

THESE*présentée*

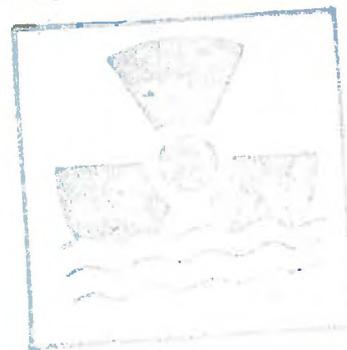
A L'UNIVERSITÉ PAUL SABATIER DE TOULOUSE

EN VUE DE L'OBTENTION

DU GRADE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

Jackie PUECH

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA DISPONIBILITÉ DE L'EAU
POUR LES VÉGÉTAUX
SUR DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS**

Soutenu le 23 mars 1972 devant la Commission d'Examen :

M. DIEHL

*Président*M^{lle} BERDUCOU

M. THIRRIOT

M. BLANCHET

Examineurs

UNIVERSITE PAUL SABATIER TOULOUSE

DIRECTION DE L'UNIVERSITE

M. LARENG Président
M. MATHIS 1er Vice Président
M. MARTIN 2ème Vice Président

S C I E N C E S

HONORARIAT

M. BLAIZOT Doyen honoraire
M. CAPDECOMME Doyen honoraire, Recteur honoraire
M. DELTHEILH Doyen honoraire, Recteur honoraire, Professeur
honoraire
M. DUPOUY Membre de l'Institut, Doyen honoraire,
Directeur Général honoraire du C.N.R.S.,
Professeur honoraire
M. DURAND Doyen honoraire
M. GAUSSEN Professeur honoraire, Correspondant de l'Institut
M. JACQUES Professeur honoraire
M. MATHIS Doyen honoraire
M. MASDUPUY Professeur honoraire
M. MIGNONAC Professeur honoraire
M. MORQUER Professeur honoraire, Correspondant de l'Institut
M. SECONDAT Professeur honoraire
M. TEISSIE-SOLIER ... Professeur honoraire
M. VANDEL Professeur honoraire, Membre de l'Institut

PROFESSEURS

M. ESCANDE Mécanique des Fluides, Membre de l'Institut
M. CASTERAS Géologie, Correspondant de l'Institut
M. BEDOS Chimie
M. CAPDECOMME Minéralogie
M. NOUVEL Biologie Générale
M. GAILLAIS Chimie, Correspondant de l'Institut

- M. DORANT Physique
- M. DRENT Physique
- M. DIEHL Agronomie
- M. DESBRE Chimie Organique
- M. BRUNEL Physiologie Végétale
- M. FURON Mathématiques Appliquées
- M. MARGULIS Pédologie
- M. TRICHE Chimie Analytique et Spectrographie
- M. LEDOUK Zoologie Appliquée
- M. RIVALS Agriculture
- M. PERRIER Physique
- M. HAPTIS Chimie
- M. ORLINO Géochimie et Minéralogie
- M. LAPOURCADE Physique
- M. ANGELIER Zoologie
- Mlle de PIERRE Botanique
- M. WARRAN Minéralogie et Géotechnique
- M. LAURET Physique Théorique et Calcul Numérique
- M. SIERMAY Biologie animale
- M. NOUGARO Hydraulique Générale et Appliquée
- M. LACASSE Electrotechnique
- M. GARDY Génie Chimique
- M. ELAVO Physique Nucléaire
- M. EL EBENT Electronique Appliquée
- M. VOIGT Chimie Minérale
- M. LIEREDDE Botanique
- M. LELUBRE Géologie
- M. TROCHAIN Botanique
- M. LALAGUE Mathématique Générales
- M. BOUIGUE Astronomie
- M. COUCHET Physique
- M. LEJEUNE Chimie
- M. LASCOMBES Botanique
- M. ASSELINEAU Chimie Biologique
- M. MAURET Chimie Systématique
- M. AGID Physiologie
- M. MONTANT Cryptogamie
- M. GAUTIER Physique
- M. CRUMEYROLLES Mathématiques

- M. GOURINARD Géologie
- M. PULOU Minéralogie
- M. CAMBOU Physique Spatiale
- M. MIQUEL Chimie
- M. LACOSTE Electrotechnique
- M. THIBAULT Mécanique Rationnelle et Appliquée
- M. MONTEL Chimie Physique et Electrochimie
- M. MASCART Mathématiques
- M. MEDIONI Psychophysologie
- M. THIRRIOT Hydrodynamique E.N.S.E.I.T.
- M. BRENON Géologie
- M. LAFON Calcul différentiel et intégral
- M. RAYNAUD P. Physiologie animale
- M. ZALTA Chimie biologique
- M. SEVELY Electrotechnique
- M. POMMIEZ Mathématiques
- M. REY Biologie Végétale
- M. COULOMB Physique
- M. TRINQUIER Physique
- M. MARONI Chimie
- M. BEETSCHEN Biologie Générale
- M. GRUAT Mécanique des Fluides (Hydraulique)
- M. DERACHE Physiologie Animale

PROFESSEURS ASSOCIES

M. SAKUMA

PROFESSEURS SANS CHAIRE

- M. HAMANT Botanique
- Mme BRUNEL Physiologie Végétale
- Mlle BERDUCOU Physiologie Végétale
- M. PICCA Physique
- M. MERIC Mathématiques Appliquées
- Mme LECAL Zoologie
- M. BUGAREL Génie Chimique
- M. MIROUSE Géologie
- M. PILLOD Physique
- M. LARROQUE Physique

M. BARRANS Chimie
Mme LAFON Mathématiques
Mlle LAPEYRE Mathématiques, Informatique
M. DAT Mécanique des Fluides
M. JEANNIN Chimie Minérale
M. BERTRAND Chimie
M. SATGE Chimie Organique
M. DESQ Mathématiques
M. MAHENC Chimie
M. LATTES Chimie
M. ROCARD Electronique
M. DEGEILH Physique
M. FALLOT Biologie Végétale (Viticulture et Arboriculture)
M. POILBLANC Chimie
M. TOUZE Physiologie Végétale
M. FRASNAY Mathématiques
M. CASSAGNAU Zoologie
M. GUERIN Mathématiques
M. TRUCHASSON Mécanique
M. PESCIA Physique
M. HOPFMANN Electronique
M. SOUQUET Géologie
M. SCHNEIDER Biologie Cellulaire
M. SICARD Biologie Génétique
M. DE LOTH Chimie Physique
M. ENJALBERT Chimie
M. MARTIN J.C. Génie Electrique

MAITRES DE CONFERENCES

M. BLANCHARD Mathématiques
M. BITSCH Zoologie
M. FONTAN Physique Nucléaire
M. CAUSSINUS Mathématiques Appliquées
M. MARTY Physique Industrielle
M. BAUDRAS Chimie Biologique
M. DURAND Ph. Physique
M. LEFEUVRE Electronique E.N.S.E.I.T.H.
M. SAPORTE Physique

M. ATTEIA Mathématiques
M. IMBERT Psychophysiologie
M. ANGELINO Génie Chimique
M. THENOZ Génie Civil
M. DABOSI E.N.S.C.
M. CALVET Mécanique des Fluides E.N.S.E.I.H.T.
M. PAGANI Physique
M. CUPPENS Mathématiques
M. PERENNOU Informatique
M. REY Génie Electrique
M. MATHIEU Chimie Analytique
M. TRANNOY Physique E.N.S.E.I.H.T.
M. CASTAGNETTO Mathématiques E.N.S.E.I.H.T.
M. CASTAN Informatique
M. GILOT Génie Chimique (Institut du Génie Chimique)
M. LANTELME Chimie Industrielle
M. CALMON Techniques Agricoles
Mlle BARBANCE Mathématiques
M. VERDIER Physique
M. GILLY Génie Mécanique
M. VEDRENNE Mesures Physiques
M. BEAUFILS Informatique
M. MATEAU Electronique E.N.S.E.I.H.T.
M. COTTU Génie Mécanique
M. ROUTTIE Génie chimique
M. REME Mesures Physiques
M. MARAL Physique

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

M. PUN

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

M. MAUSS Mécanique
M. PRADINES Mathématiques
M. BARTHET Mathématiques

PERSONNEL DE L'UNIVERSITE AFFECTE A L'INSTITUT
NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE

PROFESSEURS

M. ROQUES Chimie Industrielle
M. GRATELOUP Génie Electrique
M. MASO Génie Civil
M. MIRA Génie Electrique

PROFESSEURS DANS CHAIRE

M. CASSIGNOL Génie Electrique
M. COLLETTE Physique
M. CARRARA Physique

MAITRES DE CONFERENCES

M. PAGET Physique
M. SCHUTTLER Physique
M. LETURCQ Génie Electrique
M. SIRIEYS Génie Civil

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

M. BROUSSEAU Physique
M. LACAZE Mathématiques

ADMINISTRATION

M. PRINEAU Secrétaire Général de l'Université Paul Sabatier

"DECOUVRIR QU'IL N'Y A RIEN DE PERMANENT
A UNE IMMENSE IMPORTANCE, CAR ALORS
SEULEMENT A-T-ON L'ESPRIT LIBRE, ALORS
SEULEMENT PEUT-ON VOIR CLAIR, ET EN CELA
EST UNE GRANDE JOIE"

"SE LIBERER DU CONNU"

KRISHNAMURTI

A EDELGARD et PIERRE

AVANT - PROPOS

Cette étude est le fruit d'un travail réalisé au sein d'une équipe de recherche axée sur l'analyse des mécanismes de l'alimentation hydrique et minérale des plantes cultivées. Elle a été rendue possible grâce à de nombreux conseils, soutiens et encouragements et aussi aux moyens mis à ma disposition au sein de l'Institut National de la Recherche Agronomique, ainsi qu'à l'accueil que j'ai reçu à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse.

Je tiens particulièrement à exprimer ma gratitude à Monsieur DIEHL, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse et à l'Université PAUL SABATIER pour m'avoir fait l'honneur de présider mon Jury de thèse. Je le remercie très vivement pour l'accueil bienveillant qu'il m'a toujours réservé et pour les conseils qu'il m'a prodigué pour la présentation de ce travail.

Je voudrais adresser ma reconnaissance à Mademoiselle BERDUCOU, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse et à l'Université PAUL SABATIER pour m'avoir toujours reçu avec compréhension et beaucoup de gentillesse et avoir accepté de faire partie de mon Jury. Je la remercie bien vivement de s'être penchée sur cette étude et de m'avoir toujours aidé de ses conseils.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur THIRRIOT, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse, pour avoir eu la grande amabilité de s'intéresser à mon travail et avoir bien voulu le juger.

Je suis très heureux de pouvoir exprimer ma reconnaissance à Monsieur BLANCHET, Directeur de la Station d'Agronomie du Centre de Recherche de Toulouse (I.N.R.A.) pour sa bienveillance et son soutien permanent. C'est grâce à ses multiples et inlassables encouragements que j'ai pu mener à son terme ce travail. Je le remercie très sincèrement d'avoir accepté de participer à mon jury.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance à Monsieur HENIN, Chef du Département Agronomie à l'Institut National de la Recherche Agronomique pour l'aide efficace et le soutien permanent qu'il m'a continuellement prodigué. Je le remercie pour la compréhension dont il a toujours fait preuve à mon égard.

Je tiens aussi tout particulièrement à remercier très vivement Monsieur HERNANDEZ, collaborateur de tous les jours, pour son très grand dévouement au labeur commun. La réalisation technique de ce travail lui doit beaucoup. Je veux aussi remercier Monsieur LAGACHERIE pour son concours temporaire et efficace.

J'ai le grand plaisir d'avoir l'occasion de remercier mes nombreux collègues de l'équipe de travail pour les suggestions, et les critiques toujours constructives qu'ils ont bien voulu formuler tout au long de ce travail.

Toute ma reconnaissance va aux nombreuses personnes de la Station qui, à l'occasion de tâches multiples m'ont toujours prêté un concours spontané et très généreux ; je voudrais enfin citer en particulier Mademoiselle MORCELY pour la réalisation dactylographique de ce travail.

S O M M A I R E

INTRODUCTION GENERALE

I	- <u>RELATIONS SOL - PLANTE - CLIMAT</u>	p. 14
II	- <u>CARACTERISTIQUES DU RESERVOIR SOL</u>	p. 17
III	- <u>DISPONIBILITE DE L'EAU</u>	p. 19
IV	- <u>BUT DE CE TRAVAIL</u>	p. 21

PREMIERE PARTIE

METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

I	- <u>TYPES DE SOLS UTILISES</u>	p. 24
	A - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	p. 24
	B - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES	p. 25
	C - CARACTERISTIQUES HYDRIQUES	p. 25
	1) Courbes pF - Humidité	p. 25
	2) Réserves hydriques	p. 27
	D - SURFACES TOTALES	p. 29
	E - PREPARATION ET HUMIDIFICATION DES TERRES	p. 30
II	- <u>CHOIX D'UN MODELE DE RACINE</u>	p. 30
	A - CARACTERISTIQUES DU MODELE	p. 30
	B - MODE D'UTILISATION	p. 31
	C - ABSORPTION D'EAU PAR LE GEL DE SILICE	p. 33
	1) Influence de l'humidité du gel	p. 33
	2) Importance de la granulométrie du produit	p. 34
	3) Absorption d'eau sur les sols	p. 34
III	- <u>EXPERIMENTATION AVEC LE VEGETAL</u>	p. 36
	A - CHOIX DE LA METHODE	p. 36
	B - MATERIEL ET TECHNIQUE DE CULTURE	p. 37
IV	- <u>EXPERIMENTATION AU CHAMP</u>	p. 40
	A - MODALITES DE DESSICCATION DU SOL PAR LES CULTURES	p. 40
	B - CARACTERISATION DE SOLS DIFFERENTS	p. 41
	C - DEGRE D'EPUISEMENT DES RESERVES ET RYTHMES DE CONSOMMATION ..	p. 41

DEUXIEME PARTIE

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CIRCULATION DE L'EAU NON SATURANTE

INTRODUCTION p. 43

I - RESULTATS OBTENUS A PARTIR D'UN MODELE DE RACINE p. 44

 A - PRINCIPAUX ASPECTS DE LA CESSION D'EAU PAR LES SOLS p. 44

 1) Influence de la texture de sols considérés à la
 capacité au champ p. 44

 2) Influence de l'humidité initiale p. 47

 3) Rôle de la force de succion p. 47

 4) Rôle de la température p. 50

 B - EVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES SUR DIFFERENTS SOLS.
 GRADIENT D'HUMIDITE p. 51

 1) Importance des types de sols p. 51

 2) Rôle de l'humidité initiale p. 53

 3) Rôle de l'intensité de la succion p. 53

 4) Effet des arrêts de succion sur l'évolution des profils
 hydriques p. 53

 5) Variation du débit en fonction de l'humidité de la tranche
 de sol située près de l'absorbant p. 56

 6) Effet des succions opposées sur l'évolution des
 profils hydriques p. 58

 7) Influence de l'hétérogénéité hydrique ou texturale des milieux
 p. 61

 a) Influence de variations de l'humidité de milieux superposés p. 62

 b) Influence des types texturaux p. 62

 b1) Juxtaposition de sols pris à la capacité au champ p. 64

 b2) Sols à différentes humidités en contact avec un sol argileux
 à la capacité au champ p. 66

 b3) Mouvements d'eau en superpositions multiples de sols p. 66

II - INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX p. 71

 A - COMPORTEMENT GENERAL DU SYSTEME ETUDIE p. 71

 B - CONSIDERATIONS SUR LE MILIEU POREUX p. 72

 C - ANALOGIE AVEC UN COMPORTEMENT CAPILLAIRE DES SYSTEMES ETUDIES .. p. 76

 D - CESSIBILITE DE L'EAU DU SOL p. 79

CONCLUSION p. 85

TROISIEME PARTIE

MODALITES D'UTILISATION DE L'EAU NON SATURANTE PAR LE VEGETAL

I - COMPARAISON DES CESSIONS D'EAU DE DEUX SOLS EN CONDITIONS CLIMATIQUES
CONSTANTES ET VARIABLES p. 90

II - CESSION D'EAU PAR DIFFERENTS SOLS AVEC UNE CULTURE D'ORGE (Conditions
naturelles) p. 95

 A - COMPORTEMENT DES VEGETAUX p. 96

 B - CESSION D'EAU POUR LES DIFFERENTS SOLS p. 99

 C - CESSION D'EAU EN CONDITIONS CLIMATIQUES FLUCTUANTES p. 102

 D - RELATIONS ENTRE LA CESSION D'EAU ET LES CARACTERES PHYSIQUES
 DU MILIEU p. 104

E - IMPORTANCE DE L'HUMIDITE INITIALE	p. 106
1) Sols en dessèchement permanent	p. 106
2) Comparaison de sols en dessèchement permanent par rapport au sol maintenu à humidité constante	p. 109
3) Comparaison de sols maintenus à humidité constante	p. 109 (culture d'orge)
III - <u>EMPLOI DE RACINES ISOLEES POUR CARACTERISER LA CESSIBILITE DE L'EAU</u>	110
IV - <u>ETUDE COMPLEMENTAIRE DE QUELQUES FACTEURS INFLUENÇANT LES CESSIONS D'EAU</u>	p. 112
A - IMPORTANCE DE LA POROSITE DU SOL	p. 112
B - INFLUENCE DE L'ENRICHISSEMENT MINERAL DU MILIEU	p. 113
C - OBSERVATION DE L'EFFET DE SUPERPOSITION DE SOLS	p. 114
CONCLUSION	p. 116

QUATRIEME PARTIE

APPLICATIONS AU CHAMP

I - <u>MOUVEMENT DE L'EAU VERS UNE ZONE A FORT ENRACINEMENT</u>	p. 119
A - EVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES	p. 121
B - DESSECHEMENT DU SOL, LATERALEMENT A LA CULTURE	p. 121
II - <u>PHENOMENE DE CONSOMMATION PREFERENTIELLE DE L'EAU POUR LE CAS DES CULTURES PLANTEES EN LIGNES</u>	p. 124
A - CAS DES CULTURES ANNUELLES A ENRACINEMENT PROGRESSIF	p. 124
B - REMARQUE : CAS DES VERGERS (CULTURES A ENRACINEMENT PERMANENT)	p. 126
III - <u>EVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES SUR QUELQUES SOLS</u>	p. 127
A - EFFET DE LA TEXTURE	p. 127
B - PARTICIPATION DES RESERVES HYDRIQUES	p. 128
IV - <u>REPERCUSSION DE L'INTENSITE DU DESSECHEMENT SUR LA CONSOMMATION D'EAU DES VEGETAUX ET LEUR PRODUCTION</u>	p. 132
A - IMPORTANCE DES RYTHMES DE CONSOMMATION	p. 132
B - CONSOMMATION D'EAU ET PRODUCTION DE MATIERE SECHE	p. 133
CONCLUSION	p. 137
<u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	p. 139
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	p. 145

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA DISPONIBILITE DE L'EAU
POUR LES VEGETAUX SUR DIFFERENTS
TYPES DE SOLS

"L'eau non saturante est celle qui reste dans la microporosité du sol, une fois celui-ci ressuyé. Elle est caractérisée par le fait que sa circulation devient très lente et qu'elle ne peut s'écouler que sous l'influence d'une succion (HENIN et al., 1969)". Les études sur les modalités du mouvement de l'eau non saturante ont fait l'objet de nombreuses recherches, car le sujet est important dans divers domaines très éloignés les uns des autres ; recherche pétrolière (JACQUIN, 1965), Hydrologie (RODE, 1956 ; SINE BENTZ 1963-1965 ; SOEIRO, 1964 ; BONDARENKO et al., 1967 ; THIERRIOT et al., 1971), Mécanique des sols (TERZAGHI-PECK, 1961 ; SOEIRO, 1961-1969 ; ANDREI, 1966 ; EVERETT, 1970), Ecologie des sols (VANNIER, 1970), Agronomie (HENIN, 1936-1960 ; HALLAIRE, 1953 ; RODE, 1956 ; MARSHALL, 1959 ; GARDNER, 1960-1965 ; COWAN, 1965 ; FEODOROFF, 1965). Toutefois, DEGALLIER (1969) signale qu' "il est assez significatif qu'actuellement, bien que l'on dispose de modèles mathématiques très perfectionnés pour traiter des écoulements non saturés, aucune application n'en a encore été faite à des cas réels de terrains, mais seulement à des données d'expérience de laboratoire". Cependant, le problème considéré uniquement sous l'angle agronomique, présente un aspect spécifique. En effet, les végétaux s'alimentent à partir d'une réserve d'eau "utile" qui ne représente qu'une partie, plus ou moins grande selon les sols, de l'eau non saturante.

I - RELATIONS SOL - PLANTE - CLIMAT

L'eau est l'un des principaux facteurs qui intervient dans la production végétale ; il est donc capital de bien comprendre les relations qui s'établissent dans le complexe " sol-plante-climat", où coexistent dans le temps une association plus ou moins temporaire, le sol et la plante, et un phénomène aléatoire : le climat. Dans un tel système, l'expérience montre que la production végétale maximale est obtenue lorsque, tous les autres facteurs étant à l'optimum par ailleurs, l'alimentation hydrique n'est pas limitante. Il existe alors des relations simples, de type linéaire, entre la consommation d'eau et la

production de matière sèche (ROBELIN, 1958-1962 ; CHARTIER 1967 - 1969). Le problème se pose donc de savoir si divers types de sols sont capables d'assurer une fourniture répondant à cet impératif.

En considérant le système dans son contexte naturel, on constate que les apports énergétiques d'origine solaire, peuvent par exemple, osciller dans nos régions entre 50 et 600 calories/cm² et par jour (FABRY, 1942 ; BERNARD, 1956 ; NISEN, 1969). Cette énergie, utilisée partiellement pour la photosynthèse, sert également à vaporiser des quantités très variables d'eau, ce que confirment les mesures actuellement courantes d'évapotranspiration potentielle (ETP) (TURC, 1961, BOUCHET-ROBELIN, 1969 ; PUECH, 1969). Cette eau est surtout un liquide de transit, correspondant à une demande extérieure à la plante. Ainsi, sous climat toulousain, pour une ETP de 5-6 mm/jour et une production de matière sèche sur prairie de 1q/ha/j, la quantité immobilisée par le végétal est d'environ le $\frac{1}{150}$ de l'eau transpirée. Tout couvert végétal subit donc une demande très fluctuante à petite échelle de temps, et doit adapter ses conditions de consommation d'eau aux contraintes extérieures. Cette évapotranspiration n'est que la cause première d'un déplacement général, qui conduit l'eau à travers la plante depuis le sol jusqu'à l'atmosphère. L'eau absorbée pouvant entraîner avec elle des ions minéraux, gagne les vaisseaux de la racine au travers du parenchyme cortical.

Les facteurs essentiels du déplacement dans le cortex sont la succion exercée par les parties aériennes et le gradient de pression osmotique qui existe depuis l'assise pilifère jusqu'à l'endoderme (BINET-BRUNEL, 1968 ; HELLER, 1969). Le maintien des cellules dans un état hydrique compatible avec la vie exige, au niveau des surfaces évaporantes, le respect d'un équilibre entre les apports en phase liquide et les départs en phase vapeur. La maintenance de l'alimentation en eau des végétaux réside dans la réalisation de cet équilibre.

Le débit d'eau sera maximal si les résistances sur les voies de cheminement de l'eau (sol-racines-tige-feuilles-atmosphère) sont minimales. Or, entre les bornes du système, des différences très importantes de plusieurs centaines d'atmosphères peuvent exister (MERIAUX, 1963-1967 ; DE PARCEVAUX, 1964 ; BOUCHET, 1965) (figure 1). Les feuilles ne pouvant, sans danger, dépasser une pression de succion d'une vingtaine d'atmosphères (MERIAUX, 1967 ; DUPEYREIX, 1965 ; BINET-BRUNEL, 1968), il intervient une régulation au niveau des surfaces évaporantes par réduction des ouvertures stomatiques. Cette action de sauvegarde ralentit néanmoins le métabolisme et entraîne une perte de production végétale (ROBELIN, 1960 1961 ; DE PARCEVAUX, 1964). Ce mécanisme est sous la dépendance plus ou moins

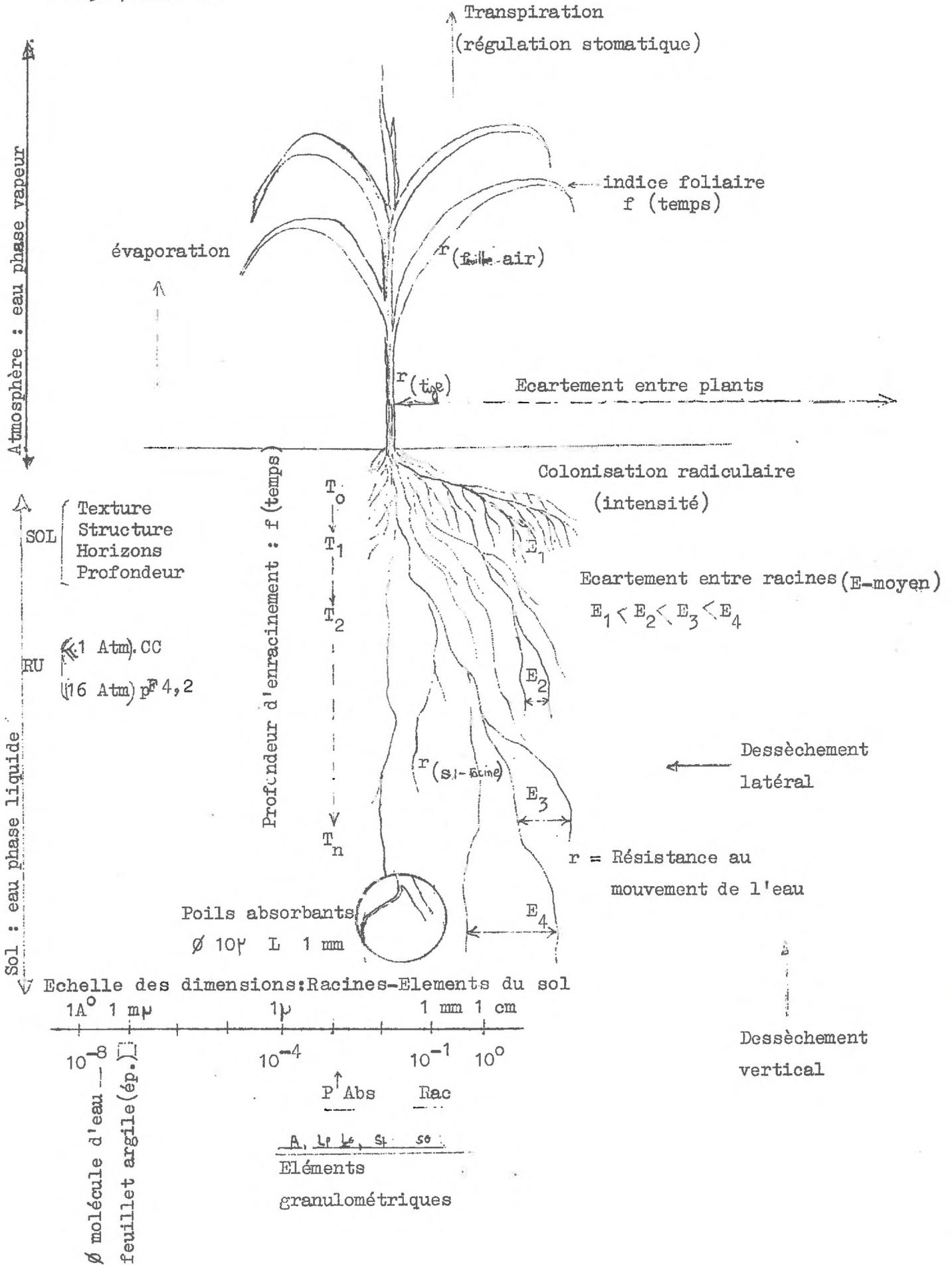
FIG. 1 : Schéma des relations

"Sol - Plante - Atmosphère"

ex : Contrainte climatique

0 - 1 500 Press H_2O en Atm

0 - 32 % Hté Rel.



directe de l'état d'hydratation des tissus. Il existe par conséquent une condition limitante, à un niveau donné. Dans nos régions, la demande climatique n'arrive que très rarement à des seuils létaux pour le végétal ; de plus, des expériences montrent que le flux liquide à travers les racines, peut atteindre des valeurs très importantes (ex 50 mm/jour sur orge) pour un végétal cultivé sur solution nutritive (MAERTENS, 1970). On peut donc valablement estimer que la limitation du flux d'eau est réalisée à la source même, au niveau du sol et des contacts "racine-sol". (SCHUURMANN, 1958 ; GARDNER, 1963 ; NYE, 1964 ; Mc LURE, 1968).

II - CARACTERISTIQUES DU "RESERVOIR SOL"

Le sol se présente comme un réservoir d'eau d'importance variable suivant les types texturaux (PERIGAUD, 1965). On peut distinguer deux cas principaux du point de vue des mouvements de l'eau non saturante :

- Le sol alimente un système évaporatoire à la séparation terre-atmosphère (intervention d'une phase vapeur).

- Le sol alimente essentiellement le système racinaire (extraction en phase liquide surtout).

Dans la première éventualité, le problème ne concerne qu'indirectement le flux d'eau qui transite par la plante, mais son importance n'est pas négligeable puisque le dessèchement provoqué a d'abord lieu dans les zones superficielles, là où l'anracinement est le plus dense. Cet aspect se présente donc sous forme d'une contrainte au niveau "sol".

Dans la deuxième éventualité, il s'agit du contact Racine-Sol. Le flux d'eau doit passer de la terre dans le végétal en empruntant le cheminement "particules du sol-Canalicules-Racines-Cellules-Atmosphère". Bien que l'absorption d'eau puisse se faire en diverses parties d'une racine (MAERTENS, 1970), il semble que pour l'essentiel elle se fasse, dans le sol, par l'intermédiaire des poils absorbants, qui présentent une membrane mince, une grosse vacuole facilitant les échanges osmotiques et surtout une surface considérable pouvant multiplier par 2 à 10 la surface des racines elles-mêmes (CAILLOUX, 1953-1966 ; HELLER, 1969).

Les contacts "Racine-Sol" sont importants dans de très nombreux phénomènes : Nutrition minérale, Structuration du sol, Aération, etc ...

(DEMOLON, 1952 ; BLANCHET et al., 1962 ; BLANCHET, 1968 ; BUI HUI TRI, 1968 ; CHAMPION 1969; BOSCH 1972) on conçoit donc qu'ils joueront un rôle prépondérant en période de forte demande, en limitant le parcours des films liquides (HALLAIRE, 1960). En effet, la force de succion du végétal étant limitée (MERIAUX, 1963-1967), les résistances du sol à la circulation de l'eau peuvent devenir un facteur limitant d'importance variable suivant les types texturaux (GARDNER - EHLIG, 1962 ; MORIZET, 1967-1971 ; PUECH, 1969), cela pose donc le problème de la cessibilité de l'eau du sol, c'est-à-dire de la capacité qu'a une terre de céder son eau plus ou moins rapidement à un végétal. Deux conditions générales peuvent être dégagées suivant que l'on considère un sol déterminé ou des sols de textures différentes.

- Le sol dans le premier cas est considéré en dessèchement permanent et le débit obtenu est fonction des réserves hydriques initiales et de la nature des contraintes imposées.

- Dans l'autre cas, le comportement des sols de textures et de réserves hydriques diverses est comparé. Il s'agit alors de savoir s'il existe des écarts importants dans la cessibilité de l'eau utile.

Enfin, nous n'aborderons pas ici le cas particulier des sols ayant une nappe d'eau plus ou moins profonde, ce cas particulier fait l'objet de travaux récents (COLLIER-ROBELIN, 1959 ; HENIN et al., 1960 ; GHAZANCHAH, 1969).

De nombreuses études ont permis depuis longtemps de définir les caractéristiques hydriques générales des sols et ont dégagé la notion d'énergie de liaison de l'eau sur son support. (SCHOFIELD, 1934 ; HALLAIRE, 1953 ; DIERJAGUIN-MELNIKOVA, 1956 ; CHAUSSIDON-HENIN, 1962, ALVISET, 1966). Etant donné que les succions varient dans le sol dans une gamme très importante, SCHOFIELD (1934) a proposé une représentation logarithmique en utilisant le concept de p^F .

Celui-ci est égal au logarithme décimal du potentiel Capillaire ψ exprimé en cm d'eau ($p^F = \log_{10} \psi$). ψ représente l'abaissement d'énergie libre de l'eau. Le potentiel capillaire peut être dû à la présence de ménisques lorsque l'humidité est assez élevée ; mais il est attribuable, aux faibles humidités, à l'attraction des molécules d'eau autour des particules du sol, ainsi que des molécules de sels dissous (HALLAIRE, 1953 ; DIERJAGUIN-MELNIKOVA, 1956 ; HALLAIRE-BALDY, 1964).

Pour définir les réserves hydriques utilisables par les végétaux, deux données essentielles ont été introduites en Agronomie à la suite de nombreuses recherches :

- Une donnée variable suivant les textures, la "Capacité au champ", nécessairement déterminée "in situ", puisqu'elle est caractérisée par une grande variation de l'énergie de rétention (PERIGAUD, 1963 ; MARTY, 1969). Les valeurs pouvant passer de pF 1,5 pour un sol sableux à ^{un} pF supérieur à 3 pour un sol argileux. La capacité au champ est le maximum d'eau susceptible d'être stocké par un sol après ressuyage (DEMOLON, 1952-1960 ; MARSHALL, 1959 ; HENIN et al., 1960-1969 ; FEODOROFF, 1962 ; PERIGAUD, 1963).

- Une valeur sensiblement constante pour tous les sols (pF 4,2 ou 16 Atmosphères), le point de flétrissement permanent, humidité pour laquelle les végétaux n'arrivent plus à extraire l'eau.

L'écart entre ces deux données définit alors la réserve "d'eau utile" (RU) pour la plante dont la validité au champ n'est totalement vérifiée que si les racines sont à même de prospecter chaque tranche de sol. C'est donc une donnée évolutive dans le temps (HALLAIRE, 1953 - 1960 ; MAERTENS et al., 1966).

Divers auteurs (RICHARDS-WECKS, 1953 ; HALLAIRE, 1964-1968 ; GARDNER 1965) ont cherché à savoir si cette réserve utile était disponible avec la même facilité et ont donné naissance au concept de réserve facilement utilisable (RFU). Si cette notion, elle-même, est très plausible, l'expérience montre que l'on ne peut s'en tenir à une valeur fixe pour un sol ; en effet, la RFU tend vers la RU dans la mesure où l'évapotranspiration potentielle est faible et le système racinaire bien développé (HALLAIRE, 1960-1964). Il a été également montré que la RFU variait avec l'humidité initiale, la masse de terre et la vitesse de dessèchement $\frac{dH}{dt}$. Avec une demande forte et une masse de sol faible, la valeur de la vitesse de dessèchement diminue régulièrement, en même temps que l'humidité, contrairement à ce qui se passe, pendant assez longtemps du moins, avec une demande assez forte et une grande masse de sol (HALLAIRE, 1960).

III - DISPONIBILITE DE L'EAU

La brève énumération des relations entre l'atmosphère, la plante et le sol, montre que la compréhension des phénomènes n'est possible qu'en tenant compte des contraintes rencontrées à différents niveaux. Ces données montrent que le sol ne peut être caractérisé d'une manière simple du point de vue hydrique ; en particulier, deux réservoirs identiques en valeur absolue n'ont pas

les mêmes possibilités de cession (BOUCHET, 1965). De nombreux facteurs interviennent et leur action peut devenir prépondérante dans certains cas : minéraux constitutifs, taille des particules, composition chimique, cations échangeables, teneur en matière organique (sols tourbeux) (MERJAGUIN, 1965 ; ALVISET, 1966 ; DUPEYREX, 1967 ; KIJNE, 1969).

A la notion de réserve utile, il convient donc d'ajouter une caractéristique de mobilité de l'eau sur son support. Les études ont généralement abouti à la détermination d'un coefficient de conductibilité λ ou d'un coefficient de diffusion D (HALLAIRE, 1956 ; GARDNER, 1958).

- Dans le premier cas, on peut écrire qu'à un niveau z , le débit d'eau q traversant le plan de référence par unité de temps et de surface, est proportionnel au gradient de potentiel $\frac{d\psi}{dz}$. Le coefficient λ représente alors le coefficient de conductibilité pour l'eau du matériau considéré. Or, la valeur de ce coefficient diminue avec l'humidité (HALLAIRE, 1953 ; HALLAIRE, HENIN, 1958 ; DEMOLON, 1960).

$$q = \lambda \frac{d\psi}{dz} \quad (1)$$

- Dans le deuxième cas, on exprime, pour obtenir le coefficient de diffusion D , que le débit observé q est proportionnel au gradient d'humidité $\frac{dH}{dz}$. L'équation obtenue étant déduite de la précédente mise sous la forme suivante (HALLAIRE, 1964)

$$q = \lambda \frac{d\psi}{dH} \frac{dH}{dz} \quad (2)$$

$$\text{d'où} \quad q = D \frac{dH}{dz} \quad \text{avec} \quad D = \lambda \frac{d\psi}{dH}$$

Or, la valeur de D n'est également pas une constante. Les résultats expérimentaux montrent qu'elle varie avec l'humidité selon une loi exponentielle (GARDNER, 1958 ; HALLAIRE-HENIN, 1958 ; HALLAIRE, 1969).

Les travaux de HALLAIRE (1964) ont alors permis d'établir, sur un sol soumis au dessèchement, l'existence d'un potentiel efficace ψ_e , différent du potentiel ψ fonction de l'humidité. Ce potentiel efficace dépend de la vitesse de dessèchement $\frac{dH}{dt}$, d'un coefficient K , de la conductibilité du sol λ et de la longueur de parcours L à l'intérieur des mailles du sol qui, dans le mouvement général de l'eau, jouent le rôle de sources :

$$\psi_e = \psi + \frac{KL}{\lambda} \frac{dH}{dt}$$

Cette expression qui met l'accent sur l'aspect dynamique de l'alimentation en eau des végétaux reste néanmoins d'un emploi difficile.

D'autres travaux ont tenté d'établir un facteur de mobilité de l'eau du sol (KOLJASEV, 1956 ; MORIZET, 1967-1971 ; PUECH, 1969). MORIZET a proposé l'utilisation d'un indice α . Or, cet indice, qui peut rendre compte des phénomènes dans des conditions déterminées, est fonction d'autres paramètres comme l'humidité initiale, la porosité et le temps.

La mobilité a été aussi caractérisée à partir des gradients d'humidité obtenus sur les profils hydriques (PUECH, 1969 ; MORIZET, 1971). Cette démarche permet de rendre compte des capacités de transfert de l'eau pour différents sols, sans analyser pour autant les facteurs en cause.

IV - BUT DE CE TRAVAIL

Du point de vue agronomique, il apparaît donc nécessaire de définir et de comparer les caractéristiques de Cessibilité de l'eau de différents sols, de manière à différencier les terres entre elles, et déterminer leurs possibilités intrinsèques de débit d'eau. Il convient d'examiner les phénomènes d'une part sous l'angle physique et analytique, et d'autre part avec l'intervention du système racinaire. C'est sous l'aspect expérimental, en laboratoire et au champ, que nous envisagerons d'étudier les modalités de circulation de l'eau non saturante vers les racines, en considérant essentiellement la gamme d'eau utile.

De nombreux problèmes coexistent dans les relations "Racine-Sol" (DIEHL, 1957 ; BERDUCOU et al., 1961-1962 ; DE ROO-WIERSUM, 1963 ; MAERTENS, 1964 ; VERNET, 1964 ; CARLEY-WATSON, 1965 ; SCHUURMAN, 1965 ; MOLINIER, 1968 ;). En particulier, la connaissance des surfaces racinaires réellement actives est difficile à évaluer (poils absorbants, taille, modalités de ramification, interactions avec les facteurs du milieu, mode de colonisation, vitesse de croissance). Or, comme les potentialités d'absorption de l'eau par les racines sont très importantes (MAERTENS, 1970), nous aborderons d'abord l'étude au niveau du sol, facteur limitant principal, en faisant appel pour s'affranchir des facteurs physiologiques précités, à un modèle physique de racine fidèle et reproductible, le gel de silice, permettant une succion variable (PUECH, 1966). De cette façon, nous étudierons, sur différents sols, l'influence de certains paramètres, notamment : le rôle de l'humidité initiale, l'intensité de la succion,

les phénomènes de réhomogénéisation de l'humidité dans le temps, l'effet de la température, l'importance des superpositions de sols, le rôle de la texture, etc ... Ces données nous permettront alors d'analyser la nature des mécanismes principaux en jeu. Nous pourrions ensuite le passage à la phase expérimentale avec le végétal lui-même, de façon à tester le degré de validité et de réalité de l'approche par modèle. Dans cette nouvelle phase d'étude en laboratoire, nous utiliserons des moyens particuliers pour travailler avec des racines. En particulier pour résoudre le facteur "surface initiale d'enracinement" correspondant à la section des colonnes de terre en essai, nous nous adresserons à une technique appropriée, la méthode de "STANFORD-DE MENT" (1959). Cette dernière permet l'obtention rapide d'un matériel végétal très homogène (MAERTENS, 1965 ; QUEMENER, 1968). Les essais sur végétal permettront de contrôler, sous certaines conditions, l'influence des divers paramètres déjà mentionnés ci-dessus, en introduisant en plus le phénomène d'avancement du front racinaire. Par ailleurs, l'influence éventuelle des caractéristiques chimiques pourra être appréciée, mais seulement à titre indicatif dans ce travail, en faisant varier certaines conditions de milieu.

En fin, du point de vue agronomique, la caractérisation des critères de cessibilité de l'eau du sol n'a d'utilité que si des expériences au champ en conditions réelles viennent étayer les résultats de laboratoire. Or, le degré de disponibilité de l'eau du sol joue un très grand rôle dans la réalisation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) maximale (ETM) ou réelle (ETR) et par voie de conséquence sur la production végétale (ROBELIN, 1960-1961, 1962) en condition de grande culture.

Aussi, grâce à l'utilisation de la méthode neutronique, nous pourrions analyser l'effet du dessèchement du sol à plusieurs niveaux. En effet, nous introduisons une autre échelle de dimension. Le temps considéré est beaucoup plus long puisque les mouvements d'eau sont suivis en fonction du développement des végétaux, et l'échelle spatiale peut aller du centimètre à plusieurs mètres selon les caractères étudiés. Nous considérerons successivement :

- l'étude du mouvement de l'eau vers une zone à fort enracinement
- l'évolution des profils hydriques des différents sols nus ou cultivés et les modalités de consommation de l'eau par des cultures plantées suivant certains espacements ; ces modalités étant liées aux possibilités de mouvement latéral de l'eau dans le milieu ;
- enfin, l'importance de la participation des réserves hydriques sur les rythmes de consommation des végétaux ($\frac{\text{évapotranspiration culture}}{\text{ETP}}$) et ses répercussions sur la production végétale.

P R M I E R E P A R T I E

M E T H O D O L O G I E E X P E R I M E N T A L E

Nous traiterons dans cette partie la méthodologie expérimentale suivie. Nous rapporterons d'abord les caractéristiques physiques, chimiques et hydriques, des sols utilisés, puis nous indiquerons les propriétés du modèle de racine choisi. Enfin, nous préciserons les principaux caractères de l'expérimentation avec le végétal, en laboratoire et au champ (choix du matériel, technique de culture, protocoles expérimentaux).

I - TYPES DE SOLS UTILISES

A) Caractéristiques physiques

Les sols cultivés sont susceptibles de présenter de grandes différences dans les domaines physiques, chimiques et hydriques. Pour étudier les possibilités de cession de l'eau, nous avons retenu les caractères texturaux comme facteur principal de différenciation, en utilisant une gamme de 10 sols avec des taux d'argile allant de 3 % à 62 %. Les caractéristiques texturales sont données au tableau 1. Dans les manipulations de laboratoire, toutes les terres ont été utilisées, tant dans l'étude sur modèle que dans l'étude sur végétal.

Tableau 1 Constitution physique des sols utilisés

Provenance	Analyse granulométrique en %						
	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable moyen	Sable grossier	Matière organique	Calcaire
	< 2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200-2000 μ		
(1) Lasbordes	3,2	3,6	11,9	28,8	50,2	0,9	-
(2) Mazères	0,4	10,1	17,4	14,8	47,1	2,2	-
(3) Lizac	11,5	14,8	26,7	36,6	1,5	1,8	6,4
(4) Plaisance	12	18,1	43,3	13,5	10,3	1,4	-
(5) Auzeville	21,6	13,7	14,6	17,3	20,1	2,0	-
(6) St Maximin	26,1	8,0	7,4	2,9	3,1	0,9	48,0
(7) Toulouse	31,7	18,8	19,0	14,7	13,1	1	1,8
(8) Barrat	37,3	19,4	20,1	15,6	2,5	2	-
(9) Larivière	55,4	22,6	9,9	5,6	2,2	1,7	1,7
(10) Lessesques	61,9	21,5	4,5	3,2	4,3	3,5	-

Toutefois, trois types texturaux ont servi de base de référence, tout au long de l'essai, pour leurs caractéristiques propres et le fait qu'ils portaient des cultures de plein champ (sol sableux : (1) Lasbordes ; sol limoneux : (4) Plaisance et sol argileux : (7) Toulouse). Les figures 2 A et B montrent les différentes familles granulométriques obtenues (courbes cumulatives et polygones de fréquence).

- Enfin, la densité réelle D_R des sols, déterminée au pycnomètre à air Beckmann, est très voisine pour tous les sols étudiés ; aussi les calculs

$$\text{de porosité } P = \frac{D_R - D_A}{D_R} \times 100 \quad (D_A = \text{densité apparente}) \text{ ont été faits}$$

avec une densité $DR = 2,65$.

B) Caractéristiques chimiques

Les principales données (teneur en phosphore assimilable, potassium échangeable, pH et capacité d'échange de cations C.E.C.) figurent au tableau 2. Les déterminations ont été réalisées d'après les analyses classiques. Il apparaît que la plupart des sols sont assez bien pourvus en phosphore et en potasse. Les terres les plus riches sont celles de Toulouse et Auzeville et les plus pauvres, celles de Plaisance et de Barrat.

Tableau 2 Analyse chimique des sols

Sols	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	Lasbordes	Mazères	Lizac	Plaisance	Auzeville	St Maximin	Toulouse	Barrat	Larivière	Iessesques
P_2O_5 assimilable ‰	0,230	0,175	0,143	0,092	0,224	0,219	0,603	0,085	0,097	0,074
K_2O échangeable ‰	0,036	0,112	0,234	0,072	0,180	0,101	0,356	0,065	0,108	0,126
pH	5,8	5,6	7,8	5,2	7,3	7,8	5,8	8,2	8,3	7,4
C.E.C. Még/kg	33,5	64	53	57,5	153	118	183	223	308	394

C) Caractéristiques hydriques

1°) Courbes pF humidité

Les caractéristiques hydriques ont été déterminées par les diverses méthodes classiques de laboratoire : centrifugation, pression, hygroscopicité (RICHARDS, 1947- ; HALLAIRE, 1953 ; STUDER, 1961 ; DAUDET, 1970)

FIG. 2 . GRANULOMETRIE DES TERRES

% ELEMENTS

60

40

20

CAL.

LG

LF

A

SF

SG

MO

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Ⓐ — GAMME DE SOLS

GRANULOMETRIE CUMUL %

100

50

0

SOLS

100

9

8*

7Δ

5

4

3

2

1

LOG.

LOG. DU DIAMETRE DES ELEMENTS

Ⓑ — FRACTIONS GRANULOMETRIQUES EN FONCTION DU LOGARITHME DU DIAMETRE DES ELEMENTS

de manière à élaborer une courbe de pF en fonction de l'humidité du sol (figure 3). Il apparaît une très nette différenciation des terres, avec une courbure plus accusée pour les sols les plus argileux. En ce qui concerne la capacité au champ, cette donnée a été généralement obtenue à partir de mesures de terrain par la méthode neutronique (ANDRIEUX et al., 1962 ; DAMAGNEZ, 1962 ; MAERTENS et al., 1965) jusqu'à l'obtention d'un palier stable, en période hivernale ou début du printemps (DIEHL-MORICE, 1957 ; FEODOROFF, 1962-1965 ; COMBEAU, 1963). Dans les autres cas, il a été tenu compte de la texture et de données obtenues en périodes humides et peu évaporantes.

2°) Réserves hydriques

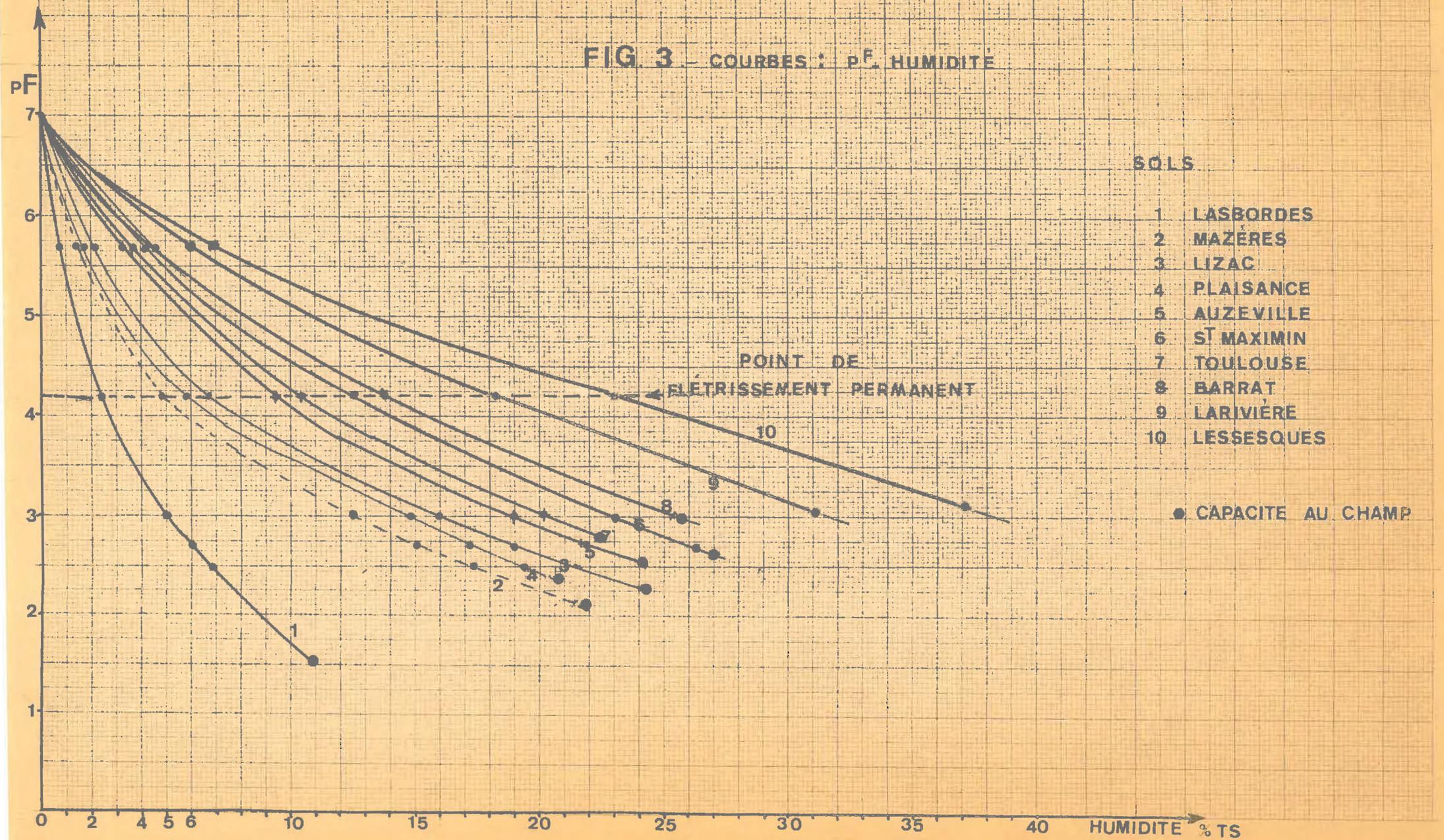
Les caractéristiques hydriques principales ainsi que les réserves utiles sont données au tableau 3. La gamme de sols utilisées permet d'obtenir des réserves, allant du simple au double et représentatives des cas existant dans les conditions naturelles.

Tableau 3

Caractéristiques hydriques des sols
(valeurs en humidité pondérale HP et en humidité volumique HV, % TS pour DA = 1,46)

provenance	Capacité au champ		Hté au pt de flétrissement permanent		Réserve utile	
	HP	HV	HP	HV	RU Pondé.	RU Vol.
Lasbordes (1) X	11,0	16,1	2,1	3,1	8,9	13,0
Toulouse (7)	22,5	32,9	11,0	16,1	11,5	16,8
Barrat (8)	25,6	37,4	13,3	19,4	12,3	18,0
Larivière (9)	31,0	45,3	18,2	26,6	12,8	18,7
Lessesques (10) X	37,0	54,0	23,8	34,7	13,2	19,3
Auzeville (5) X	24,0	35,0	9,7	14,2	14,3	20,9
St Maximin (6)	27,0	39,4	12,3	18,0	14,7	21,5
Plaisance (4) X	20,8	30,4	4,7	6,9	16,1	23,5
Mazères (2)	22,0	32,1	5,0	7,3	17,0	24,8
Lizac (3)	24,5	35,8	6,5	9,5	18,0	26,3

FIG 3 - COURBES : pF, HUMIDITE



D) Surfaces totales

Les molécules d'eau se fixent au niveau des surfaces basales et des espaces interfeuilletés des cristallites. On peut distinguer des surfaces : latérales, externes et internes, ces deux dernières étant généralement prépondérantes et structurellement identiques (CAILLERE-HENIN, 1963 ; MAMY, 1968). Les mesures de surfaces totales, externes et internes ont été obtenues par l'étude de la cinétique de l'évaporation à 110° du glycol CH₂OH - CH₂OH, à partir d'un mélange sol-glycol. La formation d'un complexe stable Argile-Glycol par adsorption d'une couche de molécules organiques permet, connaissant l'encombrement de la molécule de glycol, d'évaluer la surface des particules d'Argile (NADEAU, 1961 ; CAILLERE-HENIN, 1963 ; GUYOT, 1969). Le tableau 4 indique les résultats obtenus dans les différents sols étudiés. Les valeurs trouvées varient entre 7,7 m²/g et 170 m²/g, soit dans le rapport de 1 à 22, et suivent d'assez près l'augmentation du taux d'argile.

Tableau 4 Surfaces totales des différents sols utilisés et comparaison avec les teneurs en argile.

S o l s	S U R F A C E		A R G I L E	
	m ² /g de TS	Rapport sol (x) sol Lasbordes	Argile % TS	Rapport (A) autres sols (A) Lasbordes
(1) Lasbordes	7,7	1,0	3,2	1,0
(2) Lizac	15,1	1,96	11,5	3,6
(3) Mazères	18,6	2,42	6,4	2,0
(4) Plaisance	21,6	2,8	12,0	3,8
(5) Auzeville	43,0	5,6	24,6	7,8
(6) St Maximin	79,2	10,3	26,0	8,1
(7) Toulouse	80,0	10,4	31,7	9,9
(8) Barrat	96,5	12,5	37,3	11,7
(9) Larivière	164,0	21,3	55,4	17,3
(10) Lessesques	170,0	22,2	61,9	19,3

E) Préparation et humidification des terres

La terre est tamisée au tamis de 2 mm. Pour amener le sol à une humidité donnée, nous avons procédé à une humidification fractionnée, en humectant des couches de terre successives, puis en laissant reposer le tout en récipient hermétique pendant 48 heures minimum, et souvent plus longtemps, surtout dans le cas des sols argileux. On procède alors avec précaution, pour éviter la formation de grumeaux, à l'homogénéisation de l'ensemble. L'humidité réelle de la

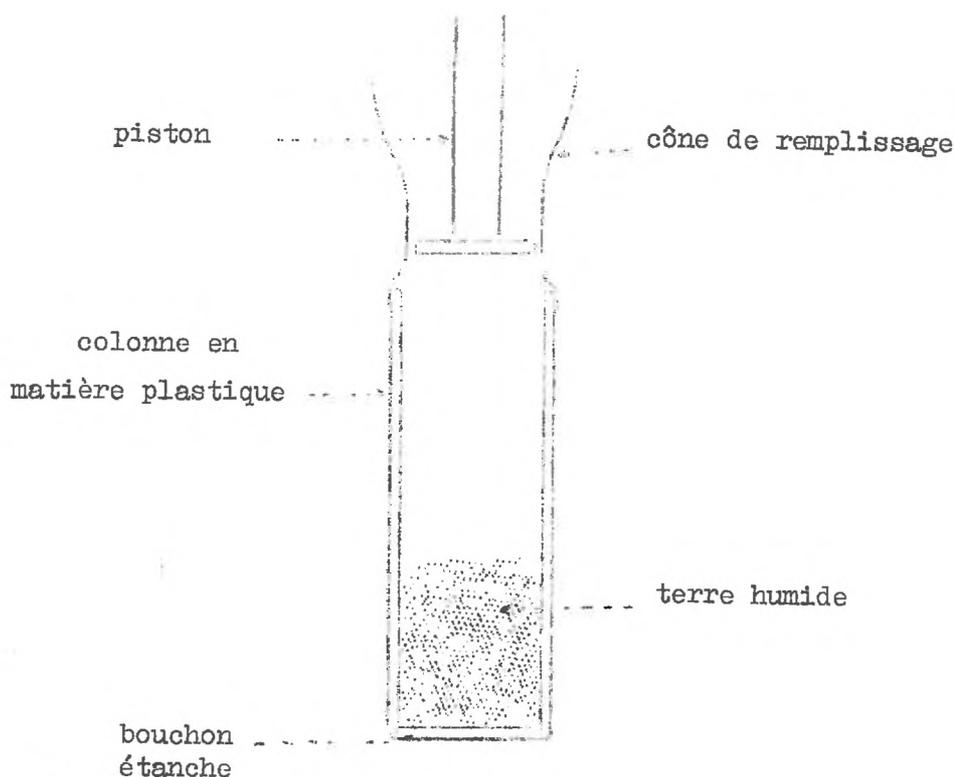


FIG. 4 : Dispositif de remplissage des colonnes

terre est ensuite contrôlée avant et à la fin du remplissage des colonnes d'essai. Cette technique s'est avérée très satisfaisante et permet d'obtenir des profils hydriques de départ, très homogènes, à $\pm 0,1$ d'humidité pour cent de terre sèche. Dans les colonnes d'essai, le remplissage se fait en utilisant une louche (figure 4). La porosité désirée est obtenue par tassement régulier au moyen d'un piston. Il ne se produit ni litage, ni cône. Ces colonnes sont ensuite placées dans un appareil à renouvellement d'absorbant qui sera décrit ci-dessous.

II - CHOIX D'UN MODELE DE RACINE

A) Caractéristiques du modèle

L'utilisation expérimentale directe des racines qui extraient l'eau en phase liquide, s'avérant difficile et délicate sur une surface déterminée et

fixe, nous avons eu recours en première analyse, pour étudier les transferts d'eau dans le sol, à un modèle : le gel de silice (PUECH, 1966). Il a été vérifié que le produit utilisé reproduisait les phénomènes d'absorption d'eau réalisés par des racines mises en contact avec le sol. Ce gel peut, en effet, par l'intermédiaire de ses microcapillaires (KRUYT, 1933 ; FRIPIAT, 1962 ; EYRAUD, 1965), extraire l'eau en phase liquide. Il a été retenu car il ne modifie pas le milieu (réaction neutre), reste facilement régénérable par la chaleur, peut être utilisé sur une surface déterminée en agissant par contact (voie physique), en ne changeant pratiquement pas de volume et en demeurant sec extérieurement. L'eau se concentre dans les pores sans s'associer par dissolution ou combinaison avec la silice (KRUYT, 1933 ; FRIPIAT et al., 1962 ; EYRAUD, 1965 ; UYTTERHOEVEN et al., 1965).

Le produit utilisé est l'"Actigel Prolabo" avec ou sans indicateur de saturation au chlorure de Cobalt (Réf. 27-615-27 613). Il se présente sous forme de grains de 2 à 3,5 mm, translucides, à structure amorphe. Le gel, obtenu par voie chimique, est constitué de silice associée de façon complexe à un peu d'eau de constitution, celle-ci ne peut être éliminée par calcination sans faire perdre aux gels leurs propriétés adsorbantes (EYRAUD, 1965 ; UYTTERHOEVEN et al., 1965). Nous avons essentiellement utilisé, le gel "sec" obtenu par passage à l'étuve à 105°.

B) Mode d'utilisation

La force de succion développée par le produit est fonction de son humidité ; elle peut décroître dans le temps si l'adsorbant n'est pas renouvelé, ou rester constante s'il est renouvelé en permanence au contact de la terre à dessécher. Aussi, pour obtenir une circulation continue du produit sur la terre, nous avons réalisé un appareil travaillant de manière autonome et en continu (figure 5). Le gel de silice est d'abord broyé en grains d'environ 1 mm, de façon à assurer un bon contact avec la terre. Il est ensuite introduit dans l'appareil (en A et B). Une vis sans fin, mue par un moteur électrique, à vitesse de rotation réglable par rhéostat, permet d'obtenir un entraînement régulier et lent du produit. Ce dernier est alors appliqué contre les parois, assurant ainsi le contact avec la terre. Périodiquement, la constance de l'humidité de l'adsorbant est vérifiée.

La terre est contenue dans des tubes de matière plastique de 6,15 cm² de section et généralement de 10 cm de longueur. La porosité est constante (45 %). Les tubes sont bouchés hermétiquement du côté extérieur. Après des temps de

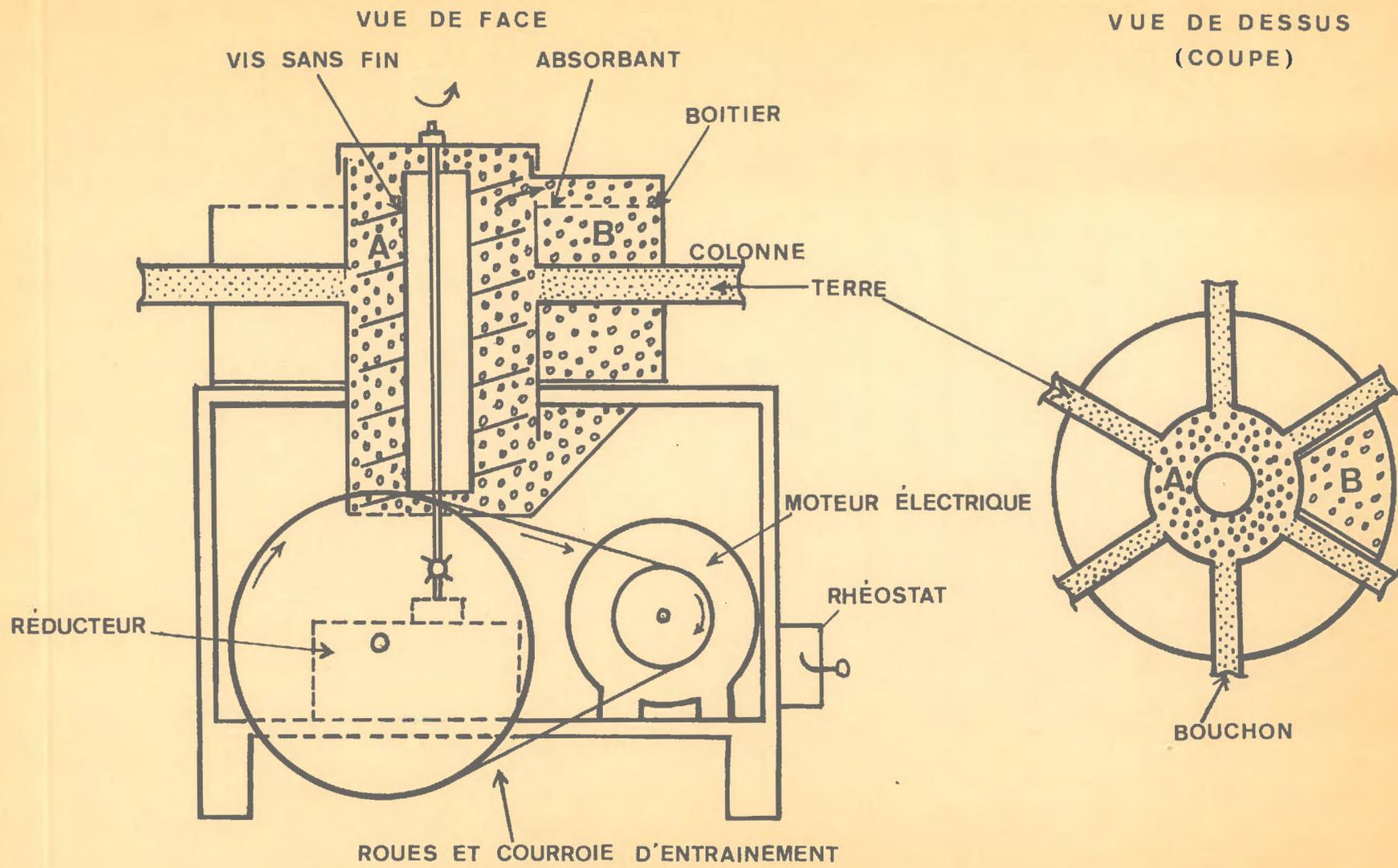


FIG. 5 APPAREIL POUR OBTENIR LE RENOUVÈLLEMENT PERMANENT DU GEL DE SILICE AU CONTACT DE LA TERRE A DESSECHER

succion variables, réalisés en conditions isothermes ($20^{\circ} + 1^{\circ}$) les colonnes de terre sont découpées en tranches dont on détermine l'humidité (passage à l'étuve à 105°) pour établir le profil hydrique et les différents éléments de la dynamique de l'eau.

C) Absorption d'eau par le gel de silice

1°) Influence de l'humidité du gel

Pour effectuer les mesures nous avons utilisé une quantité donnée de gel de silice, broyé à 1 mm et amené à différentes humidités. L'absorbant est mis, par l'intermédiaire d'une pastille de buvard calibré surmontant un filtre de bronze, en contact avec l'eau libre d'un potomètre (figure 6). On constate, avec le dispositif utilisé, que la quantité d'eau extraite dans l'unité de

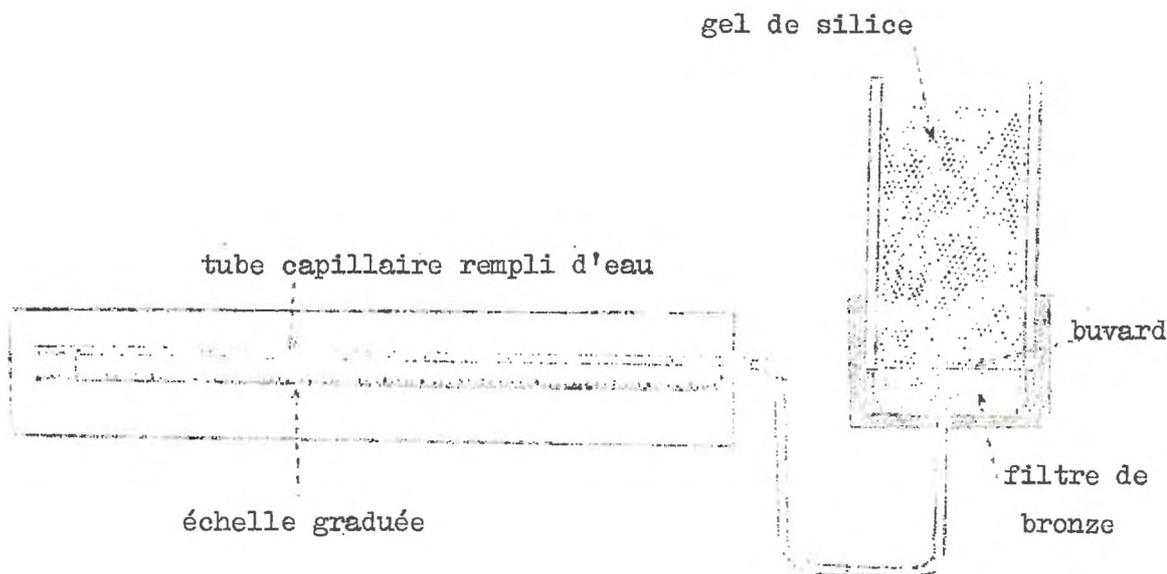


Figure 6 Absorption d'eau par le gel de silice sur un potomètre.

temps est très importante. En opérant sur de courtes durées pour avoir le potentiel d'absorption dans les conditions de l'essai, on obtient les données suivantes (tableau 5).

Tableau 5 : Eau absorbée (en mm) par le gel de silice (20 gr) à différentes humidités initiales sur une section donnée (moyenne de 5 mesures sur potomètre)

Durée d'absorption	Humidité du gel		
	gel sec	20 %	40 %
5 "	2,25 mm	1,98 mm	1,53 mm
15 "	4,40 mm	4,40 mm	3,48 mm

La capacité d'extraction d'eau est très élevée. On obtient en temps très courts, l'équivalent de la perte d'eau journalière d'un sol portant une végétation abondante. Par exemple, en zone toulousaine, l'ETP moyenne est d'environ 4 mm/jour en Mai-Septembre ; 5 mm en Juin (PUECH, 1969). Ces données montrent aussi que pour des essais sans renouvellement, la vitesse d'absorption diminue assez vite par suite de la saturation du gel. Dans ce cas il est nécessaire de travailler avec une quantité importante de produit (figure 7). Il nous a donc paru préférable d'assurer le renouvellement, selon la technique mentionnée ci-dessus.

2°) Importance de la granulométrie du produit

L'utilisation de différentes fractions granulométriques de l'adsorbant montre que l'absorption d'eau est la plus rapide pour les fractions moyennes 500 à 1000 μ et la plus faible pour les granulométries fines ($< 50\mu$) ou grossières (> 2 mm) -(figure 8)- La fraction retenue pour les essais est celle comprise dans la gamme inférieure à 1 mm.

3°) Absorption d'eau sur les sols

Sur une assez grande gamme d'humidité, le gel peut extraire l'eau utile du sol. Il a été aussi vérifié expérimentalement que l'application, au sol et au gel humides, de mêmes forces telles que les pressions exercées à la presse à membrane de RICHARDS laissent subsister, dans les deux milieux, de l'eau retenue avec la même énergie. En effet, si ces deux milieux sont ensuite amenés en contact, il ne se produit aucun mouvement, même au bout de plusieurs jours. La figure 9 indique pour l'adsorbant la courbe de pF (tension-humidité) établie par les différentes techniques classiques déjà signalées.

Dans le cas du contact Sol-Gel de silice, la circulation en phase liquide et l'apparition éventuelle de la phase gazeuse sont mises en évidence par marquage de l'eau par un sel (Cl_2Ca) qui n'est transporté qu'en solution et se dépose lorsqu'intervient la vaporisation (COLLIS GEORGE ~~etal~~ 1963-KELLY, et al. 1964 ; BALLIF et al., 1966). Dans ce cas, le gel utilisé n'est pas coloré. Les dosages du chlore sont effectués par mercurimétrie (CHARLOT, 1961). Les résultats obtenus (figure 10) montrent qu'il peut y avoir accumulation de chlore en surface, alors que la concentration en Cl de la solution reste constante dans le profil. L'accumulation est surtout sensible lorsque des échantillons sont peu humides et mis en contact avec du gel relativement sec (à pF 4,2 l'humidité relative en équilibre est de 98,8 %). Notre but étant l'extraction de l'eau en phase liquide, selon un modèle de racine, les données précédentes montrent que le gel de silice convient assez bien pour l'étude du problème.

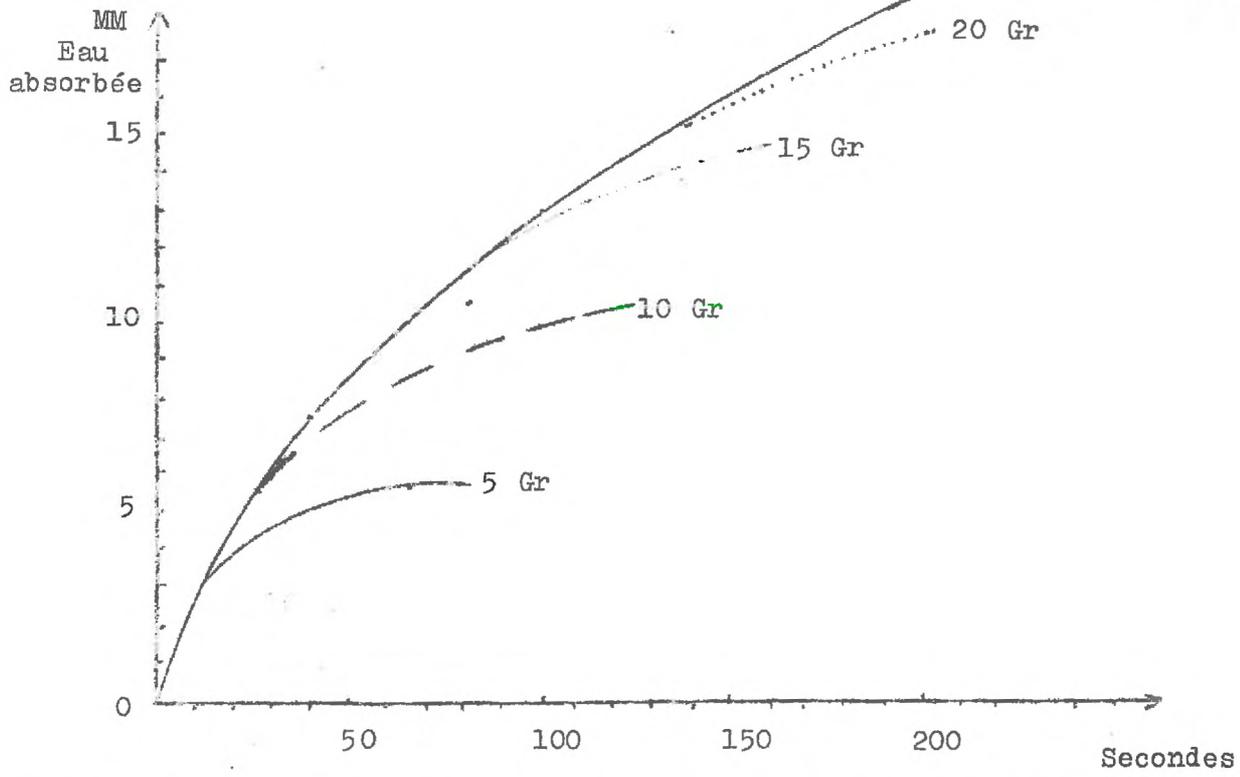


FIG 7 : Absorption d'eau sur potomètre en fonction du poids de gel utilisé (< 1000μ). Non renouvelé.

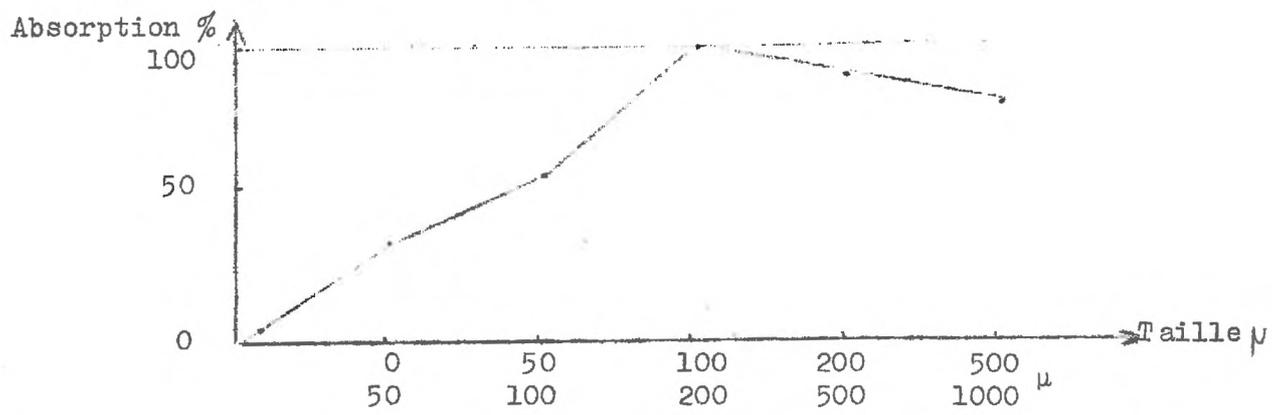


FIG 8 : Absorption relative d'eau pour un même temps (20") et pour diverses fractions granulométriques du gel de silice.

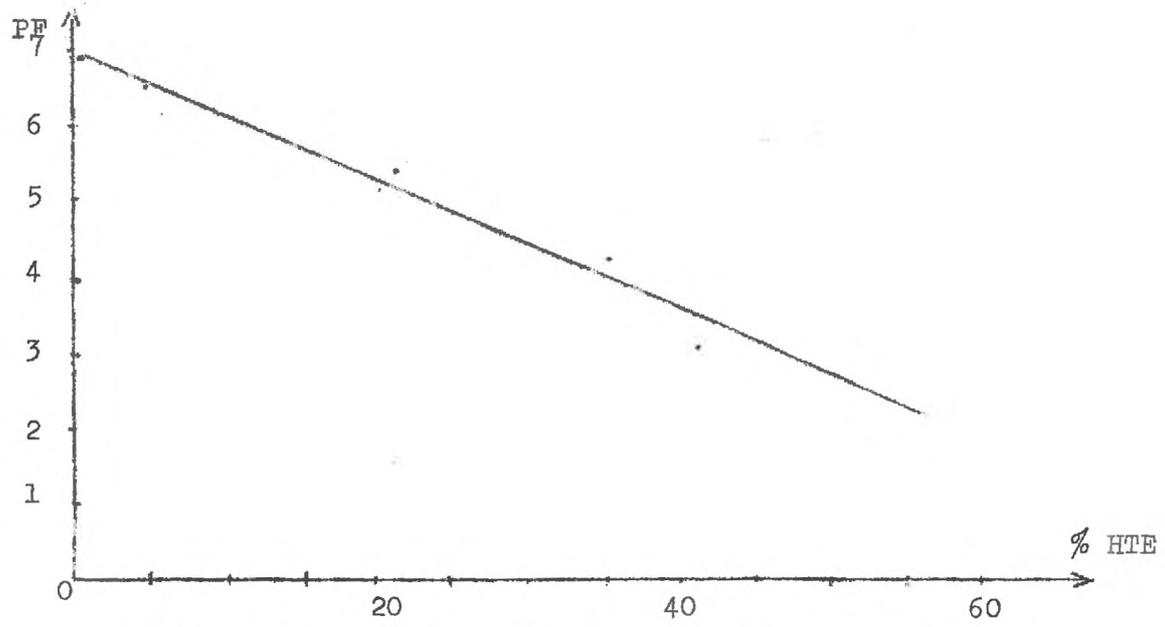


FIG 9 : Gel de silice. PF.humidité.

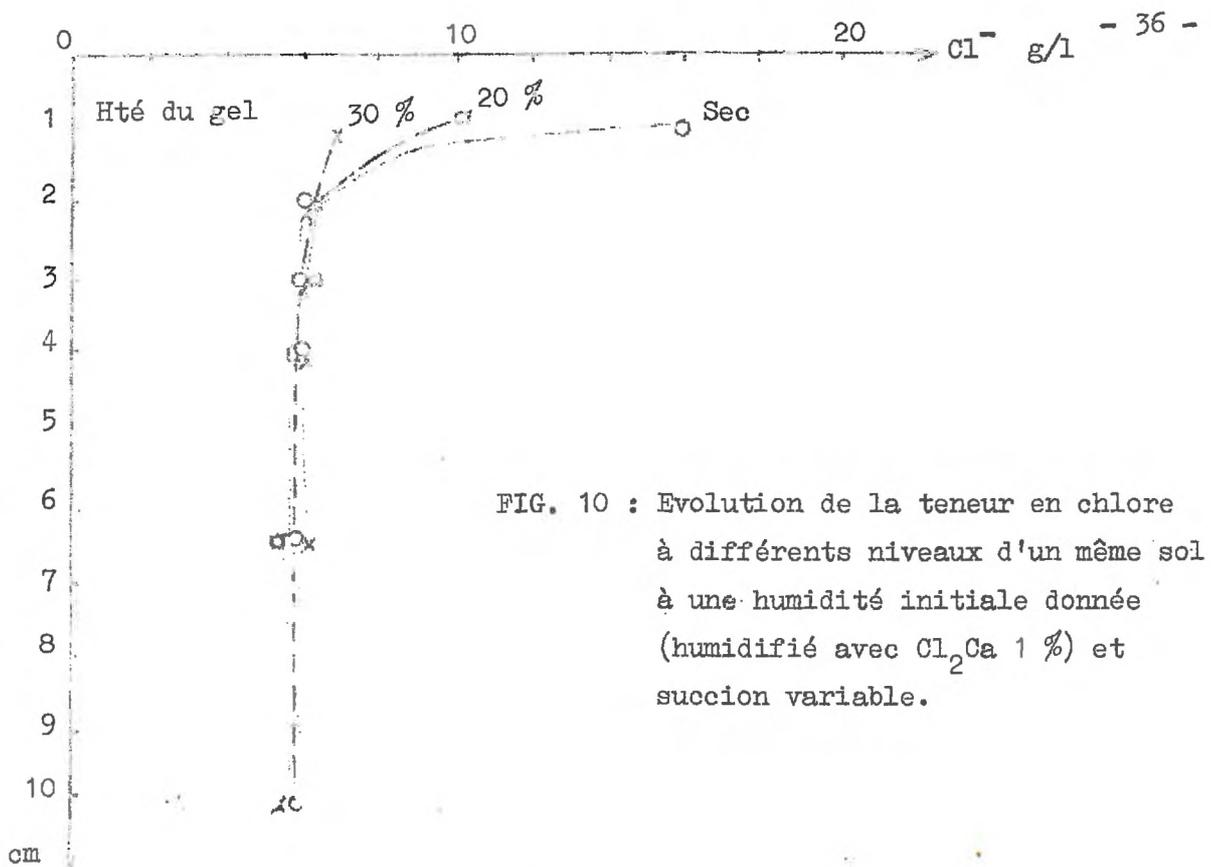


FIG. 10 : Evolution de la teneur en chlore à différents niveaux d'un même sol à une humidité initiale donnée (humidifié avec Cl_2Ca 1 %) et succion variable.

III - EXPERIMENTATION AVEC LE VEGETAL

A) Choix de la méthode

L'étude de l'absorption d'eau par les racines dans le sol nécessite une approche très délicate, si l'on considère les phénomènes à la micro-échelle d'une racine et de ses poils absorbants (CAILLOUX, 1953- 1966). Nous avons recherché l'obtention d'un effet plus global en utilisant la méthode STANFORD-DE MENT (1959), qui consiste à réaliser une préculture sur sable dans des éléments sans fond. Au bout de 10 jours environ, il se développe un feutrage racinaire intense à la base et on peut alors considérer que la totalité de la surface est colonisée (photo 1). A ce moment temps $t = 0$ on peut mettre le feutrage en contact avec le sol et suivre l'évolution de la consommation d'eau.

La préculture permet de sélectionner un matériel végétal très homogène, obtenu dans des conditions standards et n'ayant pas subi les effets des différents milieux lors de son implantation. Comme végétal, nous avons retenu l'orge variété CERES ; son développement assez rapide et important permet avec une densité de semis élevée, d'obtenir un couvert végétal dense et régulier. (photo 2).

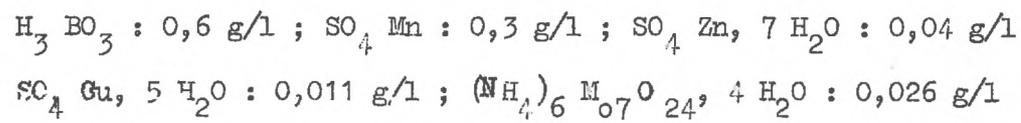
B) Matériel et technique de culture

Pour le milieu de préculture, nous avons utilisé des éléments cylindriques en matière plastique (\varnothing 11,8 cm), de 6 cm de hauteur, placés sur des plaques carrées de Lucoflex de 12 cm x 12 cm (figure 11 A). Les éléments sont remplis de 950 g de sable marin d'Antibes (\varnothing moyen 2 mm), lavé à l'acide chlorhydrique. On sème 40 graines d'orge pour n'en conserver que 30 avant la mise en essai. Au début, on maintient la capacité de rétention par arrosage à l'eau permutée ; puis quelques jours après, on arrose en alternant avec une solution nutritive, dont la composition est donnée au tableau 6. Lorsque la colonisation radiculaire totale de la base de l'élément est obtenue, la transplantation est opérée sur les sols, placés dans des colonnes en matière plastique de même diamètre que l'élément de préculture. Les colonnes ont 50 ou 25 cm de hauteur suivant les cas. Pour éviter le cheminement latéral des racines entre la terre et la paroi des colonnes, celles-ci sont chemisées intérieurement par une enveloppe plastique, type Polyane 200, recouverte de grains de quartz calibrés (1 - 2 mm) et maintenus par une colle au néoprène (sans toxicité).

Tableau 6 Solution nutritive de préculture (1)

:	$\text{NO}_3 \text{ K}$:	$(\text{NO}_3)_2 \text{ Ca}, 4 \text{ H}_2\text{O}$:	$\text{SO}_4 \text{ Mg}, 7 \text{ H}_2\text{O}$:	$\text{PO}_4 \text{ H}_2 \text{ K}$
g/l :	0,303	:	0,940	:	0,246	:	0,270
:	:	:	:	:	:	:	:

(1) on ajoute 2 cc par litre de solution d'oligo-éléments suivants :



et également 0,4 ml/l d'une solution de citrate ferrique à 1 % (pH de la solution : 5,7).

Lorsque les colonnes de terre doivent être maintenues à humidité constante, elles sont munies de tuyaux perforés de manière que les apports puissent se faire avec régularité à plusieurs niveaux. La colonne et l'élément de préculture sont maintenus solidaires par une bague de serrage (figure 11 B). Le dispositif, placé sur un bâti, est protégé du rayonnement par des plaques blanches en polystyrène expansé de 2 cm (photos 1,2,3) de manière à obtenir une ambiance homogène pour les colonnes de terre.

Le mode d'humidification des terres est identique à celui décrit précédemment mais le temps d'homogénéisation en condition hermétique est de 4 jours. La porosité de 45 % a généralement été retenue; elle présente un milieu favorable aux racines, et se rencontre fréquemment en conditions naturelles. Elle

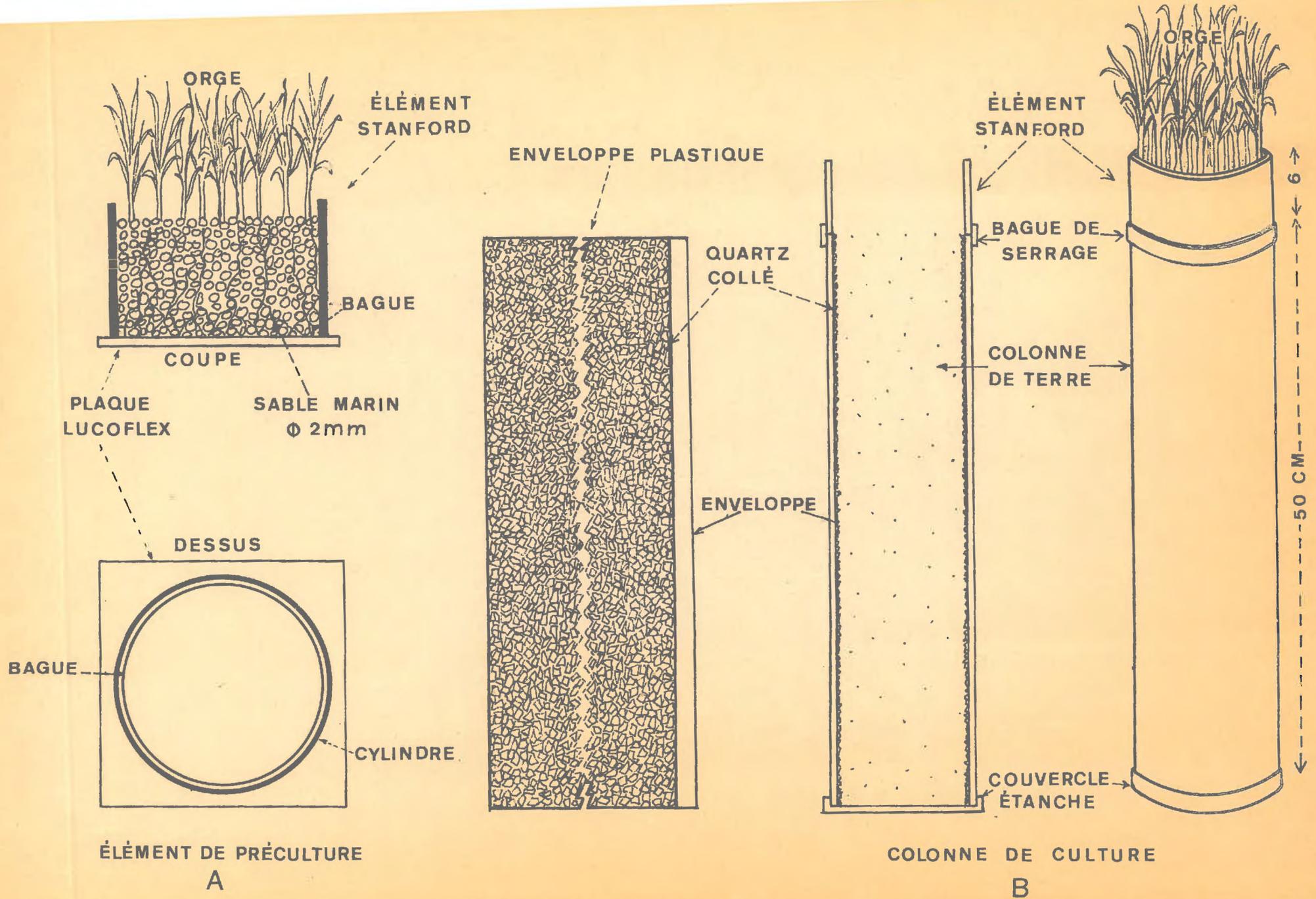


FIG.11 DISPOSITIF EXPERIMENTAL



1

Éléments de
Préculture
(orge)



2

Dispositif
expérimental
sur colonnes



3

Protection
thermique
du dispositif

peut être facilement obtenue sauf pour les sols argileux.

Du point de vue chimique, il a été apporté 250 mg d'azote par pot de 8,250 kg de terre sèche. Pour le problème étudié, les réserves P et K étaient considérées comme suffisantes. Enfin, les consommations d'eau sont mesurées chaque jour par pesée et des profils hydriques, en cours de végétation, sont réalisés par carottage et détermination gravimétrique après séchage à l'étuve à 105°.

L'ensemble des résultats a été obtenu à partir d'un nombre de plants déterminé (30), mais il existe un effet du peuplement végétal sur la colonisation radiculaire et les rythmes d'extraction de l'eau des terres. Toutefois, la comparaison des données obtenues avec 5 - 30 et 70 plants par colonne montre pour l'étude des mouvements de l'eau dans les sols, une très bonne représentativité du peuplement moyen, sa consommation d'eau étant voisine de celle du très fort.

IV - EXPERIMENTATION AU CHAMP

Les mouvements d'eau ont été suivis sur différents sols nus ou cultivés par utilisation de l'humidimètre à neutrons (ANDRIEUX et al., 1962, DAMAGNEZ, 1962 ; MAERTENS et al., 1965). La méthode est basée sur le ralentissement de neutrons rapides en neutrons thermiques par chocs successifs sur les noyaux d'atomes d'hydrogène principalement. La teneur en eau du sol peut être obtenue en humidité volumique, transformable directement en millimètres d'eau. Les profils hydriques sont réalisés à partir de l'installation, après forage préalable du sol à la tarière, d'un tube en alliage spécial d'aluminium servant de guide à la source émettrice de neutrons.

A) Modalités de dessiccation du sol par les cultures

Les phénomènes de consommation préférentielle ont été étudiés sur des cultures disposées en lignes espacées ; il s'agissait soit de plantes annuelles (maïs), soit pérennes (verger). En outre, un dispositif expérimental en sol argileux protégé de l'évaporation (Toulouse) comprenait la mesure des profils hydriques sur une rangée de 5 tubes, placés, entre 0 et 3 m, perpendiculairement à une seule ligne de maïs, de manière à suivre les mouvements d'eau vers une zone à très forte colonisation radiculaire.

B) Caractérisation de sols différents

Sur deux sols (Lasbordes, Toulouse), des tubes ont été placés sur des parcelles nues ou cultivées en maïs. Par ailleurs, à Auzeville, sur deux sols à tendance limoneuse et argileuse, les modalités de consommation d'une luzerne de 2ème année ont été suivies sur des parcelles non irriguées.

C) Degré d'épuisement des réserves et rythmes de consommation

Les mesures d'évapotranspiration maximale (ETM) et réelle (ETR) sur maïs ont été entreprises sur un sol limoneux très homogène (Plaisance bas). Les traitements consistaient à combler par irrigation le déficit d'eau du sol, à la suite d'une participation variable de la réserve utile comprise dans la zone exploitée par les racines (20 - 40 - 60 %). Il existait, en outre, un témoin en culture sèche. A partir des mesures d'ETP, effectuées par ailleurs (PUECH, 1968-1969) on a pu déterminer l'évolution des rapports de consommation : $\frac{ETM}{ETP}$, $\frac{ETR}{ETP}$, $\frac{ETR}{ETM}$; et les répercussions sur la production végétale, tout en examinant les modalités d'utilisation des réserves hydriques du sol.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CIRCULATION DE L'EAU

NON SATURANTE

L'étude expérimentale des mouvements de l'eau non saturante, au voisinage d'une surface absorbante, a pour but de mettre en évidence les modalités de cession d'eau de terres de textures très différentes, considérées à divers états d'humidité ou soumises à des traitements variés.

L'emploi du modèle physique simple que nous avons adopté permet d'extraire l'eau en phase liquide et de s'affranchir, dans un premier temps, du phénomène d'avancement racinaire. Ce modèle de racine autorise donc l'étude des mécanismes. Nous rapporterons, ci-après, les résultats obtenus sur les différents sols en examinant successivement :

- la cession d'eau par les terres et les facteurs qui l'influencent (humidité initiale, force de succion, température, etc ...)

- l'évolution des profils hydriques sous l'effet de diverses contraintes (humidité, force de succion, temps de réhomogénéisation des profils et évolution des gradients d'humidité, importance des milieux stratifiés complexes, etc ...)

- enfin, à partir des résultats expérimentaux, nous examinerons les critères de la mobilité de l'eau et nous tenterons d'interpréter les débits : c'est-à-dire la capacité de cession des sols, par analogie avec un comportement capillaire, en faisant appel à la notion de rayons équivalents, cette approche devant permettre de différencier les sols entre eux.

I - RESULTATS OBTENUS A PARTIR D'UN MODELE DE RACINE

A) PRINCIPAUX ASPECTS DE LA CESSION D'EAU PAR LES SOLS

1°) Influence de la texture de sols considérés à la capacité au champ

En effectuant une succion constante, en conditions isothermes ($20^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$) sur la gamme de sols, nous obtenons en 24 heures une très nette différenciation des pertes d'eau comme le montre la figure 12 (entre 6 et 17 mm/jour). Pour les sols à tendance limoneuse (Mazères, Lizac, Plaisance) les pertes sont très élevées et nettement supérieures à celles des sols les plus argileux (Toulouse, Barrat, Lessesques). Cela implique donc que leur vitesse de dessèchement soit très différente. En analysant le phénomène au niveau du débit horaire, on peut distinguer trois phases assez distinctes (figure 13)

- la première correspond à un fort débit pendant quelques heures et semble être en relation avec l'établissement rapide d'un gradient de potentiel entre le sol et l'absorbant situé à son contact

- la deuxième phase montre un ralentissement progressif du débit et sur un temps relativement court.

- la troisième phase indique l'existence d'un débit résiduel faible et à peu près constant.

Ce rythme de cession de l'eau est voisin de celui trouvé sur des sols en dessiccation par évaporation (FEODOROFF-RAFFI, 1962 ; RAFFI, 1964) mais on observe ici dans les premières heures un débit beaucoup plus important, entre 1,5 et 5 mm/h pour les cas extrêmes.

Si l'on considère l'évolution des réserves hydriques en fonction du temps (figure 14), on remarque des variations importantes entre les divers sols. Après 24 heures de succion, l'épuisement des réserves atteint 60- 70 % pour les sols les plus limoneux (Mazères, Plaisance, Lizac) et environ 30 - 45 % pour les sols très argileux (Barrat, Larivière, Lessesques). Il apparaît donc que la vitesse d'épuisement de la réserve d'eau utile diminue assez régulièrement, lorsque le taux d'argile granulométrique augmente (figure 15).

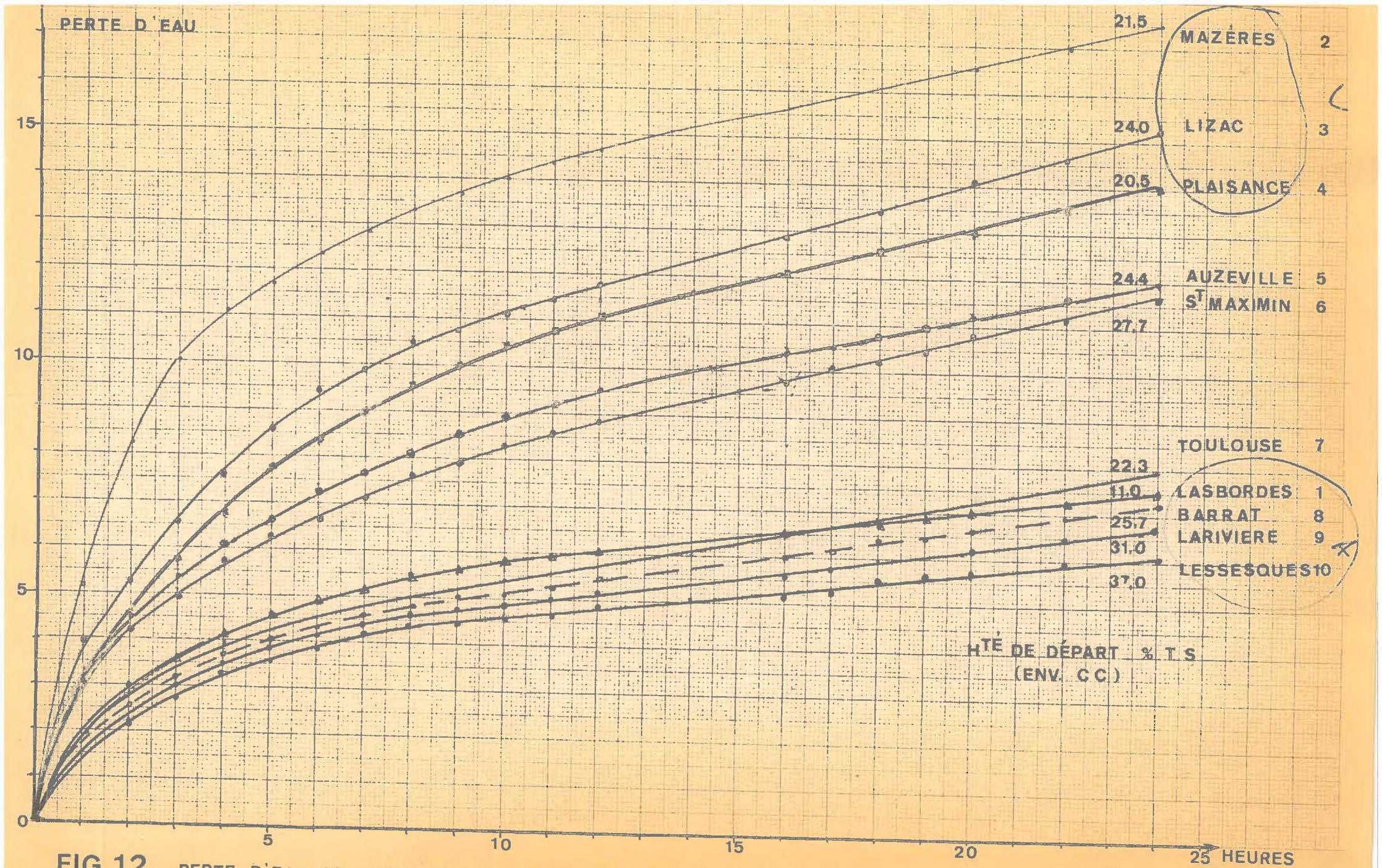


FIG.12. PERTE D'EAU EN FONCTION DU TEMPS SUR LES DIVERS SOLS A LA CAPACITÉ AU CHAMP (GEL SEC)

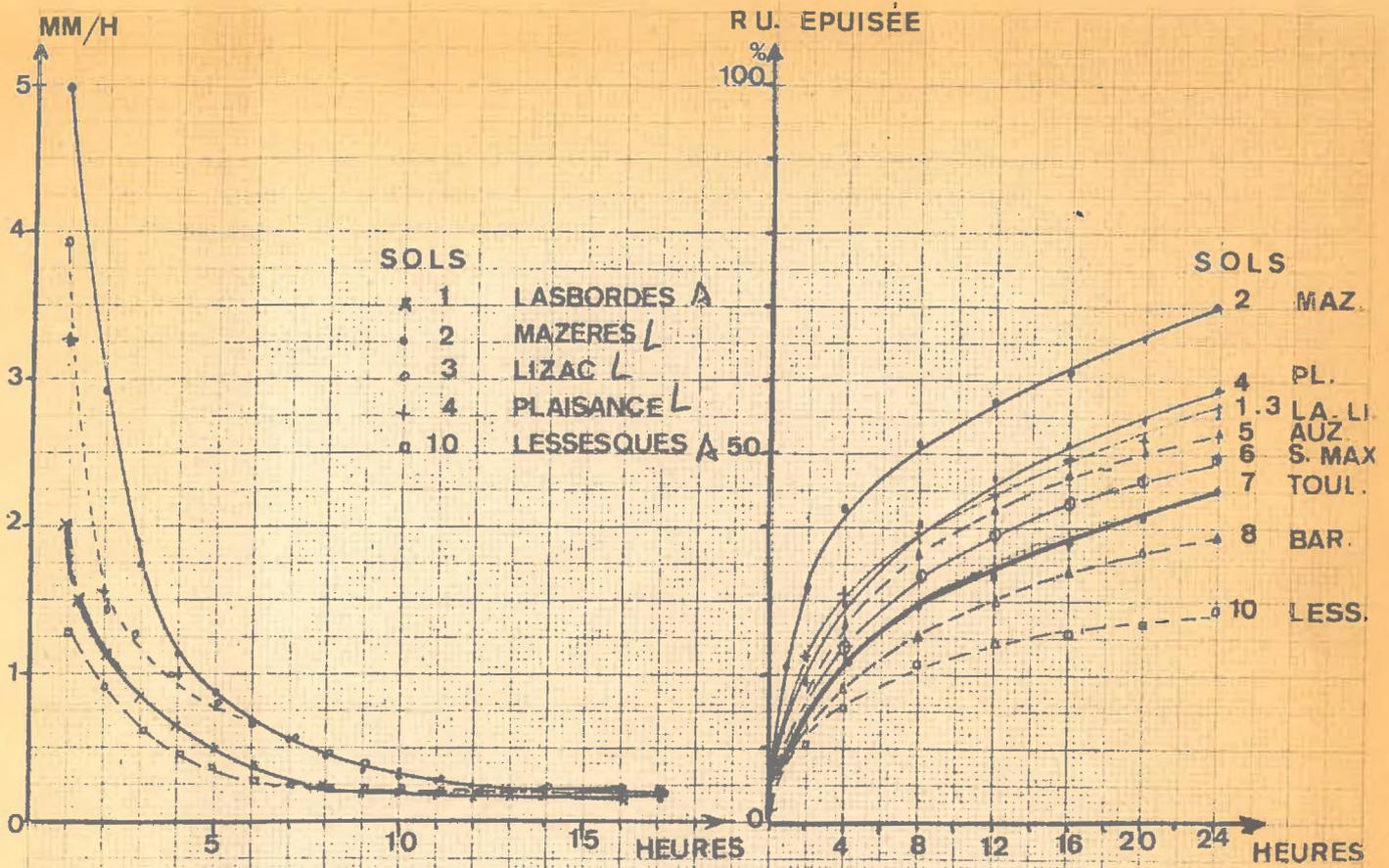


FIG. 13 - DÉBIT HORAIRE DE 5 SOLS

FIG. 14 - ÉPUISEMENT DE LA RU DANS LE TEMPS.

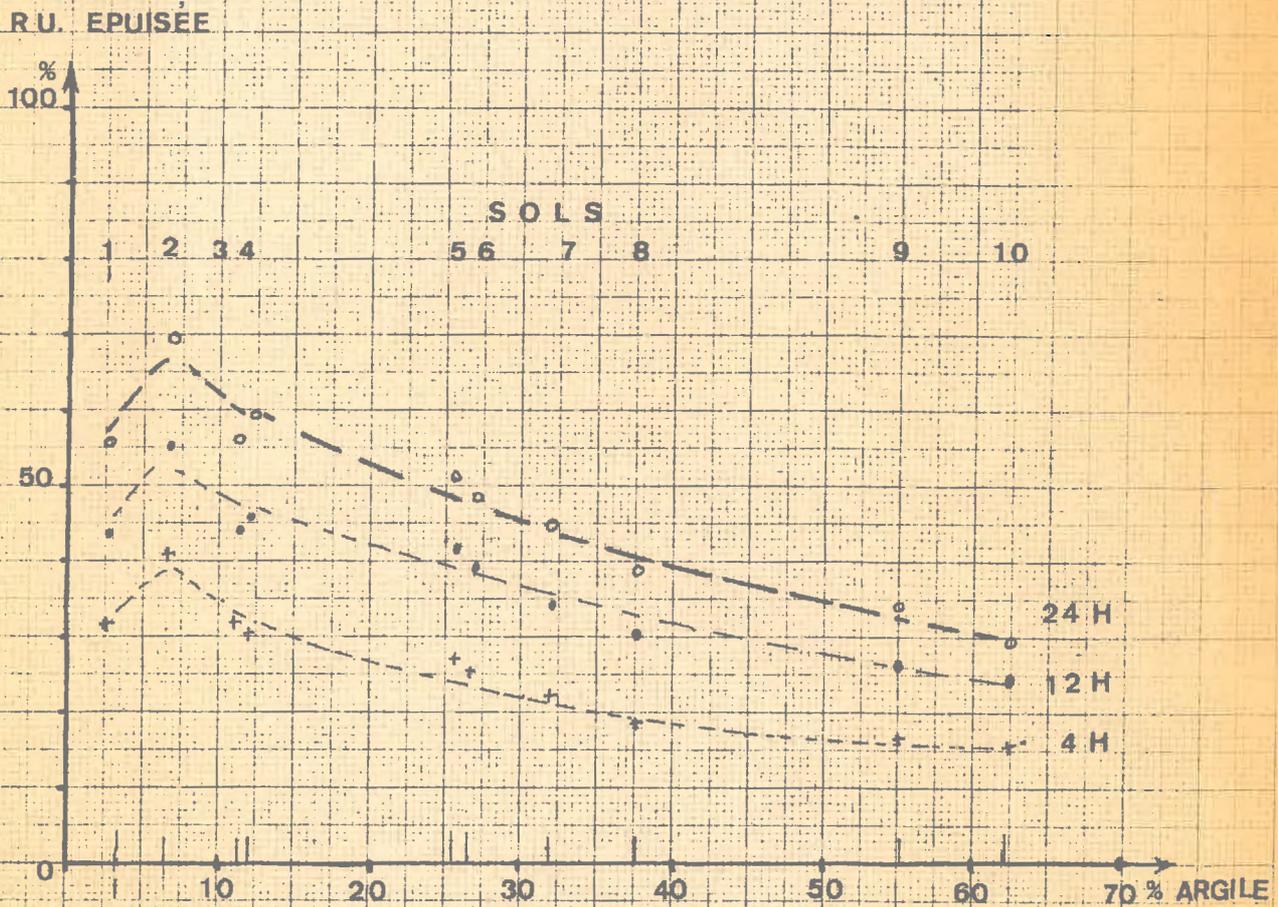


FIG. 15 - INFLUENCE DU TAUX D'ARGILE SUR LA VITESSE D'ÉPUISEMENT DE LA R U

Les données précédentes montrent donc que la cession d'eau varie avec la texture des sols et évolue rapidement dans le temps malgré des réserves importantes ; la vitesse d'épuisement des réserves fluctue dans des proportions assez grandes et est influencée par la teneur en argile. Il est donc nécessaire de rechercher, à partir de ces résultats globaux, les causes de différenciation en étudiant l'évolution des profils hydriques.

2°) Influence de l'humidité initiale

Si la succion est réalisée sur des terres possédant différentes humidités initiales, les quantités d'eau extraites en un temps donné sont d'autant plus importantes que la teneur en eau initiale est élevée (figure 16). On obtient l'allure précédemment indiquée par le graphique 12. Dans la gamme d'humidité choisie pour les trois sols différents testés (Lasbordes 1 ; Plaisance 4 ; Toulouse 7), la perte d'eau en fonction de l'humidité initiale est sensiblement linéaire (figure 17A) avec des pentes variables indiquant une influence très sensible de l'humidité initiale sur la cession dans le sol (1) sableux et moins importante pour le sol (7) argileux. D'autre part si l'on représente la perte d'eau en fonction du pF initial en considérant l'ensemble des résultats obtenus sur les sols de texture et d'humidité variables (figure 17 B), on remarque que la perte d'eau est en relation linéaire avec le pF initial pour les limons et les argiles. Seul le sol sableux, du fait de sa faible réserve utile, n'entre pas dans le cadre général. (Par ex. en deçà de pF 2 et pour cet essai : $r=0,965$ (HS) ; perte (mm) = - 8,37 pF + 33,5).

3°) Rôle de la force de succion

Avant d'aller plus avant, nous devons définir le sens des différents termes utilisés : le potentiel capillaire, la succion, la tension sont des données comparables aux dimensions près. Les correspondances entre ces termes sont mentionnées au tableau 7. Dans la suite de notre travail, nous ne ferons généralement appel qu'à une ou deux dénominations de mesure.

Si nous considérons à présent la succion de l'eau d'une terre, par un gel amené à divers états initiaux d'humidité, l'extraction de cette eau est d'autant plus importante que l'absorbant est moins humide.

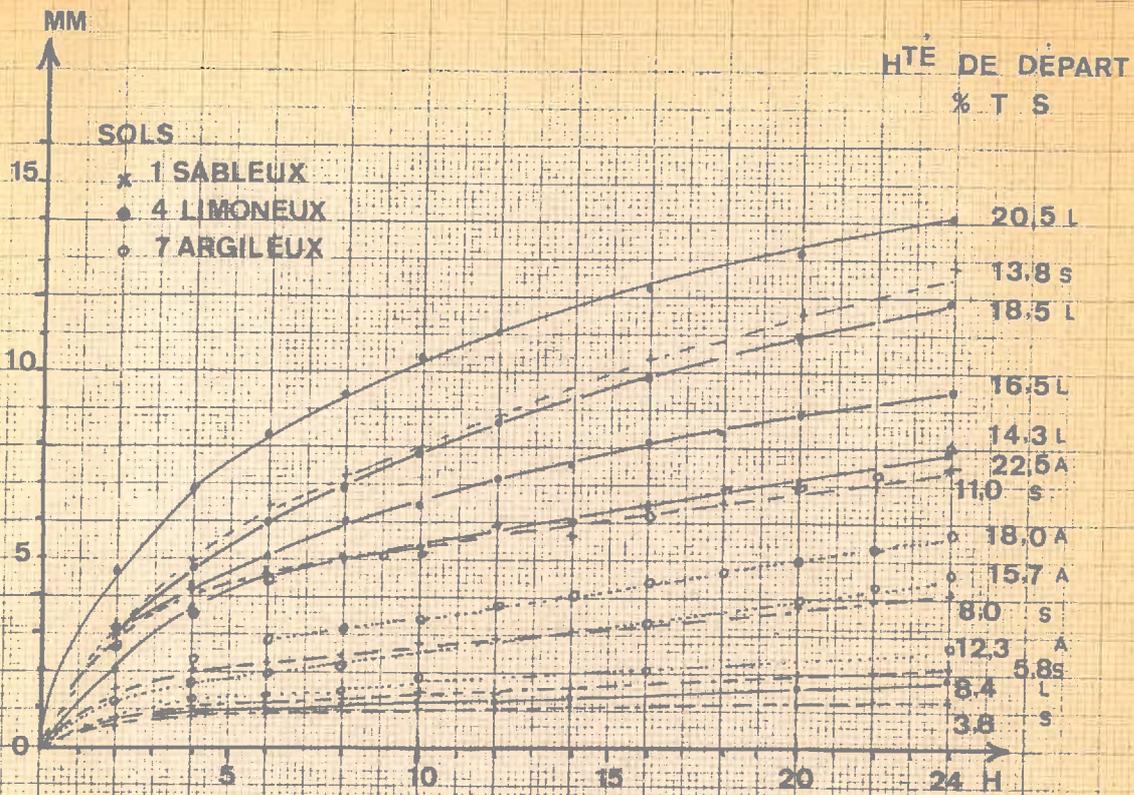


FIG. 16. — PERTE D'EAU EN FONCTION DU TEMPS (GEL SEC)
SOLS A DIFFÉRENTES HUMIDITÉS

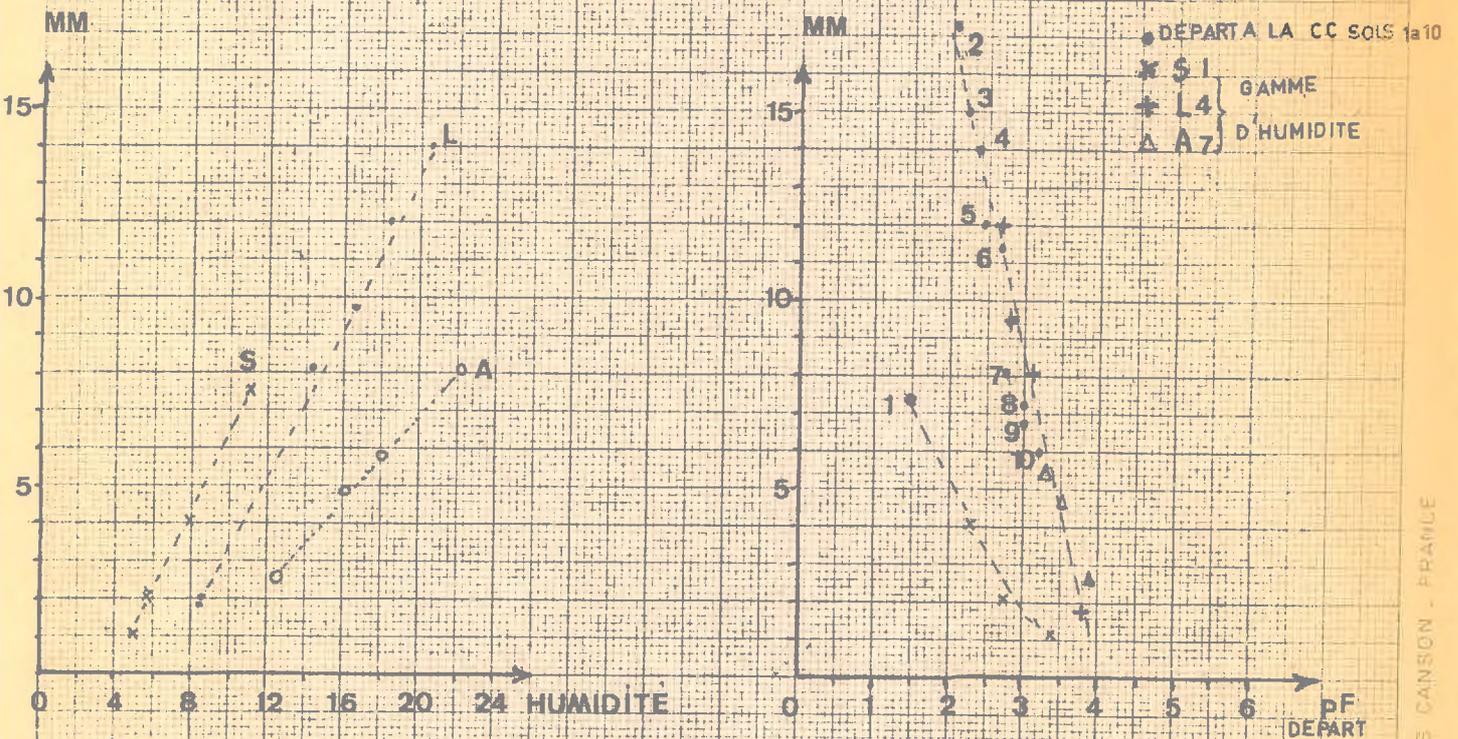


FIG. 17. — PERTE (3 SOLS A DIFFÉRENTES HUMIDITÉS INITIALES)
A - EN FONCTION DE L'HUMIDITÉ
B - EN FONCTION DU pF INITIAL
APRES 24 HEURES

PRESSION STATIQUE						UNITE OU TRAVAIL PAR UNITE ' DE MASSE D'EAU		
centimètres d'eau	Kilogramme: par centi- mètre carré:	Millimètre: de mercure	Pascals	Millibars	Atmosphères:	ERGS par gramme masse	Joules par: kilogramme: masse	pF logarithme à base 10 de la pres- sion en cm d'eau
cm eau	Kg/cm ²	mm Hg ou TORR	Pa	mbar	atm	erg/g	J/kg	
L	L ⁻¹ MT ⁻²	L	L ⁻¹ MT ⁻²	L ⁻¹ MT ⁻²		L ² T ⁻²	L ² T ⁻²	
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0,001	0,735	98,07	0,98		980,67		0
1,019		0,75	100	1		1000	0,1	≈ 0
1,36		1		1,33				
10,0	0,01	7,35		9,80				1
10,19		7,50	1000	10		10 000	1	≈ 1
100	0,1	73,5		98,07				2
1 000	1,0	735		980,67			98,07	3
1 033	1,033	760		1013	1		101,33	≈ 3

Tableau 7

Correspondance des expressions et unités des différents termes
(suction, tension, potentiel capillaire)
d'après MARSHALL (1959) ; FEODOROFF (1968).

Les résultats de la cession d'eau pour le sol argileux 7, mentionnés ci-dessous (tableau 8), montrent les écarts obtenus. Conformément à ce que nous avons déjà mentionné, la terre et le gel de silice ont tendance à s'équilibrer pour des énergies de rétention voisines. On peut enfin noter que les vitesses de dessèchement $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ peuvent être facilement différenciées.

Humidité du gel de silice	:	:	:	:	:	:
	:	0 %	:	10 %	:	20 %
	:	:	:	:	:	30 %
Perte d'eau du sol (H ₂ O % TS)	:	:	:	:	:	:
	:	0,8 %	:	0,7 %	:	0,6 %
	:	:	:	:	:	0,3 %

Tableau 8 Extraction d'eau par le gel de silice à différentes humidités initiales sur le sol argileux 7 à la capacité au champ (Durée 1 heure - gel non renouvelé)

4°) Rôle de la température

La viscosité de l'eau varie dans des proportions relativement importantes sous l'effet de la température (tableau 9). De plus, un abaissement de la température provoque une augmentation de la tension superficielle de l'eau. Ainsi, lorsque la température passe de 40° à 10° C, la tension superficielle (interface eau-air) s'accroît de 69,56 dynes/cm à 74,22 dynes/cm.

T° de l'eau	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
	:	0°	:	10°	:	15°	:	20°	:	25°
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	30°
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	35°
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	40°
Viscosité (poise)	:	0,01525	:	0,01301	:	0,01138	:	0,01006	:	0,00895
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	0,00800
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	0,00723
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	0,00656

Tableau 9 Variation de la viscosité de l'eau avec la température

Ces variations des caractéristiques de l'eau ont un **effet** non négligeable sur les mouvements d'eau sous l'influence des gradients de température et la rétention de l'eau (DERJAGUIN-MELNIKOVA, 1956 ; FEODOROFF-BALLIF, 1968 ; CASSEL et al., 1969). Ainsi le tableau 10 montre les résultats obtenus à différents temps, avec le sol argileux 7 considéré à la capacité au champ et maintenu, en milieu isotherme ($\pm 0,2^\circ$), à trois températures (8° - 15° - 29° C).

Pour les températures extrêmes, on note, en fin d'essai, une différence de cession d'environ 20 %.

Température de la terre		8°	15°	29°
Perte d'eau du sol (% TS)	2 heures	1,3 %	1,7 %	2,2 %
	4 heures	2,2 %	2,5 %	2,8 %
	8 heures	2,8 %	3,1 %	3,4 %

Tableau 10 : Cession d'eau (H₂O % TS) après différents temps de succion par le sol argileux 7 à la capacité au champ, maintenu à différentes températures (Extraction en continu - gel sec).

Le détail des influences de la température ne sera pas abordé dans cette étude, bien que dans les conditions naturelles il s'agisse d'un élément non négligeable (GESLIN, 1935 ; DEMOLON, 1952 ; DIEHL-MORICE, 1957 ; BLOODWORTH MORRIS, 1960 ; HENIN et al., 1960 ; VAN WIJK, 1960 ; FEODOROFF-BALLIF, 1962) fluctuant en fonction : de la profondeur du sol (plusieurs degrés sur quelques décimètres), des conditions climatiques (cycles journaliers, saisonniers, annuels), et des sites topographiques (exposition).

Ainsi, nous constatons donc que divers facteurs, tels que la force de succion du gel, la température, l'humidité initiale et la porosité également (MORIZET, 1967) modifient la cession de l'eau des sols. Néanmoins la texture, dans les conditions agronomiques, exerce une influence prédominante, et nous nous attacherons surtout à l'étude de ses effets.

B) EVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES SUR DIFFERENTS SOLS.

GRADIENT D'HUMIDITE

Si l'on soumet à une succion modérée une terre prise à la capacité au champ, l'expérience montre qu'en début d'essai il n'y a pratiquement pas de gradient d'humidité, mais celui-ci s'accroît progressivement au cours du temps. L'existence de ce gradient d'humidité dépend de plusieurs facteurs.

1°) Importance des types de sols

Sur la figure 18, les profils hydriques de plusieurs sols sont comparés dans des conditions homologues (même succion, capacité au champ). Il apparaît une très nette différence de comportement. Le gradient d'humidité est

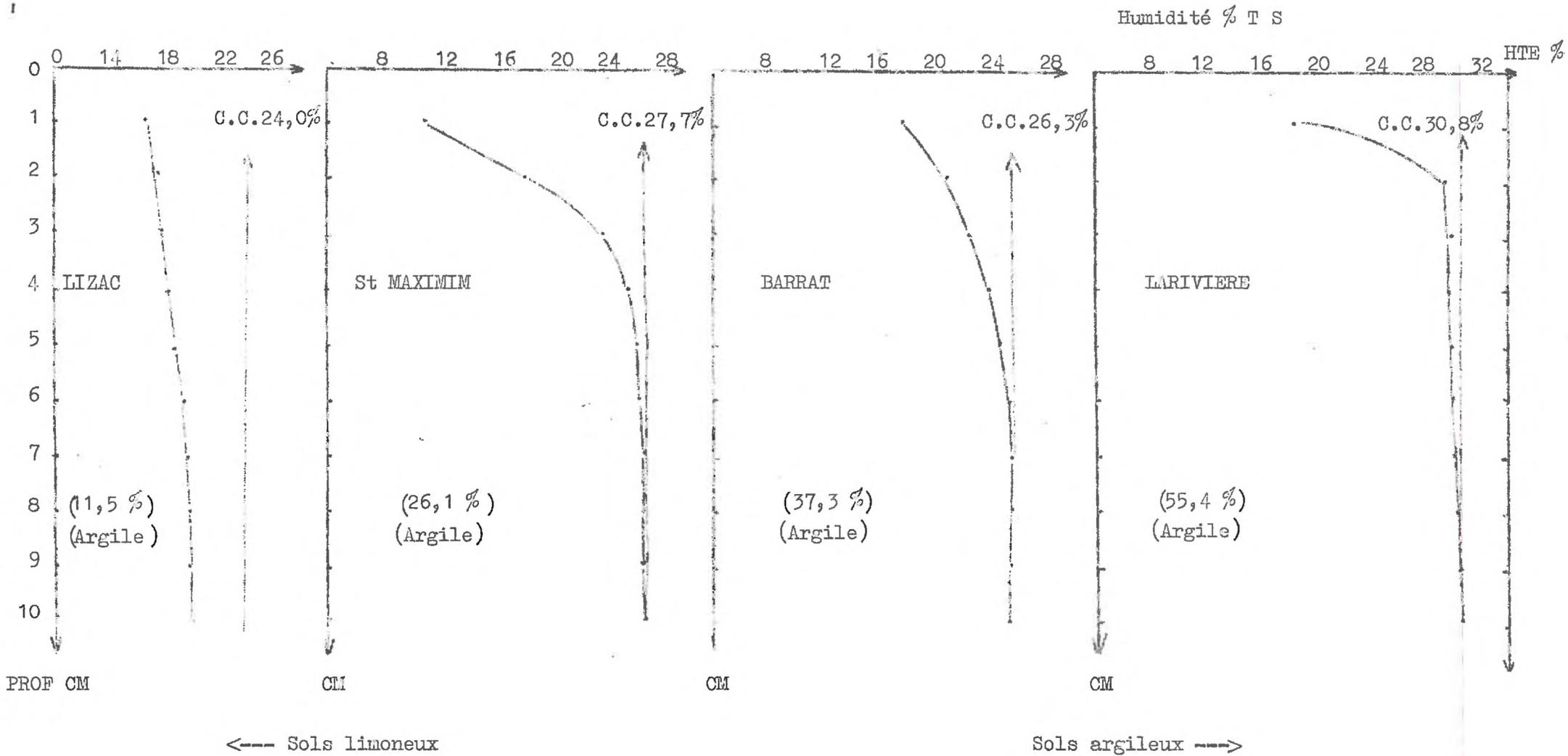


FIG. 18 : Profils hydriques sur quelques sols (3 heures - gel sec) présentant divers taux d'argile

d'autant plus accusé que le sol est plus argileux, et dans ce cas le Flux liquide intéresse préférentiellement les couches situées au voisinage du gel.

2°) Rôle de l'humidité initiale

Si l'on réalise une gamme d'humidité (supérieure à pF 4,2) et que l'on effectue une succion donnée, le gradient d'humidité est d'autant plus important que la terre est moins humide au départ, comme le montrent les profils hydriques de la figure 19 et son évolution à une tendance linéaire dans les conditions de l'expérience (figure 20). L'ampleur de ce gradient, plus marqué dans le sol de texture argileuse, met donc en évidence la difficulté de l'eau à circuler rapidement au sein de ce type de terre. En conditions homogènes, l'ampleur de ce gradient peut alors être envisagée comme un indice comparatif de mobilité de l'eau, compte tenu des indications précédemment obtenues sur les débits.

3°) Rôle de l'intensité de la succion

En utilisant un gel de silice à différentes humidités pour réaliser diverses forces de succion, on remarque que les profils hydriques présentent une convexité d'autant plus accusée vers la zone d'extraction de l'eau que la vitesse d'extraction est plus forte ; nous retrouvons encore une différenciation d'ordre textural (figure 21). La variation du gradient d'humidité $\frac{\Delta H}{\Delta Z}$ en fonction de la teneur en eau du gel est ici aussi de type linéaire (figure 22) pour les deux sols considérés.

4°) Effet des arrêts de succion sur l'évolution des profils hydriques

Nous venons de voir que suivant les conditions expérimentales, les profils hydriques présentent donc un gradient d'humidité d'ampleur variable. Il est intéressant de savoir dans quelle mesure, après arrêt de la succion pendant des temps plus ou moins longs, l'eau peut se mouvoir dans la terre pour en réhomogénéiser l'humidité, Pour cela, un gradient d'humidité important a été réalisé en soumettant à une succion de 7 heures, des tubes contenant les différentes terres (1 - 4 et 7) prises à la capacité au champ. La succion a ensuite été arrêtée et un profil hydrique de référence a été établi sur chaque sol. Les tubes restant, après avoir été bouchés hermétiquement, ont été placés dans une enceinte à température constante ; les profils hydriques ainsi laissés sous l'influence des seules forces capillaires du sol ont été de nouveau mesurés au bout de différents temps.

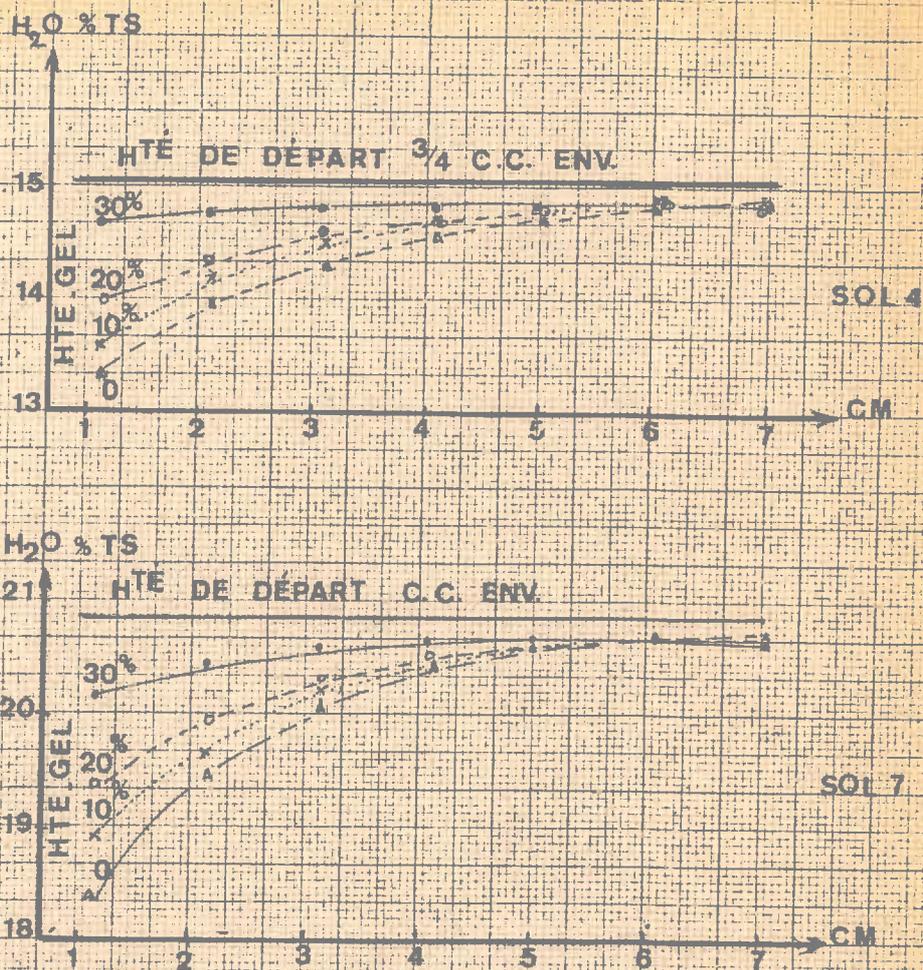


FIG. 21 — ÉVOLUTION DU PROFIL HYDRIQUE EN FONCTION DE L'INTENSITÉ DE LA SUCCION (GEL NON RENOUVELÉ, SEC 10, 20 ET 30 %)(1 HEURE)

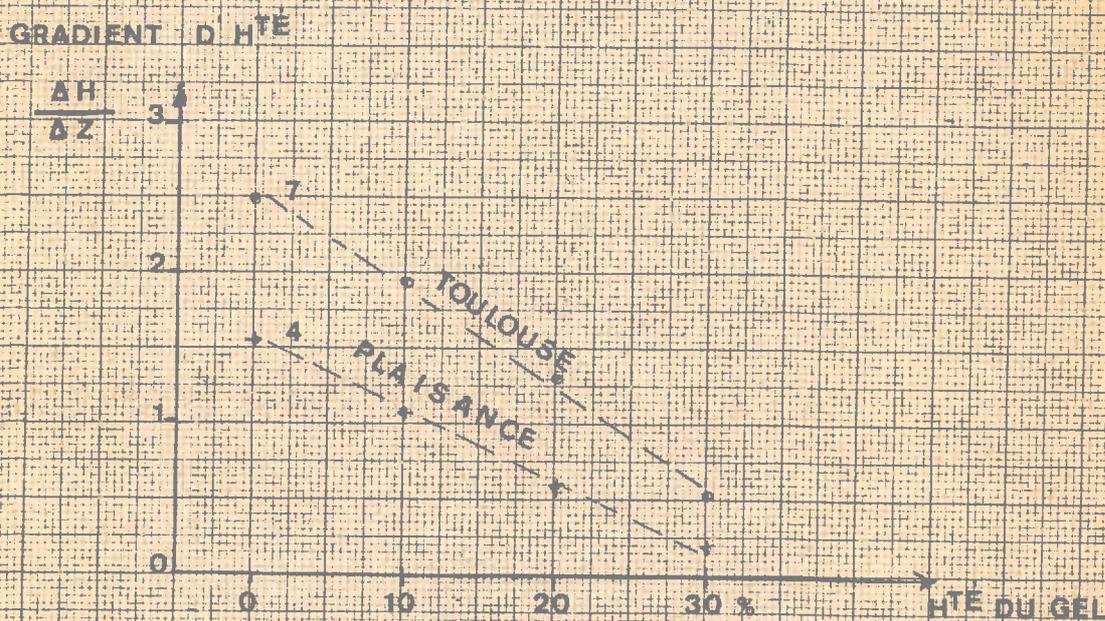


FIG. 22 — HUMIDITÉ DU GEL ET GRADIENT D'HUMIDITÉ SUR LES SOLS 4 ET 7 (1 HEURE, GEL NON RENOUVELÉ)

Après 24 heures de repos, le profil indique un léger gain d'humidité des tranches qui avaient été les plus desséchées (figure 23). Mais pour des durées supérieures (48 - 72 - 120 - 162 heures), le profil reste pratiquement stationnaire malgré l'existence d'un gradient important dans les premières tranches. Pour les trois sols étudiés dans ce cas, la réhomogénéisation du milieu est donc très limitée, ce qui rejoint en partie les phénomènes d'hystérésis observés par un certain nombre d'auteurs (HALLAIRE, 1953-1964). Comme cela a déjà été signalé, le gradient de potentiel capillaire apparent n'est donc pas le véritable (ou le seul) moteur des mouvements d'eau. Sans contrainte extérieure, le déplacement de l'eau n'a pratiquement pas lieu. Toutefois, si une nouvelle succion de même durée que la précédente est réalisée, le mouvement se fait sur toute la colonne, avec une intensité plus grande dans les premières couches, où le gradient d'humidité s'amplifie à nouveau. (figure 23).

5°) Variation du débit en fonction de l'humidité de la tranche de sol située près de l'absorbant

Nous avons précédemment montré la chute de débit relativement rapide dans le temps, pour un sol considéré initialement à la capacité au champ. Nous pouvons également remarquer qu'il se comporte au bout d'un certain délai comme le même sol pris à une humidité initiale uniforme inférieure, et que l'on assècherait au même moment dans les mêmes conditions (Tableau 11). Le stock d'eau disponible n'apparaît donc pas seul en jeu ; au fur et à mesure du dessèchement, la zone voisine de l'absorbant, plus desséchée, joue un rôle d'écran (HALLAIRE, 1953-1956). La surface efficace d'absorption semble donc décroître et il se produit ainsi un ralentissement des transferts d'eau, lorsque la succion a toujours lieu au même niveau, comme le montre l'expérience suivante réalisée sur le même sol argileux 7.

	Humidité de départ au temps t = 0				
	22,3 %	18,0 %	15,7 %	12,3 %	22,3 %
	Après 1 h				Après 10 h
Humidité moyenne % TS	21,0 %	17,1 %	15,0 %	11,9 %	18,8 %
Humidité du 1er cm	18,2 %	13,3 %	12,1 %	9,6 %	12,3 %
Débit (mm/h)	0,65	0,32	0,24	0,15	0,18

Tableau 11 Débit horaire comparé du sol argileux 7 (Toulouse) à différentes humidités initiales après 1 h de succion, et du sol le plus humide après la 10ème h de succion.

Une succion d'une heure est effectuée sur des colonnes de 10 cm d'humidité uniforme. Un profil hydrique de référence est alors établi (figure 24 A). Sur les colonnes restantes, la même succion est à nouveau effectuée, d'une part sur une colonne conservée entière (A), et d'autre part sur des colonnes où l'on a retiré 1 (B) - 2 (C) - 3 (D) et 4 cm (E) de terre à partir de la surface d'absorption primitive. Malgré une réserve d'eau totale nettement moindre, la perte d'eau est supérieure et la mobilité de l'eau meilleure, lorsque l'extraction a lieu loin de la surface initiale, et que par conséquent la tranche en contact est plus humide (figure 24 B). Il se produit alors une sorte d'effet de choc déjà noté au paragraphe relatif à la cession de l'eau.

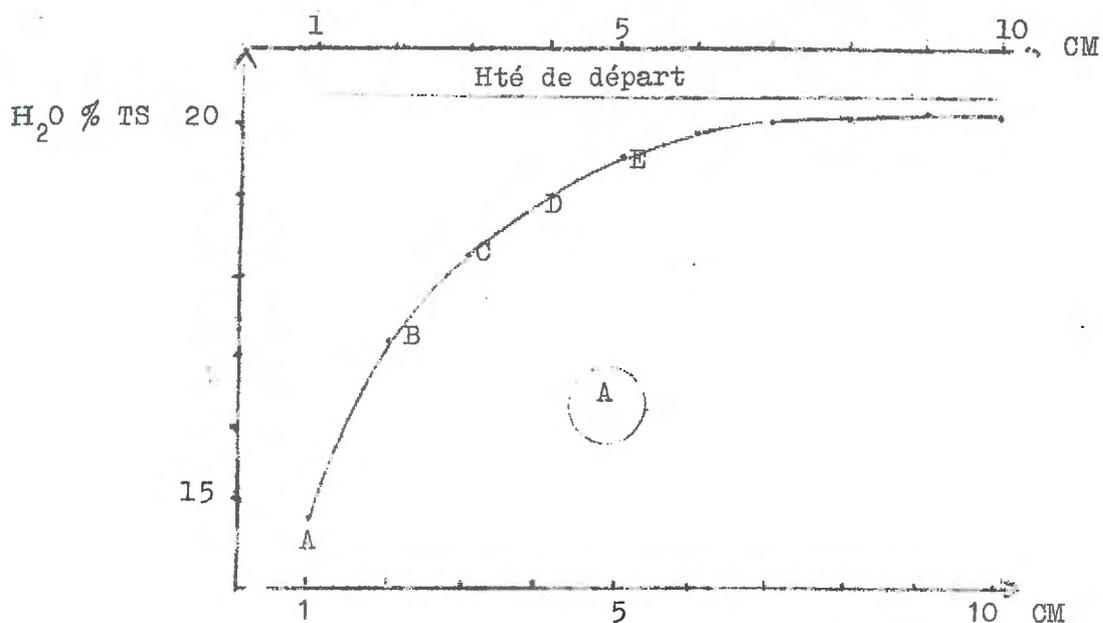
Les phénomènes étudiés jusqu'ici concernent des mouvements d'eau "unidirectionnels" ; or, dans les conditions naturelles du milieu racinaire, l'extraction d'eau se fait à partir d'un volume et les mouvements d'eau qui s'effectuent suivant plusieurs directions (convergente, opposée, divergente) peuvent avoir des effets particuliers dans les sols. Nous pouvons par exemple citer :

- le cas d'un flux convergent d'eau vers une racine (COWAN, 1965; BREXSTER 1970)
- le cas de deux flux opposés dans le cas de cultures plantées en lignes espacées, réalisant de ce fait deux plans à forte colonisation racinaire qui provoquent une absorption préférentielle d'eau ; (COURAU et al., 1966 ; PUECH 1969 ,
- dessèchement à petite échelle au niveau des phénomènes de structuration des agrégats (sous prairie par exemple) (BUI HUI TRI, 1965; SCHUURMAN, 1965).
- phénomènes de prise en masse par dessiccation, avec apparition de contraintes au sein du sol (SIFAOUI, 1970).

Nous avons donc étudié, sur modèle, les mouvements de l'eau du sol lorsque celui-ci était soumis à deux contraintes de succion de sens opposés.

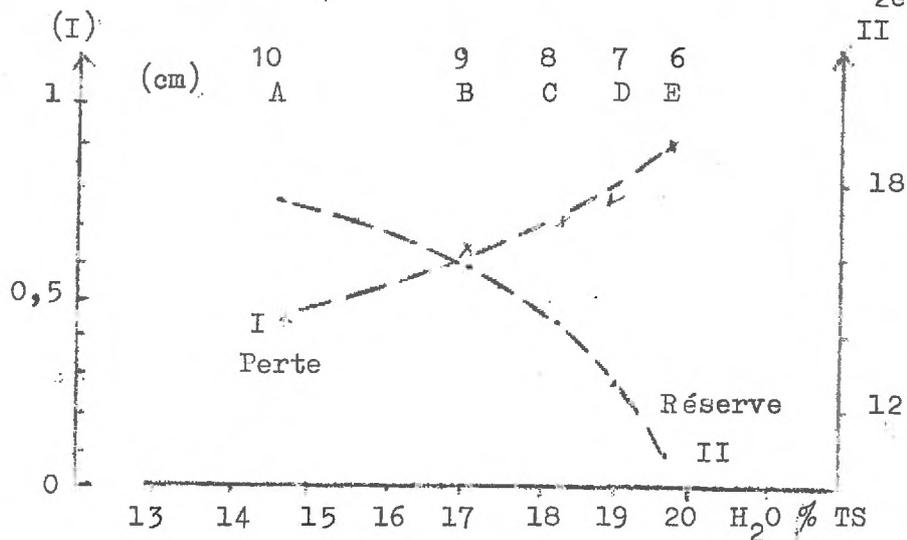
6°) Effet des succions opposées sur l'évolution des profils hydriques

Les essais sont effectués sur des colonnes de 16 cm de long. L'extraction d'eau est faite d'un côté par le gel renouvelé continuellement et de l'autre côté par un gel à renouvellement périodique (figure 25) ; on obtient alors des profils caractéristiques à double incurvation. Celle-ci est très marquée sur les sols de type argileux, ainsi que l'indique la figure 26 qui représente les résultats obtenus à deux temps différents avec le sol 7, initialement voisin de la capacité au champ. L'évolution de la cession d'eau et du gradient d'humidité sont données au tableau 12.



Perte après 2ème succion (G)

Réserve d'eau avant 2ème succion (G)



Avant la 2ème succion

B

FIG. 24

A) Profil hydrique après 1 heure de succion (gel sec)

B) Perte d'eau en fonction de l'humidité de la zone voisine de l'absorbant (après nouvelle succion de 1 heure)

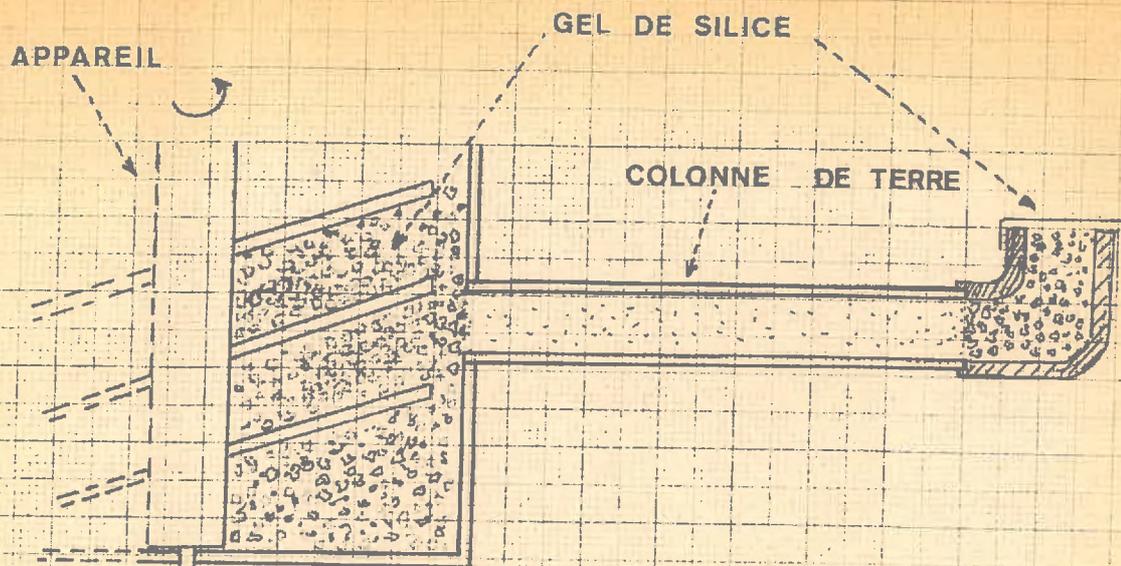
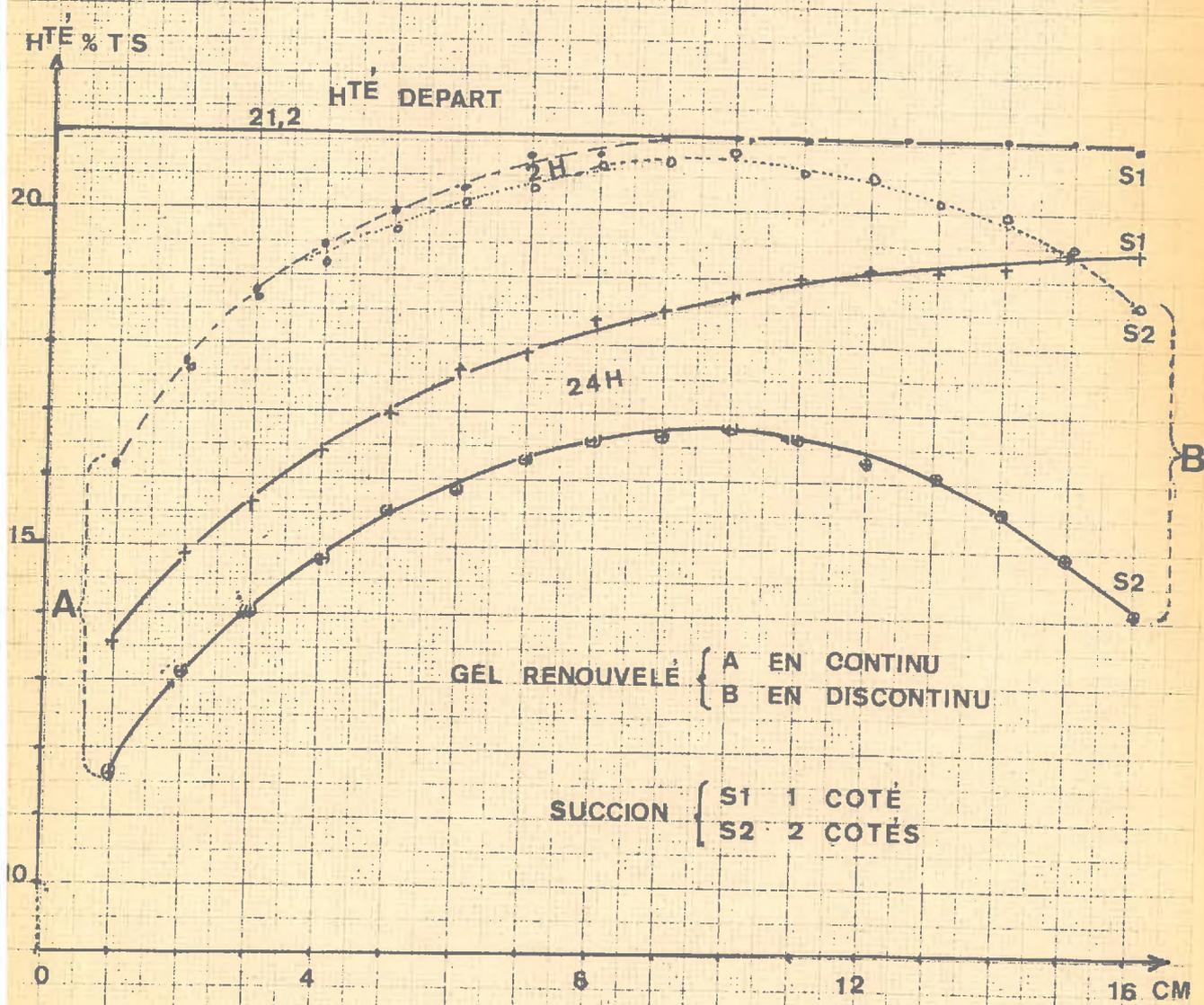


FIG.25. - SYSTEME A DOUBLE EXTRACTION



G.26. PROFILS HYDRIQUES (APRES 2H, OU 24H) AVEC SUCCION D'UN COTE OU DE 2 COTES DE LA COLONNE DE TERRE (ARGILE 7)

	(A) SUCCION SIMPLE		(B) SUCCION DOUBLE	
	2 h	24 h	2 h	24 h
Cession d'eau	1,1 %	3,6 %	1,6 %	6 %
Rapport $\frac{\text{Perte 24 h}}{\text{Perte 2 h}}$	(3,28)		(3,75)	
Gradient d'humidité $\frac{\Delta H}{\Delta Z}$	5,2 %	6,5 %	max 4,8 min 3,0	5,4 % 2,8 %

Tableau 12 Influence de la succion opposée, sur les modalités de cession de l'eau du sol argileux 7 (Toulouse). Effets comparés après 2 h et 24 h de contact.

Sous l'effet d'une double succion, le gradient d'humidité diminue donc légèrement en sol argileux. En sol limoneux, on obtient un gradient peu marqué comme le montrent les résultats du tableau 13. Cette différence de comportement selon la texture confirme bien les allures de profils obtenues précédemment (figure 19).

Sol limoneux 4	Cession d'eau %			II Rapport des pertes d'eau		Gradient d'humidité
	Totale	A 0-8 cm	B 8-16 cm	Rapport total	A B 0-8 cm:8-16 cm	
I Succion de 1 côté	3 %	3,6 %	2,4 %	1,57	1,36 : 1,87	2,6
II Succion de 2 côtés	4,7 %	4,9 %	4,5 %			Max 1,8 Min 1,0

Tableau 13 Participation des tranches de sol et cession d'eau pour le sol limoneux 4, voisin de la capacité au champ sous simple et double succion (gel sec - 2 h)

Enfin, lorsqu'on fait varier la force de succion totale ou la vitesse du renouvellement à une extrémité, les phénomènes restent du même type que ceux rapportés ci-dessus, mais avec des amplitudes variables suivant la nature des contraintes.

7°) Influence de l'hétérogénéité hydrique ou texturale des milieux

Les études précédentes ont toujours porté sur des milieux de textures homogènes. Or, dans les sols naturels, ce cas est assez exceptionnel et l'on

rencontre surtout des profils pédologiques avec superposition d'horizons de textures très différentes (DUCHAUFOR, 1960 ; FAVROT-PUECH, 1963 ; PUECH 1963; SERVAT BOUZIGUES, 1971).

Nous avons essayé de voir quelles étaient les perturbations provoquées par la juxtaposition de divers milieux. Afin de mieux cerner cette question, nous l'avons d'abord abordée par le biais de colonnes fermées de strates de même texture mais d'humidités différentes, puis de strates de deux textures ou de trois textures.

a) Influence de variations de l'humidité de milieux superposés

Considérons pour un sol donné deux humidités initiales : l'une élevée (voisine de la capacité au champ) et l'autre faible (la moitié par exemple). Les sols sont placés en deux éléments identiques juxtaposés dans une colonne de 16 cm. La succion est effectuée dans un cas sur la partie la plus humide, et dans l'autre sur la partie la plus sèche. La figure 27 montre les résultats obtenus sur trois sols (1 - 4 - 7). La succion sur le côté le moins humide permet une extraction sur le milieu sous-jacent humide, mais cette eau ne participe pas complètement au débit total car elle sert à réhumecter, en partie, l'élément peu humide. Ce transfert est dû à un effet de succion de l'élément le plus sec (suivant le gradient normal de potentiel). Si l'on réalise l'expérience inverse, en procédant à la succion sur l'élément à la capacité au champ, on remarque que le débit total est nettement supérieur mais l'élément le moins humide exerce toujours une succion sur l'autre élément. Le phénomène existe pour les trois sols considérés, malgré les différences de pF importantes qu'ils présentent initialement. Ces résultats montrent donc :

- qu'il n'apparaît pas ici de circulation à contre gradient. (Ces données obtenues avec deux strates du même sol, à deux humidités différentes, sont voisines des résultats obtenus avec la double succion par le gel de silice).

- que la configuration initiale des profils hydriques n'est pas à négliger dans les mouvements d'eau non saturante ; ceux-ci se faisant en fonction des potentiels existant aux bornes extrêmes de l'élément sur lequel est exercée une demande déterminée.

b) Influence des types texturaux

Si l'on considère maintenant une superposition de divers milieux texturaux, nous allons voir que les mouvements d'eau peuvent être largement affectés par les caractéristiques des sols en présence. Nous examinerons les

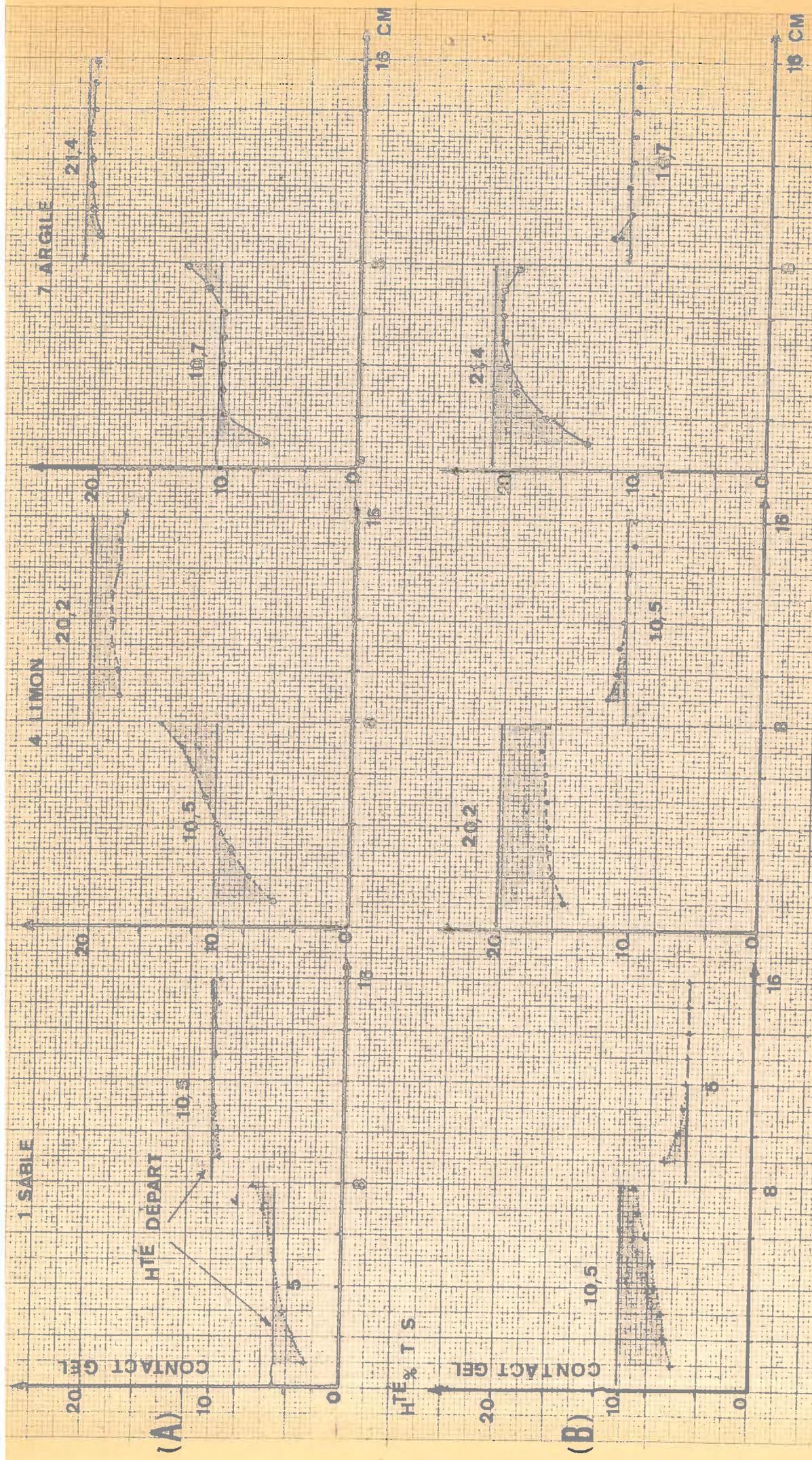


FIG. 27. SUCCION SUR 2 ELEMENTS DE SOL A 2 HUMIDITES INITIALES DIFFERENTES (2 H - GEL SEC) (O SEC/HDE (O HDE/SEC))

cas de deux et trois sols différents en contact les uns avec les autres.

b₁) Juxtaposition de sols pris à la capacité au champ

Réalisons avec les sols S, L, A (1, 4, 7) à la capacité au champ les 6 combinaisons possibles en les mettant en contact 2 à 2 : A/S, S/A ; L/S, S/L ; A/L, L/A, en deux éléments de longueur identique dans des colonnes de 16 cm ; effectuons une succion sur une des faces. La figure 28 indique les profils obtenus et montre que suivant l'ordre de superposition considéré et les types de sols concernés, les cessions d'eau sont très différenciées.

Entre les comportements extrêmes, les cessions d'eau montrent, après 8 h, une variation d'environ 50 %. Le limon placé sur argile ou sable (tableau 14) (colonnes 5-6) débite beaucoup plus que les autres systèmes, mais assure lui-même la plus grande partie du débit. De plus, il extrait davantage d'eau du sable que de l'argile. Pour les autres cas, on obtient une extraction finale à peu près équivalente, mais on remarque que l'argile superposée aux autres sols extrait leur eau (colonnes 2-1), alors que dans le cas contraire (colonnes 3-5) l'argile n'en cède que peu.

	1	2	3	4	5	6
Type de superposition	A/L	A/S	S/A	S/L	L/A	L/S
% H ₂ O total perdu	3,1	3,2	3,2	3,2	5,5	6,4
Rapport des pertes (comparaison par rapport à L/S (6))		50 %			86 %	100 %
Participation de chaque élément	A : 57 % L : 45 % S : 42 %	: 58 % : : : 42 %	: 11 % : : : 89 %	: : : 25 % : 75 %	: 13 % : 87 % : :	: : : 71 % : 29 %

Tableau 14 : perte d'eau des colonnes suivant les superpositions de sol et participation de chaque élément de terre (8 cm) (Sols 1-4-7-Capacité au champ)-Gel sec - Succion 8 heures

Globalement, nous pouvons établir le schéma suivant pour cet essai :

- Succion appliquée sur A : dessèchement de l'argile A, qui dessèche elle-même L ou S ;
- Succion appliquée sur L : L se dessèche fortement, dessèche peu A mais davantage S ;
- Succion appliquée sur S : S se dessèche, dessèche légèrement L et très peu A.

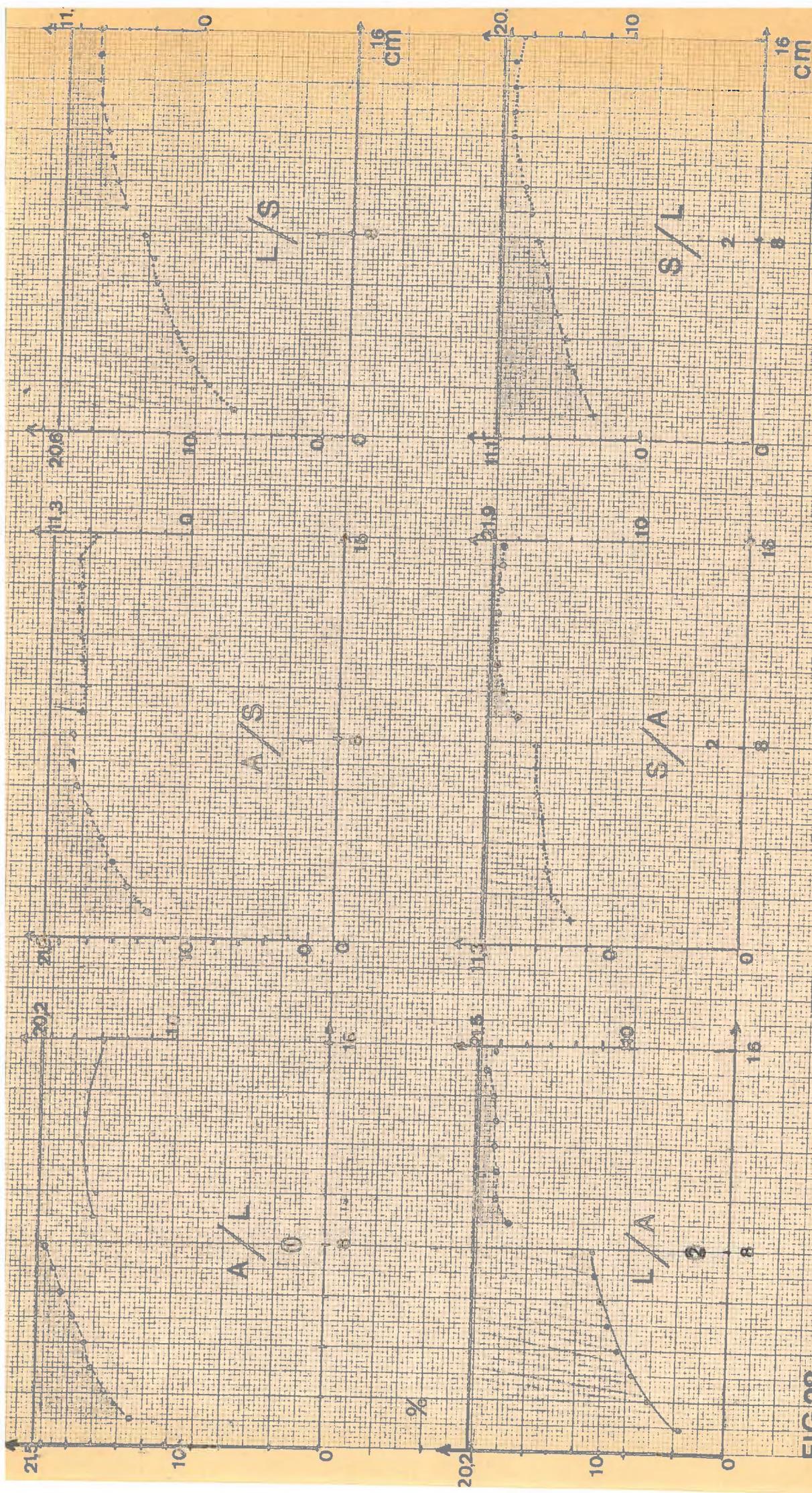


FIG.28. GESSION D'EAU AVEC DIVERS TYPES DE SUPERPOSITIONS (SOLS A LA C.C.) (SUCCION 8H) (GEL SEC RENOUVELE)

Les phénomènes se passent donc suivant les énergies de rétention existantes au départ pour chaque texture. Nous allons maintenant essayer de préciser ces divers mouvements à l'aide d'une autre expérience

b₂) Sols à différentes humidités en contact avec un sol argileux à la capacité au champ

Considérons la superposition du sol sableux 1 ou limoneux 4 à diverses humidités initiales, sur le sol argileux 7 à la capacité au champ. On constate, en effectuant une succion immédiate sur 1 ou 4, que les pertes globales d'eau du système sont d'autant plus fortes que l'humidité de la terre au contact du gel est élevée (figure 29) ; dans la plupart des cas, ce sont le limon et le sable qui assurent la majeure partie du débit, mais s'ils sont utilisés à de très faibles humidités, ils parviennent à établir une légère succion sur l'argile. Celle-ci fournit toutefois au total peu d'eau. Il s'avère donc qu'avec le type de superposition S/A ou L/A, l'argile ne peut être mise rapidement et fortement à contribution comme le montre le tableau 15. L'ordre d'extraction de l'eau se fait donc suivant la valeur des potentiels capillaires existant. Le sol argileux ayant le pF à la capacité au champ le plus élevé par rapport aux deux autres sols, offre le plus de résistance à l'entraînement de l'eau par succion.

Type de superposition	S/A					L/A				
Humidité initiale (sol argileux 7)	21,5 %					21,7 %				
% TS (sol 1 S et 4 L)	4 %	7 %	10,6 %	5,1 %	9,4 %	10,1 %	13,1 %	17,5 %	21,8 %	
Perte totale du système H ₂ O % TS	0,6	1,2	2,1	0,5	1,3	1,3	2,2	3,8	5,3	
Rapport des pertes en % du maximum réalisé	28	57	100	9	25	25	42	72	100	
Participation au débit total de l'élément argileux en %	40 %	14 %	6 %	80 %	38 %	27 %	16 %	14 %	9 %	

Tableau 15 : Superposition S/A et L/A. Participation de l'argile 7. Avec les 2 sols 1 et 4 superposés à différentes humidités initiales (gel sec-5h)

b₃) Mouvements d'eau en superpositions multiples de sols

Les expériences précédentes montrent la variabilité de l'extraction d'eau suivant la superposition envisagée. Si l'on réalise un système plus complexe à partir des trois textures fondamentales : sableuse, limoneuse et argileuse, représentatives des cas trouvés en milieu naturel, on peut s'attendre à des comportements voisins de ceux étudiés ci-dessus.

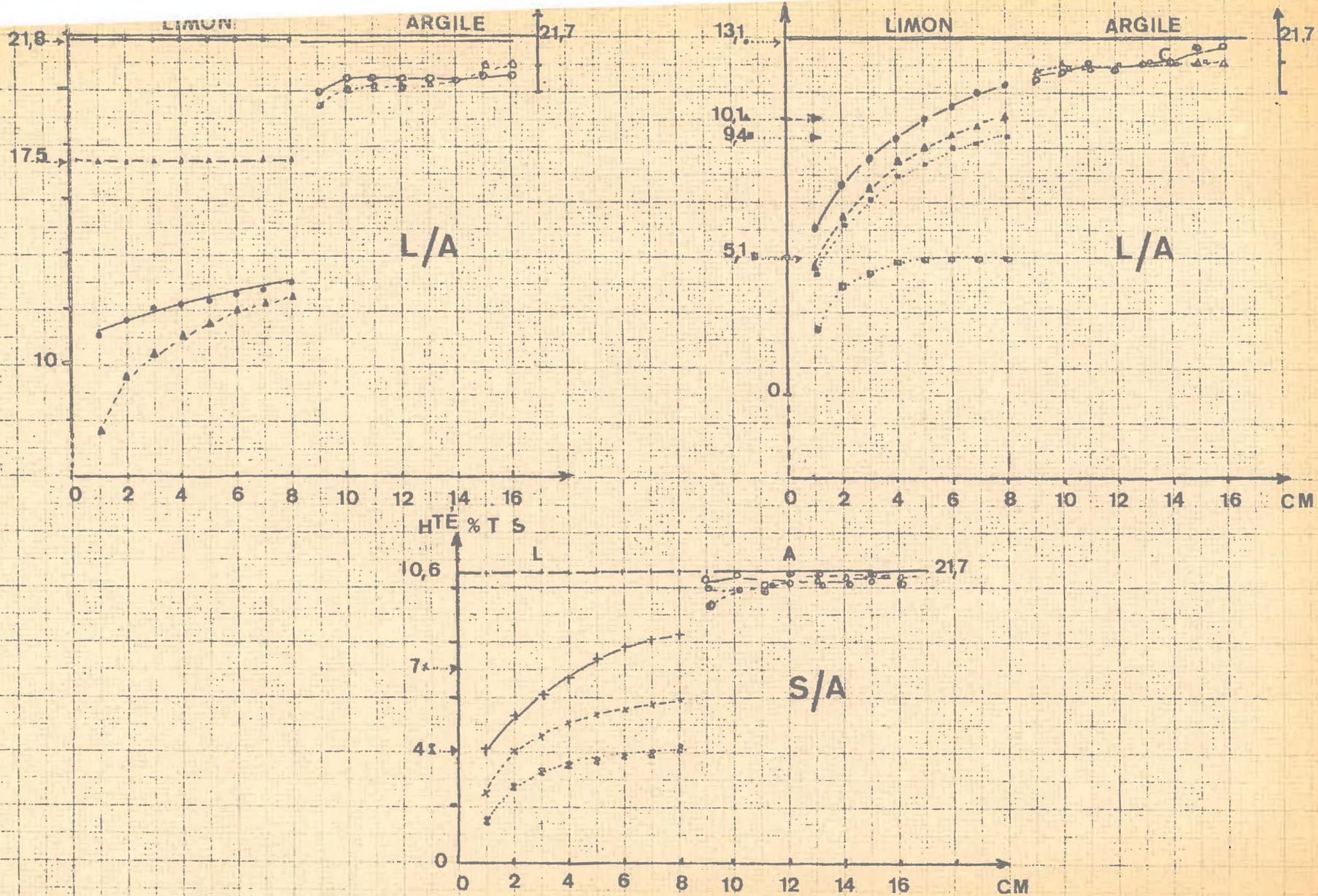


FIG.29. PROFILS HYDRIQUES. 2 SOLS (1 ET 4), A DIFFÉRENTES HUMIDITÉS INITIALES, SUPERPOSÉS AU SOL 7 A LA C C (SUCCION 5 HEURES - GEL SEC)

Les six combinaisons suivantes ont alors été retenues avec des colonnes de 15 cm et trois éléments de mêmes longueurs juxtaposés :

$$1 \begin{cases} A L S \\ A S L \end{cases} \quad 2 \begin{cases} L S A \\ L A S \end{cases} \quad 3 \begin{cases} S L A \\ S A L \end{cases}$$

La figure 30 indique les résultats obtenus. Les profils hydriques présentent une analogie manifeste avec ceux que nous avons rencontrés ci-dessus avec deux terres superposées. Il apparaît cependant que l'argile en situation médiane débite moins que le sol placé en dernière position (S ou L). Elle joue donc, dans ce cas, un rôle de transmission caractérisé par une faible évolution de son profil hydrique dans le temps.

La figure 31 représente les pertes totales obtenues avec les 3 systèmes. Il apparaît très nettement que le sol argileux débite peu s'il n'est pas en première position, au contact de l'absorbant. Du point de vue des débits totaux, les superpositions donnant le débit maximum d'eau sont celles où le limon est le premier élément tracteur, devant l'argile. Dans tous les cas, l'argile assure une succion importante sur les sols sous-jacents. Enfin, avec le sable comme élément de tête, les débits observés en 24 heures sont les plus faibles, selon toute apparence parce qu'il ne peut établir lui-même une forte succion. Si l'on effectue un essai, en plaçant côte à côte les sols sableux et argileux à la capacité au champ, sans réaliser d'autre contrainte extérieure, on remarque d'ailleurs qu'il s'établit une légère succion de l'argile sur le sol sableux.

Conclusion partielle.

L'étude de la circulation de l'eau non saturante dans les sols, réalisée à partir de la succion exercée par un gel de silice, modèle de racine, montre que le comportement des sols est très variable et dépend de nombreux facteurs : types texturaux, humidités initiales, intensité de la succion, température ; superposition de sols, etc... Généralement, le profil hydrique présente un gradient d'humidité d'ampleur plus ou moins grande suivant le sol et la nature des contraintes exercées ; enfin, l'humidité de la section de passage apparaît comme une notion importante, qui suggère l'existence d'une section utile efficace.

A partir de l'ensemble de ces résultats expérimentaux, nous tenterons ci-après de rechercher la nature des mécanismes physiques essentiels intervenant dans la dynamique de l'eau non saturante, et pour la gamme de l'eau utile aux végétaux.

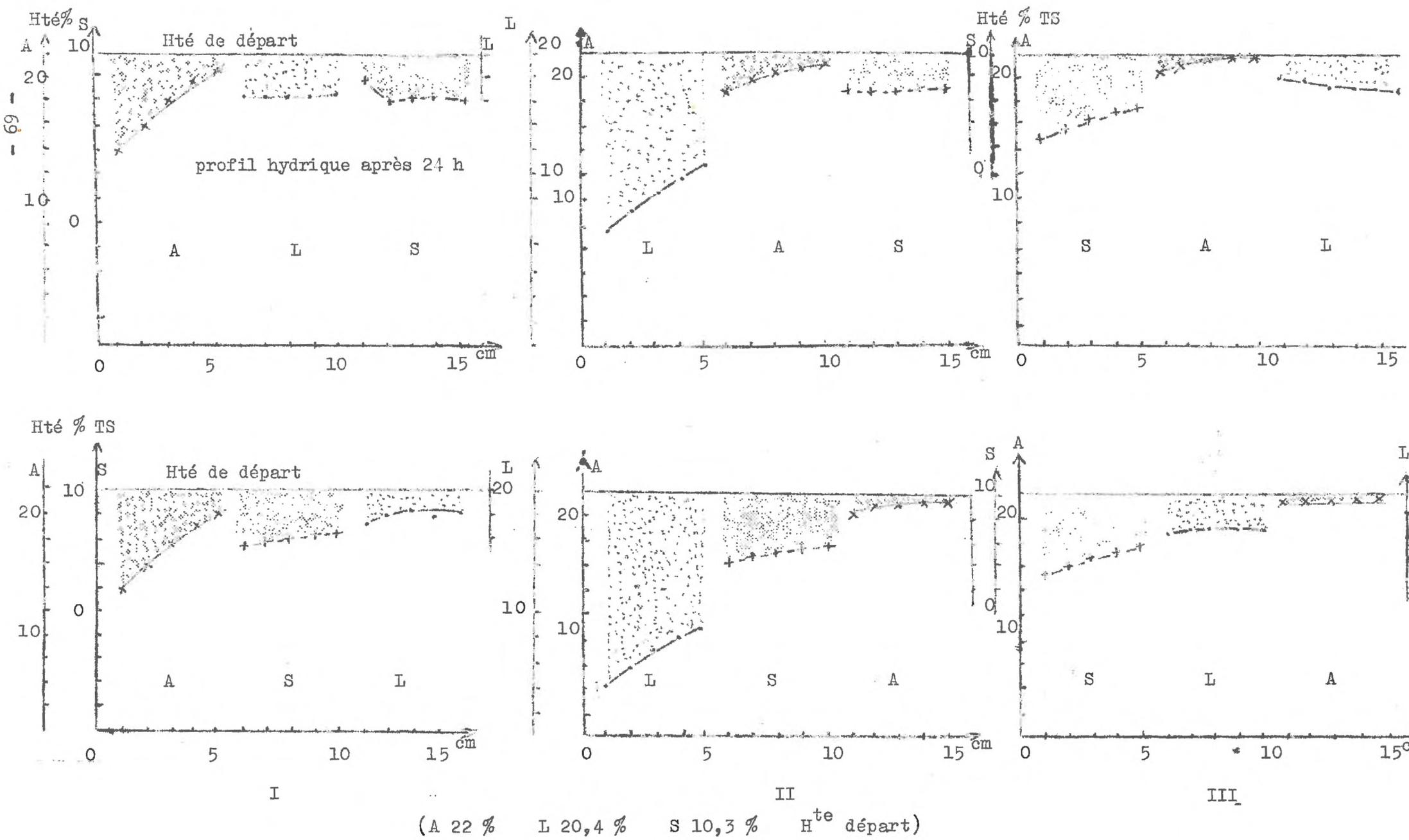


FIG. 30 : Succion (24 h) sur 3 sols superposés (gel sec)

Perte d'eau (G)

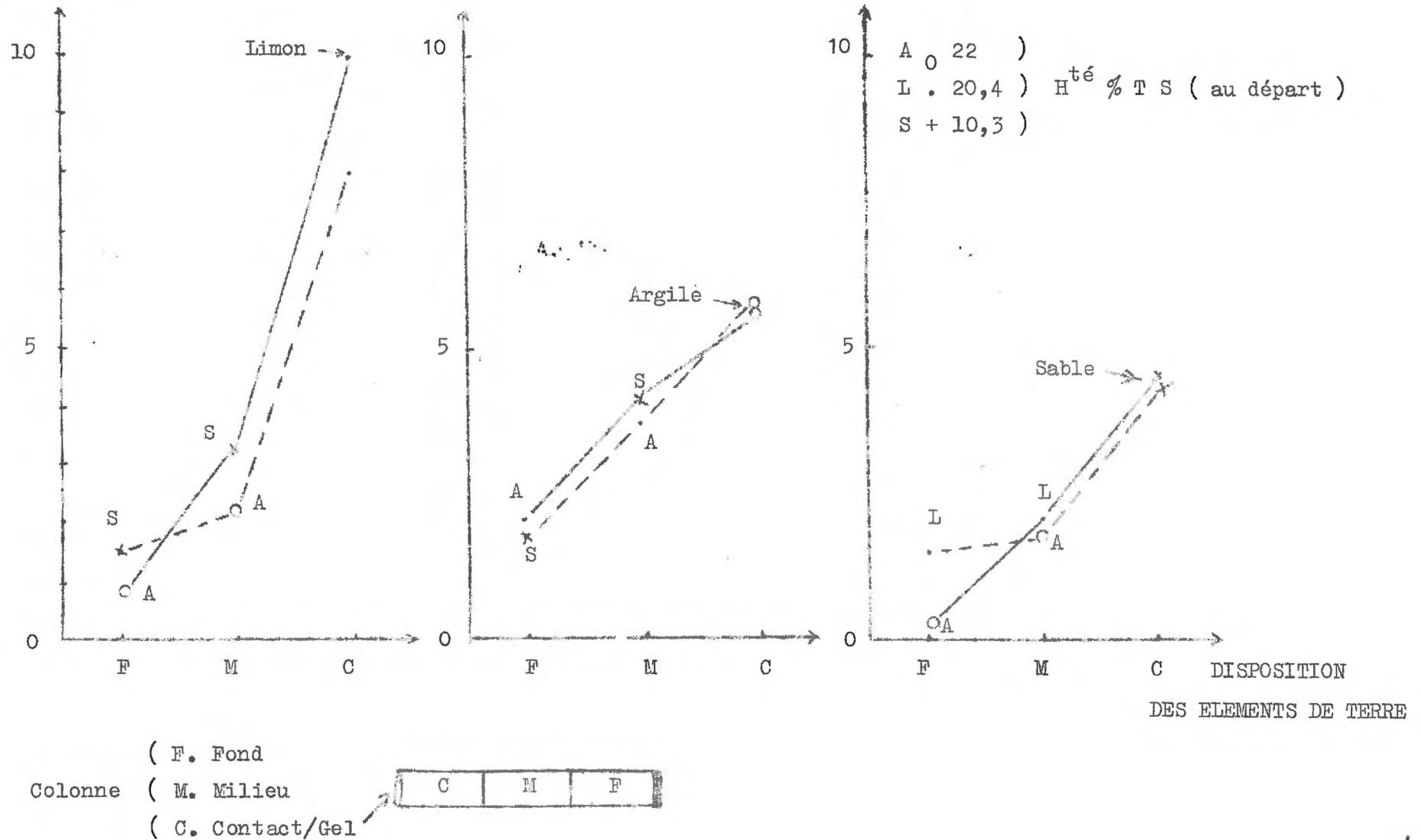


FIG. 31 : Influence du type de superposition sur la cession d'eau (suction 24 heures - gel sec)

II - INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

A - COMPORTEMENT GENERAL DU SYSTEME ETUDIE

Les données obtenues dans la partie précédente montrent que pour une contrainte de succion donnée, le comportement des sols est très variable et dépend de nombreux facteurs.

Il apparaît notamment des débits limites dont la valeur est d'autant plus faible que le sol est de texture fine ou, au contraire, très grossière. Cette liaison entre la capacité de cession d'un sol et sa texture met également en cause la configuration interne du milieu poreux. L'alimentation en eau des végétaux ne peut donc pas être envisagée d'une façon statique, en évaluant seulement la quantité d'eau du sol, retenue par des forces inférieures à celles que peut développer un végétal pour l'absorber. Il est nécessaire d'associer aux relations humidité-force de succion, une donnée exprimant la facilité avec laquelle les sols sont susceptibles de céder leur eau. Nous avons déjà vu que l'interprétation à partir des mécanismes de la diffusion s'est heurtée à des difficultés (HALLAIRE-HENIN, 1958 ; COLLIS GEORGE-HENIN-KELLY, 1963 ; SINE BENTZ 1963 ; HALLAIRE, 1964 ; BALLIF-FEODOROFF-HENIN, 1966 ; KELLY-HENIN, 1966 ; PUECH, 1966). Il n'est pas possible de ne retenir que le coefficient de conductivité λ ou de diffusivité D , du fait que ces données sont évolutives et difficiles à préciser (HALLAIRE-HENIN, 1958). Mais on peut essayer d'aborder le problème par une autre voie.

On observe généralement, à partir de la zone d'absorption, une augmentation de l'humidité avec la distance (HALLAIRE, 1953 ; GARDNER, 1960 ; COWEN, 1965 ; MORIZET, 1967 ; BLANCHET, 1968). Le fait est très net dans nos essais avec le gel de silice, sauf lorsqu'on réalise une vitesse de dessèchement très faible ; dans ce cas, le gradient s'atténue fortement. D'une manière générale, étant donné que les mouvements en phase vapeur sont négligeables aux humidités considérées, on peut estimer que le gradient observé, en relation avec le mouvement de l'eau, est provoqué par la succion appliquée. Il est donc nécessaire d'exprimer ce gradient d'humidité en terme de succion, en passant par l'intermédiaire d'une courbe de succion en fonction de l'humidité $S_c = f(H)$. Cette donnée peut alors être employée en partant, par exemple, de deux profils hydriques assez voisins pris au temps t_1 et t_2 . Il est aussi possible de mesurer le débit pendant le temps $\Delta t = t_2 - t_1$, en considérant la quantité d'eau écoulee à un niveau de référence donné z ; ce débit est la somme des pertes en eau des différents niveaux depuis la côte 0 jusqu'à la côte de référence z .

Si on admet que l'écoulement a lieu sous l'effet d'un gradient de succion, il est indispensable d'évaluer celui-ci en tenant compte, au niveau de référence considéré et aux temps t_1 et t_2 , des humidités successives obtenues h_1 et h_2 . Dans ces conditions, la valeur de la conductivité peut être obtenue en connaissant le gradient de succion et le débit. Le calcul doit être envisagé par rapport à la surface efficace intervenant réellement dans les mouvements d'eau, et non pas par rapport à la section totale occupée par la terre. Le rapport du débit par la surface efficace donne la dimension d'une vitesse, que l'on peut considérer comme étant la vitesse moyenne d'écoulement de la tranche d'eau considérée. Ces déductions reposent sur les principes exprimés par la loi de POISEUILLE, relative à l'écoulement de l'eau dans des tubes capillaires. En nous appuyant sur cette loi, nous essayerons d'interpréter les conditions de circulation de l'eau non saturante dans le sol, dans la gamme de l'eau utile aux végétaux.

B - CONSIDERATIONS SUR LE MILIEU POREUX

D'assez nombreux travaux ont fait appel aux notions de capillarité dans le cas de sols schématiques, et ont aussi montré les limites de ce type de démarche : (CHILDS-COLLIS GEORGE, 1950 ; DEMOLON, 1952 ; HALLAIRE, 1953 ; BAVIER, 1956 ; SOEIRO, 1961 ; FEODOROFF, 1965 ; SLATYER, 1967 ; VACHAUD, 1968). En effet, ce modèle est simplifié et ne peut pas prendre en compte toutes les interactions agissant au niveau eau-air-terre, la structure du sol étant nettement différente d'un réseau de capillaires (HENIN et al., 1960 ; GRAS, 1963-1969 ; KSENZEK, 1964 ; NOREL, 1965 ; MATHERON, 1967 ; PIES, 1970 ; HENIN et al., 1970). Il y a, effectivement, de nombreuses difficultés à assimiler le sol à un tel système : les sections de passage ont plutôt l'allure de polygones curvilignes irréguliers ou de triangles, plutôt qu'une allure circulaire. De plus, elles sont limitées par des parois convergentes ou divergentes comme le montrent des études microphotographiques ou les photographies au microscope électronique des minéraux constitutifs (KATCHINSKI, 1956 ; GRIM, 1953 ; KSENZEK, 1964 ; CHAUVETEAU, 1965 ; DANIOUX, 1969). Enfin, il est assez difficile d'évaluer correctement le nombre de capillaires par unité de surface. Aussi, certains auteurs (CHILDS-COLLIS GEORGE, 1950 ; MARSHALL, 1958) ont essayé d'établir des approches statistiques pour rendre compte des dispositions aléatoires des vides et des interactions entre les capillaires. Ils ont ainsi établi la probabilité d'une confluence pour qu'un capillaire de rayon donné r débouche sur un capillaire de rayon $r + dr$. Les résultats obtenus ont servi à étudier, notamment, la loi de variation de λ avec ψ .

Il est donc bien évident que le sol ne présente pas une configuration capillaire vraie ; en particulier, il ne convient de parler que de la porosité ouverte, c'est-à-dire de celle où les pores sont en communication avec l'extérieur (GRAS, 1969). En effet, le milieu poreux peut présenter de nombreux aspects canalicules interconnectés entre eux ou sans issue (doigt de gant) ; aboutissement de deux extrémités sur une même face, etc... En définitive, une partie

des canalicules en milieu poreux permettront la transmission et la circulation de l'eau (figure 32). On peut remarquer aussi qu'il peut y avoir des modifications du milieu, par suite des contraintes mécaniques internes qui s'exercent au cours de la dessiccation du sol (OSTRIKOV, 1969 ; SIFAOU, 1970).

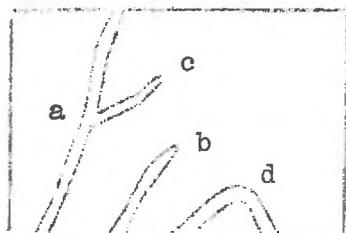


FIG. 32 : canalicules (a, d) et pures en cul de sac (b,c) (d'après GRAS, 1969).

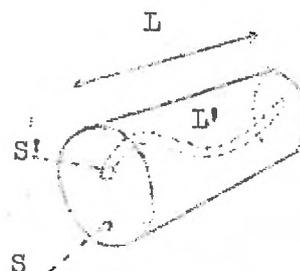


FIG. 33 : tortuosité d'une canalicule (d'après GRAS, 1969).

Par ailleurs, la tortuosité du milieu, autrement dit le trajet effectué par une molécule de fluide traversant le milieu poreux, peut être supérieur à la dimension globale de l'échantillon (figure 33) notamment dans le cas de canalicules inclinés par rapport à la surface. (GRAS, 1969 ; THIRRIOT et al., 1971). Si L est la longueur de l'échantillon et L' un trajet possible, la tortuosité est :

$$\text{Tortuosité } T = \frac{L'}{L} \gg 1$$

Considérons des milieux assez simples, par exemple l'empilement sur une hauteur L des sphères en arrangement cubique (figure 34). Si on prend le cas du trajet d'une molécule d'eau le long de n grains de rayon uniforme R, le trajet T est n fois la demi-circonférence :

$$T = n \times \pi R$$

Or, quel que soit le rayon des sphères utilisées cette relation reste valable, on a $T \gg L$. L'allongement du trajet est égal au rapport entre la demi-circonférence (voie incurvée) et le diamètre de la sphère (voie directe) d'où un rapport de $\frac{\pi}{2}$. Le trajet ne peut être égal à L que dans le cas d'une

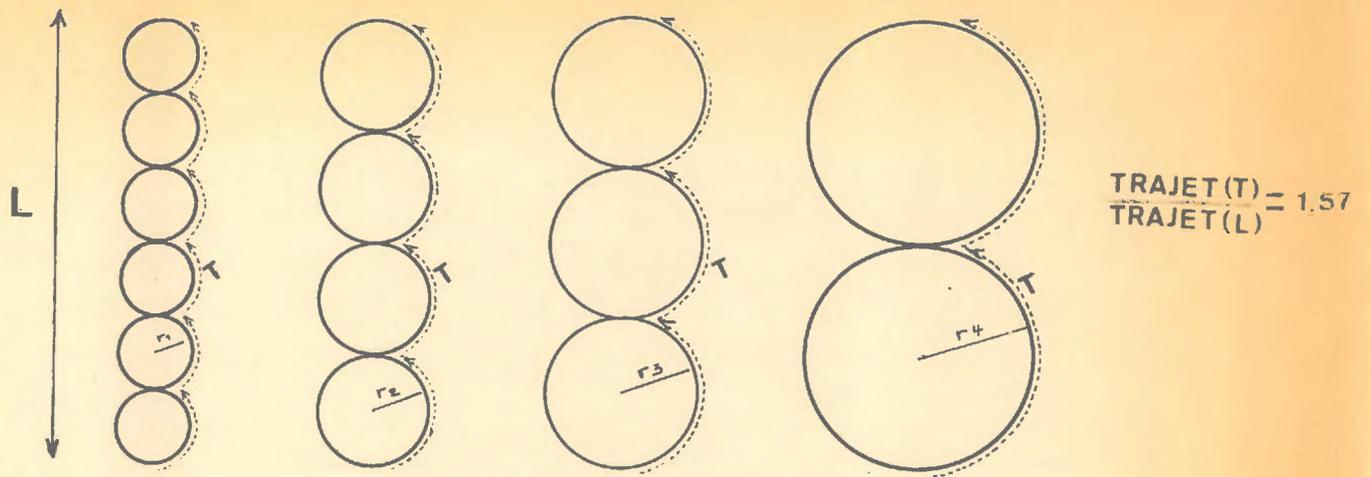


FIG.34. EXEMPLE DE TORTUOSITÉ - SPHÈRES EN ARRANGEMENT CUBIQUE

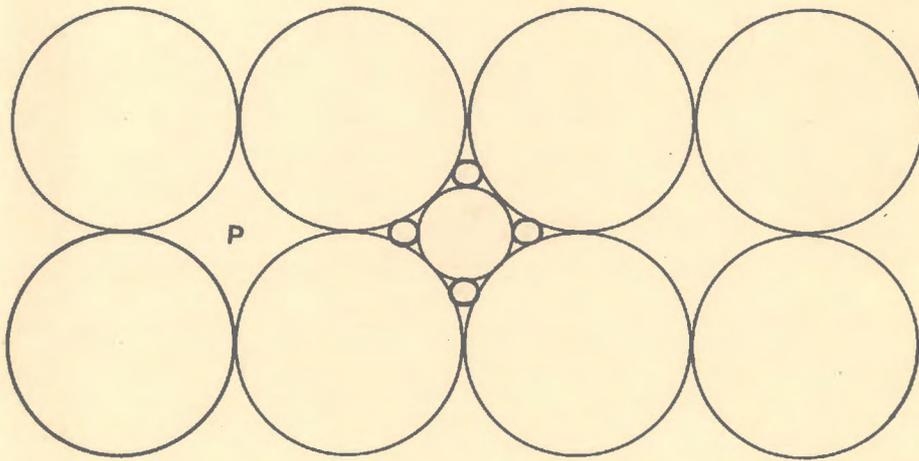


FIG.35. RÉDUCTION DE L'ESPACE POREUX

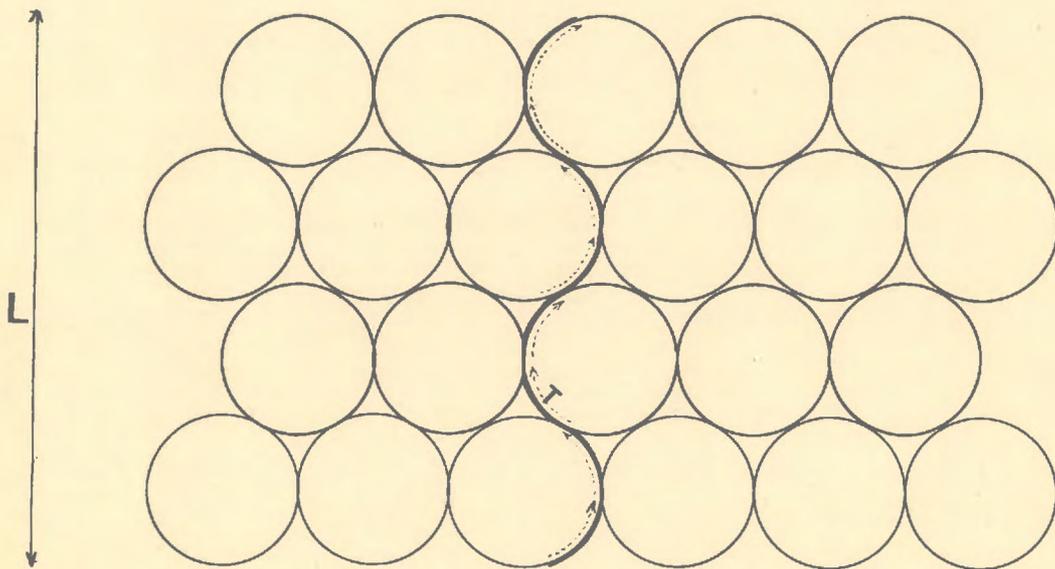


FIG.36. TORTUOSITÉ AVEC UN ARRANGEMENT COMPACT

circulation de l'eau dans le pore p laissé entre quatre grains en contact (figure 35). Cela supposerait qu'il n'y a pas de relations entre l'ensemble des pores de ce milieu interconnecté, or de toute façon, le long des grains, le mouvement du fluide ne peut être rectiligne (courbure des faces). Si dans ce milieu constitué de sphères uniformes, des sphères plus petites sont introduites dans les espaces vides, la valeur de la tortuosité sera fonction de la répartition finale des éléments granulométriques (figure 35). D'autre part, si l'on conçoit un autre type d'arrangement plus compact mais avec les mêmes sphères que précédemment, le trajet pourra être encore différent (figure 36). Enfin, le degré de connexion des pores, lié à la porosité totale et à leurs dimensions, augmente avec la finesse des canalicules. La difficulté de caractériser parfaitement le milieu poreux, du fait de son énorme complexité due surtout aux très nombreuses variantes de forme, autorise à tenter d'aborder son étude en simplifiant les représentations. Tous les types de sections possibles peuvent se rencontrer, il est préférable de les remplacer par des sections connues équivalentes, en utilisant la notion de rayon équivalent. Cette approche permet alors de rendre compte des résultats expérimentaux obtenus avec les milieux testés. L'étude du milieu poreux n'a donc de sens que dans le cadre d'un problème bien défini (GRAS, 1969). Enfin, ce modèle ne pouvant pas résoudre tous les cas rencontrés dans les mouvements de l'eau non saturante prise dans sa totalité, de nombreuses études ont été basées sur la thermodynamique et notamment la thermodynamique des processus irréversibles (HALLAIRE, 1964). Toutefois, il n'en reste pas moins vrai que pour une certaine gamme d'humidité l'approche par schéma capillaire reste valable (VACHAUD, 1968) et l'on peut du point de vue de l'écoulement parler d'un comportement capillaire et de rayon équivalent en envisageant en même temps les limitations de ce concept.

A partir de ces considérations, nous avons surtout examiné le comportement de trois sols de textures très différentes: 1 Lasbordes, 4 Plaisance et 7 Toulouse, pour vérifier les hypothèses précédentes. Rappelons que les tubes contiennent de la terre à une humidité de départ définie et à une porosité constante de 45 %, supposant un arrangement déterminé du milieu poreux. Après des temps d'extraction de l'eau variables par le gel de silice, en conditions isothermes, les colonnes sont découpées en tranches de un centimètre dont on détermine l'humidité pour établir les profils hydriques, et l'ensemble des données dérivées.

C - ANALOGIE AVEC UN COMPORTEMENT CAPILLAIRE DES SYSTEMES ETUDIES

L'application de la loi de POISEUILLE permet de déterminer le débit q de capillaires d'un rayon donné R . Elle est seulement valable dans le cas de l'écoulement laminaire, c'est-à-dire celui qui se produit toujours dans un tube de type capillaire, dans lequel passe un liquide de viscosité suffisamment grande. D'après cette formule, le débit q est proportionnel à la 4ème puissance du rayon R , à la différence de pression P entre les extrémités du tube et inversement proportionnel à la longueur L du tube et à la viscosité η du liquide.

$$q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{P}{L} \quad (1)$$

en unité C G S, q est exprimé en cm^3 , P en baryes, R en cm, η en poise (viscosité 0,01 pour l'eau à 20°).

La vitesse moyenne \bar{V} peut alors s'exprimer par la relation suivante, si S est la section de passage

$$\bar{V} = \frac{q}{S} \quad (2)$$

d'où en tenant compte de (1) et en faisant apparaître la surface

$$\bar{V} = \frac{\pi R^4 \Delta P}{\pi R^2 8\eta \Delta L} = \frac{R^2 \Delta P}{8\eta \Delta L}$$

SOIT

$$\bar{V} = \frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (3)$$

Si nous pouvons évaluer \bar{V} et $\frac{\Delta P}{\Delta L}$, nous pouvons connaître R^2 , et c'est ce que nous avons tenté de déterminer. Mais, dans le cas d'un sol et pour la surface totale de passage, on est amené à imaginer l'existence de n capillaires par unité de surface. La vitesse sera donc le quotient du débit du filtre par la section effectivement active.

Considérons maintenant un intervalle de temps assez court ; le débit total q observé dans le sol est la somme des débits de tous les capillaires existants, de rayons décroissants $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$.

$$q = \frac{\pi \Delta P}{8 \eta \Delta L} \sum (R_1^4 + R_2^4 + R_3^4 + \dots + R_n^4) \quad (4)$$

La vitesse d'écoulement dépendant de R^2 et le débit de R^4 , il est peu probable que le débit écoulé dans les capillaires les plus petits ait une influence très sensible sur le débit mesuré ; celui-ci peut alors être attribué dans un laps de temps assez court à une classe préférentielle de rayon moyen R_m (tableau 16)

Valeurs de R en cm						
$R = 10^{-4}$ cm	2	1,5	1	0,70	0,3	0,01
$R^2 = 10^{-8}$	4	2,25	1	0,49	0,09	0,000 1
$R^4 = 10^{-16}$	16	5,06	1	0,24	0,008 1	0,000 000 01

Tableau 16 Comparaison des valeurs de R^2 et R^4 par rapport au rayon R

Le débit peut alors en première approximation être celui de n capillaires, de rayon équivalent moyen R_m . Le problème revient donc à savoir quelle est la taille des capillaires qui ont fonctionné, et leur nombre par unité de surface, dont dépend le débit. Pour le milieu étudié, il faut donc connaître la section utile S_u , participant effectivement à la circulation de l'eau, nous aurons alors en considérant le dispositif comme un filtre

$$q = S_u \times V = q_c \times n \quad (5)$$

avec

V = vitesse

q_c = débit d'un capillaire

n = nombre de capillaires

R_m = rayon moyen du capillaire

Pour calculer cette section utile dans le cas d'un sol non saturé, il faut d'abord tenir compte de la section utile maximale $S_{u_{max}}$, fonction de la section totale S du dispositif utilisé et de la porosité du milieu étudié P_0 . Il faut considérer également le degré de saturation, donné par le rapport de la quantité H_t d'eau existante à un moment t à la quantité H_{max} qui sature le milieu poreux.

$$S_{u \max} = S \times P_o \times \frac{H_t}{H_{\max}} \quad (6)$$

On peut alors estimer qu'entre deux temps voisins, t_1 et t_2 , la section utile active $S_{u \text{ act}}$ est proportionnelle à l'écart entre les humidités h_{n_2} et h_{n_1} à la section N

$$S_u = S \times P_o \times \frac{h_{n_1} - h_{n_2}}{H_{\max}} \quad (7)$$

Enfin, les profils hydriques étant en cours de dessèchement, nous évaluerons la différence de succion $\Delta S_c = \frac{\Delta P}{\Delta L}$, en nous reportant sur la courbe $S = f(H)$ prise en dessiccation, et en considérant pour la section considérée la différence de succion entre les points h_{n_1} et h_{n_2}

L est la longueur de la colonne soumise à la succion. En tenant compte de (5) on a la relation suivante :

$$q = \frac{\pi R_m^4}{8\eta} \times \frac{S_u}{\pi R_m^2} \times \Delta S_c \quad (8)$$

d'où on peut tirer R en tenant compte des valeurs de ΔS_c , de S_u et de q

$$R_m^2 = \frac{8\eta q}{\Delta S_c \cdot S_u}$$

Il s'agit alors de savoir si les approximations faites en confondant une variation réelle, bien que petite, avec une différentielle, en évaluant indirectement la succion à partir de l'humidité, et enfin en admettant que le débit total est essentiellement constitué par la tranche d'eau qui s'est écoulée, sont suffisamment proches de la réalité. Il existe une possibilité de vérifier la cohérence du système d'interprétation en comparant le rayon des capillaires, estimé par le débit et la vitesse d'écoulement, avec les valeurs déduites de la loi de JURIN, si nous faisons l'hypothèse qu'à chaque valeur de p^F correspond un rayon équivalent de capillaire.

$$R = \frac{2A}{pgH} \cos \alpha$$

ou A = tension superficielle

p = densité du liquide

g = accélération de la pesanteur

α = angle de raccordement

H = hauteur maximale d'ascension capillaire.

En tenant compte des données précédentes nous avons porté sur la figure 37 en ordonnée, les valeurs du rayon R calculées avec la loi de JURIN, et en abscisse les valeurs estimées avec la loi de POISEUILLE. Les résultats portent sur les trois sols de texture limoneuse (Plaisance), sableuse (Lasbordes), et argileuse (Toulouse). Les données sont obtenues sur deux profils successifs entre la deuxième et la troisième heure de succion. On peut constater, comme le montre la droite de régression, qu'il existe un certain accord entre les valeurs calculées et estimées ($r = 0,908$). Ces résultats sont donc assez satisfaisants ; en effet, les sols utilisés sont texturalement très différents et les humidités correspondant aux diverses succions sont très variées ainsi que les gradients d'humidité. Par ailleurs, lorsqu'on considère l'écoulement d'un fluide dans un tube de section non circulaire et en milieu lacuneux, on utilise des coefficients correcteurs : un coefficient de forme dépendant de la nature de la section du tube ; dans le cas d'une section circulaire, on est ramené à la formule de POISEUILLE, mais pour des sections carrées ou triangulaires, le coefficient est différent. On utilise également un coefficient d'orientation pour exprimer le mouvement de l'eau dans un canal non rectiligne (HALLAIRE, 1953). On remarque donc qu'il est difficile pour un milieu poreux aussi complexe que le sol de déterminer aisément ces paramètres. Aussi les résultats trouvés demeurent valables malgré les imprécisions de mesures, et les approximations introduites dans notre méthode de calcul.

Ces données nous conduisent donc à caractériser la capacité d'un sol à céder son eau à un absorbant, que nous appellerons la "cessibilité", par la courbe de distribution des pores du sol fonctionnels aux différents stades. La méthode de l'écoulement étant relativement longue, il est préférable de se référer directement à une courbe de succion.

D - CESSIBILITE DE L'EAU DU SOL

Si nous considérons que le débit d'eau observé est le résultat d'une circulation au sein d'un réseau à "comportement capillaire" nous sommes amenés à aborder le problème de la "cessibilité", en déterminant les classes de pores successivement fonctionnelles. Nous avons, en effet, remarqué que les sols limoneux présentaient des débits supérieurs à ceux des sols argileux, pendant un temps assez long et pour des humidités comparables (capacité au champ par exemple). Or, si nous comparons les trois textures fondamentales : sableuse 1,

r_{JURIN}

$r = 0,908 (HS)$
 $Y = 1,355 X + 0,066$

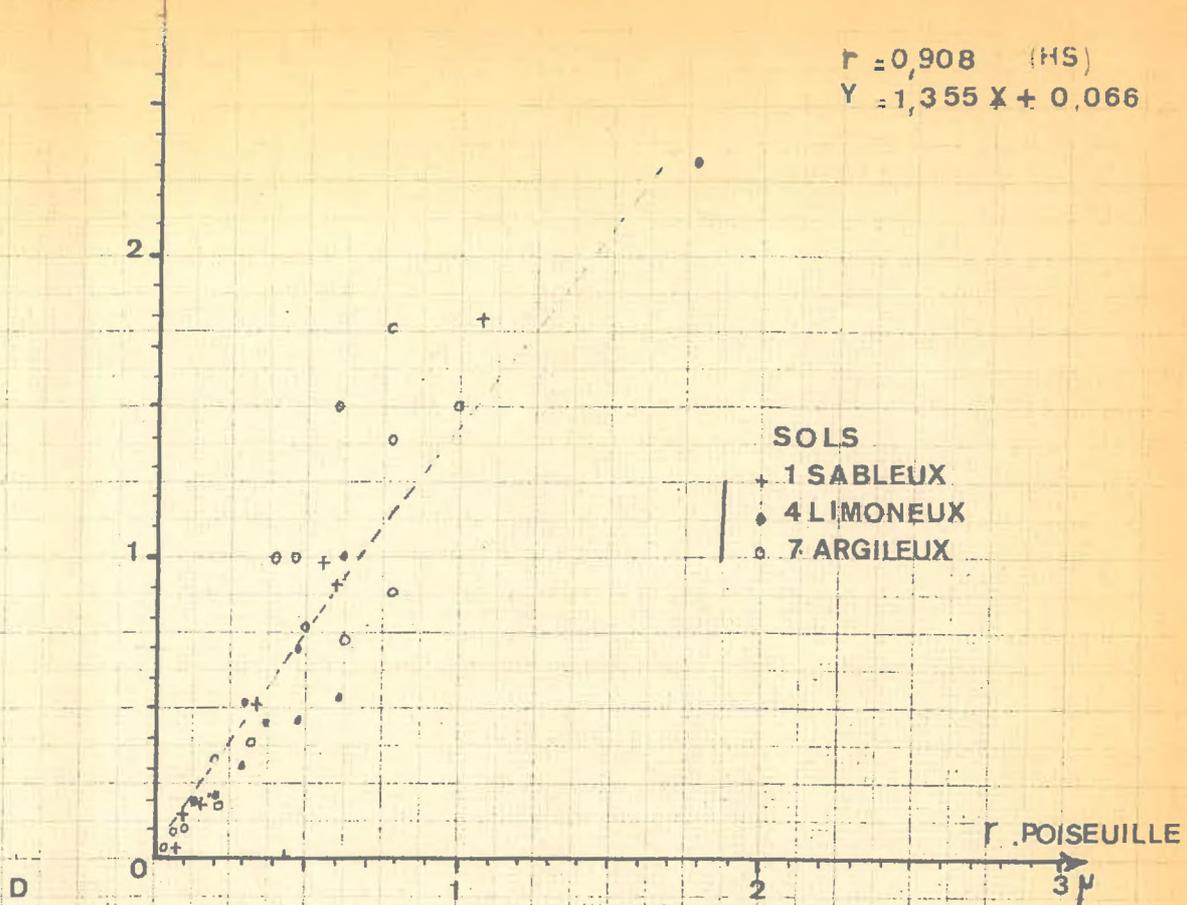


FIG. 37. COMPARAISON ENTRE LA 2 ET 3 HEURE DE SUCCION DES RAYONS EQUIVALENTS THEORIQUES (JURIN) ET OBTENUS PAR ECOULEMENT (POISEUILLE). CAS DE 3 SOLS A DIFFERENTES HUMIDITES INITIALES

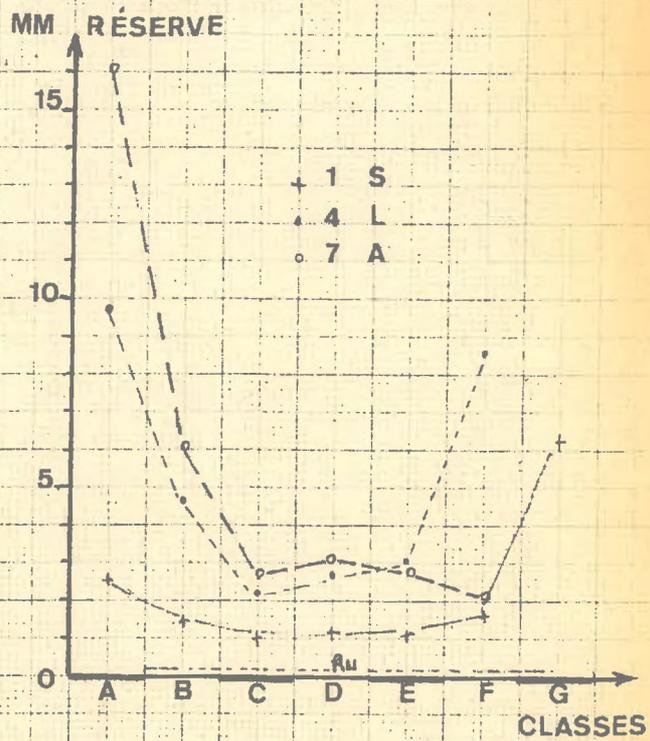
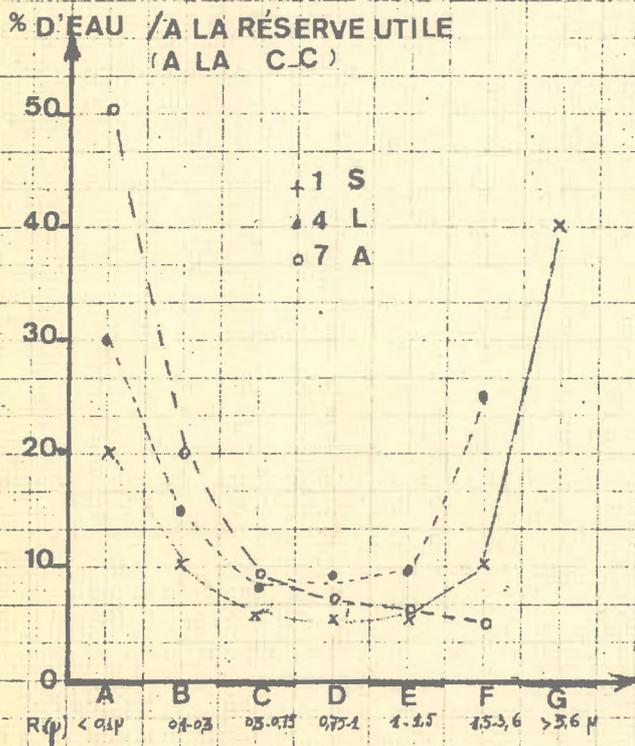


FIG. 38. COMPARAISON POUR 3 SOLS DU % D'EAU RETENU, PAR RAPPORT A LA CAPACITE AU CHAMP, DANS CHAQUE CLASSE DE CAPILLAIRES

FIG. 39. RESERVE D'EAU DANS CHAQUE CLASSE DE CAPILLAIRES

limoneuse⁴ et argileuse⁷, nous notons que les rayons équivalents initiaux R de ces sols pris à la capacité au champ, ne sont pas identiques du fait des grands écarts des forces de rétention. Le classement est alors le suivant :

$$R_{S_1} > R_{L_4} > R_{A_7}, \text{ d'où des débits instantanés différents au début de la succion.}$$

Mais la perte totale dans le temps dépend de la surface efficace en jeu à chaque instant, et par conséquent du nombre de pores actifs dans chaque type de sol. Il est donc nécessaire d'établir des classes de capillaires, dont les dimensions donnent des comportements assez homogènes en débit. Les potentialités de chaque sol peuvent être comparées en prenant, par exemple, la quantité d'eau contenue dans chaque classe exprimée en pourcentage par rapport à la capacité au champ, prise comme base de référence. La figure 38 montre les caractéristiques des trois sols étudiés (1 - 4 - 7). Il apparaît que les réserves hydriques pour le sol sableux sont élevées dans les pores de grand rayon et beaucoup plus faibles dans les autres classes. Pour le sol limoneux, la réserve est importante dans les pores de rayons relativement forts, alors que l'argile n'a que peu de réserves dans ces domaines (figure 39).

Si nous tenons compte des réserves totales et des réserves se trouvant dans chaque classe, nous pouvons, dans des conditions standards de contrainte, obtenir le temps relatif mis pour vider une classe donnée de capillaires (tableau 17). La cession d'eau sera potentiellement très rapide dans le cas des sols sableux et beaucoup moindre dans le cas des sols argileux, du fait que la vitesse est fonction du carré du rayon du pore, et le débit de la puissance quatrième de ce même rayon. Cette approche permet alors d'avoir une représentation schématisée de la résistance à la dessiccation. Ce schéma ne peut, cependant, être considéré qu'à partir du moment où les classes de capillaires actives deviennent équivalentes dans les divers sols. Or, à ce moment, si on compare les sols 1 - 4 - 7 par exemple, le sol sableux 1 a perdu 45 % de son eau et le limon (4) 13 %.

Classe des capillaires (en μ)	F : 1,5 - 3,6	E : 1 - 1,5	D : 0,75 - 1	C : 0,30 - 0,75	B : 0,1 - 0,3
Sol sableux 1	: 1	: 1	: 1	: 1	: 1
Sol limoneux 4 ...	: 5,3	: 2,9	: 2,9	: 2,2	: 2,7
Sol argileux 7 ...	: 1,4	: 2,9	: 2,9	: 2,3	: 3,9

Tableau 17 Temps relatif mis pour vider une classe de capillaires pour des gammes d'humidités analogues (sol sableux pris comme référence) et en tenant compte de l'importance des réserves.