIERE SECHE (5^{ème} SEMAINE) :
ANALYSE DE VARIANCES A DEUX VOIES

1. PREMIER ESSAI REALISE AVEC LA TERRE 6A

1.1 Développement des plantes

1.1.1. Poids secs

Les figures 12 présentent l'évolution en fonction du temps, des poids secs des racines, des tiges, et de la plante totale sous l'effet des potentiels hydriques et des porosités structurales appliqués (12a pour le potentiel hydrique de -25 mb, 12b pour -100 mb).

A partir de ces deux figures, on remarque que les plantes se sont très peu développées, les gains de poids sont faibles. On ne note pas de corrélation entre la porosité et les poids secs, ni de corrélation entre le potentiel hydrique et les poids secs. Il faut attendre la 5^{ème} semaine pour commencer à voir un effet des porosités structurales sur les poids secs. Ces différences observées ne sont cependant pas significatives, comme nous le montrent les analyses statistiques réalisées (analyse de la variance à deux voies, tab 3) sur les poids secs racinaires et totaux obtenus à la 5^{ème} semaine. Ces analyses nous apprennent, d'autre part, qu'il n'y a pas, sur les poids secs, d'effets significatifs des potentiels hydriques, ni des porosités structurales, et pas d'interaction significative entre potentiels hydriques et indices des vides structuraux.

On peut également observer que la proportion moyenne système aérien/système racinaire des plantes, jugée par les poids secs, est de 2/1 (66%/33%).

Durant la période de végétation nous avons pu observer que les plantes étaient de couleur violacée, et qu'il y avait des dépérissements foliaires à partir de la 3^{ème} semaine.

1.1.2. Enracinement

Pour juger de l'enracinement des plantes nous disposons du poids sec moyen et de la longueur moyenne des systèmes racinaires. Le coefficient de la corrélation existant entre les poids secs racinaires et la longueur des systèmes racinaires est à la limite de la



Photographie 7 : ASPECT DES RACINES QUI ONT
POUSSE DANS LA TERRE



Photographies 8 et 9 :
RAMIFICATIONS OBSERVEES A
ENVIRON 2,5 cm DE LA
SURFACE DU POT



signification car il n'est que de 0,6. Pour expliquer ceci deux hypothèses sont possibles :

- les poids secs racinaires sont erronés,
- les longueurs des systèmes racinaires sont erronées.

La première de ces hypothèses peut être éliminée car la corrélation qui existe entre les poids secs totaux et les poids frais totaux a un coefficient hautement significatif ($r = 0,8$). C'est donc la mesure de la longueur des systèmes racinaires qui est incorrecte. Cette erreur est due aux conditions expérimentales, en effet, nous avons observé différents comportements racinaires :

- l'effet micro-pot comme le montrent les photos 4 et 5. Les racines n'arrivent pas à pénétrer dans la terre, elles se développent dans le trou fait lors du semis. Les racines remontent vers la surface pour s'y développer. Ce phénomène, qui a été observé à tous les potentiels hydriques et toutes les porosités structurales étudiés, rend la mesure de la longueur réelle du système racinaire très difficile.
- lorsque les racines atteignent les bords du pot, en passant par la surface, elles se développent ensuite entre le pot et la terre (photo 6). Elles sont alors droites et très peu nécrosées. Ceci a surtout été observé pour le plus faible indice des vides structuraux.
- les racines qui ont poussé dans la terre sont reconnaissables (photo 7), elles sont toutes tordues, irrégulières et courtes, ce qui rend la mesure de leur longueur difficile. D'autre part, pour l'indice des vides le plus élevé, et ce aussi bien à -25 qu'à -100 mb, des ramifications anormales (photos 8 et 9) à 2,5-2,7 cm de profondeur ont été observées, ce qui correspond avec la présence d'une interface entre les deux zones de compactage.

6A

e_s	ψ_m
△	0,1 -25mb
▲	0,1 -100
□	0,2 -25
■	0,2 -100
○	0,3 -25
●	0,3 -100

— Racines
 - - - Tiges
 Total

-25mb

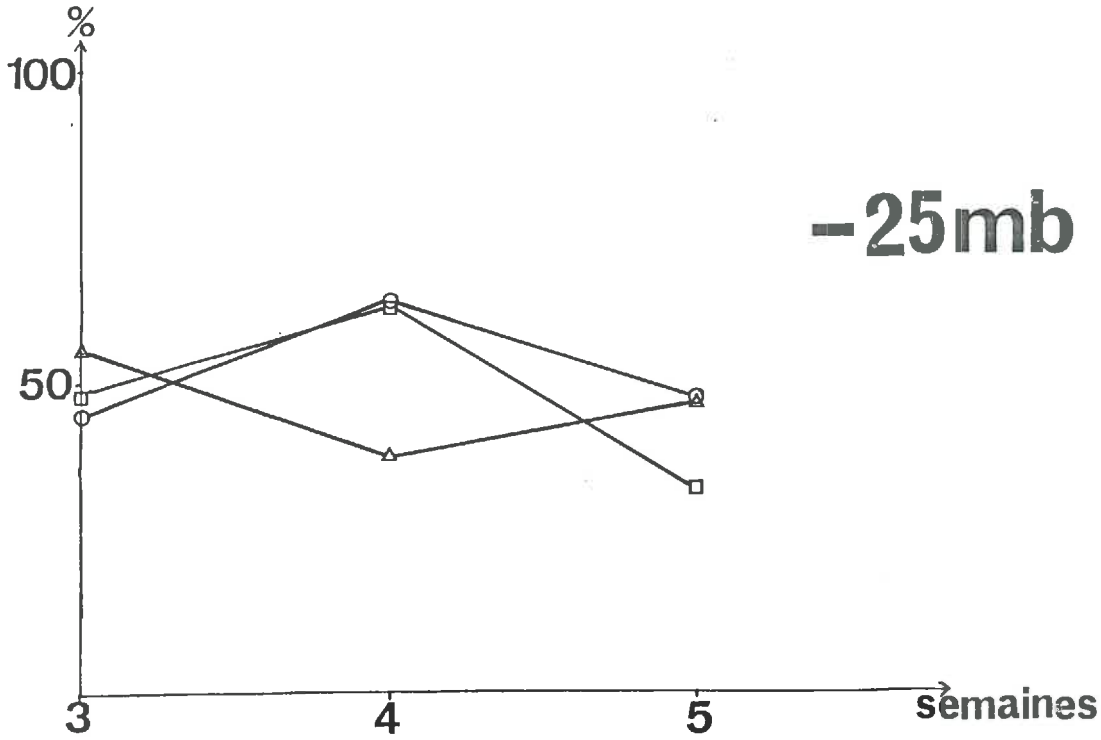


FIG 14a

-100mb

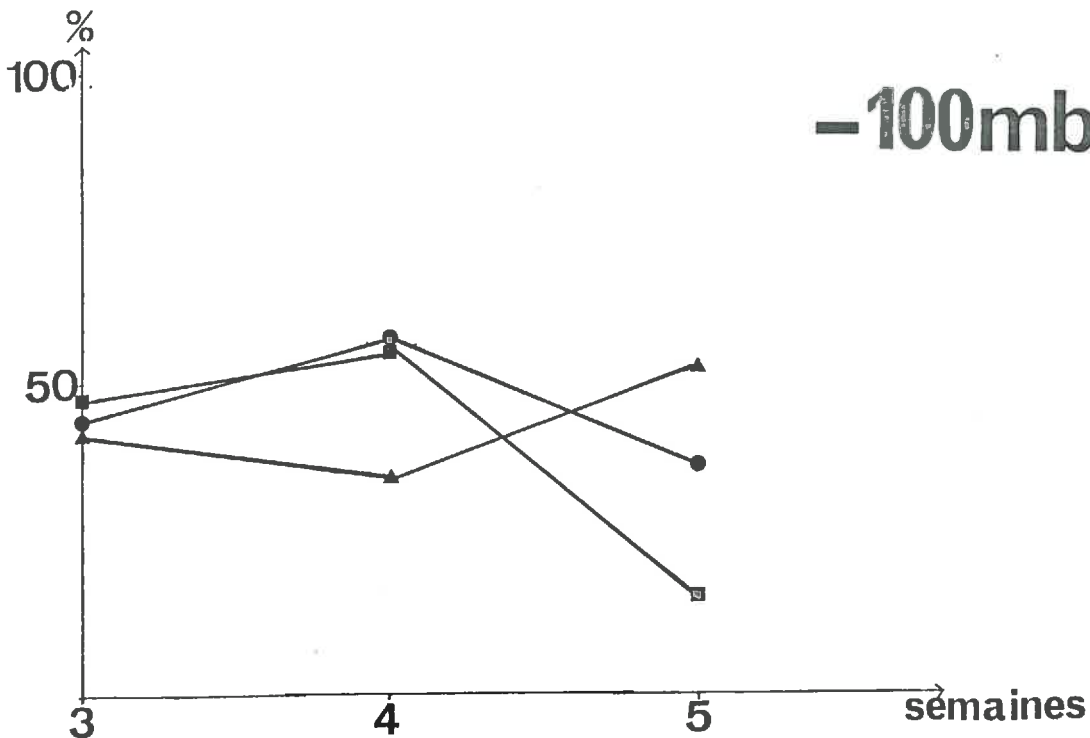


FIG 14b

FIG 14 : LONGUEUR NECROSEE DES SYSTEMES RACINAIRES :
 EVOLUTION EN FONCTION DU TEMPS ET CONTRAINTES
 PHYSIQUES

4^{ème} semaine

	Somme des carrés	ddl	Variance	F _{cal}	F _{tab5%}	Obser.
Entre potentiels hydriques	23,0	1	23,0	0,2	5,99	N.S.
Entre porosités structurales	495,0	2	247,6	2,6	5,14	N.S.
Interaction	1,0	2	0,5	0,0	5,14	N.S.
Résiduelle (erreur)	574,4	6	95,7	-	-	-

5^{ème} semaine

	Somme des carrés	ddl	Variance	F _{cal}	F _{tab5%}	Obser.
Entre potentiels hydriques	68,6	1	68,6	1,1	5,99	N.S.
Entre porosités structurales	494,5	2	247,3	3,9	5,14	N.S.
Interaction	100,6	2	50,3	0,8	5,14	N.S.
Résiduelle (erreur)	380,5	6	63,4	-	-	-

TAB 5 : LONGUEUR NECROSEE DES SYSTEMES RACINAIRES (%) :
ANALYSE DE VARIANCES A DEUX VOIES APRES TRANSFORMATION
ANGULAIRE DES POURCENTAGES

1.2 Etat sanitaire des racines

Si la notation par classes des nécroses racinaires (I.N.R.) convient pour classer ou comparer des sols, il est difficile de l'utiliser dans la comparaison de différents traitements ou pour étudier l'évolution de la proportion de racines nécrosées. L'échelle n'est pas assez précise, on se trouve forcément dans une des classes sans que les intermédiaires puissent être étudiés. Cette notation a été effectuée, elle figure en annexe. Pour la présentation et l'étude des résultats, nous lui avons préféré la notation à la loupe binoculaire. Cette dernière permet le calcul du pourcentage de la longueur nécrosée du système racinaire par rapport à la longueur totale de ce même système. Les pourcentages présentés (fig 14a et 14b) sont cependant un peu sous estimés puisque dans la mesure de la longueur totale du système racinaire il a été tenu compte des racines qui se sont développées à l'extérieur de la terre et qui, elles, sont peu nécrosées.

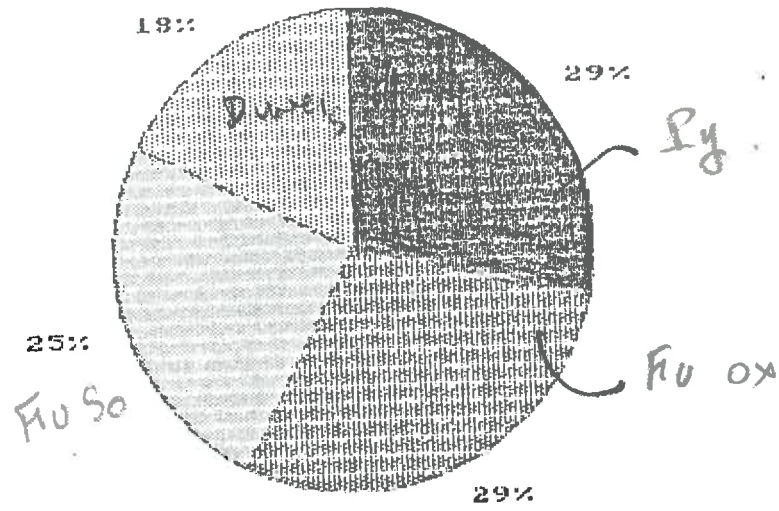
D'après les figures 14 on ne note pas de variations de la proportion de racines nécrosées, ni en fonction du temps, ni en fonction de la porosité structurale ou du potentiel hydrique. La quantité de nécroses est constante et, est comprise entre 40 et 50%. Comme les racines se développent et s'allongent dans le temps, on peut dire qu'au fur et à mesure du développement du système racinaire, des nécroses se forment, la pression pathologique est donc quantitativement constante.

Il faut attendre la 5^{ème} semaine de végétation pour commencer à voir un effet de la porosité structurale sur le pourcentage de longueur nécrosée du système racinaire. Ceci est surtout marqué pour le potentiel hydrique le plus faible (-100 mb). Il n'apparaît pas de corrélation entre porosité et quantité de nécroses.

Les résultats des analyses statistiques (analyses de la variance à deux voies après transformation angulaire des pourcentages, tab 5a et 5b) montrent l'absence, sur la proportion de longueur nécrosée :

- d'effets significatifs du potentiel hydrique,
- d'effets significatifs de la porosité structurale,
- d'interactions significatives entre les potentiels hydriques et les porosités étudiés.

Sol non traité



POTENTIEL HYDRIQUE -25 mb

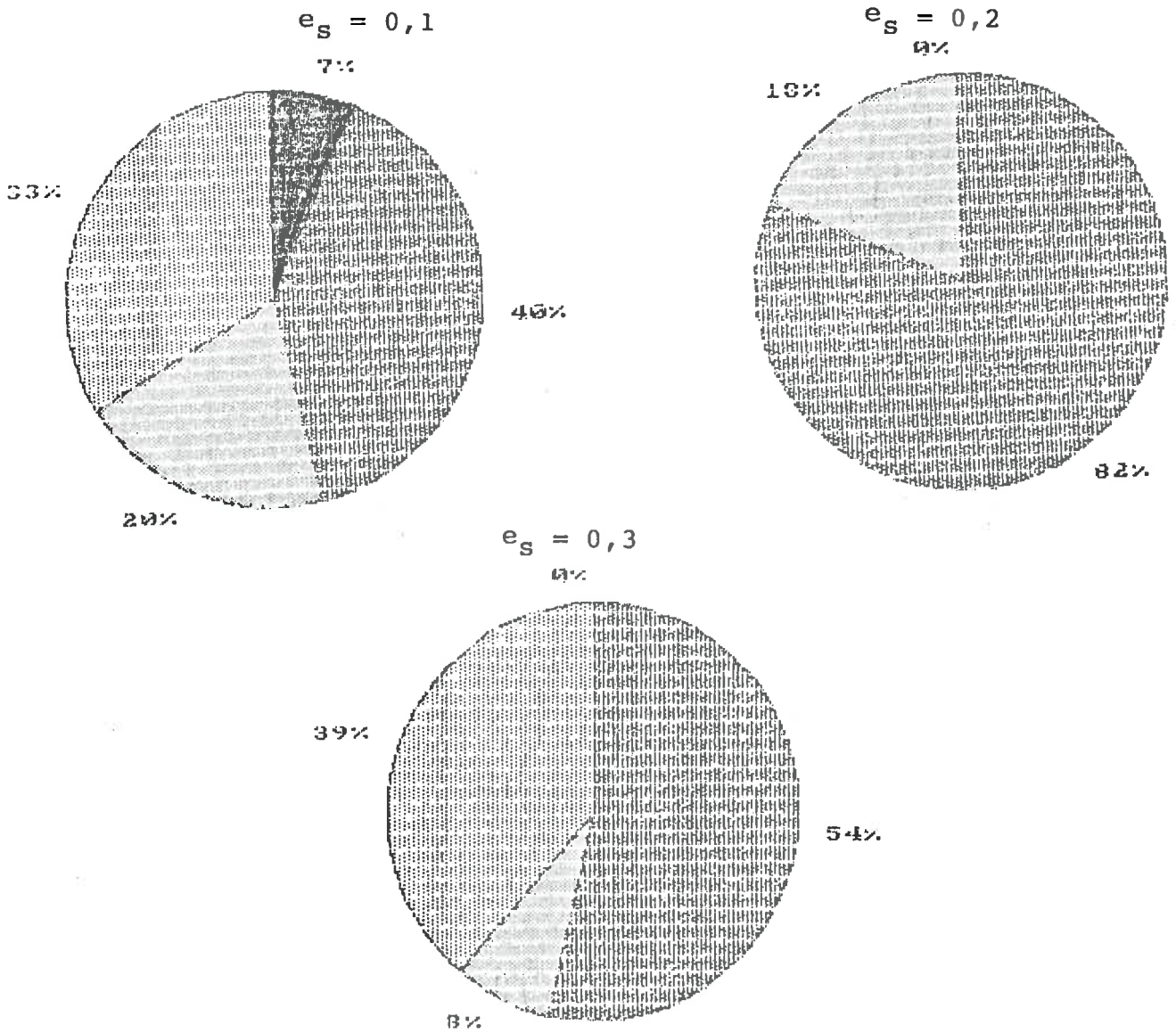
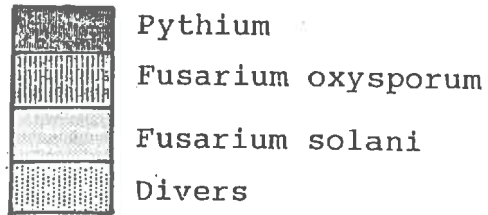
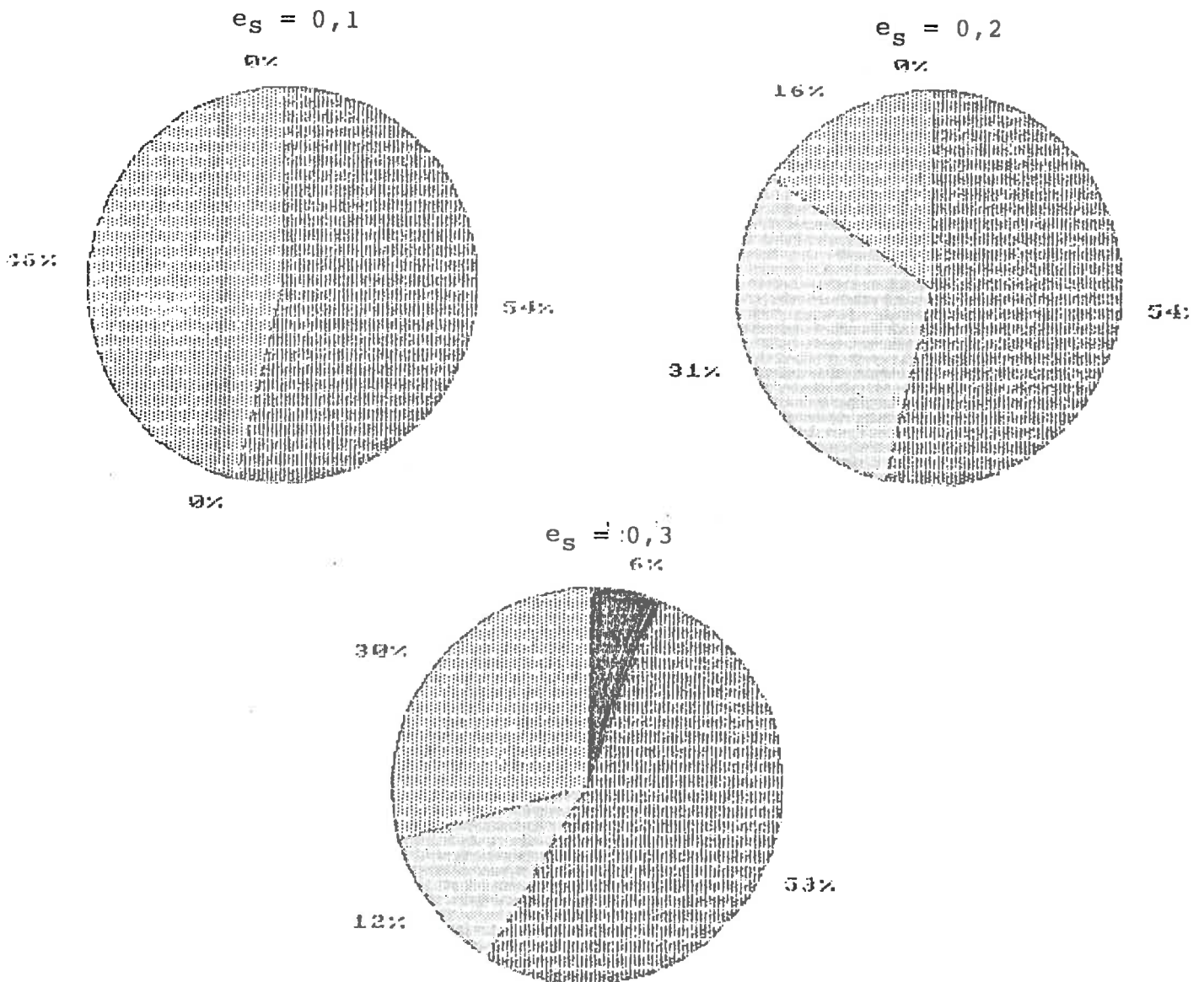


FIG 15 : SPECTRES FONGIQUES ISOLES DES NECROSES RACINAIRES :
EVOLUTION EN FONCTION DES CONTRAINTES PHYSIQUES

LEGENDE



POTENTIEL HYDRIQUE -100 mb



PYTHIUM (χ^2)

tab. a

	- 25	- 100	0,1	0,2	0,3
Sol de départ	9,47 H.S.	10,66 H.S.	6,15 S.	7,22 H.S.	6,76 H.S.
- 25	-	0,00 N.S.	-	-	-
0,1	-	-	-	≈ 0 N.S.	≈ 0 N.S.
0,2	-	-	-	-	≈ 0 N.S.

FUSARIUM OXYSPORUM (χ^2)

tab. b

	- 25	- 100	0,1	0,2	0,3
Sol de départ	7,28 H.S.	6,72 H.S.	2,69 N.S.	10,66 H.S.	5,35 S.
- 25	-	0,07 N.S.	-	-	-
0,1	-	-	-	2,15 N.S.	0,17 N.S.
0,2	-	-	-	-	0,97 N.S.

FUSARIUM SOLANI (χ^2)

tab. a

	- 25	- 100	0,1	0,2	0,3
Sol de départ	0,78 N.S.	0,07 N.S.	1,94 N.S.	1,25 N.S.	1,58 N.S.
- 25	-	≈ 0 N.S.	-	-	-
0,1	-	-	-	0,98 N.S.	0,12 N.S.
0,2	-	-	-	-	1,22 N.S.

aussi bien pour les résultats de la 4^{ème} que de la 5^{ème} semaine de végétation.

Par contre, on observe nettement un déplacement du spectre fongique isolé des nécroses racinaires (fig 15). Le témoin est le spectre isolé des nécroses racinaires de tomates cultivées dans un sol "non traité" (conditions de compactage et d'arrosage identiques à celles du test biologique à deux niveaux). Ce témoin se caractérise par :

29% de Pythium

29% de Fusarium oxysporum

24% de Fusarium solani

18% de champignons divers (vraisemblablement non pathogènes)

Par rapport à ce spectre, dans ceux obtenus à partir d'isolements sur nécroses de plantes cultivées sous les contraintes hydriques et de porosité fixées, il y a une disparition presque complète des Pythium. Inversement, la fréquence d'apparition des Fusarium oxysporum double dans les isolements. Il n'y a pas de variations significatives du nombre de Fusarium solani (tab 6c). Si l'on compare les spectres obtenus pour chaque potentiel hydrique, on note qu'aucun de ces deux potentiels n'a d'effets significativement différents de l'autre (tab 6). La comparaison des spectres obtenus à chaque porosité étudiée aboutit à la constatation qu'aucune d'entre elles ne diffère significativement des deux autres en ce qui concerne les résultats des isolements fongiques. De plus, ni l'augmentation du compactage, ni celle du potentiel hydrique ne sont corrélées avec des fréquences évidentes de champignons pathogènes isolés.

1.3 Résumé des résultats obtenus

Dans cet essai, les plantes se sont très peu développées et les poids secs obtenus ne varient pas en fonction du potentiel hydrique, ou en fonction de la porosité structurale, ou en fonction de leur application simultanée. La proportion de nécroses, jugée en pourcentage de la longueur totale du système racinaire, reste élevée et proche de 50% quels que soient les potentiels et les porosités considérés.

	Contrainte biologique		Contraintes physiques		
	terre désinfectée	non désinfec.	non tassé	$e_s=0,1$	$e_s=0,3$
SERIE 1	XXX		XXX	XXX	XXX
SERIE 2		XXX	XXX	XXX	XXX

(Un seul potentiel hydrique : -25 mb)

TAB 7 : PROTOCOLE DU DEUXIEME ESSAI REALISE AVEC 6A

25 mb

	Contraintes physiques sol désinfecté		
	Non compactée	$e_s=0,1$	$e_s=0,3$
Poids secs des racines (mg/pl)	24,5	21,6	19,0
Poids secs des tiges (mg/pl)	118,7	148,4	180,9
Poids secs totaux (mg/pl)	143,2	160,0	200,0
Longueur du système racinaire (cm/pl)	135,0	112,0	140,0
Nécroses racinaires (en % de la longueur du système racinaire)	0	0	0

TAB 8 : RESULTATS OBTENUS A LA 3^{ème} SEMAINE AVEC
6A DESINFECTE

On observe un déplacement de la flore fongique isolée des nécroses racinaires, qui se traduit par une forte réduction des Pythium au profit d'une augmentation des Fusarium oxysporum quand les plantes ont été cultivées dans des pots contenant la terre à laquelle nous avons appliqué des contraintes physiques (compacité et potentiel hydrique).

2. DEUXIEME ESSAI REALISE AVEC LA TERRE 6A

Le premier essai réalisé avec la terre 6A nous a permis de voir que les plantes ont survécu sous les contraintes imposées, mais qu'elles se sont peu développées. Ce deuxième essai a pour but de dissocier les effets relatifs de la contrainte biologique sur la plante, de ceux des contraintes physiques. Il devrait également être possible de se rendre compte si le dispositif expérimental permet un développement normal des plantes.

Dans cet objectif, les contraintes biologiques ont été supprimées (terre désinfectée (par une heure à 100 ° C suivie d'une semaine de repos) et terre non désinfectée), et/ou une contrainte physique (réalisation d'éprouvettes non compactées). Cet essai a été divisé en deux séries comme le montre le protocole ci-contre (tab 7). Compte tenu de la surface de travail, limitée, des tables à dépressions, ces deux séries n'ont pu être réalisées en même temps.

Les premiers dépouillements de la première série (terre désinfectée) de cet essai ont eu lieu début novembre. L'absence de nécroses racinaires vérifie l'efficacité de la désinfection. Il n'y a pas de difficultés d'enracinement (ni micro-pot, ni ramifications anormales).

Si on se reporte au tableau 8, on voit que les poids secs totaux moyens par plante se situent entre 140 et 200 mg, alors que, rappelons le, ils n'étaient que de 15 mg dans l'essai précédent (terre non désinfectée) donc 10 fois plus faibles. Les poids secs des systèmes racinaires des plantes de cet essai sont 5 fois supérieurs à ceux des plantes de l'essai précédent. A ce stade, c'est à dire à la 3^{ème} semaine de végétation, le compactage du sol réduit le développement des racines, jugé par leur poids sec, et il augmente le poids sec des parties aériennes.

9A

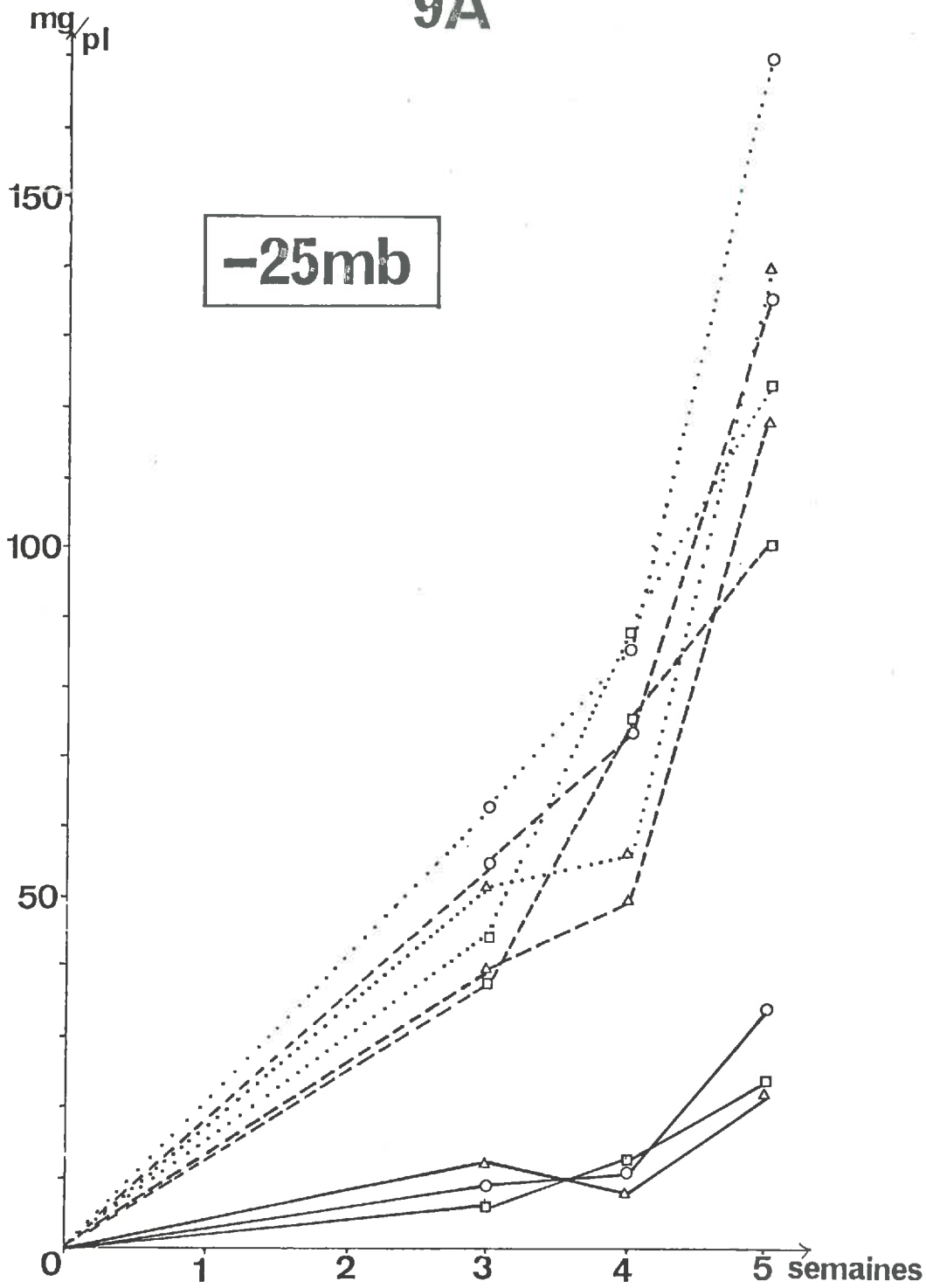


FIG 16a

FIG 16 : POIDS DE MATIERE SECHE : EVOLUTIONS
EN FONCTION DU TEMPS ET DES CONTRAINTES
PHYSIQUES

9A

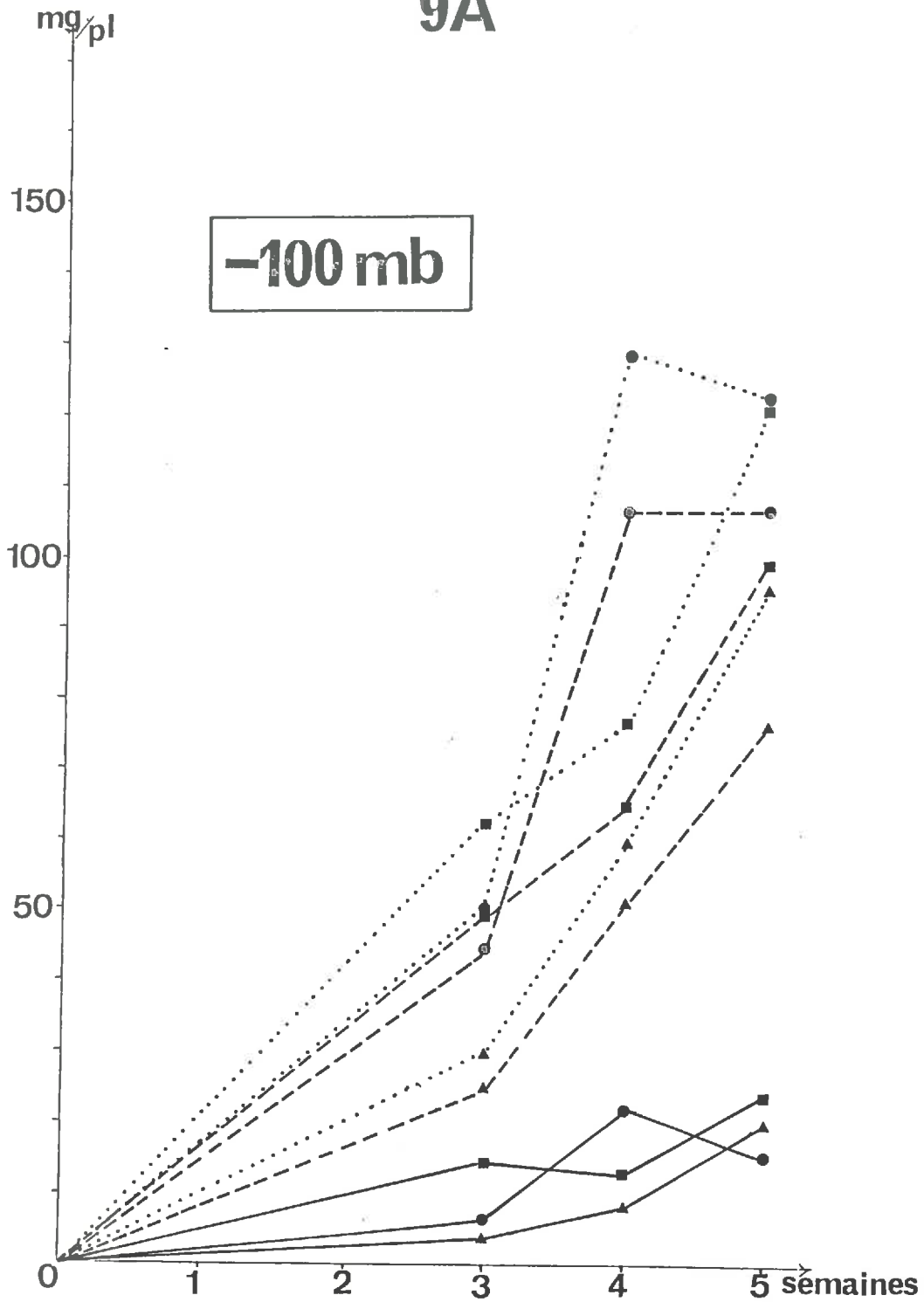


FIG 16b

	e_s	ψ_m
△	0,1	-25mb
▲	0,1	-100
□	0,2	-25
■	0,2	-100
○	0,3	-25
●	0,3	-100

— Racines
 --- Tiges
 Total

Poids secs totaux

	Somme des carrés	ddl	Variance	F _{cal}	F _{tab5%}	Obser.
Entre potentiels hydriques	2843,1	1	2843,1	5,3	5,99	N.S.
Entre porosités structurales	1789,0	2	894,5	1,7	5,14	N.S.
Interaction	1418,6	2	709,3	1,3	5,14	N.S.
Résiduelle (erreur)	3196,0	6	532,7	-	-	-

Poids secs racinaires

	Somme des carrés	ddl	Variance	F _{cal}	F _{tab5%}	Obser.
Entre potentiels hydriques	148,2	1	148,2	4,2	5,99	N.S.
Entre porosités structurales	36,6	2	18,3	0,5	5,14	N.S.
Interaction	221,4	2	110,7	3,1	5,14	N.S.
Résiduelle (erreur)	221,1	6	35,2	-	-	-

TAB 9 : POIDS DE MATIERE SECHE (4^{ème} SEMAINE) :
ANALYSE DE VARIANCES A DEUX VOIES

Poids secs totaux

	Somme des carrés	ddl	Variance	F _{cal}	F _{tab5%}	Obser.
Entre potentiels hydriques	391,4	1	391,4	0,8	5,99	N.S.
Entre porosités structurales	4670,4	2	2335,2	5,0	5,14	N.S.
Interaction	1507,6	2	753,8	1,6	5,14	N.S.
Résiduelle (erreur)	2806,6	6	467,8	-	-	-

Poids secs racinaires

	Somme des carrés	ddl	Variance	F _{cal}	F _{tab5%}	Obser.
Entre potentiels hydrique	29,7	1	29,7	1,8	5,99	N.S.
Entre porosités structurales	169,1	2	84,5	5,2	5,14	S.
Interaction	55,3	2	27,7	1,7	5,14	N.S.
Résiduelle (erreur)	98,4	6	16,4	-	-	-

TAB 10 : POIDS DE MATIERE SECHE (5^{ème} SEMAINE) :
ANALYSE DE VARIANCES A DEUX VOIES

3. ESSAI REALISE AVEC LA TERRE 9A

3.1 Développement des plantes

3.1.1. Poids secs

Les figures 16 présentent l'évolution, en fonction du temps, des poids secs sous l'action des porosités structurales et des potentiels hydriques (16a pour -25 mb, 16b pour -100 mb). Des différences apparaissent pour les poids secs totaux et pour les poids secs des parties aériennes sous l'effet des différentes porosités structurales. Ces écarts sont plus grands à -100 mb qu'à -25 mb, et sont encore plus marqués à la 5^{ème} semaine de végétation qu'à la 4^{ème} semaine. Les poids secs racinaires ne commencent à être supérieurs à ceux obtenus lors du premier essai avec 6A qu'à la 5^{ème} semaine. Pour cet essai avec 9A, ils sont significativement différents en fonction de la porosité à la 4^{ème} semaine. Par contre les analyses statistiques (tab 9 et 10) nous prouvent que les autres différences observées et citées précédemment ne sont pas significatives.

A la 4^{ème} semaine, les effets du potentiel hydrique, et ceux de la porosité structurale ne sont pas significatifs sur les poids secs totaux. Seul apparaît un effet significatif de l'indice des vides structuraux sur les poids secs racinaires.

A la 5^{ème} semaine (tab 10) on note l'absence d'effets significatifs de la porosité et du potentiel hydrique sur les poids secs totaux et racinaires.

D'autre part, la proportion système aérien/système racinaire des plantes est de 6/1 (85%/15%).

La couleur des plantes durant leur culture était violacée et des dépérissements foliaires sont apparus dès la 3^{ème} semaine de végétation.

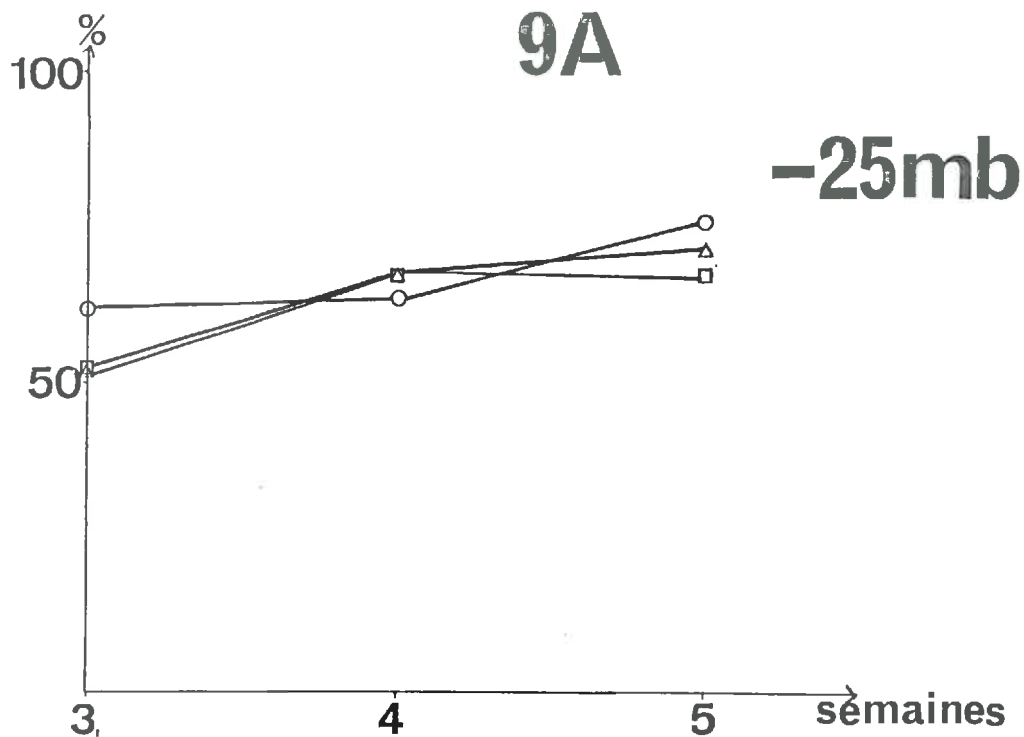
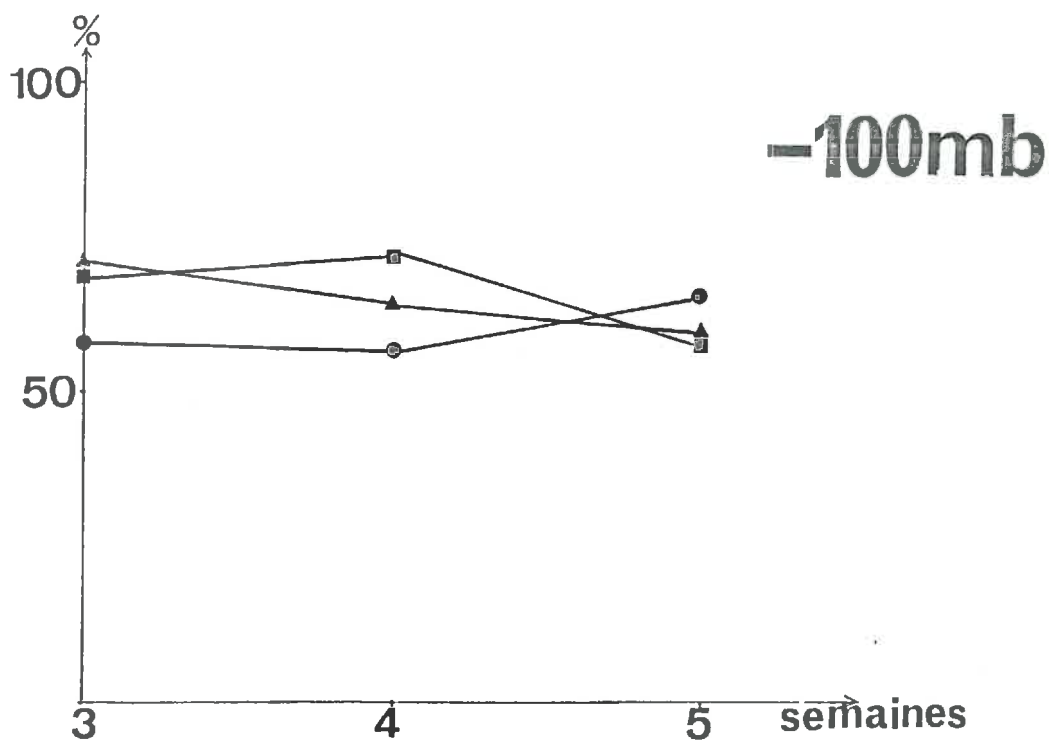


FIG 17a

	e_s	ψ_m
△	0,1	-25mb
▲	0,1	-100
□	0,2	-25
◻	0,2	-100
○	0,3	-25
●	0,3	-100



— Racines
 --- Tiges
 Total

FIG 17b

FIG 17 : LONGUEUR NECROSEE DES SYSTEMES RACINAIRES :
EVOLUTION EN FONCTION DU TEMPS ET DES CONTRAINTE
PHYSIQUES

4^{ème} semaine

	Somme des carrés	ddl	Variance	F _{cal}	F _{tab5%}	Obser.
Entre potentiels hydriques	3,9	1	3,9	0,6	5,99	N.S.
Entre porosités structurales	56,4	2	28,2	4,4	5,14	N.S.
Interaction	27,1	2	13,6	2,1	5,14	N.S.
Résiduelle (erreur)	38,5	6	6,4	-	-	-

5^{ème} semaine

	Somme des carrés	ddl	Variance	F _{cal}	F _{tab5%}	Obser.
Entre potentiels hydriques	121,2	1	121,2	3,7	5,99	N.S.
Entre porosités structurales	54,9	2	27,5	0,8	5,14	N.S.
Interaction	3,0	2	1,5	0,0	5,14	N.S.
Résiduelle (erreur)	196,7	6	32,8	-	-	-

TAB 11 : LONGUEUR NECROSEE DES SYSTEMES RACINAIRES (%) :
ANALYSE DE VARIANCES A DEUX VOIES APRES TRANSFORMATION
ANGULAIRE DES POURCENTAGES

3.1.2. Enracinement

Pour cet essai, la longueur des racines est corrélée de façon significative avec leur poids sec ($r = 0,8$). La mesure de la longueur des systèmes racinaires est donc efficace. Elle est de toute façon facilitée par l'absence de très importantes difficultés d'enracinement. Il n'a été observé ni d'effet micro-pot, ni de ramifications anormales sur le système racinaire. Par contre une partie des racines échappe aux contraintes en progressant à l'extérieur de la terre. Ces racines se développent soit à la surface du sable, soit, si elles traversent la membrane qui le recouvre, dans le sable.

3.2 Etat sanitaire des racines

Les figures 17 présentent l'évolution en fonction du temps du pourcentage de longueur nécrosée du système racinaire suivant les potentiels hydriques et les indices des vides structuraux. La proportion de racines nécrosées varie très peu, elle reste comprise, en moyenne, entre 60 et 70%. Ce qui veut dire que la quantité de nécroses par rapport à l'ensemble du système racinaire n'est pas influencée par le potentiel hydrique ou par la porosité structurale, et qu'elle n'augmente ni ne diminue au cours du temps. La pression pathologique reste quantitativement la même malgré le développement des racines.

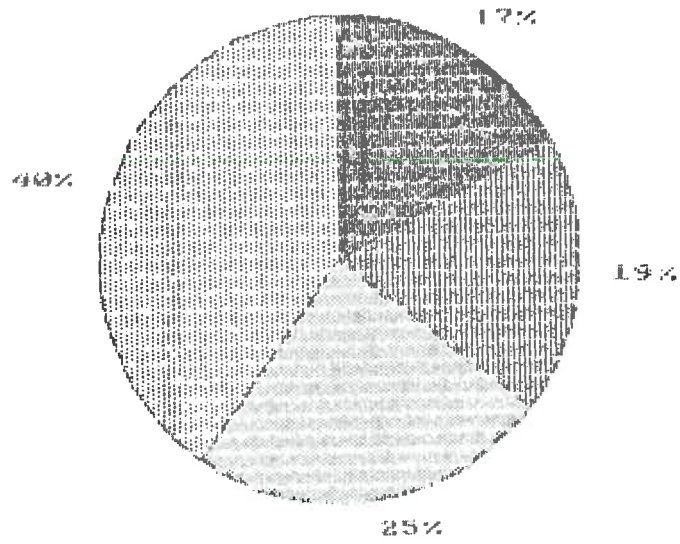
Les analyses statistiques (tab 11) indiquent que sur la proportion de racines nécrosées, aussi bien à la 4^{ème} qu'à la 5^{ème} semaine de végétation, les effets du potentiel hydrique et les effets des porosités structurales ne sont pas significatifs.

De plus aucune corrélation n'apparaît entre la porosité et le pourcentage de la longueur nécrosée.

En ce qui concerne le spectre fongique témoin isolé des nécroses racinaires (terre non "traitée", mêmes conditions que pour la réalisation du spectre témoin de 6A) il est le suivant :

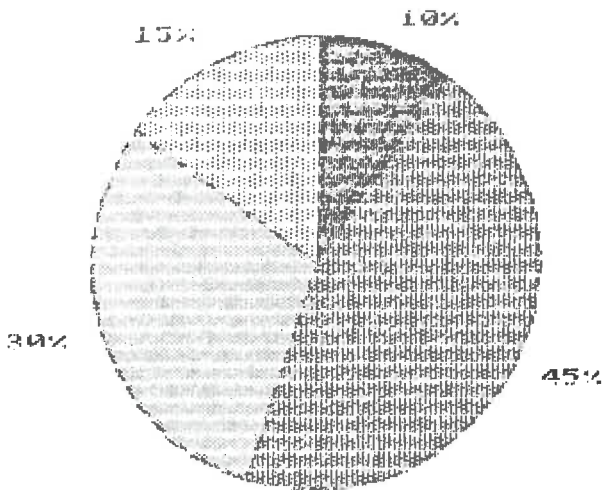
17% de Pythium (presque deux fois moins que pour le témoin 6A),

Sol non traité

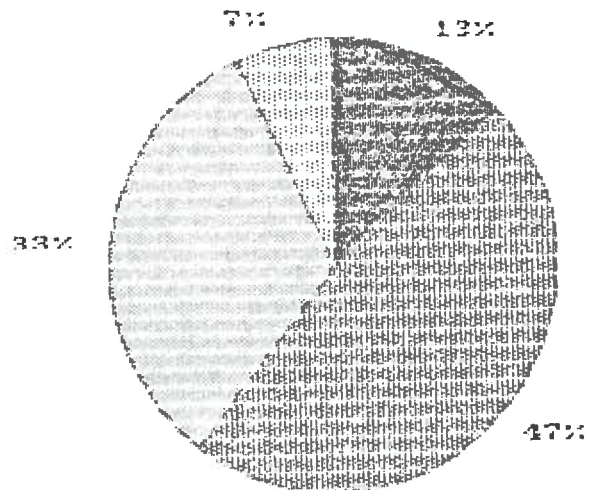


POTENTIEL HYDRIQUE - 25 mb

$e_s = 0,1$



$e_s = 0,2$



$e_s = 0,3$

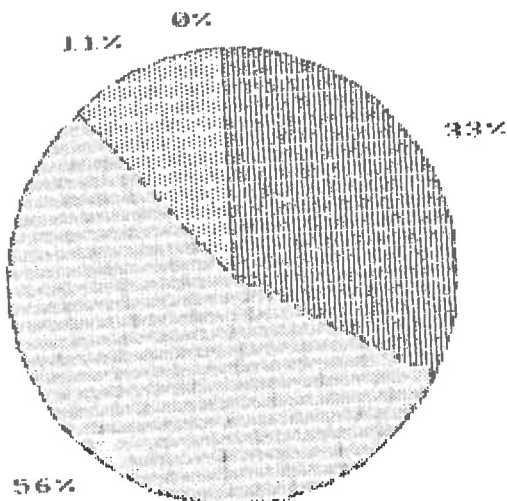
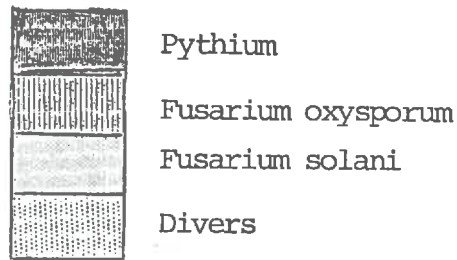


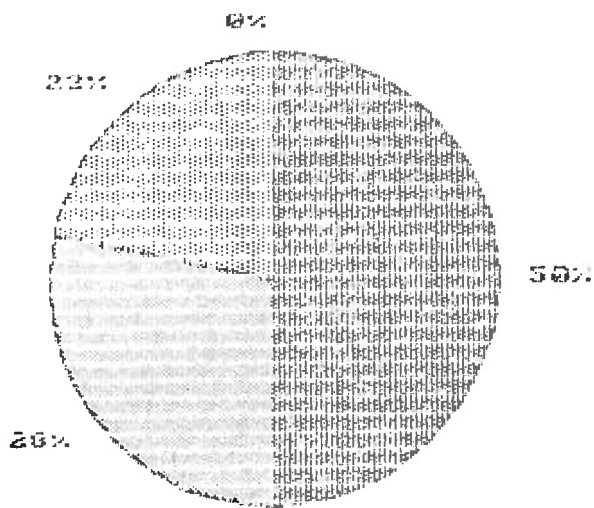
FIG 18 : SPECTRES FONGIQUES ISOLES DES NECROSES RACINAIRES :
EVOLUTION EN FONCTION DES CONTRAINTES PHYSIQUES

LEGENDE

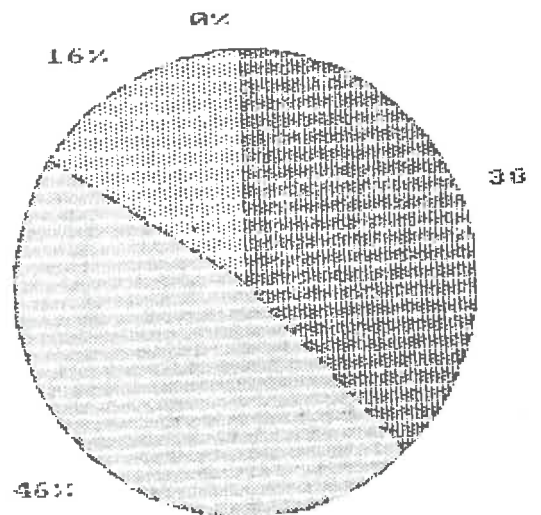


POTENTIEL HYDRIQUE -100 mb

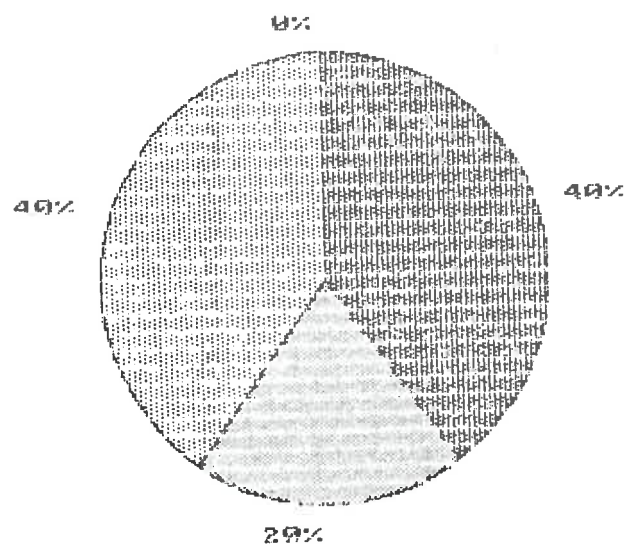
$e_s = 0,1$



$e_s = 0,2$



$e_s = 0,3$



PYTHIUM (χ^2)

	- 25	- 100	0,1	0,2	0,3
Sol de départ	1,68 N.S.	6,15 S.	1,15 N.S.	0,85 N.S.	4,67 N.S.
- 25	-	1,66 N.S.	-	-	-
0,1	-	-	-	1,90 N.S.	0,48 N.S.
0,2	-	-	-	-	0,65 N.S.

Tab. a

FUSARIUM OXYSPORUM (χ^2)

	- 25	- 100	0,1	0,2	0,3
Sol de départ	7,91 H.S.	8,24 H.S.	9,78 H.S.	6,03 S.	4,14 S.
- 25	-	0,04 N.S.	-	-	-
0,1	-	-	-	0,20 N.S.	0,79 N.S.
0,2	-	-	-	-	0,85 N.S.

Tab. b

FUSARIUM SOLANI (χ^2)

	- 25	- 100	0,1	0,2	0,3
Sol de départ	4,24 S.	0,74 N.S.	0,41 N.S.	3,18 N.S.	2,76 N.S.
- 25	-	0,97 N.S.	-	-	-
0,1	-	-	-	0,98 N.S.	0,74 N.S.
0,2	-	-	-	-	0,46 N.S.

Tab. c

18% de Fusarium oxysporum,
 24% de Fusarium solani,
 41% de champignons divers (vraisemblablement
 non pathogènes).

Par rapport à ce spectre témoin (fig 18), ceux obtenus à partir d'isolements sur nécroses racinaires de plantes cultivées aux potentiels et aux porosités étudiés, ont un nombre réduit de Pythium qui tend à être nul (tab 12a : réduction significative pour -100 mb et l'indice des vides le plus élevé). La fréquence d'apparition des Fusarium oxysporum double (cette augmentation est significative tab 12b) alors que celle de Fusarium solani n'évolue pas suivant une tendance particulière.

Ces tendances générales ne varient pas suivant les deux potentiels hydriques, ni suivant les porosités. Si l'on compare les différents spectres obtenus sans tenir compte du témoin, on n'observe pas de corrélation entre l'augmentation du potentiel hydrique et des fréquences de champignons isolés. Il n'y a pas non plus de corrélation entre la porosité et les fréquences d'isolement des champignons.

3.3 Résumé des résultats obtenus

Les plantes sont plus développées que celles cultivées lors du premier essai avec 6A, cet écart s'exprime surtout au niveau des poids secs de la partie aérienne. Les poids secs (racines, total) ne sont pas significativement différents quand on fait varier les contraintes physiques appliquées au sol.

La proportion de la longueur des racines qui est nécrosée est élevée (60%) mais constante en fonction du temps quels que soient le potentiel et la porosité considérés. Seul le spectre fongique isolé des nécroses est modifié par la porosité structurale et par le potentiel hydrique. Les comparaisons effectuées par rapport au spectre témoin indiquent une forte réduction du nombre de Pythium isolés, et un doublement du nombre de Fusarium oxysporum.

DISCUSSION

1. CRITIQUES DE LA METHODE

1.1 Critiques et bilan

Le système expérimental représenté par le pot contenant de la terre avec des contraintes biologiques et dans lequel se développe une plante est connu (test biologique à deux niveaux). Son efficacité a été prouvée. L'objectif de cette étude était d'appliquer à ce système expérimental des conditions physiques connues, donc de combiner dans un même pot des contraintes biologiques et des contraintes physiques, et d'y cultiver une plante.

Nous avons prouvé qu'il est possible, dans un même pot de mettre de la terre contenant des agents pathogènes en lui appliquant certaines contraintes physiques, et d'y cultiver une plante pendant 5 semaines. D'autre part, il a été également possible de détecter quelques différences au niveau de la croissance des plantes et de l'état sanitaire de leur système racinaire.

Cependant, plusieurs problèmes ont été rencontrés, certains d'entre eux n'ont pas encore été résolus.

- le calibrage de la terre : il ne présente pas de problèmes particuliers à condition d'utiliser un broyeur à cylindres avec tamis de 3 mm, ce qui évite des pertes de terre trop importantes. Son seul inconvénient est d'être long puisqu'il y a 2 tamisages successifs.

- l'humectation des agrégats : pour humecter une couche d'agrégats d'une épaisseur de 4 cm (quantité qui permet la réalisation de 6 à 7 éprouvettes de terre) il faut immobiliser une table à dépressions pendant 1 à 2 semaines suivant les sols. C'est la seule solution pour avoir une humectation complète et bien répartie dans la couche des agrégats.

- le compactage des agrégats : nous n'avons pas réussi à obtenir des éprouvettes de terre avec une répartition homogène des vides. D'autre part la réaction des terres à un compactage identique n'est pas la même. Avec la terre 6A nous avons pu observer un noyau central très compact qui n'existait pas pour 9A. L'apparition d'une interface entre les deux zones de compactage n'a pas été notée aux mêmes indices des vides pour les deux terres. Il semble difficile d'améliorer ce point ainsi que la répartition des vides sur une hauteur telle (60 mm).
 De plus, durant le compactage, il faut veiller continuellement à ce qu'il n'y ait pas de variations de l'humidité des agrégats (ce qui fausserait l'indice des vides structuraux). Les agrégats ne sont sortis de leur sac étanche que pour être pesés et compactés tout de suite après, les éprouvettes obtenues sont à leur tour, et au fur et à mesure, mises dans un sac étanche. Ceci rend l'opération de compactage longue (1 heure pour 6 à 7 éprouvettes) et contraignante. Là encore il est difficile de proposer des améliorations.

- la conservation des agrégats humectés et des éprouvettes : la méthode proposée dans le chapitre "Matériel et Méthodes" ne pose pas de problèmes.
- la mise en place des éprouvettes : le mode opératoire n'est pas satisfaisant car il est impossible de s'assurer d'un bon contact entre l'éprouvette et le sable. Une hétérogénéité entre éprouvettes n'est pas à écarter.
- le maintien du potentiel hydrique pendant la phase de mise à l'équilibre des éprouvettes : il ne pose pas de problèmes grâce au couvercle du bac et au premier film plastique (voir "Matériel et Méthodes").
- le semis : il persiste un problème d'encrage de la gémule dans la terre 6A compactée, qui disparaît après la désinfection de la terre. Il est donc vraisemblablement dû à une perte de vigueur de la gémule à cause d'attaques précoces par des parasites racinaires.
- le maintien du potentiel hydrique pendant la période de végétation : la couverture des pots par un deuxième film plastique en présence des plantes résout les problèmes d'évaporation, mais elle reste délicate car il faut passer les plantes à travers de petits trous. D'autre part, les variations du potentiel ne sont pas contrôlées au cours d'une journée (période diurne-période nocturne).
- l'enlèvement des pots : une quantité non négligeable de racines se développe à la face inférieure du pot, soit sur la membrane de nylon à la surface du sable, soit dans le sable pour celles qui traversent cette membrane. Les racines échappent donc aux contraintes du pot. Pour certains essais, à l'arrachage à 3^{ème} semaine, de nombreuses racines étaient déjà dans le sable ce qui laisse supposer qu'elles y sont à partir

de la 1^{ère} ou de la 2^{ème} semaine de végétation. Lors de l'enlèvement des pots, ces racines se cassent, on ne peut pas les prendre en compte dans le développement de la plante, elles faussent donc les mesures. S'ajoute à ce problème une pollution très gênante du sable. Il serait peut-être efficace d'essayer de remplacer la membrane de nylon par une fibre appelée Hydronappe. En théorie elle permet le passage de l'eau mais pas celui des racines.

1.2 Conclusion

En conclusion on peut dire que l'on est loin du test de routine, des problèmes restent encore à résoudre. Il est également intéressant de faire un bilan du temps que nécessite la réalisation d'une expérimentation.

- * calibrage des agrégats.....2 à 3 j
- * mise en route des quatre
tables à dépressions.....1 j
- * mise à l'équilibre du sable
à -25 mb.....1 j
- * humectation à -25 mb de la
quantité d'agrégats nécessaire
pour la réalisation de 6 éprouvettes.....1 à 2 sem
- * compactage de 24 éprouvettes.....1/2 j
- * mise à l'équilibre des éprouvettes
à -25 ou -100 mb.....4 à 5 j
- * période de végétation.....5 sem
- * pour vider et désinfecter
les 4 tables à dépressions.....1 j
- * désinfection du sable
provenant des 4 tables.....1 sem

La préparation du système expérimental nécessite donc 3 à 4 semaines (à condition de disposer de 4 tables à dépressions) alors que l'expérimentation elle même dure 5 semaines.

2. INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS

Les deux terres étudiées ont été choisies car, au champ, elles sont fatiguées pour la tomate. Cela a été confirmé par le test biologique à deux niveaux, les hypothèses alors formulées, en ce qui concerne les facteurs limitants, étaient les mêmes pour les deux sols. (hypothèse double biologique-nutritionnelle). Ces deux terres sont cependant différentes, 6A contient 24% d'argile et deux fois moins d'éléments minéraux que 9A qui contient 34% d'argile. De plus l'I.N.R. est de 3 pour 6A alors qu'il n'est que de 2 pour 9A.

Il est frappant de constater qu'on ne détecte, pour l'instant, pour aucun des essais achevés, de variations de la croissance de la plante ou de l'état sanitaire des racines, en fonction des contraintes physiques appliquées au sol. Il est cependant possible de proposer plusieurs hypothèses explicatives des résultats obtenus.

2.1 Très forte contrainte biologique pour 6A

La première terre, 6A, a un I.N.R. de départ équivalent à 3 (classe maximale), or les pourcentages de longueur nécrosée par rapport à la longueur totale du système racinaire sont d'environ 50% (fig 14). Cet écart entre les deux types de notation s'explique par le fait que la notation par classes est visuelle, l'oeil fait une intégration entre l'étendue et la couleur des nécroses racinaires. Sur de petites racines irrégulière lorsque le pourcentage de nécroses est supérieur à 50%, la notation par classes devient très difficile et l'oeil a tendance à surclasser le niveau de nécroses.

La longueur nécrosée représente 50% de la longueur du système racinaire, les racines sont perturbées mais elles ne meurent pas. L'effet est plus pernicieux car leur vigueur est réduite. Cette perturbation fait que les racines ne s'allongent pas, ou très peu, et qu'elles n'ont pas la force de passer les obstacles physiques. Ceci expliquerait le fait que l'effet micro-pot et les ramifications anormales observés lors du premier essai avec 6A, disparaissent lorsque ce même sol est désinfecté. Les racines sont alors assez vigoureuses pour s'allonger (tab 8) et surmonter les obstacles physiques.

2.2 Mise en évidence d'un effet du compactage pour 6A

Les résultats, dont nous disposons pour l'essai où les contraintes biologiques ont été supprimées (6A désinfecté), font apparaître, pour la 3^{ème} semaine de végétation (tab 8), une tendance à une corrélation positive entre la porosité structurale et le développement du système racinaire estimé par son poids de matière sèche. De plus, on note une corrélation négative entre la porosité structurale et le poids sec des parties aériennes. Ceci tend à prouver que des différences de développement des plantes apparaissent en fonction de la compacité du sol, mais aussi des modifications de la physiologie de la plante.

2.3 Comparaison des résultats obtenus pour chaque terre

Bien que le dispositif soit identique pour les deux terres, que la variété de tomate soit la même, on observe des dynamiques de croissance différentes entre l'essai réalisé avec 6A et celui fait avec 9A (fig 12 et fig 16).

Au bout de 5 semaines de végétation, le poids sec total moyen par plante atteint 30 mg pour 6A, pour les plantes cultivées dans 9A il est de 100 à 150 mg. Ces différences s'expriment également par une modification du rapport système aérien/système racinaire. Alors que pour les deux terres les poids secs racinaires sont sensiblement identiques, ce rapport est de 2/1 pour 6A et de 6/1 pour 9A. On peut en conclure que la partie aérienne est 3 fois plus importante dans 9A que dans 6A. Le fonctionnement général de la plante est modifié et s'exprime exclusivement par la croissance de la partie aérienne.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène. Il peut être dû à :

- une contrainte biologique différente pour les deux terres,
- une carence nutritionnelle pour 6A,
- une interaction très importante entre nature des sols et facteurs physiques des sols.

2.3.1 Hypothèse d'une contrainte biologique différente entre les terres

Cette hypothèse peut expliquer les différences observées sur la croissance des plantes suivant qu'elles se soient développées dans 6A ou dans 9A.

Environ 50% de la longueur du système racinaire des plantes sont nécrosés pour 6A, contre 60% pour 9A. On pourrait penser que la contrainte biologique est plus forte dans le deuxième sol, or le développement des plantes y est meilleur.

Si l'on regarde les spectres fongiques témoins (sol non traité) isolés des nécroses racinaires, on s'aperçoit que la quantité de Pythium est deux fois moins importante pour 9A que pour 6A, alors que par ailleurs, les fréquences d'isolement sont sensiblement identiques pour Fusarium oxysporum et F. solani. Ceci nous amènerait à suggérer que les Pythium expliquent la force de la contrainte biologique de 6A. Or pour les deux sols, les Pythium ont tendance à disparaître sous l'effet du compactage et du potentiel hydrique. De plus, parallèlement le nombre de Fusarium oxysporum isolés est doublé par l'application des potentiels et des porosités structurales, ils sont donc vraisemblablement à l'origine de la contrainte biologique de 6A.

Deux hypothèses explicatives seront avancées. La première est, que les souches de Fusarium oxysporum de 6A sont plus agressives pour la plante que celles de 9A, ce qui est en cours de vérification. Mais dans l'état actuel de nos connaissances, nous sommes obligés de poser une deuxième hypothèse, à savoir que le sol 6A peut être plus réceptif à la maladie que 9A. En effet, il faut tenir compte du fait que le nombre de champignons divers, et susceptibles d'être en compétition avec Fusarium oxysporum, est deux fois plus élevé dans les racines des plantes cultivées dans 9A que dans celles des plantes issues 6A. Seuls les travaux ultérieurs permettront de conclure sur ce point.

Il est pour l'instant également impossible d'expliquer la tendance à la disparition des Pythium isolés des nécroses racinaires lorsque les potentiels hydriques (-25 et -100 mb) et les indices de porosité structurale (0,1;0,2;0,3) sont appliqués au sol. Tout un ensemble

de facteurs physiques entre en jeu (diminution de l'aération et de la taille des pores du sol avec l'augmentation du compactage, saturation des pores en eau, interaction entre compacité et indice des vides,...). Il peut influencer sur le développement de la plante, sur sa sensibilité aux agents pathogènes, sur le développement de ces agents, et sur les relations qu'ils ont avec les autres micro-organismes.

Les principaux résultats des travaux effectués précédemment sur ce sujet ne nous permettent pas d'expliquer ces observations car ils portent surtout sur l'action des facteurs physiques sur le développement des agents pathogènes ou sur leur conservation dans les sols. Les études réalisées en présence d'une plante se bornent surtout à constater la corrélation positive entre humidité du sol et gravité des nécroses racinaires (SIMMONDS, 1941; BERKELEY, 1944), ou la corrélation entre compacité du sol et attaques par Phytophthora (FULTON et al., 1961; GRAY et POPE, 1986).

Il faut cependant retenir que la différence qui existe au niveau de la contrainte biologique de chaque sol peut expliquer les croissances inégales des plantes. Mais ce serait une grave erreur d'ignorer les autres contraintes qui peuvent intervenir.

2.3.2 Hypothèse d'une carence nutritionnelle pour 6A

Les conditions nutritionnelles de chaque sol ne sont pas limitantes pour une période de végétation de 5 semaines pour des tomates. Les éléments majeurs y sont représentés en quantité suffisante (même si 9A en a deux fois plus). Et pourtant, la couleur violacée des plantes, observée dans les deux cas, traduit une carence en phosphore le plus souvent dûe à une aération insuffisante du sol. Or, en général, si seule cette carence est révélée visuellement par cette coloration, elle s'accompagne souvent de carences en magnésium et en potassium.

On peut donc penser que l'absorption des éléments minéraux par les racines est perturbée, et que cette perturbation pourrait être variable suivant les terres étudiées. En effet, il existe des différences de réaction à une même contrainte de compactage suivant les sols.

2.3.3 Hypothèse d'une interaction entre nature des sols et facteurs physiques des sols

Il est impossible de nier l'existence d'une réaction différente de 6A et de 9A à un même compactage. Les photos des éprouvettes prises aux U.V. (fig 9) en sont d'ailleurs une confirmation.

La teneur en limon, plus élevée pour 6A que pour 9A, peut expliquer l'apparition d'un noyau central très compact dans les éprouvettes de sol réalisées avec 6A. Dans celles faites avec 9A, sans être parfaite, la répartition des vides est plus homogène. Les contraintes physiques sont certainement plus importantes dans 6A que dans 9A.

De plus, si l'on reprend l'hypothèse d'une perturbation de l'absorption par les racines du phosphore du sol qui serait due à une aération insuffisante du sol, il est probable qu'elle soit plus sévère dans 6A que dans 9A compte tenu du noyau central très compact. Néanmoins, la couleur violette des plantes, commune aux deux terres, prouve que cette perturbation existe pour 6A et pour 9A.

2.4. Conclusion

A ce point de notre étude, toute conclusion concernant les résultats est dangeureuse. Pour l'instant, nous avons juste constaté de façon nette :

- qu'un fort pourcentage de nécroses racinaires perturbe de façon importante le développement des tomates,
- qu'il y a une tendance à la disparition des Pythium isolés des nécroses racinaires quand sont appliqués aux pots de culture les potentiels et les porosités structurales étudiés. Cette constatation demande confirmation.

Il faut attendre les résultats du deuxième essai 6A (terre désinfectée) pour voir s'il est effectivement possible de mettre en évidence une interaction entre le comportement de la plante et l'état physique du sol.

Quant à la comparaison des résultats obtenus pour chaque terre, nous pouvons seulement émettre des hypothèses. Trop de facteurs non contrôlés sont en interaction.

CONCLUSION

CONCLUSION

L'objectif principal de l'étude présente, à savoir la mise au point d'un système expérimental qui permette le contrôle simultané du potentiel hydrique et de la compacité de la terre contenue dans un pot de culture où se développent des tomates, a été globalement atteint. Dans l'état actuel de nos connaissances, tous les problèmes qui pouvaient l'être ont été résolus.

Il ne faut cependant pas perdre de vue le but dans lequel a été entrepris ce travail. Il s'agit de tenter de mettre en évidence et d'étudier les éventuelles interactions qui existent entre l'état physique du sol et l'état sanitaire des racines. Or jusqu'à présent cela n'a pas été possible. L'interprétation trop hâtive de nos résultats pourrait nous amener à voir la preuve de l'absence de telles interactions. Avant de conclure d'une façon si définitive, examinons les phénomènes qui auraient pu nous empêcher de mettre en évidence des interactions existant effectivement entre les facteurs physiques du sol et l'état sanitaire des racines.

Un système expérimental inadapté : il est certain que le contournement des contraintes physiques par les racines, qui descendent entre le pot et la terre, fausse les mesures concernant la croissance de la plante. Mais avant de rejeter le dispositif expérimental il est nécessaire de réaliser d'autres essais et d'essayer de trouver la raison de ce contournement, n'oublions pas que la désinfection du sol 6A a fait disparaître ce problème. D'autre part, il doit être possible d'empêcher les racines de pénétrer dans la sable au moyen d'une membrane perméable à l'eau mais aux mailles très fines.

Une période de végétation trop courte : est-il possible de détecter ces interactions dès la 5^{ème} semaine de végétation ?

Des contraintes biologiques fortes au point de masquer les effets des facteurs physiques du sol sur la plante : l'exemple de la terre 6A nous confirme cette hypothèse. Il n'est pas conseillé, à ce stade des travaux, de continuer à travailler avec des sols aux contraintes biologiques si fortes. Pour que l'étude, que nous avons réalisée à la station de science du sol de L'I.N.R.A. de MONTFAVET, sur les propriétés physiques des deux sols étudiés reste valable, il est possible de diluer, à des concentrations connues, par exemple 6A dans de la terre 6A désinfectée.

Il est donc nécessaire, pour l'instant, de continuer à travailler de la même façon pour statuer définitivement sur la valeur du dispositif expérimental et sur la manière dont à été abordé le sujet. L'étude présente a permis de résoudre de nombreux problèmes et de proposer des lignes de réflexion. Mais les expérimentations ont été trop peu nombreuses, le temps requis pour un essai est long. Cette étude doit donc être considérée comme le point de départ d'un travail important de plusieurs années.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERKELEY G.H., 1944. Root rots of certain non cereal crops, Botanic Review 10 : 67-123.
- BERNARDT E.A., GROGAN R.G., 1982. Effects of soil matric potential on the formation and indirect germination of Phytophthora parasitica, P. capsici et P. cryptogea. Phytopathology 72(5) : 507-511.
- BOUHOT D., 1981. Fatigue des sols. Cultivar 144 : 64-65.
- BOUHOT D., 1982a. Un test biologique à deux niveaux pour l'étude des fatigues de sol. In : Evolution du niveau de fertilité des sols dans différents systèmes de cultures - critères pour mesurer cette fertilité, F. LANZA, Bari, 77-86.
- BOUHOT D., 1982b. Les tests biologiques pour le diagnostic des sols. B.T.I. 370-372 : 513-516.
- BOUHOT D., 1983. La fatigue des sols - position du problème et principe du diagnostic. In : La fatigue des sols XXIIIème colloque S.F.P. 21-22 octobre 1982, I.N.R.A., Versailles, 9-21.
- BOUHOT D., BONNEL L., 1979. Description du test biologique à deux niveaux pour l'étude des fatigues de sol. Annales de Phytopathologie 11(1) : 111-115.
- BOUHOT D., DUMAS Y., 1983. Fatigue des sols en culture de tomate de plein champ. In : La fatigue des sols XXIIIème colloque S.F.P. 21-22 octobre 1982, I.N.R.A., Versailles, 77-81.
- CAPILLON A., SEBILLOTTE M., 1979. C.R. de l'Académie de l'Agriculture Française, 10 octobre 1979, 1155-1167.
- COLHOUN J., 1973. Effects of environmental factors on plant diseases. Annual Review of Phytopathology 11 : 343-364.

- COOK R.J., 1973. Influence of low plant and soil water potentials on diseases caused by soil borne fungi. Phytopathology 63 : 451-468.
- COOK R.J., PAPENDICK R.I., 1972. Influence of water potential of soils and plants on root diseases. Annual Review of Phytopathology 10 : 349-373.
- DEJOU J, DEKIMPE C.R., 1984. La compacité des sols et ses conséquences agronomiques - aperçu bibliographique. B.T.I. 386 : 3-15.
- DREW M.C., LYNCH J.M., 1980. Soil anaerobiosis microorganisms and root function. Annual Review of Phytopathology 18 : 37-66.
- DUNIWAY J.M., 1979. Water relations of water molds. Annual Review of Phytopathology 17 : 431-460.
- FULTON J.M., MORTIMORE C.G., HILDERBRAND A.A., 1961. Note on the relation of soil bulk density to the incidence of Phytophthora root and stalk rot of soybeans. Canadian Journal of Soil Science 41 : 247.
- GANGOPADHYAY S., WYLLIE T.D., TEAGUE W.R., 1982. Effect of bulk density and moisture content of soil on the survival of Macrophomina phaseolina. Plant and Soil 68 : 241-247.
- GILLES G., 1968. La fatigue du sol en culture fruitière, Fruit Belge 320 : 135-141.
- GISI U., ZENTMYER G.A., KLURE L.J., 1980. Production of sporangia by Phytophthora cinnamomi and P. palmivora in soils at different matric potentials. Phytopathology 70(4) : 301-306.
- GRAY L.E. POPE R.A., 1986. Influence of soil compaction on soybean stand, yield, and Phytophthora root rot incidence. Agronomy Journal 78(1) : 189-191.
- GRIFFIN D.M., 1963. Soil physical factors and the ecology of fungi. II Behavior of Pythium ultimum at small water suction. Transaction of the British Mycological Society 46 : 368-372.
- HANCOCK J.G., 1981. Longevity of Pythium ultimum in moist soil. Phytopathology 71(10) : 1033-1037.

- HUISMAN O.C., 1982. Interrelation of root growth dynamic to epidemiology of root invading fungi. Annual Review of Phytopathology 20 : 303-327.
- KOUYEAS V., 1964. An approach to the study of moisture relations of soil fungi. Plant and Soil 20 : 351-363.
- KRAFT J.M., ROBERTS D.D., 1969. Influence of soil water and temperature on the pea root rot complex caused by Pythium ultimum and Fusarium solani f.sp.pisi. Phytopathology 59(1) : 149-152.
- LOUVET J., 1984. Effets des facteurs climatiques sur les maladies en culture légumière. Séminaire Avignon du 29 février au 1 mars 1984, Les colloques de l'I.N.R.A. 33 : 183-197.
- O'NEIL K.J., CARROW R.N., 1983. Periennial Ryegrass growth, water use, and soil aeration status under soil compaction. Agronomy Journal 75(2) : 177-180.
- Van OORT F., 1984. Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogénèse, Thèse I.N.A., Paris-Grignon, 281p.
- PIERRE M., 1983. La fatigue des sols en culture céréalières - comparaison blé de rotation - blé de monoculture, Mémoire de fin d'études E.N.I.T.A. Dijon.
- RICHARDS L.A., 1949. Methods of measuring soil moisture tension. Soil Science 68 : 95-112.
- ROUHANI H., 1984. Appréciation du pouvoir pathogène et des dégâts commis en France par Pythium arrhenomanes Drech. sur maïs. Recherche de résistances variétales, Thèse Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 237 p.
- SCHOENEWEISS D.F., 1975. Predisposition, stress and plant disease. Annual Review of Phytopathology 13 : 193-211.
- SCHOFIELD R.K., 1935. The pF of the water in soil. Trans. 3rd International Congress of Soil Science 2 : 37-48.
- SCOTTO LA MASSESE C., 1970. Eléments à prendre en considération pour l'étude de la fatigue spécifique des sols en arboriculture fruitière. In : La fatigue des sols en pépinières, F.N.P.H.P., Paris, 19-74.

- SEBILLOTTE M., 1978. Cours d'Agronomie, I.N.A. Paris-Grignon.
- SEBILLOTTE M., 1983. Potentialités du milieu et fatigue des sols. In : La fatigue des sols XXIIIème colloque S.P.F. 21-22 octobre 1982, I.N.R.A., Versailles, 115-122.
- SIMMONDS P.M., 1941. Root rots of cereals. Botanic Review 7 : 308-331.
- SLATYER R.O., 1967. Plant water relationships, Academic Press, Londres et New York, 365 p.
- STENGEL P., 1983. Caractérisation de l'état physique du sol - principes et méthodes. Séminaire C.E.E. Agrimed 14-18 mars 1983.
- SUNG J.M., COOK R.J., 1981. Effect of water potentials on reproduction and spore germination by Fusarium roseum "graminearum", "culmorum" and "avenaceum". Phytopathology 71(5) : 499-504.
- TARDIEU P., 1973. Vie microbienne et fatigue des sols. In : Table ronde : la fatigue des sols en pépinières, I.N.R.A.-F.N.P.H., Orléans, 40-43.
- TROUSE A.C., 1971. Soil conditions as they affect plant establishment, root development and yield. In : Compaction of agricultural soils, American Society of Agricultural Engineers, Michigan.
- VOORHEES W.B., FARRELL D.A., LARSON W.E., 1975. Soil strength and aeration effects on root elongation. Soil Science Soc. Am. Proc. 39 : 948-953.
- WARKENTIN B.P., 1971. Effects of compaction on content and transmission of water in soils. In : Compaction of agricultural soils, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, 126-153.

ANNEXES

ANNEXE n ° 1a

RESULTATS DES ANALYSES DE TERRES

	6A		9A	
	résultats	interprétations	résultats	interprétations
pH (KCl)	7,8	alcalin	7,6	alcalin
Calcaire total (%)	54,0	très calcaire	20,0	calcaire
Calcaire actif (%)	12,0	très chlorosant	5,2	peu chlorosant
C.E.C. (meq/Kg)	88,0	faible	174,0	moyen
Phosphore (ppm)	65,0	moyen	153,0	élevé
Mg échang./C.E.C. (%)	8,1	normal	13,1	normal
K échang./C.E.C. (%)	8,8	très élevé	12,5	très élevé
Mg/K	0,9	risque de carence en Mg	1,0	faible
M.O. (‰)	19,1	satisfaisant	24,1	satisfaisant
Argile (%)	24,3		33,0	
Limon fin (%)	34,2	TOTAL 56,5	19,6	TOTAL 35,2
Limon grossier (%)	22,3		15,6	
Sable fin (%)	14,7	TOTAL 19,2	17,4	TOTAL 31,8
Sable grossier (%)	4,5		14,4	
Indice de battance	1,56	peu battant	0,72	non battant
Indice de stabilité structur.	2,32	stable	1,06	stable

ANNEXE n ° 1b

LA CAPACITE TOTALE D'ECHANGE

Nous ne disposons pas d'analyse précise sur le type d'argile de chacun de ces deux sols. Cependant, la comparaison de l'indice T (capacité totale d'échange en meq) montre une différence significative :

6A T pour 100 g d'argile = 35 meq

9A T pour 100 g d'argile = 53 meq

On peut sans, trop faire d'erreur, dire que 6A renferme une majorité de minéraux interstratifiés non gonflants de type 1:1 (Illite-Kaolinite) et que le sol 9A renferme une majorité de minéraux interstratifiés de type 2:1 (Montmorillonite-Illite)

type 1:1 double couche une octaédrique
une couche tétraédrique



- en général non gonflant,
- faible capacité totale d'échange.

type 2:1 triple couche une couche octaédrique
deux couches tétraédriques



- comprend des minéraux gonflants et non gonflants (détermination possible aux rayons X),
- toujours capacité totale d'échange supérieure ou égale à 50 meq.

ANNEXE n ° 2a

TEST BIOLOGIQUE A DEUX NIVEAUX POUR L'ETUDE
DES FATIGUES DE SOL

Ann. Phytopathol., 1979, 11 (1), 111-115.

Note

Description et mode d'emploi du test biologique
à deux niveaux pour l'étude des fatigues de sol

D. BOUHOT * et L. BONNEL **

* *Station de Recherches sur la Flore Pathogène dans le sol,*

** *Station de Faune du sol,*

*Centre de Recherches de Dijon, INRA,
17, rue Sully, 21034 Dijon Cedex,*

I. — Préparation de l'échantillon de sol

L'échantillon est mis à sécher en couche mince soit à la température du laboratoire soit en étuve ventilée à 25 °C. Puis il est homogénéisé par broyage et calibrage sur tamis à maille de 5 mm. Il est ensuite soumis aux traitements ci-après.

II. — Application des traitements

A. — Traitements de premier niveau

Ils comportent quatre traitements :

— Le traitement biocide total est obtenu par stérilisation à l'autoclave à 100 °C pendant 1 h, trois fois de suite à 24 h d'intervalle. Pour cela, la terre est placée en sac polyéthylène (basse pression et haute densité résistant à l'autoclavage) de façon à former des boudins de 10 cm de diamètre maximum et de longueur variable 0,5 à 1,20 m. Ainsi l'échauffement de la terre est régulier, homogène et reproductible. Le boudin est soudé à une extrémité et fermé à l'autre par un serrage sur un tube de verre de 1 à 2 cm de diamètre empli de coton hydrophile. Par ce procédé la même pression s'établit à l'intérieur et à l'extérieur du sac, évitant son éclatement tout en empêchant des pollutions ultérieures.

Après ce traitement, la terre est laissée à reposer dans les sacs pendant une semaine.

— Le traitement correspondant à l'hypothèse nutritionnelle est un apport d'une solution nutritive et d'une solution d'oligo-éléments contenant le fer, le zinc, le cuivre, le manganèse et le bore (tabl. 1).

Le mélange de ces deux solutions est amené chaque semaine dans les godets « solution nutritive » et « témoin non fatigué » et au cours de la troisième semaine dans tous les godets du test.

— Le traitement correspondant à l'hypothèse physico-chimique est un apport de terreau horticole à raison de 20 l de matière sèche à l'hectare, c'est-à-dire 2 kg au m² ou environ 7 kg au m³. Il faut veiller à ce que le pH du terreau ne soit pas trop différent du pH du sol étudié.

— L'hypothèse toxique est contrôlée par l'apport au sol de charbon végétal actif à raison de 1,5 p. 100 en poids. Il est important d'utiliser toujours le même type de charbon et de préférence un charbon activé à l'acide sulfurique, afin que ses qualités d'absorption soient maximales et constantes.

B. — Traitement de deuxième niveau

L'hypothèse biologique est diversifiée par l'utilisation de cinq traitements. Deux de ceux-ci perturbent à peu près tous les champignons :

a) chauffage de la terre humide au bain-marie à 60 °C pendant 20 min (température prise au cœur de la masse).

b) apport dans le sol de dithiocarbamate de zinc et de manganèse à raison de 16 g de matière active au m².

Deux autres traitements contrôlent sélectivement certains groupes de champignons :

a) l'étridiazole en arrosage du sol à raison de 3,5 g de matière active au m² inhibe les *Pythium* et les *Phytophthora*,

b) le quinlozène (pentachloronitrobenzène ou PCNB) à raison de 3 g de matière active au m² inhibe *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia* et partiellement *Botrytis*. Ce produit a également une certaine action contre les nématodes.

Enfin, l'aldicarbe, nématicide, insecticide et acaricide, est apporté à la dose de 1 g de matière active au m².

Souvent, le traitement à la vapeur à 100 °C est renouvelé dans le test de deuxième niveau et vient s'ajouter aux deux témoins « fatigué » et « non fatigué ».

L'hypothèse nutritionnelle est précisée grâce à l'application de trois solutions contenant respectivement :

- les macroéléments et les oligo-éléments (solutions I + II) (tabl. 1),
- les macroéléments seuls (solution I),
- les oligo-éléments seuls (solution II).

* On considère que 1 m³ représente 100 l de sol.

TABLEAU 1

Composition de la solution nutritive pour 100 l * (I)	
1 ml	Acide sulfurique
125 ml	Nitrate de calcium 4 N
200 ml	Nitrate de potassium 4 N
15 ml	Phosphate biphosphorique 10 N
100 ml	Sulfate de magnésium 2 N
20 ml	Nitrate d'ammonium 10 N
50 ml	Verseau de fer
12 ml	Chlorure de sodium 4 N
	Ca(NO ₃) ₂ , 4 H ₂ O
	KNO ₃
	K ₂ HPO ₄
	MgSO ₄ , 7 H ₂ O
	NH ₄ NO ₃
	NaCl
Composition de la solution d'oligo-éléments * (II)	
(En grammes pour 1 l)	
2 g	Acide borique
1,8 g	Sulfate de manganèse
0,22 g	Sulfate de zinc
0,08 g	Sulfate de cuivre
0,15 g	Anhydride molybdique
Traces	Nitrate de cobalt
S'utilise à 100 ml pour 100 l d'eau	Co(NO ₃) ₂
	H ₂ O, B
	MnSO ₄
	ZnSO ₄
	CuSO ₄
	MoO ₃

* D'après J. M. Lefebvre, Station d'Agronomie, I. N. R. A., 17, rue Sully, 21034 Dijon Cedex.

Si le test de premier niveau fait apparaître deux hypothèses (biologique et nutritionnelle par exemple), les deux types de traitement de sol cités précédemment peuvent être associés dans le test de deuxième niveau pour vérifier si le cumul des deux traitements est indispensable pour supprimer complètement le syndrome de fatigue.

Enfin, la diversification de l'hypothèse physico-chimique est obtenue en ajoutant à la terre fatiguée différentes présentations commerciales de matière organique plus ou moins évoluée (tourbe, terreau, compost...) pour en préciser le rôle : effet sur la structure du sol ou sur la nutrition de la plante.

III. — Dispositif expérimental

La parcelle élémentaire est un godet en matière plastique opaque ou en terre cuite, de 8 cm de hauteur sur 7 cm de diamètre, percé au fond et rempli de 200 ml de terre. Cette taille de pot convient aux plantes à petites graines, elle peut être plus grande (diamètre 10 cm à 15 cm) pour l'utilisation de caieux, boutures, stolons (Fraisier) ou pour les plantes à grosses graines (Haricot, Pois).

Les godets, remplis de terre, sont ensimés avec un nombre variable de graines selon leur taille, l'espèce végétale, et le nombre défini de plantes par récipient. Pour le Céleri par exemple, vingt-deux graines sont semées pour obtenir quinze plantes dans un godet de sept. On choisit toujours la variété cultivée qui a présenté le syndrome de fatigue au champ. Il est très important que les semences soient indemnes de parasites et notamment de virus et que les boutures soient homogènes (plants mérisématiques pour le fraisier par exemple).

Les récipients sont ensuite arrosés avec la même quantité d'eau (démémorisée de préférence), et partiellement fermés avec un couvercle plastique transparent jusqu'à ce que les plantules sortent du sol. Quatre à six godets sont à prévoir pour chaque traitement.

Le témoin fatigué est constitué par le sol naturel où sévit la fatigue.

Le témoin non fatigué est un mélange de 50 p. 100 de tourbe et 50 p. 100 de sable grossier lavé et désinfecté à l'autoclave à 100 °C. Si l'on craint une contamination de la tourbe, le mélange peut être désinfecté et laissé à reposer pendant une semaine. Certaines plantules (Céleri) peuvent en souffrir, il vaut mieux éviter la désinfection. Ce témoin est arrosé chaque semaine avec la solution nutritive décrite ci-dessus.

Le test biologique est placé en chambre climatisée à 22 °C le jour et 18 °C la nuit. L'intensité lumineuse est de 8 000 lx, et la photopériode est de 15 h, ces conditions sont à adapter en fonction des besoins de l'espèce végétale utilisée.

IV. — Critères de notation

En raison de la complexité du phénomène étudié, les notations sur les plantules sont diversifiées. Cependant, le principe est constant et consiste à comparer le développement des plantules obtenues sur les terres traitées à celles des témoins « fatigué » et « non fatigué ».

Le « témoin non fatigué » permet en principe un développement optimum des plantes puisqu'il ne renferme aucun facteur limitant.

Une première notation visuelle est effectuée entre les 3^e et 4^e semaines et une notation quantifiée et définitive est réalisée en fin d'essai (entre 6 et 8 semaines selon l'espèce végétale testée).

Pour cette dernière notation, plusieurs critères sont employés pour décrire le syndrome de fatigue.

1) La taille des plantes mesurée entre le sol et la base du limbe de la feuille la plus haute (= longueur du plus grand pétiole).

2) Le poids de matière sèche (après passage pendant 24 h à l'éluve à 105 °C) est mesuré soit sur la plante entière, soit sur les parties aériennes et les racines séparément.

Pour ces deux critères, les chiffres obtenus sont exprimés par godet, et les répétitions permettent une analyse statistique de variance par le test F de Fischer et le test de Newman et Keuls (Dagnelie 1970) pour classer les moyennes. Sur les histogrammes, les traitements affectés de la même lettre (a, b, c...) ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 p. 100.

3) La couleur des plantes peut être estimée en classant les lois selon l'intensité de la coloration entre le témoin fatigué et le témoin non fatigué, par exemple de 1 = jaune à 5 = vert très foncé. L'échelle de notation peut varier selon le végétal testé.

4) Les nécroses racinaires sont estimées visuellement après l'arrachage de toutes les plantes (dans les groupes par traitement) et exprimées par quatre classes, de 0 = racines non nécrosées à 3 = très nécrosées.

Pour ces deux derniers critères non quantifiés, chaque godet est affecté d'un numéro de classe représentant l'aspect moyen des plantes, et le traitement est représenté par la moyenne des godets.

Reçu pour publication en avril 1979.

Références bibliographiques

- BOUHOT D., 1979. Un test biologique à deux niveaux pour l'étude des fatigues de sol. Application à l'étude des nécroses des racines de céleri-rave. *Ann. Phytopathol.*, 11 (1), 95-109.
 DAGNELIE P., 1970. Théories et méthodes statistiques. Applications agronomiques. Vol. 2, 245-250, J. Duculot, Gembloux, Belgique.

ANNEXE n ° 2b

SOL 6A : RESULTATS DU TEST BIOLOGIQUE A DEUX NIVEAUX
REALISE EN 1985

(légende et principe voir ANNEXE n ° 2a)

1^{er} niveau

Traitements Critères	100	SN	MO	CVA	TF	TNF
Poids secs racines (mg/pl)	165 A	196 A	39 B	16 B	37 B	588
Poids secs tiges (mg/pl)	86 A	49 A	14 B	9 B	23 B	165
Poids secs totaux (mg/pl)	251 A	245 A	53 B	25 B	60 B	753
I.N.R.	0,00	2,48	2,08	2,00	2,76	0,12

2^{ème} niveau

Traitements Critères	100	60	SN	MO	OE	SN+100	MZ	ET	QZ	AL	TF	TNF
Poids secs tiges (mg/pl)	154 BC	136 BC	217 B	109 C	63 C	374 A	117 C	68 D	42 D	41 D	67 D	571
Poids secs racines (mg/pl)	64 B	45 BC	94 B	43 BC	40 BC	153 A	41 C	26 C	23 C	23 C	20 C	181
Poids secs totaux (mg/pl)	218 BC	181 C	311 B	152 C	103 C	527 A	158 C	94 D	65 D	64 D	87 D	752
I.N.R.	0,50	0,50	2,24	1,09	1,32	0,52	1,00	0,99	1,12	1,55	1,70	1,08

(si même lettre : pas de différence significative)

ANNEXE n ° 2c

SOL 9A : RESULTATS DU TEST BIOLOGIQUE A DEUX NIVEAUX
REALISE EN 1985

(légende et principe voir ANNEXE n ° 2a)

1^{er} niveau

Traitements Critères	100	SN	MO	CVA	TF	TNF
Poids secs tiges (mg/pl)	365 A	342 A	226 B	171 B	185 B	775
Poids secs racines (mg/pl)	125 A	89 B	53 C	37 C	36 C	207
Poids secs totaux (mg/pl)	490 A	431 A	279 B	208 B	221 B	982
I.N.R.	0,06	1,10	0,92	0,83	1,40	0,08

2^{ème} niveau

Traitements Critères	100	60	100+SN	SN	ME	OZ	MZ	ET	QZ	AL	TF	TNF
Poids secs tiges (mg/pl)	284 B	201 B	515 A	470 A	306 B	117 B	249 B	205 B	122 B	119 B	110 B	765
Poids secs racines (mg/pl)	96 BC	54 C	190 A	127 B	71 BC	23 C	52 C	47 C	39 C	18 C	22 C	193
Poids secs totaux (mg/pl)	360 B	255 B	705 A	597 A	377 A	140 B	301 B	252 B	161 B	137 B	132 B	958
I.N.R.	0,00	0,46	0,09	1,50	1,52	1,77	0,80	1,40	1,56	2,00	2,30	0,00

(si même lettre : pas de différence significative)

ANNEXE n ° 3

L'INDICE DE NECROSES RACINAIRES : I.N.R.

Il s'agit de quantifier l'importance des nécroses du système racinaire d'une plante, une nécrose étant une pourriture qui se traduit par une couleur brunâtre.

Une échelle de notation a été établie par BOUHOT (non publié) :

- 0 : racines totalement saines
- 0,5 : 1/10 du système racinaire est nécrosé
- 1 : 1/3 du système racinaire est nécrosé
- 2 : 2/3 du système racinaire sont nécrosés
- 3 : plus des 3/4 du système racinaire sont nécrosés

La moyenne des notes attribuées à un même traitement est appelée indice de nécroses racinaires ou I.N.R.

ANNEXE n ° 4

QUELQUES PRINCIPES DE PHYSIQUE DES SOLS

1. Le potentiel hydrique (DUNIWAY, 1979; Van OORT, 1984)

Les mouvements de l'eau dans le sol sont conditionnés par un ensemble de forces : gravité, attraction par la partie solide, présence de solutés. En pratique, le potentiel hydrique représente l'énergie qu'il faut fournir à un système pour en extraire 1 g d'eau libre à l'état liquide. On estime arbitrairement que celui de l'eau libre est nul. Les principales forces agissant sur l'eau sont contenues dans l'équation suivante :

$$\psi_t = \psi_g + \psi_o + \psi_p$$

ψ_t = potentiel total de l'eau

ψ_g = potentiel gravitaire, il dépend de la hauteur relative entre un point déterminé dans le sol et un niveau de référence

ψ_o = potentiel osmotique, il correspond à la perte d'énergie potentielle de l'eau en présence d'électrolytes dans la phase liquide, par rapport à l'eau libre

ψ_p = potentiel de pression

$\psi_p > 0$ potentiel de submersion, mouvement de drainage et d'infiltration de l'eau

$\psi_p = 0$ surface d'une nappe d'eau libre

$\psi_p < 0$ potentiel matriciel, la rétention de l'eau dans le sol résulte des forces capillaires et des forces d'adsorption. Ceci a pour effet de diminuer la pression de l'eau P_w par rapport à celle de l'eau libre P_o . La succion matricielle est inversement proportionnelle à la taille des pores

L'énergie qu'il faut pour enlever l'eau retenue dans une certaine gamme de pores est souvent exprimée en équivalence à une hauteur d'eau :

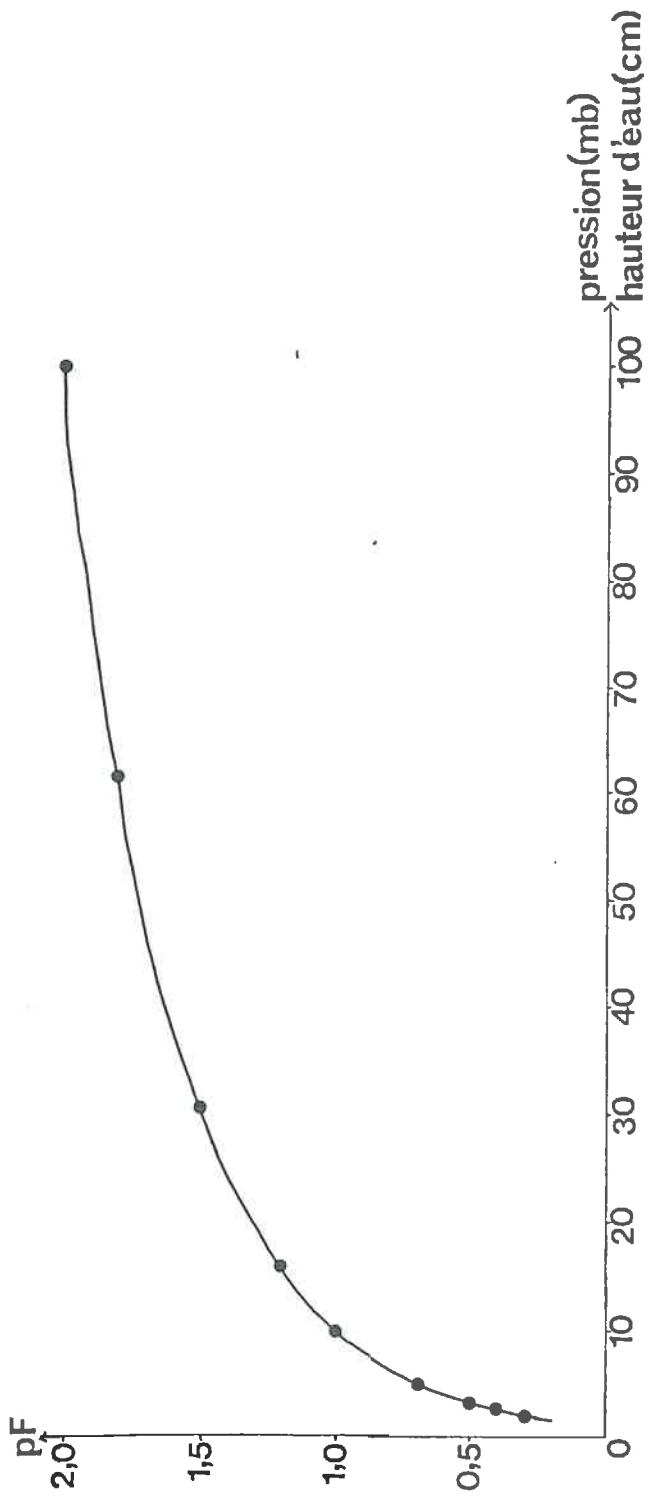
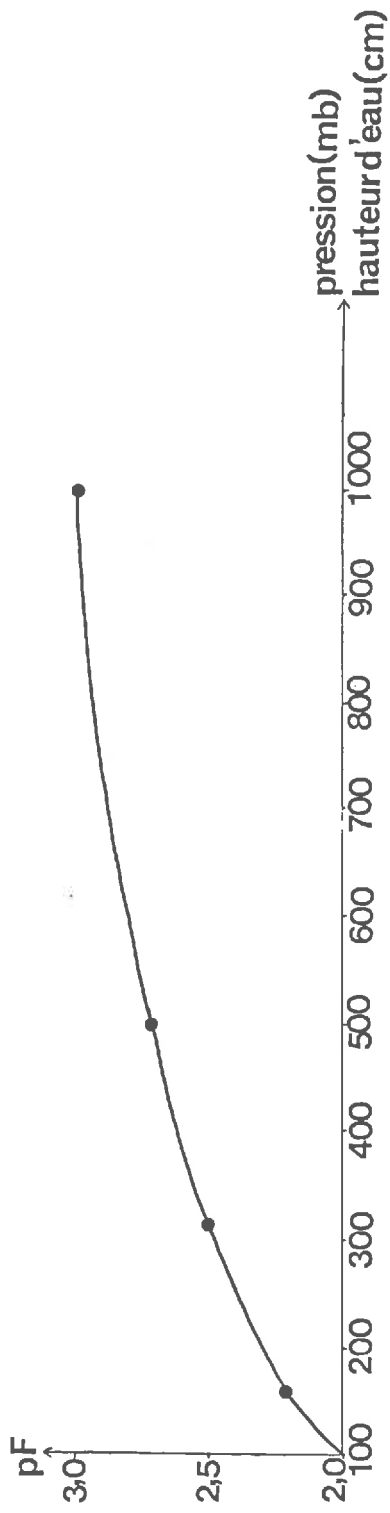


fig A : VALEUR DU pF EN FONCTION DE LA HAUTEUR D'EAU

$$h = \frac{P_o - P_w}{\rho_w \cdot g}$$

avec g = accélération de la pesanteur
($m \cdot s^{-2}$)

h = hauteur de la colonne d'eau
(m)

P_o, P_w = pressions atmosphériques de
l'eau ($kg \cdot s^{-2} \cdot m^{-1}$)

w = masse volumique de l'eau
($kg \cdot m^{-3}$)

Le log de cette colonne d'eau équivalente en cm est appelé
pF (SCHOFIELD, 1935)

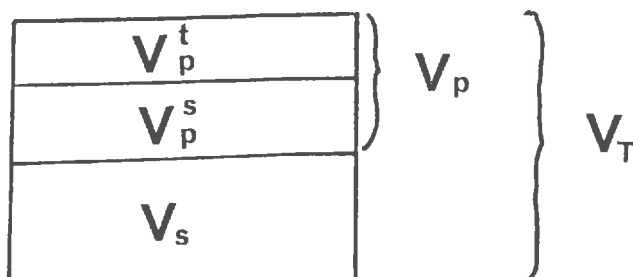
$$pF = \log h \quad (\text{fig A})$$

2. Porosité (STENGEL, 1983)

La porosité d'un sol est en relation avec la fraction du sol occupée par l'air et par l'eau. Elle se mesure par le rapport entre le volume des vides du sol, V_p , et le volume total, V_T , de celui-ci. La porosité totale est exprimée en indice des vides :

On distingue deux types de porosité :

- porosité texturale : elle résulte de l'assemblage des particules solides élémentaires (V_p^t , en indice des vides : e_t)
- porosité structurale : elle résulte de l'arrangement des agrégats et est due à l'action de facteurs externes (V_p^s , en indice des vides : e_s).



Connaissant la porosité texturale des sols étudiés, on calcule la masse de terre qu'il faut tasser pour obtenir la porosité structurale choisie.

$$e_T = e_s + e_t \quad e_t = \frac{\rho_s}{\rho_{dt}} - 1$$

$$e_s = 1 - \frac{m_s}{\rho_s} \cdot \frac{1}{V_T} \quad \left(\frac{1}{\rho_{dt}} = \frac{1}{\rho_s} + W \right)$$

$$m_s = \frac{V_T \cdot \rho_s}{e_s + 1 + \rho_s \cdot W}$$

avec e_T = indice de porosité totale de l'éprouvette

e_t = indice de porosité texturale du sol

e_s = indice de porosité structurale de l'éprouvette

V_T = volume total de l'éprouvette

ρ_s = densité de solide (pycnomètre)

ρ_{dt} = densité texturale (poussée hydrostatique dans le pétrole)

W = humidité choisie

m_s = poids d'agrégats secs nécessaire

ANNEXE n ° 5

MESURE DE LA DENSITE DE SOLIDE METHODE AU PYCNOMETRE A EAU

Principe

On détermine le volume d'eau déplacé dans un pycnomètre par l'échantillon de sol finement tamisé (200 μ) dont la masse est approximativement connue. On opère à température constante.

Mode opératoire

- on détermine le volume du pycnomètre en le pesant vide (M_0) puis plein d'eau permutee dégazée (M_1).
- l'échantillon est placé dans le pycnomètre contenant de l'eau dégazée. Le tout est mis à l'équilibre et en dégazage pendant une nuit. Après la mise en place du capillaire, on complète à niveau avec de l'eau à l'aide d'une seringue. L'échantillon occupe alors un certain volume.
- après séchage à l'étuve (105 ° C, 24 h) on pèse le pycnomètre contenant l'échantillon (M_3)

Calculs

$$M_1 - M_0 = \text{volume du pycnomètre}$$

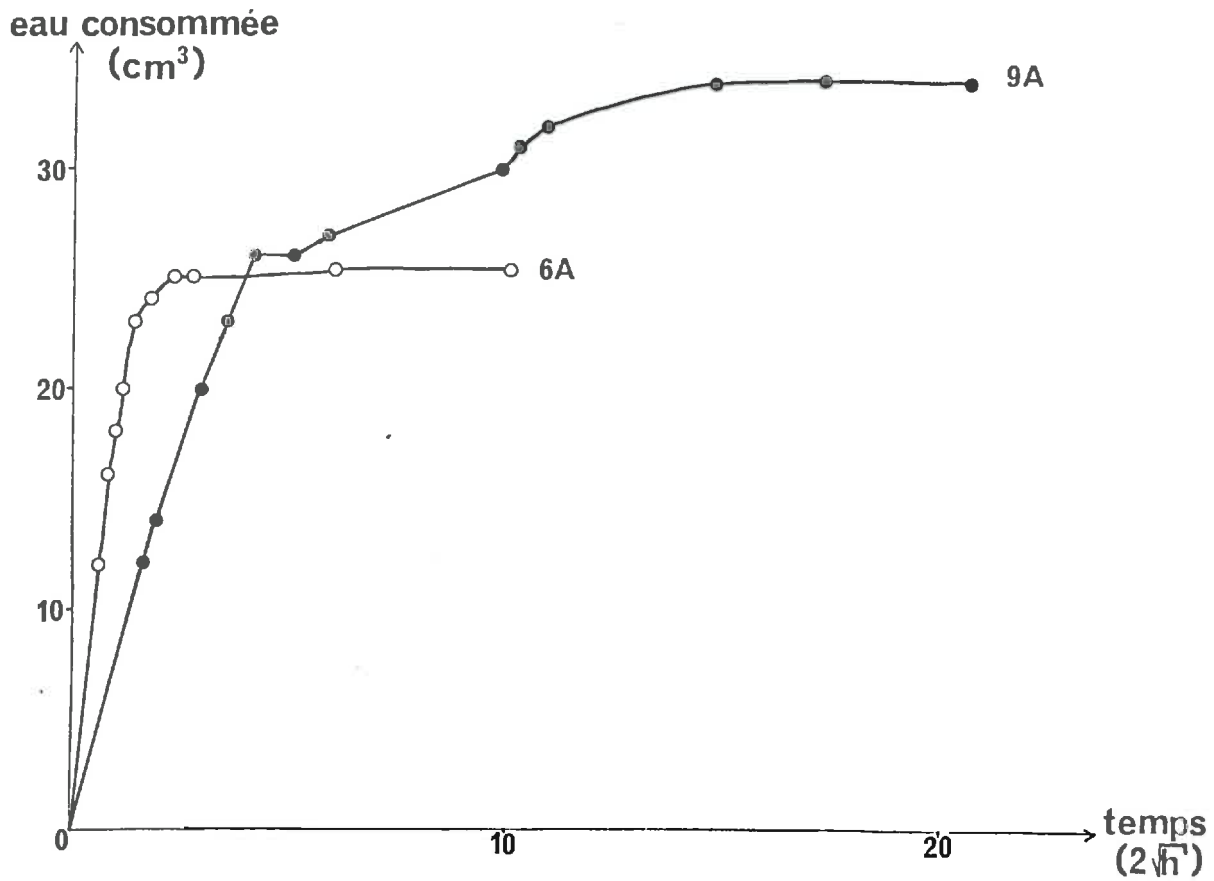
$$M_3 - M_0 = \text{masse de l'échantillon}$$

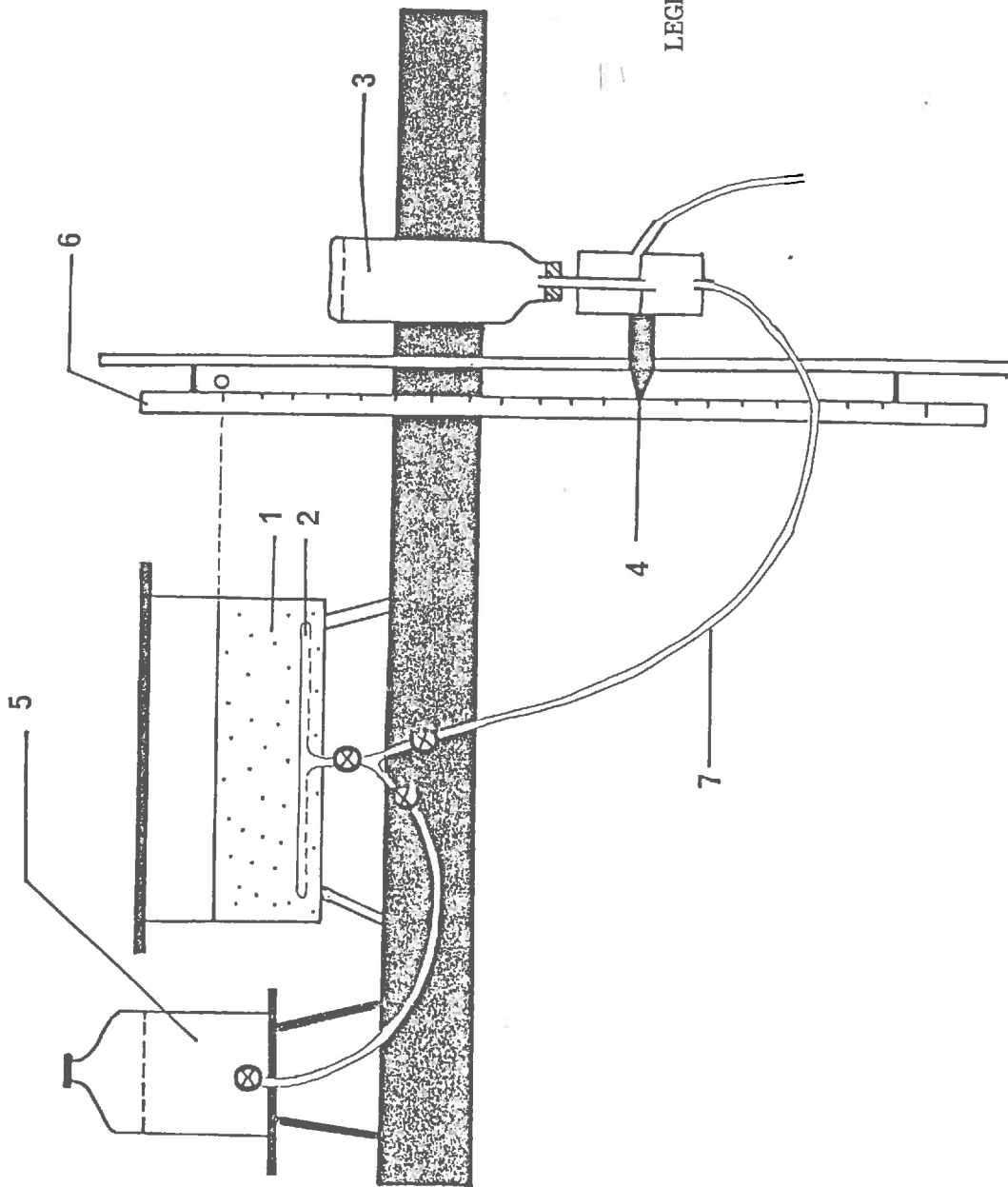
$$M_2 - M_3 = \text{volume d'eau dans le pycnomètre contenant l'échantillon}$$

$$\rho_s = \frac{M_3 - M_0}{(M_1 - M_2) - (M_2 - M_3)}$$

ANNEXE n ° 6

COURBE D'HUMECTATION ET DE SATURATION
DES AGREGATS EN FONCTION DU TEMPS





LEGENDE

- 1 bac contenant le sable
- 2 rampe d'arrivée d'eau
- 3 vase de Mariotte (réservoir)
- 4 curseur de réglage du potentiel
- 5 bouteille d'eau
- 6 règle graduée en cm
- 7 tuyau

fig B : SCHEMA DE LA TABLE A DEPRESSIONS
ALLANT DE pf 0 A pf 2.0

ANNEXE n ° 7

MODE D'EMPLOI DE LA TABLE A DEPRESSIONS ALLANT DE pF 0 A pF 2,0 (fig B)

1. Modifications par rapport au matériel d'origine

Ces modifications sont dûes soit à l'inadaptation du matériel pour l'usage souhaité, soit à sa mauvaise qualité.

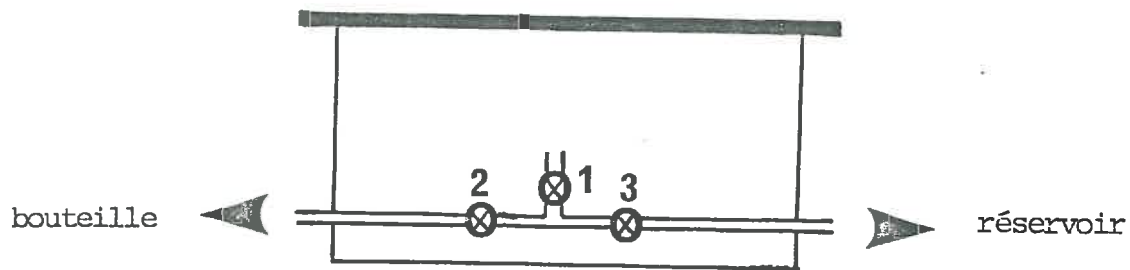
- 1 Le vase de Mariotte est remplacé par un récipient plus grand. Dans le cas où cette modification est inutile, vérifier que le diamètre du tube du vase fourni permette bien l'écoulement de l'eau; si nécessaire, le bisauter.
- 2 Les tuyaux 7 qui vont de la table au réservoir à élévateur sont rallongés pour que 4 puisse descendre jusqu'à un mètre.
- 3 Les colliers qui fixent les tuyaux au reste du système sont à vérifier car certains raccords ne sont pas étanches.

2. Installation

- 1 Le matériel est posé sur une table stable qui a au moins 1 m de hauteur. Le côté gauche doit être au bord afin que l'on puisse y fixer la règle graduée 6.
- 2 Mettre la bouteille 5 sur son support. Elle sera à droite de la boîte à sable 1.
- 3 A 6 cm du bord supérieur de la boîte et à l'intérieur, tracer un trait au marqueur indélébile.
- 4 Entourer les tuyaux de la rampe d'arrivée d'eau 2 avec les bandes de tissu fournies destinées à empêcher le sable de s'écouler à travers la rampe.
- 5 Bien enfoncer le support de la rampe dans le fond du bac pour qu'il n'y ait pas de fuites.

3. Remplissage

TYPE I : TROIS ROBINETS SIMPLES



TYPE II : UN ROBINET TRIPLE

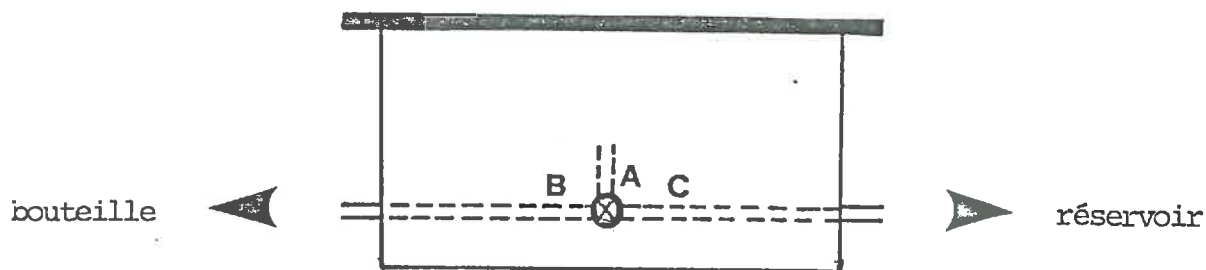


fig C : LES DEUX TYPES DE TABLES A DEPRESSIONS
ALLANT DE pF 0 A pF 2,0

1 Remplir la bouteille d'eau **dégazée**.

2 Voir fig C si type I : ouvrir 1 et 2, fermer 3
si type II : mettre en position B

Le bac se remplit progressivement d'eau. De cette façon, peu d'air reste prisonnier dans la rampe.

3 Quand l'eau atteint le trait au marqueur, fermer les robinets (1 et 2, ou mettre en A).

4 Pour faciliter l'élimination des bulles d'air et amorcer le système : remplir les tuyaux d'eau. Pour cela, déplacer le curseur 4 vers le bas (plus il est bas, plus le débit d'eau sera rapide et plus les bulles d'air seront entraînées). Ouvrir 1 et 3 (ou mettre en C). Mettre un récipient pour recueillir l'eau évacuée. "Jouer" avec les tuyaux pour faciliter l'évacuation de l'air. Puis fermer 1 et 3 (ou mettre en A).

5 Le sable est amené avec un entonnoir pour avoir une bonne répartition. De temps en temps laisser le sable se reposer et ouvrir 1 et 3 (ou mettre en C) pour éliminer l'air avec l'eau de drainage.

6 Quand le niveau du sable atteint le trait, drainer toute l'eau (ouvrir 1 et 3, mettre en C). Vérifier que le niveau du sable est homogène (bords et coins).

7 Réhumecter le sable en remontant le curseur en 0 (niveau correspondant à la surface du sable). Répéter plusieurs fois cette opération afin de voir s'il ne se crée pas de turbulences dans le sable.

ATTENTION : compte tenu de la forme de la rampe, certains tuyaux sont très près de la surface. Une arrivée d'eau trop brutale crée d'importantes turbulences. Quand la table est remplie, il ne faut pas se servir de l'arrivée d'eau par la bouteille.

8 La pièce de nylon, découpée au préalable et dont les bords ont été chauffés, est posée, humide, sur la surface immergée du sable. L'eau est ensuite drainée. Les poches d'air entre le nylon et le sable sont éliminées. Un papier absorbant est utilisé pour lisser la surface humide.

9 Pour limiter la prolifération des algues, tous les tuyaux et toutes les bouteilles sont recouverts de papier d'aluminium.

Temps nécessaire : 1 table = 2 h
2 tables = 3 h 30

4. Changement de sable

Pour éviter les contaminations, à la fin de chaque manipulation (changement de terre, changement de plante etc...) le sable est changé.

1 Humecter le sable, l'enlever avec une petite pelle.

2 Enlever la bande de tissu de la rampe et, ainsi que le morceau de nylon, la laver et la désinfecter (eau de javel), puis bien rincer.

3 Rincer tout le système avec de l'eau javellisée au moins deux fois. De temps en temps fermer tous les robinets pour une désinfection plus complète. Puis faire circuler de l'eau pure dans le circuit pour le rinçage.

Temps nécessaire : 1 table = 2 h
2 tables = 2h 30

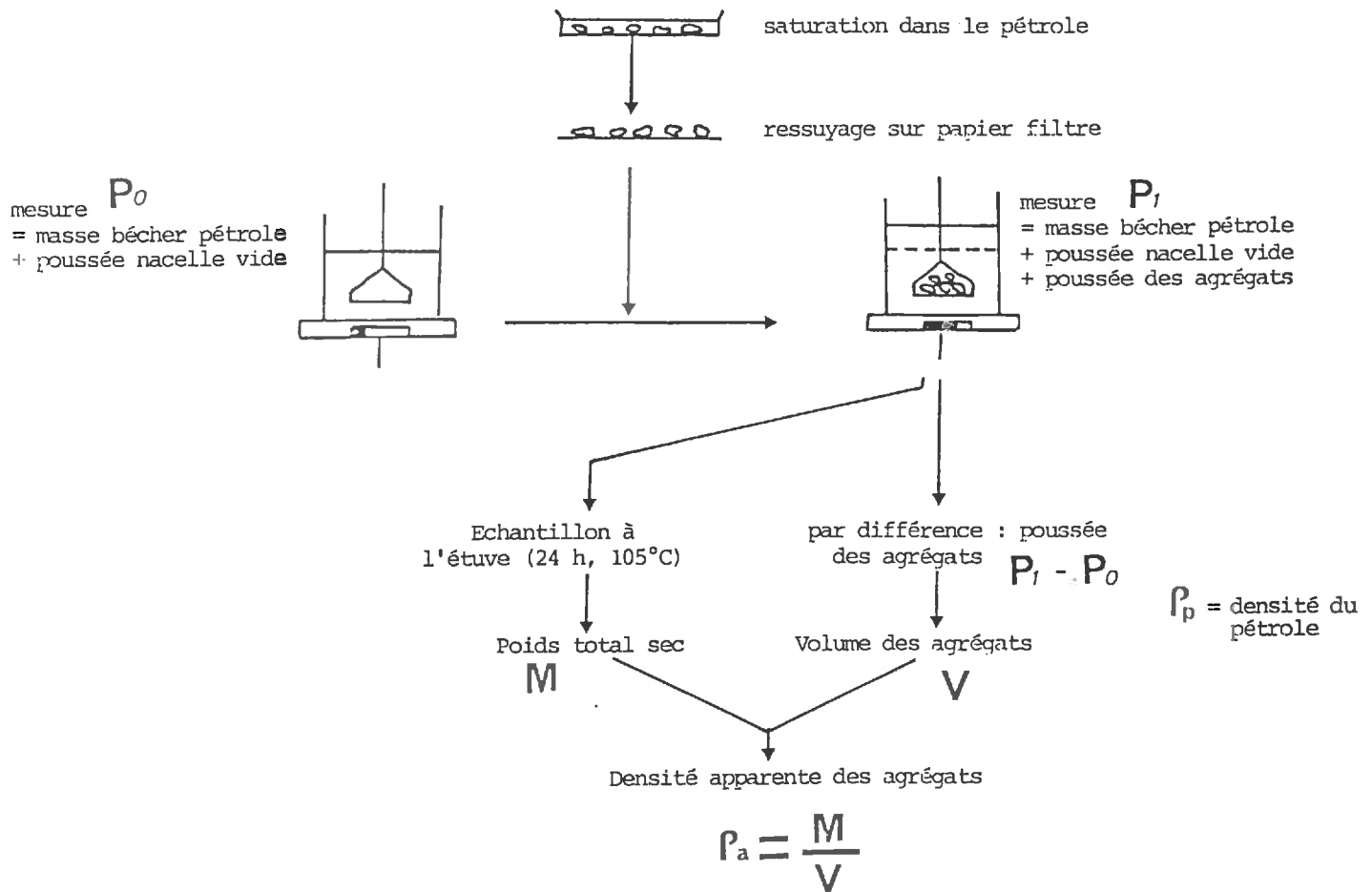
4 Vider le circuit et recommencer l'opération de remplissage avec du sable désinfecté (2 à 3 h à 180 ° C) et de l'eau dégazée.

ANNEXE n° 8

MESURE DE LA DENSITE APPARENTE DU SOL AU PETROLE

Principe

On détermine la densité de petits agrégats ou de mottes en les imprégnant de pétrole, puis après ressuyage en mesurant leur volume par la mesure de la poussée hydrostatique dans le pétrole.

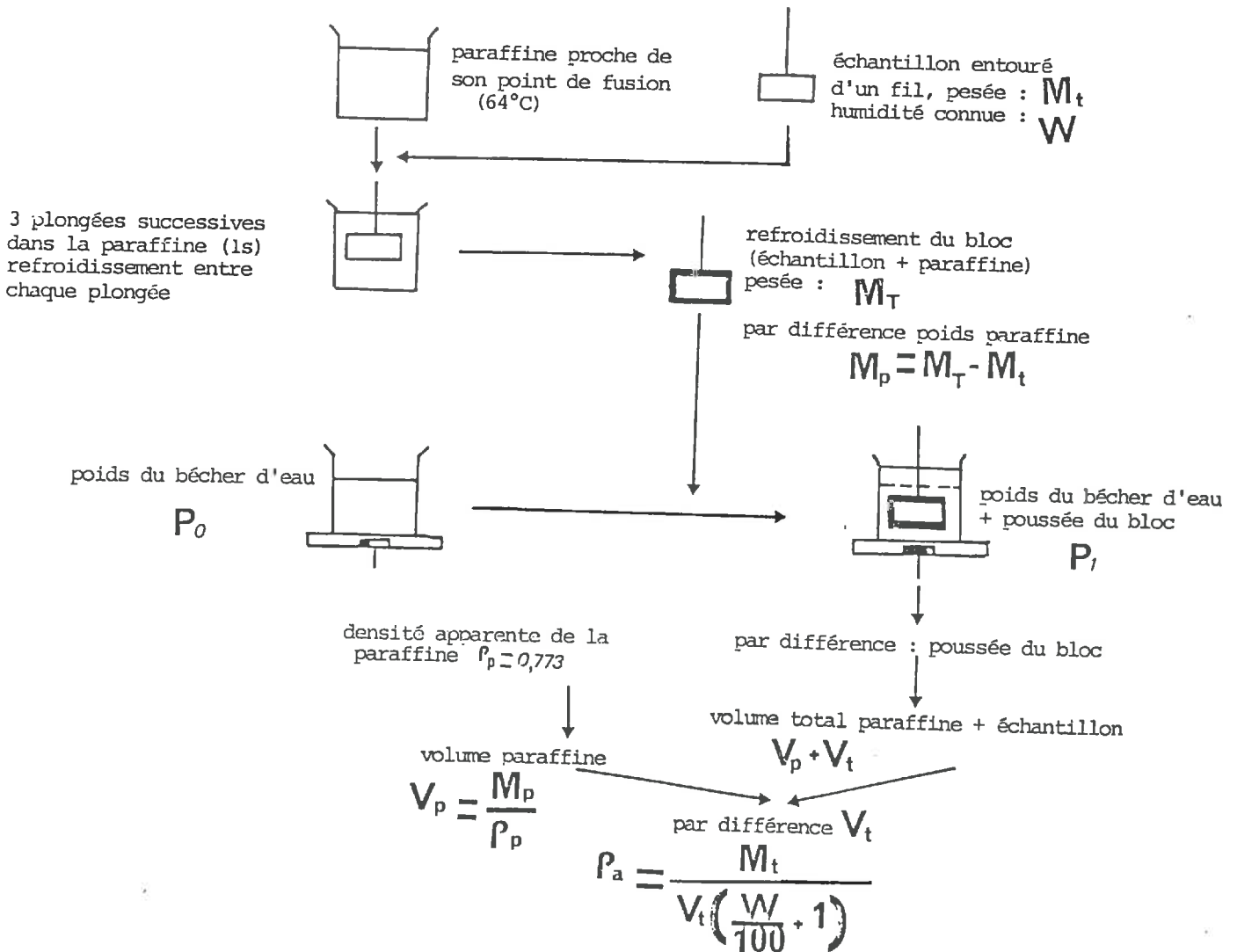


ANNEXE n° 9

MESURE DE LA DENSITE APPARENTE DU SOL A LA PARAFFINE

Principe

La paraffine enrobe, sans pénétrer, l'échantillon de sol (volume minimum 100 cm³) de façon hermétique. Le volume de l'ensemble refroidi (terre plus paraffine) est mesuré par la poussée hydrostatique dans l'eau.



ANNEXE n^o 10

RESULTATS OBTENUS POUR LE PREMIER
ESSAI AVEC 6A

Seu.	e _s	POIDS SECS † RACINES	POIDS SECS † TIGES	POIDS FRAIS † TOTAUX	LONGUEUR † † RACINES	% LONGUEUR RACINES NECROS.	I. N. R.
3	0,1	6,12	9,82	220,25	4,00	50,00	3,00
		5,10	13,20	217,15	13,75	59,10	3,00
	0,2	8,20 4,92	12,17 11,70	217,00 193,35	15,12 non mesura.	47,90 -	2,00 1,25
4	0,3	7,70	12,80	296,67	16,67	49,00	2,00
		4,30	11,42	187,08	13,50	40,70	2,50
	0,1	4,37 7,70	11,80 21,83	188,37 294,68	27,33 40,80	28,05 47,75	2,33 2,67
5	0,2	6,15	15,75	267,60	10,75	62,79	2,50
		7,50	14,60	247,70	10,25	60,98	2,50
	0,3	7,08 5,86	16,02 13,94	244,04 221,66	19,00 14,30	72,81 51,75	2,40 2,75
5	0,1	12,50	22,08	319,35	11,28	47,25	3,00
		7,82	13,33	247,38	5,67	46,27	2,75
	0,2	19,25 8,50	22,55 13,33	630,40 297,77	29,50 5,67	32,20 32,35	3,00 2,33
5	0,3	9,44	23,80	366,08	42,19	32,00	2,50
		7,07	18,27	367,13	51,64	30,50	3,00

† en mg/plante
†† en cm/plante

POTENTIEL HYDRIQUE : -25 mb

Sem.	e _s	POIDS RACINES	SECS † TIGES	POIDS FRAIS † TOTAUX	LONGUEUR†† RACINES	% LONGUEUR RACINES NECROS.	I. N. R.
3	0,1	4,40 6,15	12,32 10,70	173,55 181,45	27,00 13,83	43,21 39,80	2,67 1,67
	0,2	3,27 4,25	8,95 5,82	115,05 108,18	5,87 3,62	46,80 48,30	2,50 1,75
	0,3	4,75 9,53	7,90 11,45	171,78 334,17	12,75 20,17	41,20 46,30	2,00 1,67
4	0,1	2,33 7,94	6,80 7,98	93,17 133,96	13,00 13,00	42,31 26,91	3,00 2,50
	0,2	10,25 2,53	14,70 6,13	239,70 159,80	9,00 11,50	33,33 78,26	2,50 3,00
	0,3	9,17 3,72	11,40 10,32	237,70 209,93	27,17 9,25	51,88 62,16	3,00 3,00
5	0,1	3,04 19,70	7,12 29,20	96,86 580,60	7,56 27,90	56,67 47,67	2,00 2,00
	0,2	5,88 4,10	13,53 7,35	174,12 120,35	6,63 5,50	15,09 18,18	2,25 2,00
	0,3	7,28 7,16	9,86 15,24	186,45 287,52	16,50 12,00	58,33 15,63	2,50 2,25

POTENTIEL HYDRIQUE : -100 mb

† en mg/plante
†† en cm/plante

Sol de départ	- 25			- 100		
	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3
PYTHIUM	1	0	0	0	0	1
FUSARIUM OXYSPORUM	6	9	7	7	7	9
FUSARIUM SOLANI	3	2	1	0	4	2
DIVERS	5	0	5	6	2	5
TOTAL	15	11	13	13	12	17

RESULTATS DES ISOLEMENTS FONGIQUES

ANNEXE n° 11

RESULTATS OBTENUS AVEC 9A

Sem.	e _s	POIDS RACINES	POIDS SECS+ TIGES	POIDS FRAIS+ TOPAUX	LONGUEUR†† RACINES	% LONGUEUR RACINES NECROS.	I. N. R.
3	0,1	12,30	38,00	750,15	73,50	46,36	2,50
		8,33	41,87	753,50	52,00	57,09	2,00
	0,2	6,38	34,84	642,46	65,20	53,01	2,00
4	0,3	6,93	40,17	691,17	51,17	51,60	1,00
		6,28	47,35	800,68	44,25	67,24	2,67
	10,23	62,00	966,73	94,83	56,78	2,25	
5	0,1	6,55	44,80	554,55	38,25	69,70	2,50
		7,28	54,10	689,08	36,00	64,35	3,00
	0,2	9,78	55,32	804,40	49,00	73,14	3,00
6	0,3	15,30	93,85	1117,13	70,00	61,47	2,25
		10,05	57,43	859,18	70,00	61,60	2,25
	13,92	88,88	1005,25	44,00	67,35	2,50	
7	0,1	22,88	108,73	1049,32	91,63	75,94	2,75
		21,07	126,33	1296,70	90,83	66,90	1,67
	0,2	18,68	87,70	930,06	62,20	70,34	2,60
8	0,3	27,18	111,23	1154,88	82,38	63,52	2,25
		34,65	135,50	1535,95	110,75	74,86	3,00
	34,15	135,45	1450,86	126,25	77,65	2,50	

POTENTIEL HYDRIQUE : -25 mb

† en mg/plante
†† en cm/plante

Sem.	e _s	POIDS SECS+ RACINES	TIGES	LONGUEUR++ RACINES	LONGUEUR+ RACINES NECROS.	I.N.R.
3	0,1	3,90 3,88	22,50 26,40	4,00 6,75	66,67 75,00	1,50 2,00
	0,2	7,60 19,15	40,40 58,65	22,67 22,00	65,83 72,73	2,00 2,50
	0,3	8,37 4,75	50,03 38,38	26,00 16,88	59,09 56,57	2,67 1,75
4	0,1	7,10 8,56	51,00 52,08	14,50 19,20	63,64 64,03	3,00 2,60
	0,2	8,10 15,72	51,00 77,75	20,88 29,00	70,71 73,40	3,00 2,50
	0,3	16,38 25,90	94,00 118,20	34,90 82,25	57,09 57,36	2,40 2,50
5	0,1	14,82 23,90	58,04 95,40	11,20 122,00	74,19 43,33	2,40 2,00
	0,2	31,63 15,45	116,30 81,08	80,00 42,75	59,56 57,14	2,33 2,25
	0,3	16,38 14,36	113,58 98,30	42,10 40,70	64,35 67,16	2,80 2,20

POTENTIEL HYDRIQUE : -100 mb

† en mg/plante
‡ en cm/plante

	Sol de départ	- 25			- 100		
		0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3
PYTHIUM	12	2	2	0	0	0	0
FUSARIUM OXYSPORUM	13	9	7	6	7	5	6
FUSARIUM SOLANI	17	6	6	10	4	6	3
DIVERS	30	3	1	2	3	2	6
TOTAL	72	20	16	18	14	13	15

RESULTATS DES ISOLEMENTS FONGIQUES