

Ecole Nationale Supérieure Agronomique  
de Montpellier

**DIPLOME D'AGRONOMIE APPROFONDIE  
SCIENCE DU SOL ET DU BIOCLIMAT**

*mention*

**UTILISATION AGRICOLE DE L'EAU  
MAITRISE DU MILIEU ET DE LA PRODUCTION**

**CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE D'UN SOL  
ET MESURE DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE  
EN VUE DE L'ETALONNAGE D'UN MODELE INFORMATIQUE**

*Cas d'une culture de maïs sur andosol au Nicaragua*

*Thierry FELLMANN*

Jury : MM. CALVET  
GOENAGA  
LUC  
PERRIER  
ELDIN

Novembre 1987

J'adresse tous mes remerciements à :

- ( - M. Michel ELDIN, mon maître de stage qui m'a guidé tout au long de ce travail.
- M. Jean Paul LUC, Directeur de ma spécialisation à l'ENSAM.
- MM. Philippe VAUCHEL et Christian PRAT, de l'ORSTOM.
- MM. Florent MARAUX et Bruno RAPIDEL , pour l'aide et les conseils sur place.
- Sylvie ROBIN, avec qui j'ai réalisé la plupart des expérimentations.
- Toute l'équipe de l'IRENA, pour son accueil chaleureux, et plus particulièrement Marcos, Lesbia et Blanquita, du département d'agroclimatologie, ainsi que Moises et Norman, pour leur aide précieuse sur le terrain.
- Et pour le sprint final, Bellou, Bulle, Diego, Pag, Pit, Foireux, George et Karim.

## RESUME

Cette étude a pour but de confronter les consommations en eau d'une culture de maïs, mesurées sur le terrain, à celles simulées par un modèle informatique.

Les termes du bilan hydrique ont été déterminés par des méthodes neutroniques et tensiométriques.

Les flux en profondeur ont été mesurés à partir de résultats sur les conductivités hydrauliques du sol, obtenues par un essai-drainage interne.

La caractérisation hydrodynamique des sols, ainsi que le suivi de la culture de maïs ont fourni la plupart des paramètres d'entrée du modèle.

A partir de ces résultats, quelques simulations de bilan hydrique ont permis de vérifier la validité du modèle.

MOTS CLES : Simulation  
Bilan hydrique  
Drainage interne  
Maïs  
Nicaragua

## SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION .....	1
LE NICARAGUA .....	2
LE PROJET ORSTOM .....	4

### PRESENTATION DE L'ETUDE

#### I. LE SITE EXPERIMENTAL

I.1/ Localisation, caractéristiques générales .....	6
I.2/ Caractéristiques climatiques .....	6
I.3/ La station expérimentale du projet .....	7
I.3.1 Description	
I.3.2 Les sols	

#### II. PROTOCOLES DES ESSAIS

II.1/ Objectifs .....	9
II.2/ Détermination de $K(\theta)$ par la méthode de drainage interne .....	9
II.2.1 Principe de la méthode	
II.2.2 Dispositif expérimental	
II.3/ Mesure des termes du bilan hydrique .....	12
II.3.1 Objectifs	
II.3.2 Dispositif expérimental	
II.3.3 Déroulement de l'essai	
II.4/ Détermination du point de flétrissement .....	14
II.5/ Mesure de l'évapotranspiration maximale .....	14

## RESULTATS

I. ETALONNAGE DES TUBES DE SONDE .....	15
II. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DU SOL	
II.1/ Traitement des données. Calculs des stocks et gradients de charge .....	16
II.2/ Calcul de K .....	18
II.3/ Interprétation des résultats et critiques ...	19
II.3.1 Calcul de K	
II.3.2 Modélisation des courbes $K(\theta)$	
II.3.3 Quelques aspects concernant l'infiltration	
II.4/ Les courbes $h = f(\theta)$ .....	23
III. MESURE DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE	
III.1/ Méthode de traitement des données .....	23
III.2/ Résultats .....	26
III.3/ Remarques et critiques .....	26
III.3.1 Précision	
III.3.2 Données manquantes	
III.3.3 Critiques	
IV. CARACTERISATION DES RESERVES DU SOL	
IV.1/ La réserve utile .....	28
IV.1.1 La capacité de rétention	
IV.1.2 Le point de flétrissement	
IV.1.3 La réserve utile	
IV.2/ Estimation de la réserve facilement utilisable	31

## SIMULATION PAR LE MODELE DE BILAN HYDRIQUE

I. MODELE .....	34
II. SIMULATION ET AJUSTEMENT DU MODELE	
II.1/ Objectifs .....	34
II.2/ Les paramètres d'entrée .....	34
II.2.1 Paramètres climatiques	
II.2.2 Paramètres édaphiques	
II.2.3 Paramètres cultureux	
II.2.4 Paramètres d'initialisation	
II.3/ Les indicateurs de l'ajustement .....	37
II.4/ Première simulation .....	38
II.4.1 Résultats	
II.4.2 Interprétation	
III. VALIDITE DES PARAMETRES D'ENTREE : DEUXIEME SIMULATION	
III.1/ Modification des paramètres .....	40
III.2/ Résultats et interprétations .....	42
CONCLUSION .....	44

## INTRODUCTION

En 1985, l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) et l'IRENA (Instituto Nicaragüense de Recursos Naturales y del Ambiente) ont signé un accord de coopération sur un projet de conservation et d'utilisation des sols du bassin sud de Managua.

Dans le cadre de ce projet, les travaux réalisés par les agroclimatologues permettent de fournir des données objectives pour la mise en valeur agricole du bassin.

Cette étude a été réalisée au sein du département agroclimatologique de l'IRENA. Elle a pour objet principal la mesure des termes du bilan hydrique d'une culture de maïs afin d'étalonner un modèle de simulation de ce bilan hydrique.

## LE NICARAGUA

### 1. Présentation.

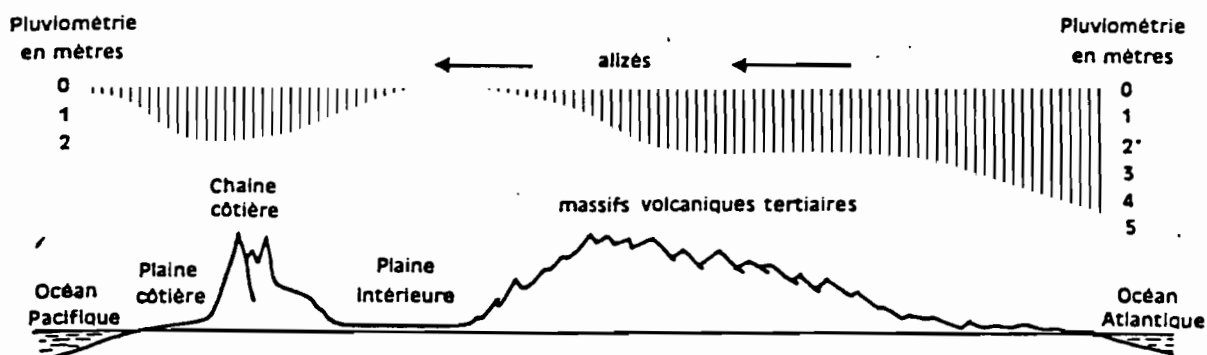
Le Nicaragua est situé en Amérique centrale entre les 11ème et 15ème parallèles nord et les 83ème et 88ème méridiens ouest.

Avec une superficie de 130 000 km<sup>2</sup>, c'est le plus grand pays de l'Amérique centrale.

Sa population est approximativement de 3 millions d'habitants, vivant en grande majorité sur la côte pacifique.

### 2. Relief et climat.

Le pays est divisé en trois ensembles géographiques distincts, caractérisés par leur relief et leur climat.



\* La plaine Pacifique, traversée par une chaîne volcanique côtière, bénéficie d'un climat tropical à deux saisons des pluies. La pluviométrie varie de 500 à 1500 mm. La saison des pluies ("Hiver") dure de Mai à Octobre et est entrecoupée par une courte saison sèche ("Veranillo") plus ou moins marquée en Juillet.

\* Les versants pacifiques intérieurs et la chaîne volcanique centrale sont caractérisés par un climat subtropical de montagne. La saison des pluies (1500 à 2000 mm) dure de Mai à Décembre, le Veranillo est peu marqué.

\* La côte Atlantique, avec 2000 à 3000 mm de précipitations de Mai à Février possède un climat de type tropical à une saison des pluies.

\* La pointe sud-est du pays bénéficie d'un climat équatorial avec des précipitations allant jusqu'à 5000 mm.

Les vents dominants sont les alizés nord-est de Novembre à Février et sud-est en saison sèche.

### 3. Production agricole.

90 % des exportations en 1983 proviennent du secteur agricole. Partent à l'exportation essentiellement: café, banane, coton, canne à sucre, viande. Pour la consommation intérieure sont produits: maïs, haricots rouges, riz, légumes, viande (bovins, porcins, volailles). Le maïs constitue l'aliment de base du peuple nicaraguayen.

## LE PROJET ORSTOM AU NICARAGUA

### 1. Nature et objectifs.

Il s'agit d'une étude complète d'écosystème réalisée dans le cadre de l'aménagement du bassin versant sud de Managua: "la Cuenca Sur". La superficie du bassin est de 850 km<sup>2</sup>.

Le projet est réalisé en collaboration avec l'Institut Nicaraguayen des Ressources Naturelles et de l'Environnement (IRENA).

### 2. Activités.

Les activités sont réparties en trois disciplines:

\* L'hydrologie étudie les pluies, débit et érosion au niveau de microbassins représentatifs dans le but de modéliser les transferts et érosions à partir des pluies et débits. L'objectif est d'orienter la politique d'aménagement du bassin en matière de dispositif anti-érosif, d'évaluer les ressources en eau et d'obtenir des données permettant un bon dimensionnement des ouvrages d'évacuation des crues vers le lac de Managua.

\* La pédologie est orientée vers la détermination des propriétés et du fonctionnement hydrodynamique des sols à l'échelle du bassin. Pour cela, les pédologues travaillent sur une cartographie pédologique du bassin, ainsi que sur des essais d'infiltration avec un simulateur de pluie. L'étude d'un horizon induré d'origine volcanique (talpetate) est menée conjointement.

\* L'agroclimatologie: les agroclimatologues travaillent à la calibration d'un modèle de production du maïs à partir duquel, par simulation, sont évaluées diverses possibilités concernant le choix des variétés, le calage du cycle cultural, les techniques culturales, l'irrigation. Par ailleurs, ce modèle constitue la base d'un zonage agropédoclimatique précisant les potentialités agricoles de ce bassin.

L'objet de mon travail est de calibrer un modèle de bilan hydrique (L'HOMME - ELDIN, 1985), qui sert de sous-modèle au modèle de production, mais aussi -plus directement- à définir les termes d'une gestion rationnelle de l'eau dans cette région.

Le maïs a été choisi pour les raisons suivantes :

- il est largement cultivé au Nicaragua
- il entre dans de nombreuses rotations (coton, soja, haricot)
- le gouvernement sandiniste veut développer la culture des grains de base autour de Managua pour pallier en partie aux problèmes d'approvisionnement de la capitale

### 3. Moyens.

Pour réaliser ce suivi, une parcelle expérimentale a été installée dans une pépinière de l'IRENA à proximité de Managua: le vivero Julio Canales.

Cette parcelle est équipée par:

- une station automatique CIMEL de saisie de données climatiques (pluie, rayonnement global, rayonnement net, température sous abri, température du sol, indice actinométrique, humidité, vent...)
- huit lysimètres drainants répartis par paires (cf description paragraphe)
- un système d'irrigation mobile

Outre ce matériel installé, on dispose également de:

- tensiomètres Nardeux
- sondes solo 25 Nardeux
- tubes de sonde ...

Le site a été choisi pour:

- sa proximité de Managua
- sa représentativité de l'ensemble de la partie basse du bassin versant et de nombreuses zones de la partie occidentale de l'Amérique Centrale.
- sa potentialité agricole élevée
- sa disponibilité en main d'oeuvre, eau et matériel agricole
- une pente des terrains presque nulle .

## PRESENTATION DE L'ETUDE

### I. LE SITE EXPERIMENTAL: Le vivero Julio Canales.

#### I.1 LOCALISATION. CARACTERISTIQUES GENERALES.

Le vivero Julio Canales est une pépinière appartenant à l'IRENA. Il est situé dans la partie basse de la Cuenca Sur à quelques kilomètres à l'est de Managua, près du village de Cofradia.

Cette partie du bassin est très plane exception faite de quelques coulées de lave des volcans voisins.

Les agriculteurs y pratiquent la monoculture du coton irrigué en saison sèche en rotation avec le maïs et le sorgho, cultivés en saison des pluies.

#### I.2 CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DE LA REGION.

Le bassin sud de Managua présente les caractéristiques climatiques suivantes: (Zonification Agroclimatologique de la zone pacifique, étude MIDINRA Avril 1987)

- Précipitations annuelles entre 1000 et 1500 mm.
- Distribution relativement régulière de la pluie.
- Veranillo peu marqué mais existant.
- Températures élevées. Moyenne à Managua: 26,1°C en décembre et 29,4°C en mai.

La saison 1987 a été marquée par:

- Un retard des pluies ne permettant les semis qu'à la fin du mois de juin.
- Un mois de juillet très pluvieux (400 mm).
- Une saison sèche bien marquée du 5 au 25 août (19 mm).

Voir les données climatiques, en annexe 2.

### I.3 LA STATION EXPERIMENTALE DU PROJET.

#### I.3.1 Description.

L'IRENA a mis à la disposition du projet une parcelle expérimentale de 130 x 160 m. (plan en annexe 3)

La partie Est de la parcelle accueille la station météorologique CIMEL ainsi que les 8 lysimètres et leurs 4 anneaux de garde de 50 x 55 m.

Le reste de la parcelle est réservée aux différents essais réalisés au cours de l'année: Bilan hydrique - Drainage interne - Détermination du point de flétrissement - Essais d'irrigation.

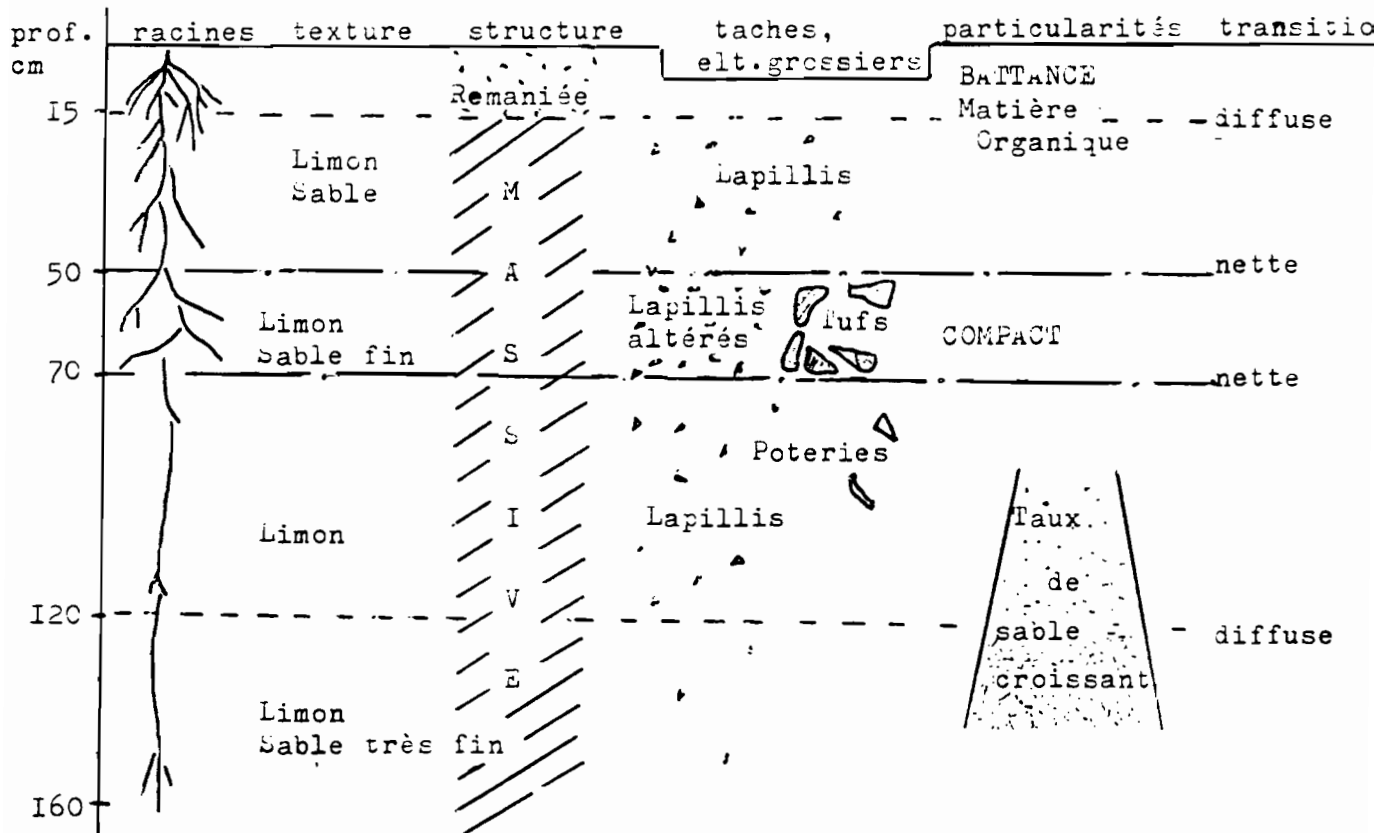
#### I.3.2 Les sols.

a/Profils. (voir fiche descriptive, annexe 4)

Ils ont été étudiés au niveau de la station par D.DU CLARY et C.PRAT:

Le sol est d'origine volcanique, de type andosol brun. Il présente une grande homogénéité au niveau de la parcelle. Les quelques variations concernent la profondeur des différents horizons.

Nous nous limiterons ici à la description du sol tel qu'il se présente à l'intérieur de la parcelle d'étude du bilan hydrique et du drainage interne.



On retiendra de ce profil:

- La présence d'une croûte de battance,
- L'absence de trace d'hydromorphie,
- La présence à 50-70 cm d'un horizon compact qui freine la pénétration des racines. (S.ROBIN)

b/ Densités.

Elles sont données dans le tableau suivant:

Profondeur (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80
Densité	1,03	1,04	0,96	0,92	0,93	0,91	0,93	0,94

moyenne: 0,95

Profondeur (cm)	90	100	110	120	130	140	150	160
Densité	0,97	0,97	1,00	1,07	0,93	1,18	1,12	1,14

moyenne: 1,11

Les densités ont été mesurées par la méthode des cylindres. Elles varient de 0,95 pour les horizons de surface à 1,1 vers 1,60 m de profondeur. Dans la suite de l'étude, nous avons retenu une densité moyenne de 0,95 sur les 80 premiers centimètres et 1,1 pour les horizons inférieurs.

Enfin, précisons que la nappe phréatique se trouve à au moins 10-15 m de profondeur. (C.PRAT)

## II. PROTOCOLE DES ESSAIS REALISES.

Nous traitons dans cette partie du principe et du déroulement des essais . Les résultats seront développés ultérieurement.

### II.1 OBJECTIFS.

Les essais réalisés en 1987 poursuivent les mêmes buts que ceux menés l'année précédente par D.DU CLARY et S.ROBIN à savoir:

- Estimer les paramètres d'entrée du modèle (Réserve utile, Réserve facilement utilisable, coefficients culturaux,...).
- Comparer les mesures directes d'évapotranspiration relative et de drainage à celles fournies par le modèle.
- Obtenir une caractérisation hydrodynamique des sols du vivero.

L'accent a été mis cette année sur ce dernier point, avec la mise en place d'une manipulation de drainage interne. En effet, les résultats de l'année 1986 montrent l'importance que peut prendre le drainage dans le calcul des termes du bilan hydrique. En l'absence de données sur les caractéristiques hydrodynamiques du sol, ce drainage avait été estimé de façon très approximative comme terme résiduel d'un bilan hydrique.

Nous envisageons cette année d'estimer directement le drainage à l'aide des courbes donnant les conductivités hydrauliques (K), en fonction de la teneur en eau ( $\theta$ ).

### II.2 DETERMINATION DE $K(\theta)$ PAR LA METHODE DU DRAINAGE INTERNE.

#### II.2.1 Principe de la méthode.

Cette méthode, développée par HILLEL et al. (1972), consiste à effectuer un apport d'eau suffisamment important pour que la redistribution soit facile à suivre jusqu'aux horizons profonds considérés. On suit cette redistribution dans le profil immédiatement après la disparition de la lame d'eau, en couvrant la surface du sol de façon à éviter tout transfert à travers cette surface. On impose ainsi que pendant toute la cinétique de ressuyage l'on ait un flux nul à travers la surface de côte  $z = 0$ . (HILLEL 1972)

A l'aide d'une batterie de tensiomètres et d'une sonde à neutrons, on suit l'évolution des profils de charge et des stocks d'eau, ce qui permet d'obtenir à tout moment, à la cote  $z$  considérée:

- Le gradient de potentiel à partir des mesures des 2 tensiomètres entourant la cote  $z$ :  $\frac{H_2 - H_1}{z}$
- Le flux à partir de la variation de stock entre 2 instants  $t$  et  $t + \Delta t$ :  

$$\Phi * \Delta t = [\Delta S]_z^2$$

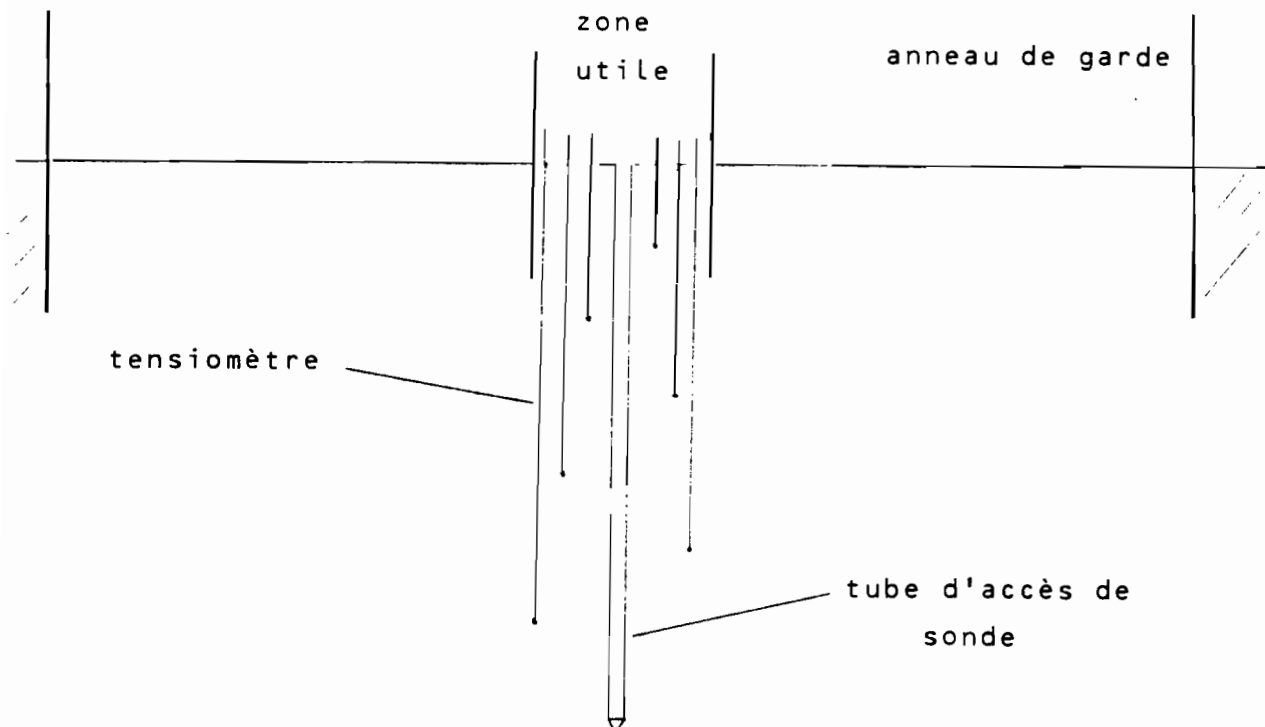
La corrélation entre le flux et le gradient donne la conductivité hydraulique  $K$  relative à la teneur en eau mesurée au temps moyen, (Loi de DARCY):

$$\Phi_z = - K(\theta) \frac{dH}{dz} \quad \text{d'où} \quad K = - \frac{[\Delta S]_z^2 / \Delta t}{\Delta H / \Delta z}$$

Cette méthode exige, pour être applicable, que l'écoulement dans la zone étudiée soit unidirectionnel, vertical et que le sol soit homogène.

### II.2.2 Dispositif expérimental.

L'essai-drainage interne a été installé de la façon suivante:



Dispositif expérimental de l'essai drainage interne.

- Un anneau de garde de 3 x 3 m, délimité par des lames métalliques enfoncées à 50 cm de profondeur.
- Au centre de l'anneau, une zone utile, circulaire de 48 cm de diamètre, délimitée de la même façon.
- A l'intérieur de cette zone, un tube d'accès de sonde à neutrons installé à 2,90 m de profondeur et une batterie de 6 tensiomètres (20-40-60-80-100-120 cm) disposés en cercle autour du tube en alternant les profondeurs de façon à ce que la sphère d'influence de chaque tensiomètre ne perturbe pas celle des tensiomètres voisins.

L'étalonnage du tube a été réalisé par la méthode gravimétrique:

\* Lors de la réalisation - à la tarière - du trou destiné à recevoir le tube, des échantillons de sol sont prélevés tous les 10 cm, puis pesés humides et après dessèchement à l'étuve (105°C).

\* Les humidités volumiques sont calculées à partir des mesures d'humidité pondérale, et des profils de densité.

\* Elles sont ensuite corrélées aux comptages réalisés sur le terrain, immédiatement après la mise en place du tube.

L'essai a eu lieu du 7/4/87 au 20/5/87 donc en saison sèche. Une lame d'eau d'environ 560 mm a été apportée le 8/4/87 dans la zone utile. Une hauteur d'eau équivalente a été maintenue dans l'anneau de garde pendant toute la durée de l'infiltration.

La lame d'eau a disparu le 9/4/87 à 7h00, le front d'humectation atteignant 1,70 m.

Tout l'anneau de garde a alors été recouvert d'une bâche plastique.

Les mesures ont commencé à 9h10:

- L'évolution des teneurs en eau a été suivie par des sondages neutroniques tous les 10 cm jusqu'à 1,80 m de profondeur.
- Celle des potentiels hydriques par des relevés tensiométriques.

Remarque: En fin de saison sèche, le sol est très dur et rend impossible l'installation des tensiomètres. Nous avons donc été contraints d'attendre la fin de la phase d'infiltration pour les mettre en place. D'où:

- La phase d'infiltration n'a pu être suivie en ce qui concerne l'évolution des charges hydriques. Elle a néanmoins été étudiée partiellement par des mesures d'humidité.

- Il existe un décalage de 2 heures entre la disparition de la lame d'eau et le début des mesures. Il est dû à l'installation des tensiomètres.

Les mesures ont d'abord été effectuées toutes les 1/2 heures puis à des intervalles de temps plus grands, étant donné la lenteur du ressuyage. A partir du 12/4/87 les mesures sont devenues journalières.

Remarque: La stabilité de la sonde a été vérifiée régulièrement par comptage dans l'eau.

Cet essai permet de calculer les conductivités hydrauliques aux profondeurs intermédiaires à celles des tensiomètres (30-50-70-90-110 cm) et pour différentes valeurs de l'humidité du sol.

La cinétique du ressuyage permet également d'estimer la capacité au champ du sol, in situ, donnant ainsi la borne supérieure de la réserve utile.

## II.3 MESURE DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE (ETR et drainage).

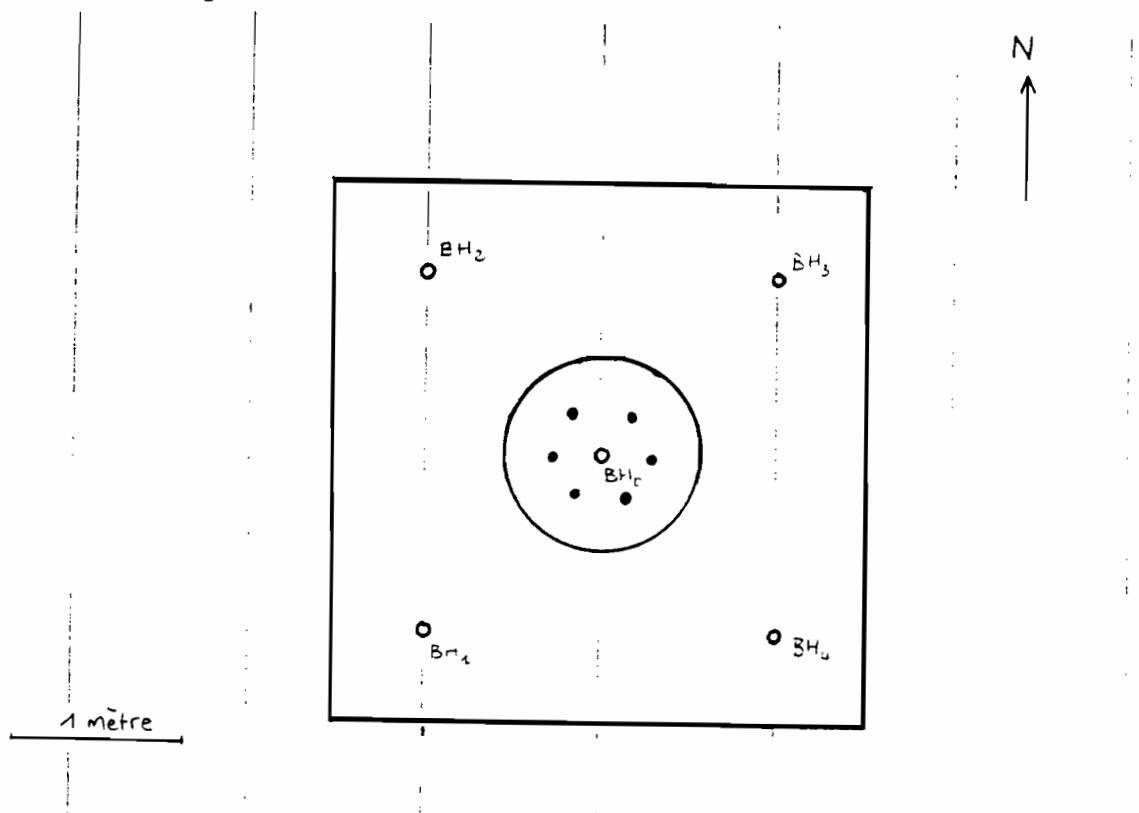
### II.3.1 Objectifs.

Les objectifs sont les suivants:

- Déterminer l'ETR du maïs au cours du cycle à partir des variations du stock d'eau dans le sol et de l'évaluation des flux profonds. Ceux-ci sont estimés grâce aux résultats de conductivité hydraulique. Les ETR mesurées serviront par la suite au calage du modèle de simulation.
- L'étude des ETR en période sèche, permet également de mettre en évidence le décrochement d'ETR par rapport à ETM, lié à la régulation stomatique et d'évaluer ainsi la limite entre RFU et RDU.

### II.3.2 Dispositif expérimental.

L'essai-bilan hydrique a été mené de juin à octobre 1987 sur culture de maïs. Il a été installé sur le même site que l'essai-drainage interne.



Dispositif expérimental de l'essai bilan hydrique.

En plus du tube central et des 6 tensiomètres déjà installés, nous avons mis en place 4 tubes supplémentaires de 1,90 m de profondeur, aux angles de l'anneau de garde.

L'écartement des lignes de maïs est de 80 cm, le rang central passant au niveau du tube BH0 et des tensiomètres, les 2 rangs latéraux au niveau des tubes BH1, BH2 et BH3, BH4.

Les tubes ont été étalonnés par la méthode gravimétrique.

### II.3.3 Dérroulement de l'essai.

Le maïs a été semé le 10/6/87.

Le semis a été réalisé mécaniquement sur la parcelle de garde et à la main à proximité des installations de tube et tensiomètres.

La densité de semis de 90 000 plants/ha nous a permis d'obtenir le peuplement souhaité, à savoir 45 000 plants/ha.

Les faibles précipitations du mois de juin ont nécessité plusieurs irrigations. Les doses ont été contrôlées à l'aide d'un pluviomètre-association installé sur le site "bilan hydrique".

Par suite d'une panne de la sonde à neutrons, les sondages n'ont pu être effectués qu'une seule fois par semaine au cours des mois de juin et juillet, avec une sonde solo 40 empruntée à B.RAPIDEL (MIDINRA).

Les relevés tensiométriques ont été effectués, tous les jours, à 7h du matin ainsi que les sondages neutroniques des mois d'août et septembre (sonde solo 25).

Les données climatiques (pluie et ETP) sont fournies par la station automatique CIMEL.

Enfin, signalons que tout au long du cycle de culture nous avons suivi la croissance racinaire du maïs et la production de matière sèche.

La profondeur racinaire a été mesurée in situ toutes les semaines pour 3 plants de maïs en réalisant des fosses dans l'interrang.

La matière sèche aérienne totale a été déterminée au laboratoire à partir des 3 mêmes plants.(S.ROBIN)

#### II.4 DETERMINATION DU POINT DE FLETRISSEMENT.

Le profil hydrique au point de flétrissement permanent du maïs est déterminé en saison sèche sur une parcelle irriguée (essai mené par S.ROBIN).

Le maïs a été semé en mars et irrigué régulièrement jusqu'au 19/4/87 (floraison). A partir de cette date, l'irrigation a été supprimée et nous avons laissé mourir le maïs. La parcelle est équipée d'un tube de sonde, ce qui permet d'évaluer à partir des ETR le point de flétrissement permanent.

#### II.5 MESURE DE L'EVAPOTRANSPIRATION MAXIMALE.

Elle est réalisée par l'essai lysimétrique mené par S.ROBIN. Sur 8 lysimètres répartis par paires, 2 mesurent l'ETM-sol nu et les 6 autres celle de la culture.

Le maïs a été semé au même moment que pour l'essai-bilan hydrique, ce qui permet d'obtenir simultanément les ETM et ETR de la culture.

L'irrigation des lysimètres a été effectuée régulièrement en fonction du drainage de chaque lysimètre. Par suite du non fonctionnement de la pompe d'irrigation nous n'avons pas pu irriguer suffisamment les anneaux de garde des lysimètres, ce qui a vraisemblablement perturbé les résultats en raison de la présence probable d'échanges advectifs.

## RESULTATS

### I. ETALONNAGE DES TUBES DE SONDE.

Chaque tube a été étalonné en réalisant une corrélation linéaire entre les comptages et les humidités volumiques déterminés lors de l'installation du tube, donnant les résultats suivants:

tube BH0 :	$\theta = 0,104 \times Cs - 6,57$	$r = 0,94$
tube BH1 :	$\theta = 0,088 \times Cs - 2,46$	$r = 0,87$
tube BH2 :	$\theta = 0,098 \times Cs - 5,11$	$r = 0,97$
tube BH3 :	$\theta = 0,100 \times Cs - 6,93$	$r = 0,90$
tube BH4 :	$\theta = 0,089 \times Cs - 3,02$	$r = 0,92$

Les étalonnages du tube BH0 et des 4 autres tubes ont été réalisés dans des conditions différentes:

\* Le 7/4/87 pour le tube BH0, sur un profil de sol de fin de saison sèche avec la sonde solo 25.

\* Le 20/5/87 pour les tubes BH1 à BH4, sur un profil plus humide (fin de l'essai drainage interne) avec la sonde solo 40.

Malgré ces différences, les coefficients d'étalonnage obtenus fournissent des humidités relativement homogènes sur l'ensemble des 5 tubes. Dans les gammes de comptages mesurées au champ (150 à 450), les variations d'humidité entre tubes ne dépassent pas 10%, ce qui est peu compte tenu de l'imprécision des mesures absolues (estimée à un minimum de 8% par VACHAUD et DAUDET).

## II. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DU SOL.

### II.1 TRAITEMENT DES DONNEES. CALCULS DES STOCKS ET GRADIENTS DE CHARGE.

Les mesures effectuées sur le terrain ont été traitées de la façon suivante:

- A partir des courbes  $\theta z = f(t)$  obtenues par lissage, on se place à des temps  $t$  choisis depuis la disparition de la lame d'eau pour reconstituer les profils hydriques  $\theta(z)$  correspondants. annexe 5

- Ces profils hydriques permettent directement d'obtenir les stocks d'eau [S] de la superficie à la côte  $z$  considérée pour chaque valeur de  $t$  choisie. La formule de calcul du stock est la suivante:

$$[S]_0^z = (1,5 \theta_{10} + \theta_{20} + \theta_{30} + \dots + 0,5 \theta_z)$$

- Pour chacune des profondeurs de tensiomètre, les courbes  $H = f(t)$  ont été modélisées par deux droites correspondant à l'évolution de  $H_z$ , de  $t=0$  à 145 puis de  $t=145$  à fin (annexe 6). Ces droites fournissent les valeurs des charges hydrauliques  $H_z$  au temps  $t$  choisi.

- A partir des charges hydrauliques, on calcule les gradients de charge en fonction de  $t$  aux profondeurs intermédiaires à celles des tensiomètres.

On obtient ainsi la première série de résultats : Tableau I

TPS	ST30	GR30	ST50	GR50	ST70	GR70	ST90	GR90	ST110	GR110
0.00	150.00	-0.83	252.00	-1.34	358.00	-1.30	465.00	-1.37	570.60	-0.71
5.00	139.00	-0.84	233.00	-1.36	334.00	-1.31	435.00	-1.35	537.50	-0.72
10.00	134.30	-0.84	225.50	-1.38	322.30	-1.32	421.00	-1.33	520.50	-0.73
15.00	131.40	-0.85	220.40	-1.40	314.00	-1.32	410.00	-1.32	509.00	-0.74
20.00	128.70	-0.86	215.50	-1.42	308.30	-1.33	401.90	-1.30	497.50	-0.76
25.00	126.60	-0.87	211.90	-1.45	303.20	-1.34	395.10	-1.29	488.50	-0.77
30.00	124.90	-0.88	208.90	-1.47	298.00	-1.35	389.10	-1.27	481.20	-0.78
35.00	123.40	-0.89	206.40	-1.49	295.00	-1.35	383.50	-1.26	474.40	-0.79
40.00	122.00	-0.90	203.90	-1.51	291.30	-1.36	378.00	-1.24	468.00	-0.81
50.00	119.00	-0.92	199.90	-1.55	285.50	-1.38	370.70	-1.21	457.40	-0.83
60.00	117.90	-0.93	196.50	-1.59	280.50	-1.39	364.00	-1.18	448.60	-0.86
70.00	116.60	-0.95	194.00	-1.63	276.70	-1.41	358.90	-1.15	441.90	-0.88
80.00	115.20	-0.97	191.40	-1.67	273.00	-1.42	354.00	-1.11	435.00	-0.90
90.00	113.80	-0.99	189.00	-1.71	269.60	-1.44	349.70	-1.08	430.00	-0.93
100.00	112.90	-1.01	187.30	-1.75	267.00	-1.45	346.40	-1.05	425.00	-0.95
110.00	111.90	-1.02	185.60	-1.79	264.70	-1.47	343.30	-1.02	421.50	-0.98
120.00	111.10	-1.04	184.40	-1.83	262.90	-1.49	340.90	-0.99	418.30	-1.00
140.00	109.00	-1.08	182.00	-1.91	259.40	-1.52	336.40	-0.93	412.30	-1.05
160.00	108.60	-0.93	179.70	-1.89	256.00	-1.44	332.00	-1.32	406.50	-0.97
180.00	107.60	-0.91	178.00	-1.86	253.40	-1.42	328.40	-1.31	401.60	-0.97
200.00	106.90	-0.90	176.00	-1.82	251.70	-1.40	325.70	-1.29	398.00	-0.98
250.00	105.50	-0.85	174.90	-1.74	248.30	-1.35	320.00	-1.25	390.90	-0.98
300.00	104.30	-0.81	173.30	-1.66	246.60	-1.30	317.90	-1.20	386.60	-0.99
350.00	103.40	-0.77	172.00	-1.57	244.70	-1.26	315.40	-1.16	383.00	-1.00
400.00	102.50	-0.73	170.50	-1.49	242.70	-1.21	312.50	-1.12	379.20	-1.01
450.00	101.40	-0.69	168.90	-1.40	240.50	-1.16	309.40	-1.07	375.20	-1.02
500.00	100.20	-0.64	167.30	-1.32	238.30	-1.12	306.40	-1.03	371.20	-1.02
550.00	99.00	-0.60	165.70	-1.23	236.20	-1.07	303.30	-0.99	367.40	-1.03
600.00	97.30	-0.53	164.10	-1.14	234.10	-1.02	299.20	-0.94	363.70	-1.04
650.00	96.10	-0.48	162.50	-1.06	232.00	-0.97	295.10	-0.89	360.00	-1.05
700.00	94.90	-0.43	160.90	-0.98	230.00	-0.92	291.00	-0.84	356.30	-1.06
750.00	93.70	-0.38	159.30	-0.90	228.00	-0.87	287.00	-0.79	352.60	-1.07
800.00	92.50	-0.33	157.70	-0.82	226.00	-0.82	283.00	-0.74	348.90	-1.08
850.00	91.30	-0.28	156.10	-0.74	224.00	-0.77	279.00	-0.69	345.20	-1.09
900.00	90.10	-0.23	154.50	-0.66	222.00	-0.72	275.00	-0.64	341.50	-1.10
950.00	88.90	-0.18	152.90	-0.58	220.00	-0.67	271.00	-0.59	337.80	-1.11
1000.00	87.70	-0.13	151.30	-0.50	218.00	-0.62	267.00	-0.54	334.10	-1.12
1050.00	86.50	-0.08	149.70	-0.42	216.00	-0.57	263.00	-0.49	330.40	-1.13
1100.00	85.30	-0.03	148.10	-0.34	214.00	-0.52	259.00	-0.44	326.70	-1.14
1150.00	84.10	0.02	146.50	-0.26	212.00	-0.47	255.00	-0.39	323.00	-1.15
1200.00	82.90	0.07	144.90	-0.18	210.00	-0.42	251.00	-0.34	319.30	-1.16
1250.00	81.70	0.12	143.30	-0.10	208.00	-0.37	247.00	-0.29	315.60	-1.17
1300.00	80.50	0.17	141.70	-0.02	206.00	-0.32	243.00	-0.24	311.90	-1.18
1350.00	79.30	0.22	140.10	0.06	204.00	-0.27	239.00	-0.19	308.20	-1.19
1400.00	78.10	0.27	138.50	0.14	202.00	-0.22	235.00	-0.14	304.50	-1.20
1450.00	76.90	0.32	136.90	0.22	200.00	-0.17	231.00	-0.09	300.80	-1.21
1500.00	75.70	0.37	135.30	0.30	198.00	-0.12	227.00	-0.04	297.10	-1.22
1550.00	74.50	0.42	133.70	0.38	196.00	-0.07	223.00	0.01	293.40	-1.23
1600.00	73.30	0.47	132.10	0.46	194.00	-0.02	219.00	0.06	289.70	-1.24
1650.00	72.10	0.52	130.50	0.54	192.00	0.03	215.00	0.11	286.00	-1.25
1700.00	70.90	0.57	128.90	0.62	190.00	0.08	211.00	0.16	282.30	-1.26
1750.00	69.70	0.62	127.30	0.70	188.00	0.13	207.00	0.21	278.60	-1.27
1800.00	68.50	0.67	125.70	0.78	186.00	0.18	203.00	0.26	274.90	-1.28
1850.00	67.30	0.72	124.10	0.86	184.00	0.23	199.00	0.31	271.20	-1.29
1900.00	66.10	0.77	122.50	0.94	182.00	0.28	195.00	0.36	267.50	-1.30
1950.00	64.90	0.82	120.90	1.02	180.00	0.33	191.00	0.41	263.80	-1.31
2000.00	63.70	0.87	119.30	1.10	178.00	0.38	187.00	0.46	260.10	-1.32
2050.00	62.50	0.92	117.70	1.18	176.00	0.43	183.00	0.51	256.40	-1.33
2100.00	61.30	0.97	116.10	1.26	174.00	0.48	179.00	0.56	252.70	-1.34
2150.00	60.10	1.02	114.50	1.34	172.00	0.53	175.00	0.61	249.00	-1.35
2200.00	58.90	1.07	112.90	1.42	170.00	0.58	171.00	0.66	245.30	-1.36
2250.00	57.70	1.12	111.30	1.50	168.00	0.63	167.00	0.71	241.60	-1.37
2300.00	56.50	1.17	109.70	1.58	166.00	0.68	163.00	0.76	237.90	-1.38
2350.00	55.30	1.22	108.10	1.66	164.00	0.73	159.00	0.81	234.20	-1.39
2400.00	54.10	1.27	106.50	1.74	162.00	0.78	155.00	0.86	230.50	-1.40
2450.00	52.90	1.32	104.90	1.82	160.00	0.83	151.00	0.91	226.80	-1.41
2500.00	51.70	1.37	103.30	1.90	158.00	0.88	147.00	0.96	223.10	-1.42
2550.00	50.50	1.42	101.70	1.98	156.00	0.93	143.00	1.01	219.40	-1.43
2600.00	49.30	1.47	100.10	2.06	154.00	0.98	139.00	1.06	215.70	-1.44
2650.00	48.10	1.52	98.50	2.14	152.00	1.03	135.00	1.11	212.00	-1.45
2700.00	46.90	1.57	96.90	2.22	150.00	1.08	131.00	1.16	208.30	-1.46
2750.00	45.70	1.62	95.30	2.30	148.00	1.13	127.00	1.21	204.60	-1.47
2800.00	44.50	1.67	93.70	2.38	146.00	1.18	123.00	1.26	200.90	-1.48
2850.00	43.30	1.72	92.10	2.46	144.00	1.23	119.00	1.31	197.20	-1.49
2900.00	42.10	1.77	90.50	2.54	142.00	1.28	115.00	1.36	193.50	-1.50
2950.00	40.90	1.82	88.90	2.62	140.00	1.33	111.00	1.41	189.80	-1.51
3000.00	39.70	1.87	87.30	2.70	138.00	1.38	107.00	1.46	186.10	-1.52
3050.00	38.50	1.92	85.70	2.78	136.00	1.43	103.00	1.51	182.40	-1.53
3100.00	37.30	1.97	84.10	2.86	134.00	1.48	99.00	1.56	178.70	-1.54
3150.00	36.10	2.02	82.50	2.94	132.00	1.53	95.00	1.61	175.00	-1.55
3200.00	34.90	2.07	80.90	3.02	130.00	1.58	91.00	1.66	171.30	-1.56
3250.00	33.70	2.12	79.30	3.10	128.00	1.63	87.00	1.71	167.60	-1.57
3300.00	32.50	2.17	77.70	3.18	126.00	1.68	83.00	1.76	163.90	-1.58
3350.00	31.30	2.22	76.10	3.26	124.00	1.73	79.00	1.81	160.20	-1.59
3400.00	30.10	2.27	74.50	3.34	122.00	1.78	75.00	1.86	156.50	-1.60
3450.00	28.90	2.32	72.90	3.42	120.00	1.83	71.00	1.91	152.80	-1.61
3500.00	27.70	2.37	71.30	3.50	118.00	1.88	67.00	1.96	149.10	-1.62
3550.00	26.50	2.42	69.70	3.58	116.00	1.93	63.00	2.01	145.40	-1.63
3600.00	25.30	2.47	68.10	3.66	114.00	1.98	59.00	2.06	141.70	-1.64
3650.00	24.10	2.52	66.50	3.74	112.00	2.03	55.00	2.11	138.00	-1.65
3700.00	22.90	2.57	64.90	3.82	110.00	2.08	51.00	2.16	134.30	-1.66
3750.00	21.70	2.62	63.30	3.90	108.00	2.13	47.00	2.21	130.60	-1.67
3800.00	20.50	2.67	61.70	3.98	106.00	2.18	43.00	2.26	126.90	-1.68
3850.00	19.30	2.72	60.10	4.06	104.00	2.23	39.00	2.31	123.20	-1.69
3900.00	18.10	2.77	58.50	4.14	102.00	2.28	35.00	2.36	119.50	-1.70
3950.00	16.90	2.82	56.90	4.22	100.00	2.33	31.00	2.41	115.80	-1.71
4000.00	15.70	2.87	55.30	4.30	98.00	2.38	27.00	2.46	112.10	-1.72
4050.00	14.50	2.92	53.70	4.38	96.00	2.43	23.00	2.51	108.40	-1.73
4100.00	13.30	2.97	52.10	4.46	94.00	2.48	19.00	2.56	104.70	-1.74
4150.00	12.10	3.02	50.50	4.54	92.00	2.53	15.00	2.61	101.00	-1.75
4200.00	10.90	3.07	48.90	4.62	90.00	2.58	11.00	2.66	97.30	-1.76
4250.00	9.70	3.12	47.30	4.70	88.00	2.63	7.00	2.71	93.60	-1.77
4300.00	8.50	3.17	45.70	4.78	86.00	2.68	3.00	2.76	89.90	-1.78
4350.00	7.30	3.22	44.10	4.86	84.00	2.73	-1.00	2.81	86.20	-1.79
4400.00	6.10	3.27	42.50	4.94	82.00	2.78	-5.00	2.86	82.50	-1.80
4450.00	4.90	3.32	40.90	5.02	80.00	2.83	-9.00	2.91	78.80	-1.81

## II.2 CALCUL DE K.

Les données du tableau I permettent directement le calcul de K entre 2 temps t1 et t2, à l'aide de la formule:

$$Kz(\theta_z) = \frac{[\Delta S]_c^z / t}{Grz}$$

où:  $[\Delta S]_c^z$  est la variation de stock entre deux instants consécutifs, t1 et t2.

t est l'intervalle de temps t1 - t2.

Grz est la moyenne sur l'intervalle t, des gradients de charge au niveau z.

$$\frac{Gr_{t1} - Gr_{t2}}{2}$$

$\theta_z$  est l'humidité moyenne, au niveau z, pendant l'intervalle t.

$$\frac{\theta_{zt1} - \theta_{zt2}}{2}$$

On obtient ainsi une série de valeurs de Kz en fonction de  $\theta_z$  pour z = 30 - 50 - 70 - 90 - 110 cm, qui sont données dans le Tableau II (page suivante).

TPS	KJ30	HV30	KJ50	HV50	KJ70	HV70	KJ90	HV90	KJ110	HV110
5.00	58.90	47.30	67.36	50.30	91.30	51.60	103.18	51.90	218.75	51.50
10.00	31.42	44.20	28.99	47.70	42.82	49.70	52.91	50.10	112.48	50.00
15.00	16.39	42.90	17.55	46.30	27.29	48.40	36.90	49.00	74.81	49.00
20.00	15.10	42.10	16.62	45.00	23.51	47.50	32.58	47.80	73.58	48.20
25.00	11.62	41.30	12.04	44.00	18.34	46.70	25.20	46.80	56.65	47.30
30.00	9.31	41.00	9.89	43.30	15.73	45.90	22.51	46.00	45.22	46.50
35.00	8.14	40.90	8.13	42.70	13.51	45.20	21.27	45.00	41.46	45.80
40.00	7.52	40.10	8.02	42.10	13.08	44.70	18.07	44.20	38.42	45.10
50.00	5.82	39.50	6.29	41.30	10.16	43.90	15.88	43.20	31.10	44.10
60.00	4.93	38.90	5.21	40.40	8.66	43.00	13.48	42.00	25.06	43.10
70.00	3.31	38.40	3.73	39.70	6.51	42.30	10.54	41.20	18.54	42.20
80.00	3.50	37.90	3.79	39.10	6.27	41.70	10.41	40.50	16.41	41.60
90.00	3.43	37.50	3.41	38.60	5.70	41.20	9.39	39.90	15.18	40.90
100.00	2.17	37.10	2.36	38.20	4.31	40.80	7.42	39.40	10.71	40.20
110.00	2.36	36.70	2.31	37.90	3.78	40.40	7.18	39.00	10.68	39.60
120.00	1.86	36.40	1.59	37.60	2.92	40.10	5.74	38.70	7.75	39.10
140.00	1.47	36.00	1.54	37.30	2.80	39.70	5.64	38.30	7.00	38.40
160.00	1.43	35.50	1.45	36.80	2.76	39.10	4.70	37.70	6.89	37.60
180.00	1.30	35.20	1.09	36.40	2.19	38.50	3.29	37.20	6.06	36.90
200.00	0.93	34.90	0.78	36.10	1.45	38.20	2.50	36.60	4.44	36.30
250.00	0.77	34.50	0.51	35.70	1.19	37.70	1.86	35.90	3.48	35.40
300.00	0.69	34.10	0.45	35.50	0.61	37.30	1.14	35.30	2.09	34.30
350.00	0.55	33.70	0.39	35.30	0.71	37.00	1.02	34.90	1.73	33.70
400.00	0.58	33.30	0.47	35.10	0.78	36.70	1.22	34.50	1.82	33.20
450.00	0.75	32.90	0.53	34.90	0.89	36.40	1.36	34.10	1.90	32.70
500.00	0.87	32.50	0.56	34.70	0.93	36.10	1.37	33.70	1.88	32.30
550.00	0.93	32.10	0.60	34.40	0.92	35.90	1.48	33.30	1.77	31.90
991.00	0.75	31.10	0.61	32.90	0.86	34.40	1.09	31.90	0.90	30.60

Tableau II: Conductivités hydrauliques (Kj, en mm/jours) et humidités volumiques (HV) obtenus lors de l'essai-drainage interne.

## II.3 INTERPRETATION DES RESULTATS ET CRITIQUES.

### II.3.1 Calcul de K.

Le traitement à partir des résultats de drainage interne n'est pas le seul envisageable. WATSON (1966) propose un calcul instantané de  $ds/dt$  et  $dH/dt$  à partir des pentes des courbes  $S = f(t)$  et  $H = f(z)$ . Cette méthode présente l'avantage de ne pas utiliser d'interpolation entre profils, mais nécessite soit de modéliser les courbes soit de déterminer graphiquement les tangentes. Dans les deux cas, on risque de perdre en précision.

Quelque soit la méthode employée, le problème de la précision sur les valeurs de K reste posé. La principale cause d'erreur provient des calculs de variation de stock. Nous ne disposons pas de données statistiques suffisantes pour évaluer cette erreur. Cependant, les calculs de K ont été réalisés sur des intervalles de temps pour lesquels la variation de stock est largement significative (en raison de la répétition des mesures) et ce, même pour les faibles valeurs de S donc de K.

### II.3.2 Modélisation des courbes K( $\theta$ ).

K croît quand  $\theta$  croît selon une courbe exponentielle (THONY, 1970), comme le montrent les courbes K( $\theta$ ) en coordonnées semi-logarithmiques. annexe 8.

La modélisation envisagée pour les courbes est donc du type

$$K(\theta) = A e^{B\theta}$$

Les résultats des ajustements sont repris dans le tableau suivant:

Prof. (cm)	Expression de K	coefficient de détermination
30	$K_j = 2,00 \cdot 10^{-5} e^{0,32\theta}$	$r^2 = 0,96$
50	$K_j = 1,09 \cdot 10^{-5} e^{0,32\theta}$	$r^2 = 0,95$
70	$K_j = 2,00 \cdot 10^{-5} e^{0,32\theta}$	$r^2 = 0,98$
90	$K_j = 5,39 \cdot 10^{-4} e^{0,23\theta}$	$r^2 = 0,95$
110	$K_j = 6,24 \cdot 10^{-4} e^{0,24\theta}$	$r^2 = 0,99$

$\theta$  est exprimé en % d'humidité.

Pour une valeur de  $\theta$  donnée, les valeurs de K, bien que très faibles, sont très variables suivant la profondeur. Ceci est lié à l'hétérogénéité du sol:

\* Les conductivités à 50 et 70 cm sont très voisines et correspondent aux valeurs les plus faibles, du fait de la structure très compacte de cet horizon. (voir description du profil, annexe 4)

\* Les conductivités à 90 et 110 cm évoluent de la même façon et sont plus élevées. Bien qu'appartenant au même horizon pédologique, les valeurs de  $K_{j110}$  sont systématiquement supérieures à celles de  $K_{j90}$ . Ceci est à mettre en relation avec l'augmentation du taux de sable à cette profondeur.

Remarque: Nos études granulométriques à partir d'échantillons prélevés sur le site sont en cours. Faute de résultats, on se réfèrera à l'étude effectuée par D.DU CLARY à quelques dizaines de mètres du site. (annexe 4)

\* Enfin, les fortes valeurs de la conductivité au voisinage de la superficie (30 cm) correspondent vraisemblablement à une porosité plus importante liée à l'activité biologique et aux travaux du sol.

Malgré ces différences, les valeurs de K restent très faibles (< 3 mm/h) pour l'ensemble du sol. Elles correspondent à des conductivités hydrauliques lentes (< 3,6 mm/h, BONFILS 1967). Nous verrons par la suite que cela pose des problèmes pour le calcul et l'interprétation de la capacité au champ (sur les 500 mm apportés, 230 mm seulement ont drainé en dessous du niveau 110 cm). Cependant, même s'il est faible, le drainage est loin d'être négligeable pour l'établissement d'un bilan hydrique (1mm/j représente de 15 à 30 % de l'ETR journalière d'une culture).

A noter également que tout au long du ressuyage, on observe des valeurs de conductivité en fonction du temps qui croissent avec la profondeur. Ceci traduit le fait que compte tenu du profil d'humidité qui existe après la submersion, le sol draine correctement sur toute la profondeur. Il n'y a aucun phénomène d'accumulation d'eau et malgré la lenteur du drainage, aucun problème d'hydromorphie (profil pédologique).

### II.3.3 Quelques aspects concernant l'infiltration. (voir annexe 7)

Pour des raisons pratiques (cf paragraphe précédent), l'infiltration n'a pu être suivie qu'au niveau des quantités d'eau infiltrée pendant les 10 premières heures.

Les résultats sont les suivants:

Temps	Infiltration	Interprétation
0 à 1,5 h	35 mm/h	Remplissage de la porosité
1,5 à 7 h	16 mm/h	Réarrangement des agrégats qui diminue la porosité
7 à 10 h	21 mm/h	Disparition des bulles d'air d'où augmentation de l'infil- -tration
10 à 24 h	21 mm/h	
moyenne: 0 à 24 h	21 mm/h	

Remarque: les interprétations sont proposées par CHRISTIANSEN et BOURBIER (1962).

\* La première valeur d'infiltration (35 mm/h) dépend entièrement des conditions initiales. Ici, c'est le cas d'un sol en fin de saison sèche et l'infiltration peut permettre d'évaluer l'efficacité d'une forte pluie de semis.

\* La valeur de 21 mm/h qui s'établie après 7 heures d'infiltration correspond à la conductivité à saturation en surface, l'humidité du sol est alors de 53%.

Remarque: Les mesures de l'essai-drainage interne n'ayant débuté que 2 heures après la fin de l'infiltration, les plus fortes conductivités qui apparaissent dans le tableau II ne correspondent pas à des conductivités à saturation. Si l'on reporte la valeur de l'humidité à saturation (53%) dans la formule  $K = A \times e^{B\theta}$  (déterminée précédemment), on obtient une conductivité à saturation de 20 mm/h. Cette valeur est en accord avec les résultats concernant l'infiltration.

Au temps  $t = 24$  h, c'est-à-dire à la fin de la phase d'infiltration, le stock a augmenté de 515 mm dans la tranche de sol de 0 à 180 cm. Cette valeur reste ensuite constante jusqu'à l'arrivée du front d'humectation 3 heures après.

temps	humidité volumique	stock	à 180 cm de profondeur
24	11,5	818	
25	11,2	815	
25,5	11,6	813	début de l'exploitation
26	11,4	818	← des mesures
26,5	11,6	825	
27	11,9	815	arrivée du front
27,5	12,3	808	← d'humectation

tableau III: Evolution du stock et de l'humidité volumique en fin de phase d'infiltration.

La stabilité de cette valeur indique l'absence d'écoulement latéral. Toutefois, elle n'a pu être vérifiée que sur un temps très court et un tube latéral de contrôle à proximité de l'anneau de garde aurait été souhaitable.

La valeur de 515 mm est inférieure de 8% à la quantité d'eau apportée initialement. Ce fait peut être expliqué de la manière suivante (VACHAUD-DANCETTE):

- Le transfert latéral, même s'il est faible, existe.
- Les mesures de sonde en présence d'un front sont souvent sous estimées du fait de l'existence d'un gradient d'humidité important dans la sphère d'influence.

Enfin signalons que le tracé des profils d'infiltration, (annexe 7), montre une progression régulière du front d'infiltration. On n'observe pas de perturbation liée à des infiltrations préférentielles le long du tube.

## II.4 LES COURBES $h = f(\theta)$ .

Les courbes ont d'abord été tracées à l'aide des données de ressuyage de drainage interne: (annexe 9)

Ces courbes correspondent théoriquement à des branches principales de succion en drainage.

Les allures générales des courbes sont identiques, ce qui traduit une relative homogénéité au niveau de la texture du sol de 20 à 110 cm (ces résultats ont déjà été observés sur le terrain et à partir des courbes donnant  $K$  en fonction de  $\theta$ ).

On observe toutefois, quelques différences au niveau de la position relative des courbes que l'on peut interpréter par l'augmentation de la fraction sableuse, en profondeur, et de la compacité au niveau de l'horizon 60 - 80 cm.

Par la suite, les courbes ont été complétées avec les points  $h = f(\theta)$  obtenus lors de l'essai bilan hydrique: (annexe 9)

Les points sont dispersés autour d'une courbe moyenne, ce qui confirme l'homogénéité du sol.

Seuls les niveaux 80 et 120 cm présentent des valeurs significativement différentes.

Pour une teneur en eau fixée:

- La succion est plus forte à 80 cm, correspondant à une compacité élevée.
- La succion est plus faible à 120 cm à cause de l'augmentation du taux de sable.

La dispersion des points peut être liée à des phénomènes d'hystérésis, en effet, pendant l'essai bilan hydrique, après chaque pluie importante, le sol est successivement en humectation puis en drainage. Cependant aucune observation ne permet de conclure quant à l'importance de ce phénomène, pour les niveaux allant de 40 à 120 cm de profondeur. Seules les données de succion à 20 cm de profondeur montrent des variations importantes de l'humidité pour un même potentiel hydrique, traduisant des phénomènes d'hystérésis. (annexe 10)

## III. MESURES DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE. ETR ET DRAINAGE.

### III.1 METHODE DE TRAITEMENT DES DONNEES.

Les mesures disponibles pour évaluer les termes du bilan hydrique, sont:

- + Les relevés tensiométriques journaliers
- + Les comptages Sonde des tubes BH0 à BH4
- + Les pluies journalières, fournies par la station CIMEL

Les termes du bilan hydrique sont calculés avec la formule:

$$[\Delta S]_0^z = P + I + Ru - Drz - ETR$$

avec:  $[\Delta S]_0^z$  : Variation du stock d'eau entre 0 et z  
P + I : Pluie et Irrigation entre t1 et t2  
Ru : Ruissellement entre t1 et t2  
Drz : Drainage au niveau z entre t1 et t2  
ETR : Evapotranspiration de la culture entre t1 et t2

\* Les apports d'eau, P + I:

Les pluies ont été mesurées par le pluviomètre de la station et régulièrement vérifiées à l'aide d'un pluviométrique. Aucune différence notable n'a été enregistrée. Les irrigations ont été déterminées sur le terrain à l'aide du pluviométrique.

\* Le ruissellement, Ru:

Ce terme devait théoriquement être nul. en effet, la hauteur de l'anneau métallique qui entoure les tubes - 40 cm - a été prévue pour retenir même les plus fortes pluies. Cependant, les observations sur le terrain lors des fortes pluies (>60 mm) ont montré des écoulements préférentiels à l'intérieur de la parcelle d'étude, notamment à cause de la présence de "trous de rats". Les jours de fortes pluies n'ont donc pas été pris en compte, et les calculs portent sur des périodes pour lesquelles les pluies n'ont donné qu'un ruissellement tout à fait négligeable, voir nul.

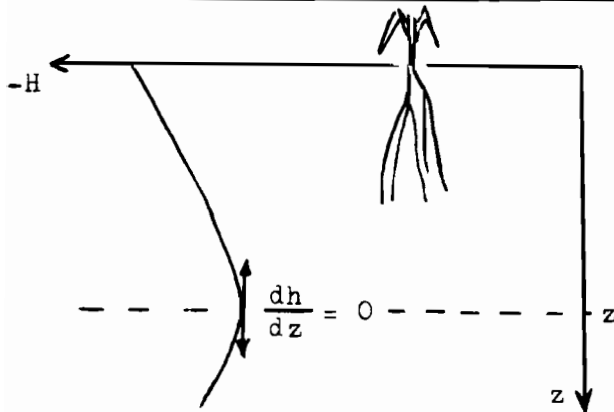
\* Les variations de stocks,  $[\Delta S]_0^z$  :

Elles ont été calculées à partir des mesures de sonde, communes aux 5 tubes, à l'aide d'un logiciel mis au point par P.VAUCHEL (les humidités sont déterminées pour chaque tube à l'aide des coefficients d'étalonnage puis les stocks et variations sont moyennés). Pour conserver une précision acceptable ( 5%), les variations de stocks ont été calculées sur des périodes correspondant en moyenne à une variation de 50 mm (MOUTONNET, 1979), exception faite de la période sèche où les variations deviennent plus faibles.

\* Le drainage,  $Drz$ :

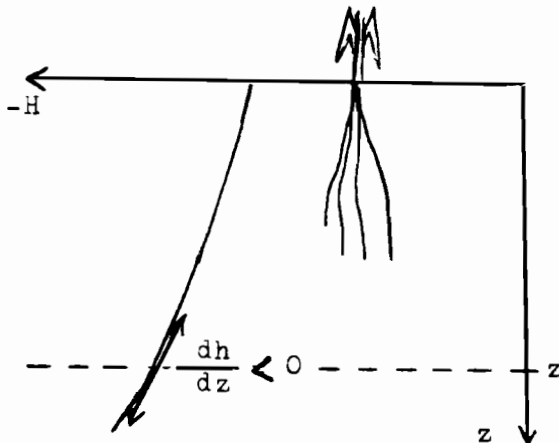
Deux situations sont à envisager en ce qui concerne les mouvements d'eau:

1) Plan de flux nul sous les racines.



Dans ce cas, il n'y a pas de mouvements d'eau au niveau  $z$ .  $Drz = 0$  et on prendra  $z$  égal à la cote du plan du flux nul.

2) Drainage.



Au niveau  $z$ , on a:

$$Drz = - Kz(\theta) \cdot dh/dz$$

avec:  $Kz(\theta)$ , conductivité  
 $dh/dz$ , gradient hydraulique  
à  $z$

$K(\theta)$  est calculé à l'aide des résultats précédents (paragraphe II.3.2) et des humidités du tube BH0.

$Grz$  est déterminé à l'aide des tensiomètres.

On prendra  $z = 110$  pour plusieurs raisons:

- Le système racinaire n'atteint jamais cette profondeur. Sur l'ensemble du cycle les valeurs du drainage seront comparables.

- Les valeurs de  $\theta_{110}$  sont très stables et varient peu sur les périodes de 5 à 10 jours rendant les calculs plus fiables.

- Les valeurs de  $K_{110}(\theta)$  restent faibles, donc appartiennent à des domaines de faible variation de la conductivité en fonction de  $\theta_{110}$ , ce qui permet de gagner en précision.

\* L'évapotranspiration réelle.

Elle est déterminée comme terme résiduel de l'équation du bilan hydrique:

$$ETR = P + I + (Ru) - Drz - [\Delta S]_0^z$$

### III.2 RESULTATS.

Les résultats sont présentés dans le tableau IV (page suivante), les détails des calculs sont donnés en annexe 11 et 12.

Les périodes ont été choisies en tenant compte des précisions vues au paragraphe précédent à savoir:

- Les fortes pluies ruissellantes
- La précision sur les variations de stock
- Le calcul de Drz (humidité stable, plan de flux nul, remontée capillaire)
- L'existence des données de sonde.

### III.3 REMARQUES ET CRITIQUES.

#### III.3.1 Précision des résultats.

En ce qui concerne le drainage, la précision a été estimée pour chaque période à partir des variations sur les gradients et les humidités. Elle est de l'ordre de 5%. (annexe 11)

La plus grande incertitude sur les résultats d'ETR provient des variations de stock (jusqu'à 20%), mais en supprimant certaines valeurs dans le calcul des variations de stock, on peut la ramener à 10%. (annexe 12)

#### III.3.2 Données manquantes.

Les termes du bilan hydrique n'ont pu être calculés sur certaines périodes, qui correspondent à:

- \* de fortes pluies (ruissellement),
- \* des phénomènes d'infiltration rendant le calcul de drainage hasardeux,
- \* des données manquantes.

PERIODE	P+I (mm)	S (mm)	Dr 110 (mm)	(mm/j)	ETR (mm)	(mm/j)	ETP (mm)	(mm/j)	Stade maïs
11/6/87 au 24/6/87	116	54	30	2,1	32	2,3	78	5,6	1 - 14 j Semis à 4-5 feuilles
14/7/87 au 21/7/87	11	-48	29	2,5	39	4,3	35	4,3	27 - 41 j 10-12 f à 14-17 f
22/7/87 au 27/7/87	74,5	13	15	2,5	40,5	6,7	28	4,6	42 - 47 j 14-17 f
28/7/87 au 2/8/87	70,5	14	20	2,8	30,5	5,2	23	3,3	48 - 54 j Apparition panicule
6/8/87 au 10/8/87	3,5	-57	25	5	35,5	7,1	25	5	57 - 61 j Floraison
11/8/87 au 13/8/87	2,5	-16	0	0	18,5	6,2	15	5	62 - 64 j Remplissage grain
14/8/87 au 19/8/87	4	-20	0	0	30	5	29	4,0	65 - 70 j Remplissage grain
20/8/87 au 23/8/87	15	-2	0	0	17	4,5	13	3,3	71 - 74 j Grain pâteux
24/8/87 au 27/8/87	3	-14	0	0	17	4,5	19	4,0	75 - 78 j Grain pâteux
28/8/87 au 2/9/87	22	2	0	0	20,5	3,4	25	4,1	79 - 85 j Grain pâteux
12/9/87 au 25/9/87	60	-40	52	3	54	3,0	72	5,1	94 - 107 j Gr. vitreux Récolte
26/9/87 au 2/10/87	33,5	5	25	3,1	3,5	0,4	30	4,5	Paillage Maïs sec

Tableau IV : Calcul des termes du bilan hydrique.

### III.3.3 Critiques.

A partir des valeurs de drainage et d'ETR, on peut mettre en évidence deux situations:

#### Situation de stress hydrique:

Elle correspond à des drainages nuls (du 11/8/87 au 2/9/87). Les résultats concernant cette période sont utilisés pour la détermination de la RFU.

#### Alimentation "normale" en eau:

Ce sont les périodes correspondant à des pluies régulières (du 11/6/87 au 10/8/87 et du 12/9/87 au 25/9/87). Le drainage en profondeur est régulier et atteint des valeurs de l'ordre de 2,5 mm/j. L'eau est facilement disponible pour la plante et les valeurs d'évapotranspiration correspondent aux ETM. Compte tenu de la précision des mesures, on ne peut pas déterminer les coefficients culturaux. A titre indicatif, on propose les encadrements suivants:

Période	Encadrement	
du 11/6 au 24/6	$0,3 < Kc < 0,5$	1ère décade
du 14/7 au 21/7	$0,9 < Kc < 1,3$	4ème décade
du 22/7 au 27/7	$1,2 < Kc < 1,7$	5ème décade
du 28/7 au 2/8	$1,3 < Kc < 1,9$	6ème décade
du 6/8 au 11/8	$1,1 < Kc < 1,7$	
du 12/9 au 25/9	$0,6 < Kc < 0,9$	10 ème décade

Remarque:  $Kc = ETR \text{ mesurée} / ETP \text{ station}$

Les valeurs sont systématiquement supérieures à celles que l'on trouve dans la bibliographie (KONE). Deux hypothèses sont envisageables:

- Une sous estimation du drainage liée aux formules établies à partir de l'essai-drainage interne.
- Une sous estimation des valeurs d'ETP obtenues à partir des données de la station. En effet, les valeurs d'ETP mesurées varient entre 3,3 et 5 mm/j, alors que l'analyse fréquentielle des ETP à Managua donne des ETP supérieures à 5 mm/j pour les périodes considérées (annexe 2).

#### IV. CARACTERISATION DES RESERVES HYDRIQUES DU SOL.

##### IV.1 LA RESERVE UTILE.

###### IV.1.1 Borne supérieure: la capacité de rétention.

La capacité de rétention correspond au stockage maximal d'eau dans le sol. Elle est donc obtenue à la fin du drainage de l'eau gravitaire lorsque l'écoulement de l'eau devient très lent (WEIHMEYER 1931).

Plusieurs méthodes sont possibles pour sa détermination in situ:

RICHARDS (1952) propose la notion de capacité au champ qui correspond à l'humidité du sol après un ressuyage de 48 heures (méthode A).

MARCESSE (1967) propose une méthode basée sur la cinétique de ressuyage du sol après submersion (méthode B).

Enfin, les mouvements d'eau dans le sol peuvent être déterminés à partir des données tensiométriques. L'arrêt du drainage correspond à des hauteurs semblables dans tous les tensiomètres (méthode C).

Nous avons utilisé ces trois méthodes:

- Méthode A:

Il s'agit des profils hydriques mesurés 55 heures et 75 heures après une forte pluie.

(I): 70,5 mm le 03/09/87 précédé d'une pluie de 24 mm la veille

(II): 40,5 mm le 04/09/87 précédé d'une pluie de 75 mm la veille

- Méthode B:

Les profils hydriques correspondent à des mesures effectuées lorsque les tensiomètres indiquent une absence de drainage lors de l'essai-bilan hydrique.

(I): le 22/07/87

(II): le 11/08/87

-Méthode C:

Le profil a été obtenu par une étude de la cinétique lente du ressuyage à partir des données de "drainage interne" (cf annexe 13).

Les résultats sont repris dans le tableau de la page suivante.

Profondeur cm	PROFILS HYDRIQUES en % d'humidité						
	Méthode A				Méthode B		Méthode C
	55 h		75 h		(I)	(II)	
	(I)	(II)	(I)	(II)	(I)	(II)	
20	38,1	37,3	37,8	36	32,3	28	37,7
30	40,3	39,5	39,4	38	33,1	33,1	36,6
40	39,1	38	37,3	37,3	32,8	32,5	36,3
50	37,6	36,3	36,8	36,5	32,9	32,1	37,5
60	38,7	38	37,2	36,8	35	33,8	38,6
70	39,5	37,7	39,7	36,8	36	35,6	39,8
80	39,1	37	39,5	36,3	37,1	35,5	38,9
90	39,6	36,3	39,3	36,4	36,4	35,9	37,8
100	37,9	32,3	37,9	34,1	35,4	35,8	36,1
110	36,3	32,7	32,2	33,1	34,5	35,4	36
120	35,4	30,2	36,3	31,2	34,1	33,8	36,1
130	35,4	29,5	35,9	29,7	33,8	32,9	31,2
140	32,5	27,5	32,7	28,5	29,2	31	37,3
150	30,6	26,3	21,5	26,3	33	29,6	32,5

Remarques:

- Les profils obtenus après ressuyage de forte pluie (méthode A) dépendent de l'état hydrique initial du sol. Dans le cas de la pluie du 04/09/87 qui a eu lieu après une longue période sèche, on observe des humidités systématiques inférieures.

- Du fait de la lenteur du ressuyage, les humidités pour ces profils restent élevées en surface et faibles en profondeur, même après 72 heures.

- Les profils correspondant à l'arrêt du drainage (méthode B) présentent des humidités faibles en surface liées à l'évapotranspiration. Ces profils caractérisent le système sol-plante-atmosphère et ne représentent pas une caractéristique propre du sol.

Pour ces différentes raisons, nous avons retenu comme profil définitif celui obtenu par la méthode C.

#### IV.1.2 Borne inférieure: le point de flétrissement.

Les résultats obtenus par S.ROBIN sont repris dans le tableau suivant:

Période	ETR mm/j	ETR/ETM
20/4/87	7,6	1,2
26/4/87		
27/4/87	4,2	0,6
01/5/87		
02/5/87	5	0,9
04/5/87		
05/5/87	3,4	0,55
12/5/87		
13/5/87	2,5	0,4
18/5/87		

Le profil au point de flétrissement a été mesuré le 12/05/87. (cf figure p. )

A partir de cette date, l'indice de satisfaction ETR/ETM devient très faible.

D'autre part, le maïs a atteint un état de sécheresse qui paraît irréversible.

Remarque: Le profil a été déterminé à la tarière, ce qui permet une comparaison avec des profils obtenus sur d'autres tubes.

#### IV.1.3 La réserve utile.

A partir des résultats précédents, la réserve utile est déterminée à différentes profondeurs par la formule:

$$RUz = (\theta z \text{ capacité rétention} - \theta z \text{ point de flétrissement}) \times z$$

Les résultats sont les suivants:

Profondeur cm	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
RU mm	44	62	80	97	113	129	136	155	166	174	182

#### IV.2 ESTIMATION DE LA RESERVE FACILEMENT UTILISABLE RFU.

La RFU correspond à la partie de la réserve utile pour laquelle l'eau est facilement disponible pour la plante. Lorsque la culture se trouve dans cette situation, on peut admettre  $ETR = ETM$ . Lorsque l'humidité du sol passe sous la limite inférieure de la RFU, on a  $ETR < ETM$ . (ELDIN M., LHOMME J.P. 1984).

Ainsi, l'étude du rapport  $ETR/ETM$  en période de déficit hydrique permet de cerner la limite séparant la réserve facilement utilisable de la réserve difficilement utilisable.

Nous avons vu que la culture a subi une période de stress hydrique du 11/08/87 au 02/09/87. Les ETR ont été déterminées dans le paragraphe III.1.

Les valeurs d'ETM n'ont pu être estimées de façon satisfaisante à partir des données lysimétriques. Cependant, pendant la période considérée, le maïs évolue du stade floraison au stade remplissage des grains. Pour cette période, de nombreux auteurs (KONE, PRAT) considèrent que le coefficient cultural de la plante atteint son maximum et reste constant ( $ETM = Kc \text{ max } \times ETP$ ). On peut ainsi se limiter à l'étude du rapport  $ETR/ETP$ .

Période	ETR mm/j	ETP mm/j	ETR/ETP
06/8/87	35,5	25	1,4
10/8/87			
11/8/87	18,5	15	1,2
13/8/87			
14/8/87	30	29	1
19/8/87			
20/8/87	17	13	1,3
23/8/87			
24/8/87	17	19	0,9
27/8/87			
28/8/87	20,5	25	0,8
02/9/87			

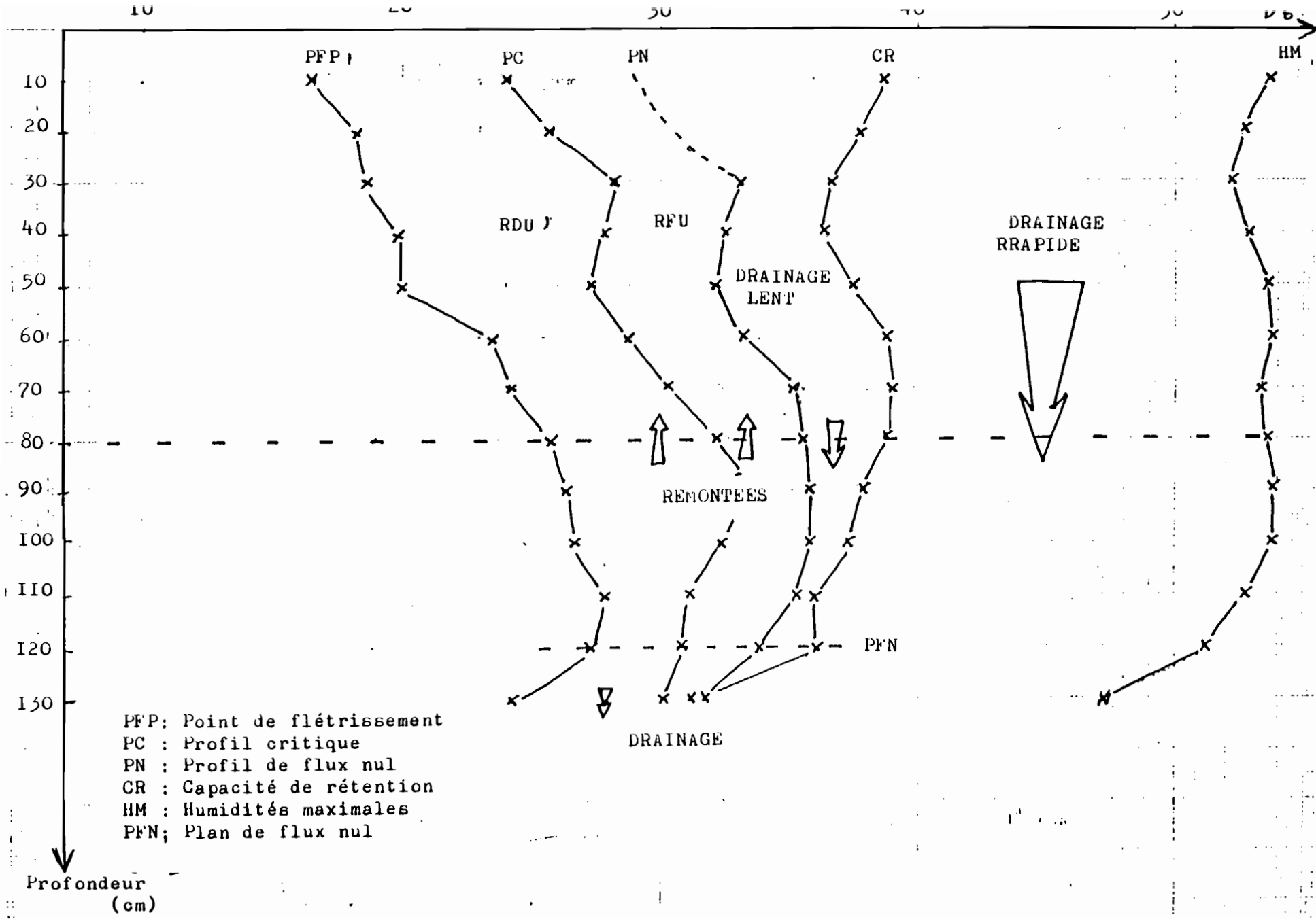
← décrochement

Le décrochement a eu lieu entre le 20/8/87 et le 27/8/87. On retiendra le profil du 24/8/87 comme limite entre RFU et RDU. Les valeurs des stocks d'eau correspondant permettent le calcul de RFU et RDU.

Profondeur cm	RU mm	RDU mm	RFU mm	RDU/RFU
70	119	48	71	0,4
100	161	70	91	0,43
120	190	89	101	0,47

On admet généralement une valeur de RDU égale au tiers de la réserve utile (SERVAT 1976, LUC 1981). Les résultats ci-dessus indiquent un rapport RDU/RFU 0,45. Cette valeur est à mettre en relation avec la composition granulométrique des sols ( Ministère de la Coopération 1976).

Ces différents profils hydriques sont représentés en page suivante.



PROFILS HYDRIQUES REMARQUABLES (d'après mesures in situ)

## SIMULATION PAR LE MODELE DE BILAN HYDRIQUE

### I. MODELE.

Il s'agit d'un modèle agroclimatique qui fonctionne avec des variables climatiques, des paramètres édaphiques et des paramètres spécifiques de la culture considérée (ELDIN M.).

Par rapport au modèle pluie-ETP couramment utilisé, il apporte une prise en compte du réservoir sol.

Les détails concernant le modèle sont donnés en annexe 14

### II. SIMULATION ET AJUSTEMENT DU MODELE.

#### II.1 OBJECTIFS.

L'objet de cette partie est de réaliser des simulations de bilan hydrique, à partir du modèle et de confronter les résultats avec ceux mesurés sur le terrain.

La comparaison modèle-réalité doit permettre:

- de tester la validité des hypothèses qui servent de base à la modélisation (évaluation de la RH, évaluation de l'ETM, évaluation de l'ETR, efficacité des pluies).
- de vérifier les paramètres d'entrée (RUX, RUM, ETP...).

#### II.2 LES PARAMETRES D'ENTREE.

##### II.2.1 Paramètres climatiques.

Il s'agit des pluies et de l'ETP déterminées à partir des données de la station CIMEL.

## II.2.2 Paramètres édaphiques.

### \* Réserve utile maximale (RUX):

La profondeur maximale atteinte par les racines est de 80 cm (cf annexe 15).

La valeur annuelle de la réserve utile correspondante est: RUX = 135 mm.

### \* Coefficient RFU/RU:

Il a été estimé dans le paragraphe IV.2 :  $k = 0,55$ .

### \* Réserve utile minimale (RUM): (réserve au semis)

Elle a été estimée à partir des observations suivantes:

- les profils hydriques déterminés après semis, pour la culture de maïs irrigué (mars 1987), ne montrent aucune variation significative des humidités au delà de 30 cm de profondeur (S.ROBIN).

- les profils de charge après semis pour la culture de maïs étudiée (semis en juin 1987) indiquent un drainage à 30 cm pour des humidités faibles (absence de précipitation).

La profondeur de sol évaporante au moment du semis a ainsi été estimée à 25 cm.

La réserve utile à cette profondeur vaut RUM = 45 mm.

### \* Coefficient cultural du sol nu (Kcs):

Aucun essai n'a été réalisé pour déterminer ce paramètre. Son estimation a été effectuée à partir des données bibliographiques:

- lorsque la surface du sol est maintenue dans un état de saturation, les valeurs d'évapotranspiration sont très proches de l'ETP (VERNET, HILLAIRE études in situ, HILLEL études en laboratoire).

- après dessèchement de la surface, les valeurs d'évaporation chutent rapidement jusqu'à  $0.2 \times$  ETP (VERNET, HILLAIRE).

En toute rigueur, le coefficient cultural du sol nu devrait être proche de 1 (évaporation en condition hydrique non limitante).

En fait, le coefficient Kcs du modèle correspond au coefficient cultural au début du cycle de la culture. Il a été estimé à 0,5 à partir des références bibliographiques (PRAT, KONE) et des mesures d'ETR réalisées en début de cycle. Cependant, le modèle tient compte du fort pouvoir évaporant du sol après une pluie (évaporation proche de l'ETP). Ceci explique les rapports ETR/ETM > 1 observés certains jours.

\* Coefficient de ruissellement (Kr):

Dans un premier temps, le ruissellement a été considéré comme négligeable. D'où les valeurs des paramètres:

- seuil de pluie ruissellante Spr = 0
- coefficient de ruissellement Kr = 0

II.2.3 Paramètres culturaux:

\* Stades phénologiques:

Les différentes dates des stades phénologiques du maïs ont été déterminées sur le terrain par S.ROBIN (cf annexe 15). Les chiffres correspondent au nombre de jours après semis:

- levée JL = 10
- développement maximum du système aérien JM = 60
- développement maximum du système racinaire JK = 60
- récolte JR = 107
- durée de la phase floraison - remplissage des grains DFLO = 30

Remarque: Nous avons du introduire un nouveau paramètre. En effet, le modèle tel qu'il est décrit en annexe 14 ne tient pas compte de l'écart qui peut exister entre la levée et la date à laquelle la profondeur de l'enracinement devient supérieure à celle de la RUM.

Le modèle est actuellement modifié et prend en compte ce paramètre, qui a été également déterminé sur le terrain:

- développement des racines au delà de la profondeur de RUM JP = 30

\* Coefficients culturaux (KCM et KCR):

Les données lysimétriques sont en cours de traitement. Nous utiliserons pour les premières simulations les coefficients culturaux fournis par la bibliographie (KONE):

- coefficient cultural maximal KCM = 1,2
- coefficient cultural à la récolte KCR = 0,7

II.2.4 Paramètres d'initialisation.

Ils sont directement mesurés sur le terrain.

- pluie précédant le semis PI = 0
- réserve hydrique au semis RHI = 20 mm  
(calculée sur 25 cm)

### II.3 LES INDICATEURS DE L'AJUSTEMENT DU MODELE.

Pour effectuer une comparaison entre les résultats fournis par la simulation et ceux mesurés sur le terrain, nous avons retenu les grandeurs suivantes:

- Evapotranspiration réelle : ETR
- Réserve hydrique : RH
- Drainage : Dr

Les comparaisons portent sur les périodes étudiées au paragraphe Résultats III.2. Pour se ramener aux termes fournis par le modèle, il faut estimer la réserve hydrique et le drainage correspondant à la profondeur racinaire moyenne pour chaque période considérée. Les calculs ont été effectués de la façon suivante.

Pour chacune des périodes, on dispose des données suivantes:

ETR  
 Variation de stock à 110 cm:  $\Delta S_c^{110}$  cf paragraphe  
 Drainage à 110 cm:  $Dr_{110}$  Résultats III.2

Profondeur moyenne d'enracinement :  $z_r$  cf annexe 15

Variation de stock à  $z_r$  fournie par les données de sonde

Le drainage à la profondeur d'enracinement  $z_r$  a été calculé en confrontant les bilans hydriques à  $z$  et à 110 cm.

$$\begin{aligned} ETR &= P + I - Dr_{110} - \Delta S_o^{110} \\ ETR &= P + I - Dr_{z_r} - \Delta S_o^{z_r} \end{aligned}$$

On obtient ainsi:

$$Dr_{z_r} = \Delta S_o^{110} - \Delta S_o^{z_r} + Dr$$

La réserve hydrique est calculée à partir du stock  $S_{z_r}$  et du stock au point de flétrissement correspondant à la profondeur  $z_r$  ( $S_{z_r}$  pfp)

$$RH = S_{z_r} - S_{z_r} \text{ pfp}$$

## II.4 PREMIERE SIMULATION.

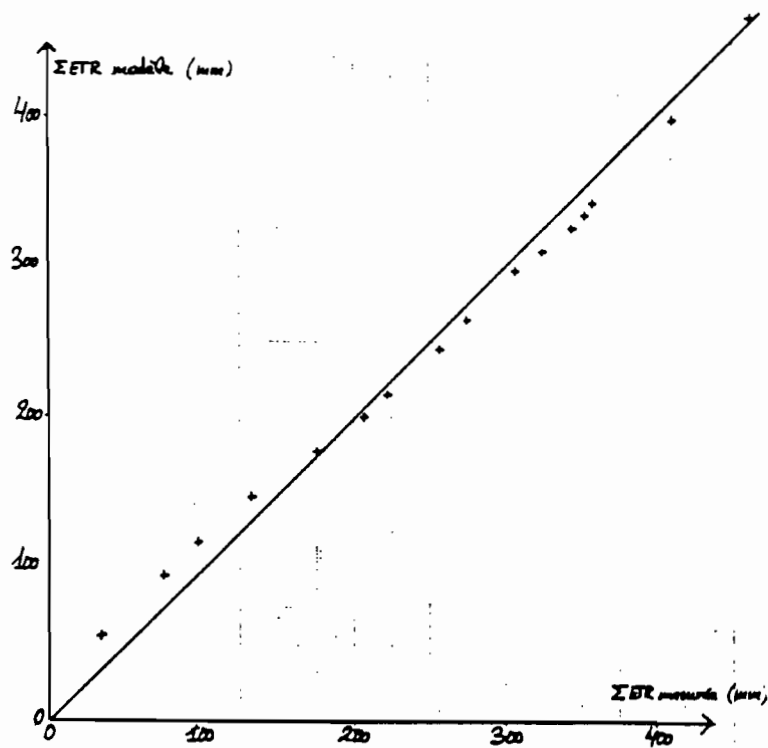
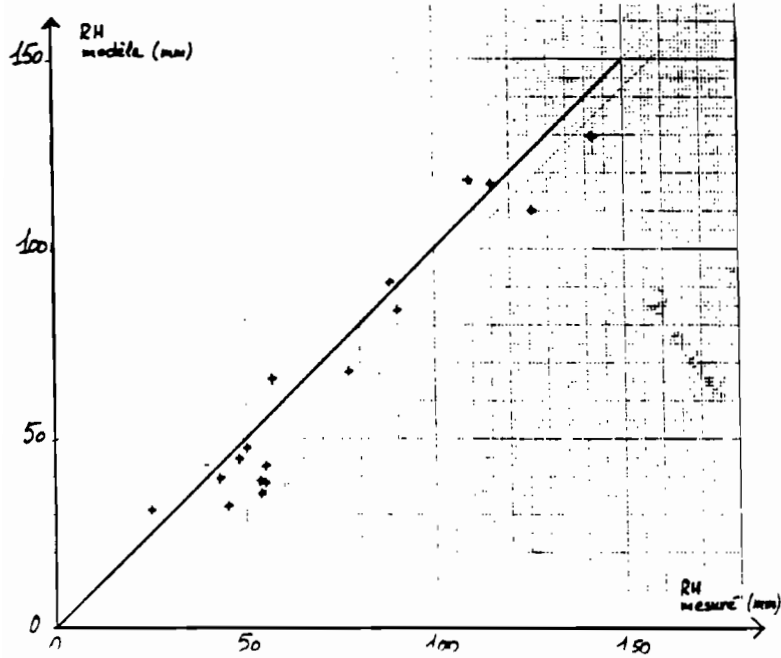
### II.4.1 Résultats.

Une première simulation a été réalisée à partir des paramètres d'entrée. Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus sur le terrain. Ils sont donnés dans le tableau suivant:

Date	Dr (mm)		ETR (mm)		RH (mm)	
	Mesuré	Modèle	Mesuré	Modèle	Mesuré	Modèle
10/06/87					25	26
	65	44,6	32	58		
24/06/87					43	39,2
	-	-	-	-		
06/07/87					50	47,6
	-	-	-	-		
13/07/87					57	65,6
	2,5	0	39	31,5		
21/07/87					48	44,8
	15	0	40,5	28,3		
27/07/87					88	91,8
	22,5	20,2	36,5	24,3		
02/08/87					115	117
	-	-	-	-		
05/08/87					126	109,8
	14	0	35,5	30,2		
10/08/87					90	83,6
	-2,1	0	18,5	18,5		
13/08/87					75	67,5
	-5,4	0	30	33,1		
19/08/87					56	38,9
	-3	0	17	12,2		
23/08/87					55	42,7
	-4	0	17	15,5		
27/08/87					45	30,2
	-2	0	20,5	20,5		
02/09/87					49	32,7
	-	-	-	-		
11/09/87					140	129,5
	41	0	54	68,2		
25/09/87					109	118,1

Résultats de la première simulation

Pour mieux visualiser ces résultats, les courbes  
 $RH \text{ modèle} = f(RH \text{ mesurée})$   
et  $\Sigma ETR \text{ modèle} = f(\Sigma ETR \text{ mesurées})$  ont été tracées.



## II.4.2 Interprétation.

Les résultats sont très satisfaisants. On n'observe pas de déviation systématique des ETR ou des RH. Ceci confirme la validité des hypothèses de base du modèle (modélisation de RU, ETM et ETR).

On note cependant une tendance du modèle à sous estimer les réserves hydriques. Cette tendance peut être interprétée de la manière suivante:

### \* Le drainage après une forte pluie:

Le jour suivant les fortes pluies, la modélisation ramène la réserve hydrique à son maximum et comptabilise l'excédent comme du drainage. Ensuite, la RH diminue progressivement en fonction de l'ETR.

En fait, l'inertie du drainage (importante en raison des faibles conductivités hydrauliques) maintient le sol au-delà de la capacité au champ trois à quatre jours après les fortes pluies. Cela a pour effet de retarder la diminution de la RH par rapport à celle qui est modélisée.

### \* Les remontées capillaires:

Le modèle ne prend pas en compte ce phénomène qui peut être non négligeable en période de déficit hydrique. Il sous estime ainsi la profondeur de l'activité racinaire, ce qui a pour effet de diminuer les ETR et les RH. C'est bien ce que l'on observe en période sèche.

Ces deux phénomènes sont actuellement en cours de modélisation.

## III. LA VALIDITE DES PARAMETRES D'ENTREE: DEUXIEME SIMULATION.

### III.1 MODIFICATION DES PARAMETRES

Les résultats de la première simulation montrent:

- une surestimation des ETR en début et fin de cycle
- une sous estimation des ETR en phase de croissance et de remplissage des grains

Ces observations nous ont amenés à modifier les paramètres qui agissent directement sur les ETR, à savoir les coefficients culturaux.

Une seconde simulation a été effectuée avec les paramètres suivants:

Paramètre	Ancienne valeur	Nouvelle valeur	Effet subi
Coefficient cultural en début de cycle (Kcs)	0,5	0,4	Diminution des ETR en début de cycle
Date où le coeff. cultural atteint son maximum (J)	60 j	35 j	Augmentation des ETR en phase de croissance
Coefficient cultural à la récolte (J KCR)	0,7	0,6	Diminution des ETR en fin de cycle

Remarque: Le choix des nouveaux paramètres a été réalisé en fonction de données bibliographiques et des observations sur le terrain.

- les valeurs de Kcs et KCR sont celles proposées par F.PRAT (1985).

- la valeur de J correspond au stade 14-17 feuilles de maïs. Il couvre alors entièrement la surface du sol et on peut considérer que l'ETM est maximale.

- la valeur de KCM (coefficient cultural maximum) a été maintenue à 1,2. En effet, nous avons déjà signalé que pour les périodes correspondantes à des ETM maximales (août), les valeurs d'ETP paraissent faibles (cf Résultats III.3). Ceci peut suffire à expliquer les faibles valeurs d'ETP fournies par le modèle durant cette période.

### III.2 RESULTATS ET INTERPRETATIONS.

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant:

Date	Dr (mm)		ETR (mm)		RH (mm)	
	Mesuré	Modèle	Mesuré	Modèle	Mesuré	Modèle
10/06/87					25	26,5
	65	48,5	32	55		
24/06/87					43	39,2
	-	-	-	-		
06/07.87					50	47,6
	-	-	-	-		
13/07/87					57	65,6
	2,5	0	39	36		
21/07/87					48	40,7
	15	0	40,5	33,4		
27/07/87					68	81,7
	22,5	7,7	36,5	27,5		
02/08/87					115	117
	-	-	-	-		
03/08/87					125	109,3
	14	0	33,5	30,6		
10/08/87					90	82,7
	-2,1	0	18,5	18,5		
13/08/87					75	66,6
	-5,4	0	30	33,1		
19/08/87					56	38,2
	-3	0	17	12,2		
23/08/87					55	42,2
	-4	0	17	15,2		
27/08/87					45	29,9
	-2	0	20,5	20,5		
02/09/87					49	32,8
	-	-	-	-		
11/09/87					140	128,7
	41	1,7	54	61		
35/09/87					109	125,9

Résultats de la deuxième simulation

Les modifications n'ont affecté que faiblement les ETR du modèle.

Il est vraisemblable que les nouveaux paramètres sont plus proches de la réalité, mais il est difficile de se prononcer, compte tenu de la précision des résultats expérimentaux.

Plus qu'un réajustement vers les valeurs mesurées, cette seconde simulation a permis de mettre en évidence la faible influence des paramètres modifiés. Or ce sont précisément des paramètres difficiles à estimer.

Ces premiers résultats ont donc surtout mis en évidence la validité des hypothèses qui sont utilisées dans le modèle. D'autres simulations devront permettre d'étudier plus précisément l'influence de chacun des paramètres d'entrée, donnant ainsi une idée de la souplesse d'utilisation de ce modèle.

## CONCLUSION

Les résultats de l'essai-drainage interne ont permis de mieux connaître les caractéristiques hydrodynamiques des andosols du Vivero : conductivité hydraulique, relations succion-humidité.

A partir de ces données, nous avons pu mesurer le drainage sur des périodes pluvieuses, permettant ainsi de calculer directement l'évapotranspiration réelle d'une culture de maïs.

Les valeurs d'ETR mesurées ont permis de vérifier la validité du modèle de bilan hydrique.

Elles donnent également des ordres de grandeur des consommations en eau de la culture, notamment les ETM, ainsi que des précisions sur la répartition de ces consommations au cours du cycle.

D'autre part, les différents essais réalisés ont également permis de caractériser les réserves hydriques du sol: réserve utile, réserve facilement utilisable. Ces résultats obtenus sur le terrain ont par la suite servi de paramètres d'entrée du modèle. La concordance des valeurs mesurées et simulées confirme la validité de ces paramètres.

Enfin, les mêmes essais, réalisés sur d'autres cycles, voire d'autres cultures, permettraient de vérifier que ces paramètres sont intrinsèques du sol étudié.

- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -

CHERRIER, MOUTONNET et COULHA T., 1979, Application des méthodes neutroniques et tensiométriques à la détermination des flux d'eau en profondeur, sous culture de maïs. Bulletin GFH n°5.

COUCHAT P., 1977, Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols. Annales Agronomiques, 28 (5), p 477 - 488.

DAUDET F. et VACHAUD G., 1977, La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. Annales Agronomiques, 28 (5), p 503 - 519.

DAUDET F. et VALANCOGNE C., 1976, Mesure des flux profonds de drainage ou de remontées capillaires. Leur importance dans le bilan hydrique.

HILLEL D., 1974, Soil and water physical principles and processes. Academic Press, N.Y., 288 pages.

HILLEL D., KRENTOS V.D. and STYLIANOU Y., 1972, Procedure and test of an internal drainage. Method for measuring hydraulic characteristics in situ. Soil Science, 114, 5, p 395 - 401.

KATERJI N., DAUDET F. et VALANCOGNE C., 1984, Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique. Détermination et importance. Annales Agronomiques, 4 (8), p 779 - 787.

LEMON E.R., 1956, Potentialities for decreasing soil moisture loss. Soil Sci. Soc. of Am. Proc., 20, p 120 - 125.

LE PELLETIER DU CLARY D., 1986, Mesures des termes du bilan hydrique sur culture de maïs, en vue de l'étalonnage d'un modèle informatique, sur sols d'origine volcanique au Nicaragua, DAA ENSAM (44 pages).

MOUTONNET, La mesure de l'humidité des sols. Intérêt et limitation. Bulletin GFHN n° 3.

PRAT F., 1985, Mesure des termes du bilan hydrique en vue du rationnement de l'irrigation d'une culture de maïs au Nicaragua, DSA CIRAD.

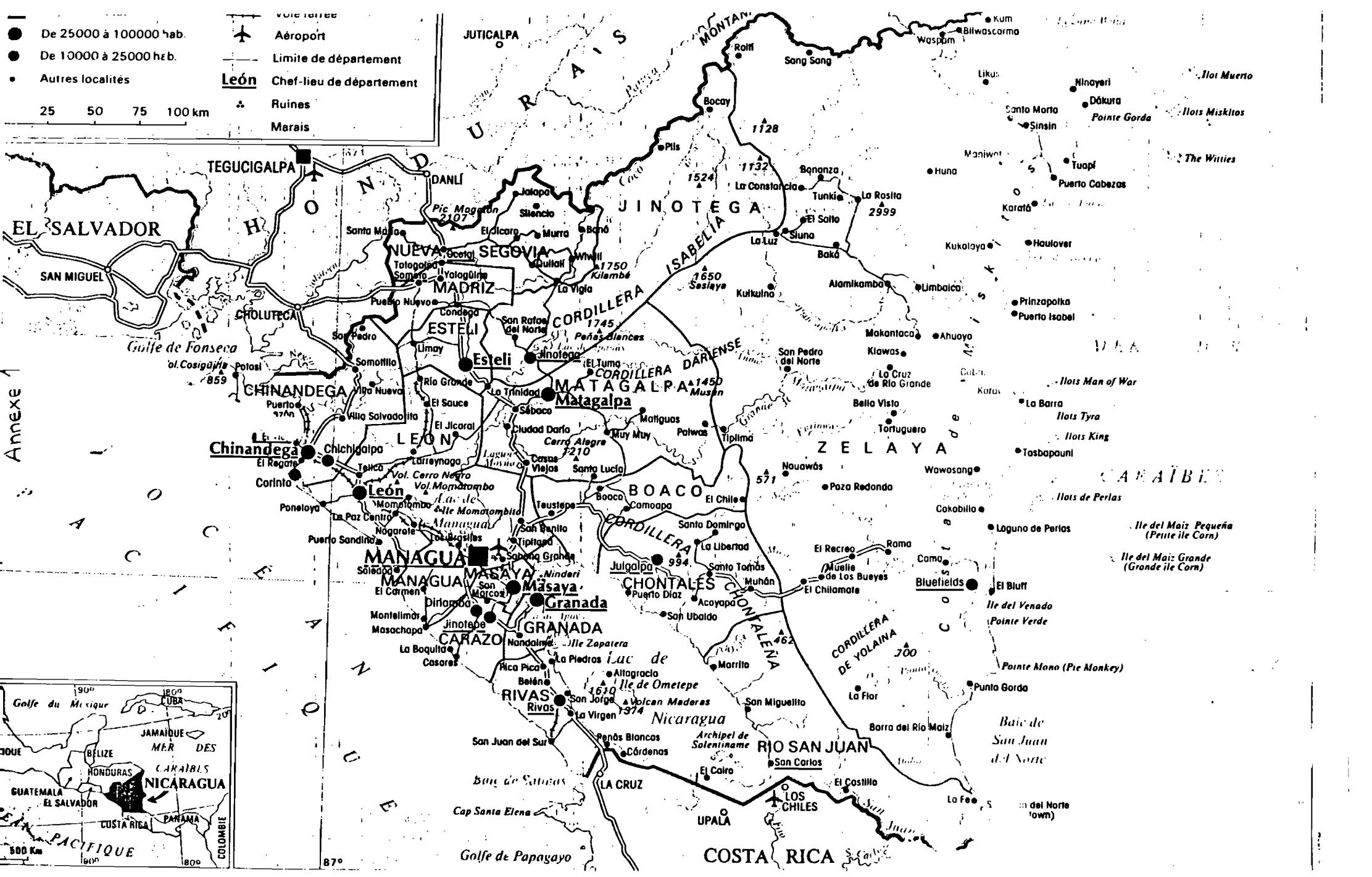
VACHAUD C. et DANCETTE C., 1977, Méthode de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé. ISRA (26 pages).

VERNET, 1963, Evaporation de l'eau du sol. Annales Agronomiques, 14, p 587 - 600.

## ANNEXES

## ANNEXES

- Annexe 1: Carte du Nicaragua.
- Annexe 2: Données climatiques.
- Annexe 3: Disposition des parcelles d'étude au vivero
- Annexe 4: Fiche descriptive du sol.  
Analyse granulométrique (D.DU CLARY, 1986)
- Annexe 5: Variation des profils hydriques en fonction du temps.
- Annexe 6: Modélisation des courbes  $H = f(t)$ .
- Annexe 7: Evolution des profils hydriques. Infiltration.
- Annexe 8: Variation des conductivités en fonction de l'humidité.
- Annexe 9: Courbe  $h = f(\theta)$  (bilan hydrique)  
Courbe  $h = f(\theta)$  (drainage interne)
- Annexe 10: Phénomène d'hystérésis à 20 cm de profondeur.
- Annexe 11: Evaluation du drainage (essai bilan hydrique).
- Annexe 12: Calcul des variations de stock à 110 cm (essai bilan hydrique).
- Annexe 13: Détermination de la capacité au champ.
- Annexe 14: MODELE
- Annexe 15: Croissance racinaire et stades phénologiques du maïs (Sylvie ROBIN).

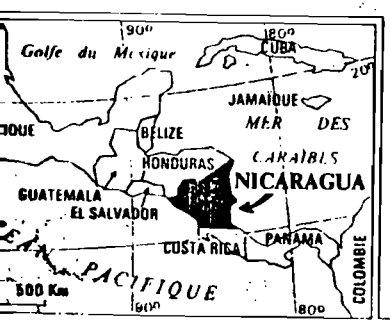


● De 25000 à 100000 hab.  
 ● De 10000 à 25000 hab.  
 ● Autres localités

✈ Aéroport  
 — Limite de département  
**León** Chef-lieu de département  
 ✪ Ruines  
 ■ Marais

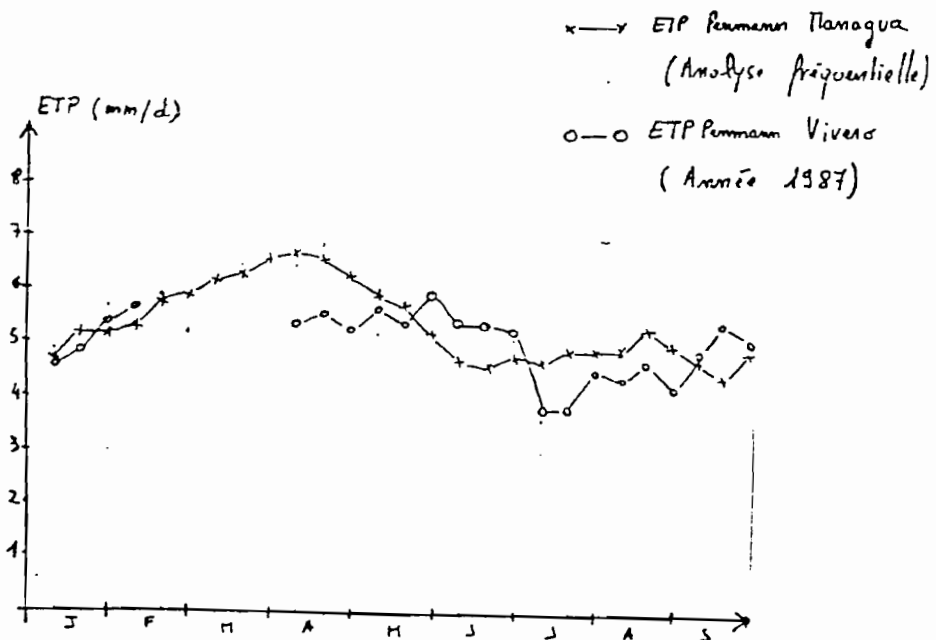
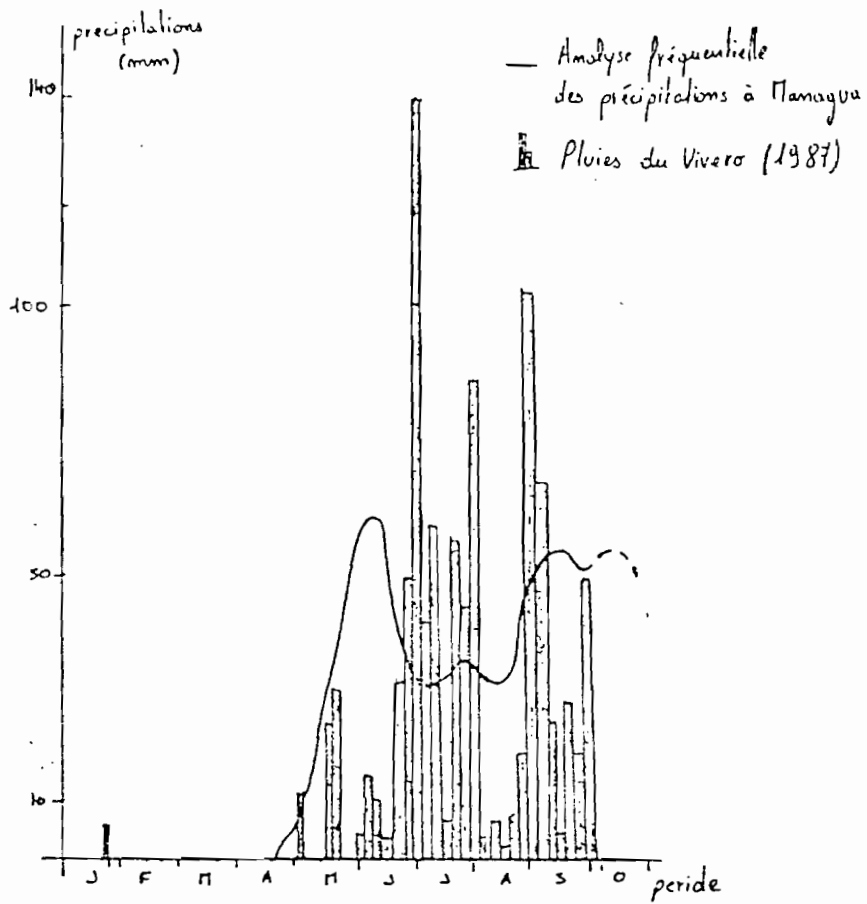
25 50 75 100 km

ANNEXE 1



87°

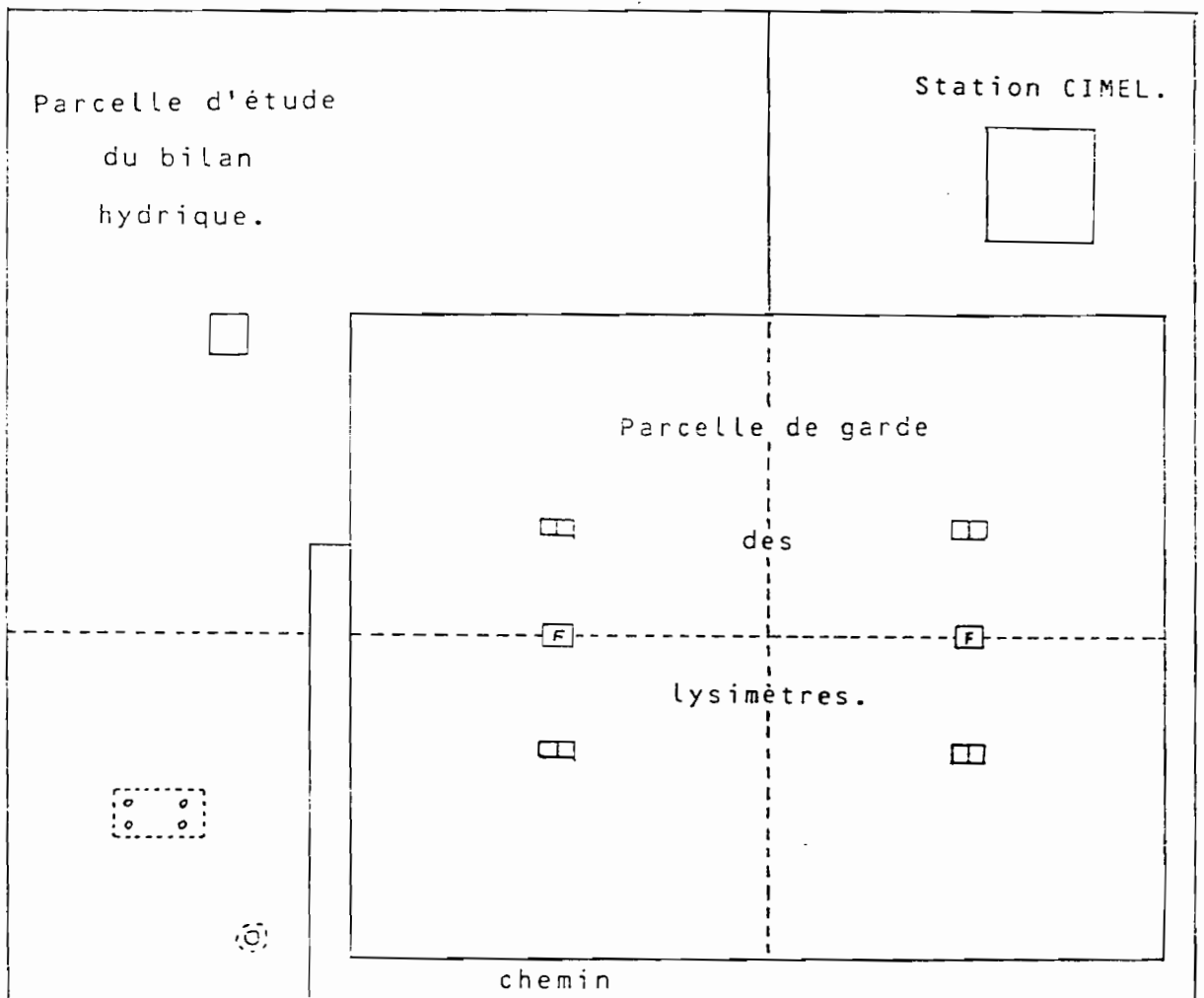
# ANNEXE 2: DONNEES CLIMATIQUES.



ANNEXE 3 :

## DISPOSITION DES PARCELLES D'ETUDE AU VIVERO

echelle : 1 / 1000 <sup>e</sup>



▭ lysimètre

▣ fosse de drainage

⊙ dispositif d'étude du point de flétrissement

▭ Installation bilan hydrique irrigué (03/87 - 05/87)

▭ Installation

drainage interne (04/87 - 05/87)

bilan hydrique (06/87 - 10/87)

# enith-sol

Profil N° : 1

Pour :

Le : 9/10/87

A ou Environ : Vivero  
Cofradia

Roche : /

Altitude : /

Topographie : /

I.C.N. : /

Végétation : Plais

Classification du sol :  
**ANDOSOL BRUN**

## nomenclature

Horizon I de 0 à 50cm : Un - AP  
Horizon II de 50 à 70cm : Un - AB  
Horizon III de 70 à 120cm : Un - AC  
Horizon IV de 120 à 160cm : Un - C

## TEXTURE

I <15% A L.s  
II L.s fin  
III L.s  
IV L.s très fin

COULEUR DOMINANTE : Brun

I  
II  
III  
IV

## HUMIDITÉ

I II III IV  
2 2 2 2 : sec  
3 3 3 3 : fraie  
4 4 4 4 : humide  
5 5 5 5 : très humide  
6 6 6 6 : noyé

## TACHES - AUTRES TACHES

I	II	III	IV	abondance	I	II	III	IV
2	2	2	2	2 : sans taches	2	2	2	2
3	3	3	3	3 : qls taches	3	3	3	3
4	4	4	4	4 : taches	4	4	4	4
5	5	5	5	5 : nba taches	5	5	5	5
6	6	6	6	6 : très nba taches	6	6	6	6

## couleur

I Rouille - blanche  
II "  
III "  
IV "

## formes

I	II	III	IV	abondance	I	II	III	IV
2	2	2	2	2 : irrégulières	2	2	2	2
3	3	3	3	3 : arrondies	3	3	3	3
4	4	4	4	4 : en trainées	4	4	4	4
5	5	5	5	5 : en bandes	5	5	5	5

## limites

I	II	III	IV	abondance	I	II	III	IV
2	2	2	2	2 : peu nettes	2	2	2	2
3	3	3	3	3 : nettes	3	3	3	3
4	4	4	4	4 : très nettes	4	4	4	4

## contrastes

I	II	III	IV	abondance	I	II	III	IV
2	2	2	2	2 : peu contrastées	2	2	2	2
3	3	3	3	3 : contrastées	3	3	3	3
4	4	4	4	4 : très contrastées	4	4	4	4

## dimensions

I	II	III	IV	abondance	I	II	III	IV
1	1	1	1	1 : =	3	3	3	3
2	2	2	2	2 : =	4	4	4	4
3	3	3	3	3 : =	5	5	5	5
4	4	4	4	4 : =	6	6	6	6

## MATIERES ORGANIQUES

I	II	III	IV	abondance	I	II	III	IV
2	2	2	2	2 : débris organiques	2	2	2	2
3	3	3	3	3 : M.O. directement décelables	3	3	3	3
4	4	4	4	4 : M.O. non "	4	4	4	4
5	5	5	5	5 : apparemment non organique.	5	5	5	5

## CALCAIRE :

I	II	III	IV	Réaction Hcl - Teneur en CaCO <sub>3</sub>
2	2	2	2	2 : aucune effervescence : nulle
3	3	3	3	3 : très faible " : traces
4	4	4	4	4 : faible " : faible
5	5	5	5	5 : effervescence : moyenne
6	6	6	6	6 : vive " : forte

## Abondance

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : < 2 %
3	3	3	3	3 : 2 à 15 %
4	4	4	4	4 : 15 à 30 %
5	5	5	5	5 : 30 à 50 %
6	6	6	6	6 : > 50 %

## Consistance

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : friable
3	3	3	3	3 : dure

## Repartition

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : localisée
3	3	3	3	3 : généralisée

## Forme

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : diffus
3	3	3	3	3 : pseudomycélium
4	4	4	4	4 : en amas
5	5	5	5	5 : en nodules
6	6	6	6	6 : en encroûtement

## ÉLÉMENTS GROSSIERS :

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : < 2 %
3	3	3	3	3 : 2 à 15 %
4	4	4	4	4 : 15 à 30 %
5	5	5	5	5 : 30 à 50 %
6	6	6	6	6 : > 50 %

Dimensions

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : Gravière : 0,2 à 2 cm
3	3	3	3	3 : Cailloux : 2 à 20 cm
4	4	4	4	4 : blocs : > 20 cm

## Nature et nom

I	II	III	IV	abondance
1	1	1	1	1 : Lapilli
2	2	2	2	2 : Tufs
3	3	3	3	3 : Lapilli sableux-compacts
4	4	4	4	4 : (autres)

## Altération

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : non altérée
3	3	3	3	3 : faiblement altérée
4	4	4	4	4 : altérée
5	5	5	5	5 : fortement altérée

## ÉLÉMENTS FE/FE - Mn :

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : < 2 %
3	3	3	3	3 : 2 à 15 %
4	4	4	4	4 : 15 à 30 %
5	5	5	5	5 : 30 à 50 %
6	6	6	6	6 : > 50 %

## Formes

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : diffuse
3	3	3	3	3 : en taches
4	4	4	4	4 : en nodules
5	5	5	5	5 : en concrétions
6	6	6	6	6 : en pellicules
7	7	7	7	7 : en carapace
8	8	8	8	8 : en cuirasse

## Consistance

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : friables
3	3	3	3	3 : durs
4	4	4	4	4 : très durs

## STRUCTURE

I	II	III	IV	abondance
2	2	2	2	2 : particulière
3	3	3	3	3 : massive
4	4	4	4	4 : fragmentaire

## Type de structure fragmentaire

I	II	III	IV	abondance	sur ou sous structure
2	2	2	2	2 : cubique	2 2 2 2
3	3	3	3	3 : plaquettes obliques	3 3 3 3
4	4	4	4	4 : lamellaire	4 4 4 4
5	5	5	5	5 : équimasse	5 5 5 5
6	6	6	6	6 : prismatique	6 6 6 6
7	7	7	7	7 : en colonnes	7 7 7 7
8	8	8	8	8 : polyédrique	8 8 8 8
9	9	9	9	9 : polyédrique subangulaire	9 9 9 9
10	10	10	10	10 : grenue	10 10 10 10
11	11	11	11	11 : grumeleuse	11 11 11 11

## Dimensions

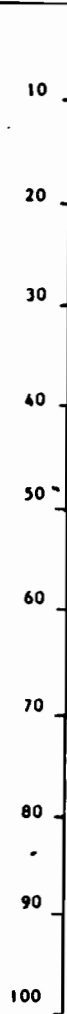
I	II	III	IV	abondance	sur ou sous structure
2	2	2	2	2 : très fine	2 2 2 2
3	3	3	3	3 : fine	3 3 3 3
4	4	4	4	4 : moyenne	4 4 4 4
5	5	5	5	5 : grossière	5 5 5 5
6	6	6	6	6 : très grossière	6 6 6 6
7	7	7	7	7 : fine et très fine	7 7 7 7
8	8	8	8	8 : moyenne et fine	8 8 8 8
9	9	9	9	9 : moyenne et grossière	9 9 9 9
10	10	10	10	10 : grossière et très gros	10 10 10 10

## Netteté

I	II	III	IV	abondance	sur ou sous structure
2	2	2	2	2 : peu nette	2 2 2 2
3	3	3	3	3 : nette	3 3 3 3
4	4	4	4	4 : très nette	4 4 4 4
2	2	2	2	2 : sous-structure	
3	3	3	3	3 : sous-structure	

<p><b>POROSITE</b></p> <p>Volume des vides entre les agrégats :</p> <p>I II III IV</p> <p>2 2 2 2 : très faible  3 3 3 3 : faible  4 4 4 4 : assez important  5 5 5 5 : important  6 6 6 6 : très important</p>	<p><b>POROSITÉ</b> <u>Appréciation globale</u></p> <p>1 II III IV</p> <p>2 2 2 2 : non poreux  3 3 3 3 : très peu poreux  4 4 4 4 : peu poreux  5 5 5 5 : poreux  6 6 6 6 : très poreux</p>	<p><b>CONSISTANCE</b></p> <p>I II III IV</p> <p>2 2 2 2 : rigide  3 3 3 3 : semirigide  4 4 4 4 : malléable  5 5 5 5 : pâteuse  6 6 6 6 : élastique</p>	<p><b>ACTIVITE :</b></p> <p>Traces d'activité :</p> <p>degré d'activité</p> <p>I II III IV</p> <p>2 2 2 2 : nulle  3 3 3 3 : très faible  4 4 4 4 : faible  5 5 5 5 : moyenne  6 6 6 6 : forte</p>
<p><i>du sol</i></p> <p><u>porosité des vides = Abondance</u></p> <p>2 2 2 2 : sans pores visibles  3 3 3 3 : pores peu nombreux  4 4 4 4 : pores nombreux  5 5 5 5 : pores très nombreux</p>	<p><u>COHESION</u> entre les agrégats</p> <p>2 2 2 2 : bouillant  3 3 3 3 : meuble  4 4 4 4 : cohérent</p>	<p>2 2 2 2 : non plastique  3 3 3 3 : peu plastique  4 4 4 4 : plastique  5 5 5 5 : très plastique</p>	<p><b>TRANSITION</b></p> <p>2 2 2 2 : diffuse &gt; 12 cm  3 3 3 3 : graduelle : 5 à 12  4 4 4 4 : distincte : 2 à 5  5 5 5 5 : nette &lt; 2  6 6 6 6 : très nette - direct</p>
<p><u>largeur</u></p> <p>2 2 2 2 : très fine &lt; 1 mm  3 3 3 3 : fine 1 à 2 mm  4 4 4 4 : moyenne 2 à 5 mm  5 5 5 5 : larges &gt; 5 mm</p>	<p><u>FACES DES AGREGATS</u></p> <p>2 2 2 2 : faces luisantes  3 3 3 3 : faces de glissements</p>	<p>2 2 2 2 : non collant  3 3 3 3 : peu collant  4 4 4 4 : collant  5 5 5 5 : très collant</p>	<p><b>LIMITE INFÉRIEURE</b></p> <p>2 2 2 2 : régulière  3 3 3 3 : ondulée  4 4 4 4 : irrégulière  5 5 5 5 : interrompue</p>
<p><u>formes "trop petits"</u></p> <p>2 2 2 2 : tubulaires  3 3 3 3 : vacuolaires  4 4 4 4 : vésiculaires  5 5 5 5 : intergranulaires</p>	<p><u>REVETEMENTS : nature</u></p> <p>2 2 2 2 : Argileux  3 3 3 3 : Organo-Argileux  4 4 4 4 : Organo-ferrugineux  5 5 5 5 : Saaquioxides  6 6 6 6 : Sels solubles  7 7 7 7 : limoneux  8 8 8 8 : sableux  9 9 9 9 : complexes</p>	<p>2 2 2 2 : non friable  3 3 3 3 : peu friable  4 4 4 4 : friable  5 5 5 5 : très friable</p>	<p><b>OBSERVATIONS :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Croute de battance</li> <li>• Poteries précolombiennes</li> <li>• Racines soignées</li> </ul>
<p><u>orientation</u></p> <p>2 2 2 2 : verticaux  3 3 3 3 : horizontaux  4 4 4 4 : obliques  5 5 5 5 : sans orientation dominante  6 6 6 6 : Indéterminée</p>	<p><u>épaisseur</u></p> <p>2 2 2 2 : minces  3 3 3 3 : épais  4 4 4 4 : très épais</p>	<p><b>RACINES</b></p> <p><u>Abondance</u></p> <p>2 2 2 2 : pas de racines  3 3 3 3 : quelques racines  4 4 4 4 : racines  5 5 5 5 : nombreuses racines</p>	
<p><b>FENTES DE RETRAIT</b></p> <p>largeur (mm)      Écartements</p> <p>I  II  III  IV</p>	<p><u>couleur</u></p> <p>I Brom foncée  II  III  IV</p>	<p><u>Grossueur</u></p> <p>2 2 2 2 : fines  3 3 3 3 : moyennes  4 4 4 4 : grosses</p>	
<p><b>POROSITE BIOLOGIQUE</b></p> <p>2 2 2 2 : très faible  3 3 3 3 : faible  4 4 4 4 : assez importante  5 5 5 5 : importante  6 6 6 6 : très importante</p>	<p><u>localisation</u></p> <p>2 2 2 2 : sur agrégats  3 3 3 3 : associées aux vides erracines</p>	<p><u>Pénétration</u></p> <p>2 2 2 2 : entre les agrégats  3 3 3 3 : sur faces "  4 4 4 4 : pénétrant "</p>	
	<p><u>recouvrement %</u></p> <p>I 1%  II  III  IV</p>	<p><u>chevelu</u></p> <p>2 2 2 2 : pas de chevelu  3 3 3 3 : chevelu  4 4 4 4 : chevelu très dense</p>	

Schéma



ANNEXE 4: - ANALYSE GRANULOMETRIQUE - (D·DU CLARY)

profondeur de l'échantillon	SG (%)	SF (%)	LG (%)	LF (%)	A (%)
Surface	16,4	21,3	8,5	23,9	30
30 cm	12,3	18,1	8,5	30,4	30,9
50 cm	14,2	20,4	4,8	30,8	29,8
70 cm	17,6	30,8	8,4	22,5	20,7
100 cm	13,7	26,1	7,8	28	24,4
126 cm	17,4	27,3	19,7	22,15	13,4
140 cm	13,0	24,5	31,8	24,4	6,9

SG : sables grossiers

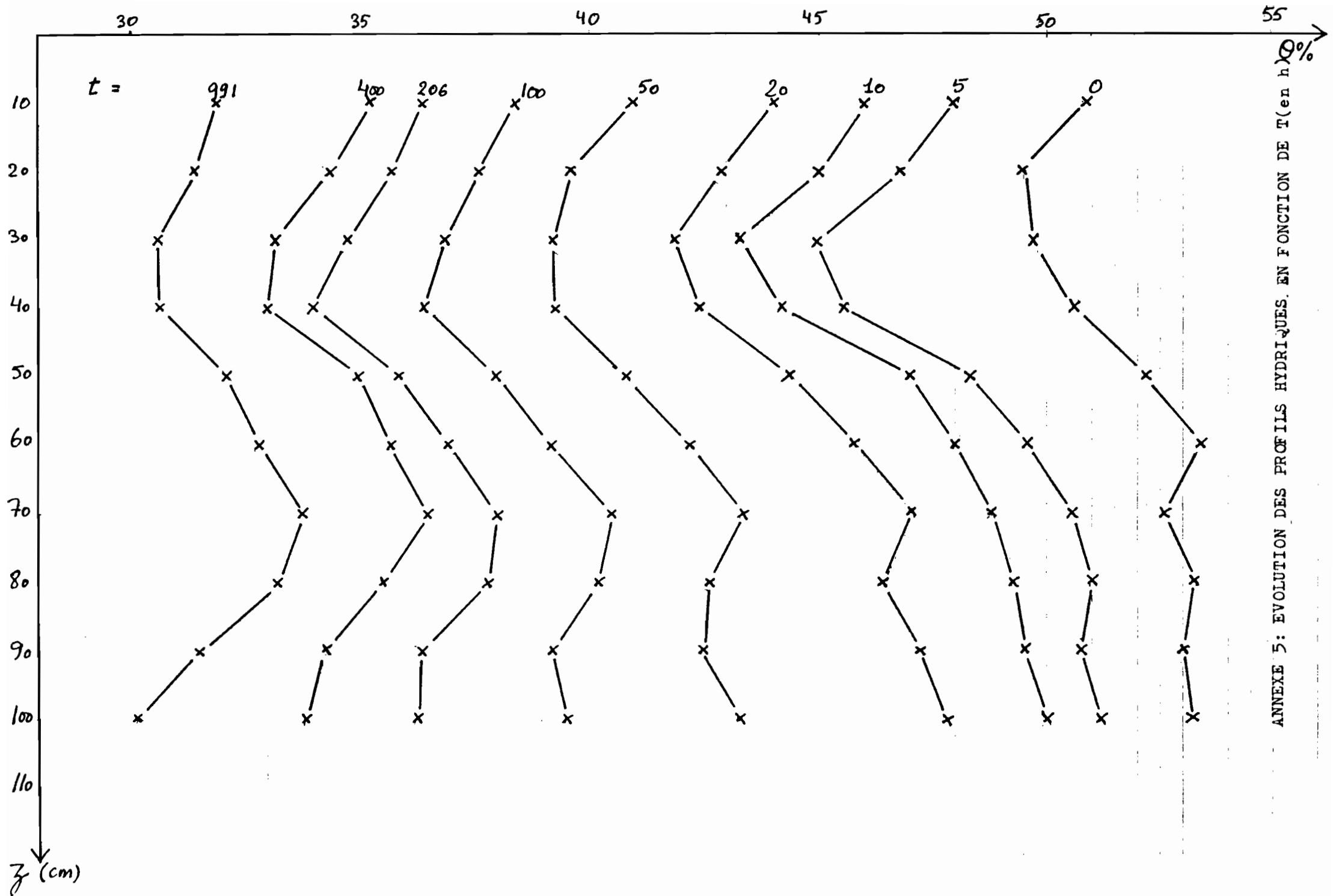
SF : sables fins

LG : limons grossiers

LF : limons fins

A : argiles

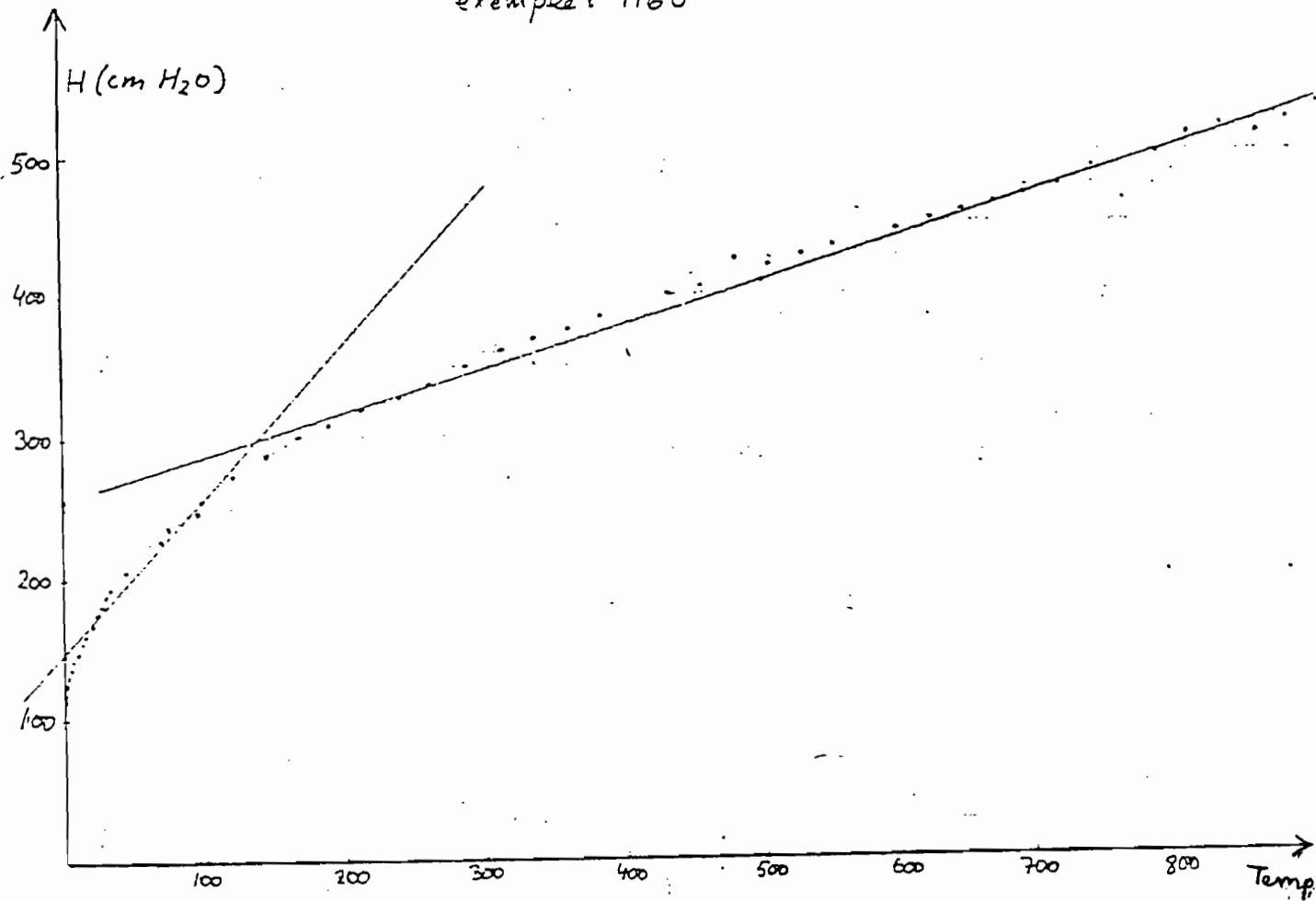
.....



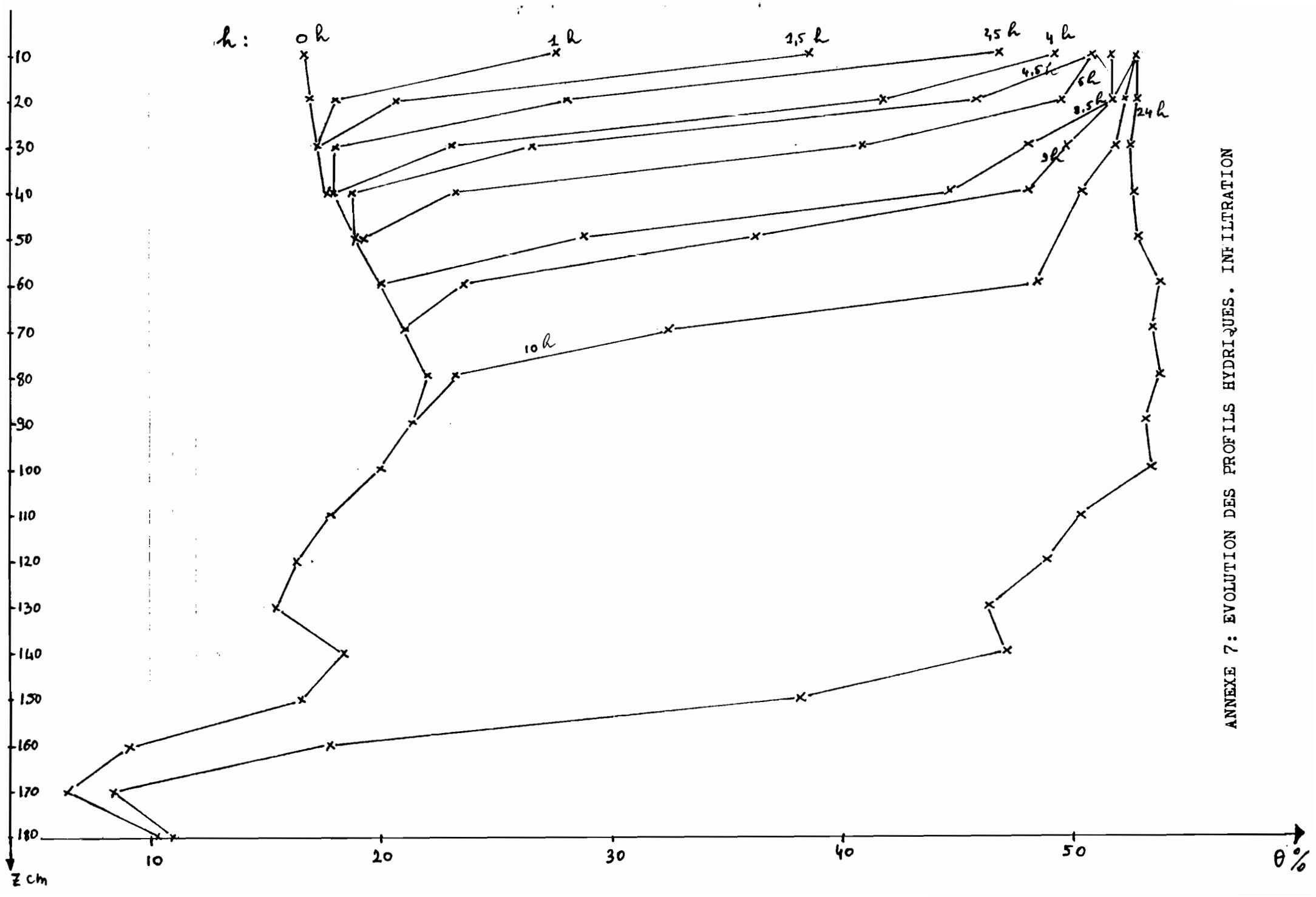
ANNEXE 5: EVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES. EN FONCTION DE T(en h)

ANNEXE 6 - Modélisation des courbes  $H = f(t)$

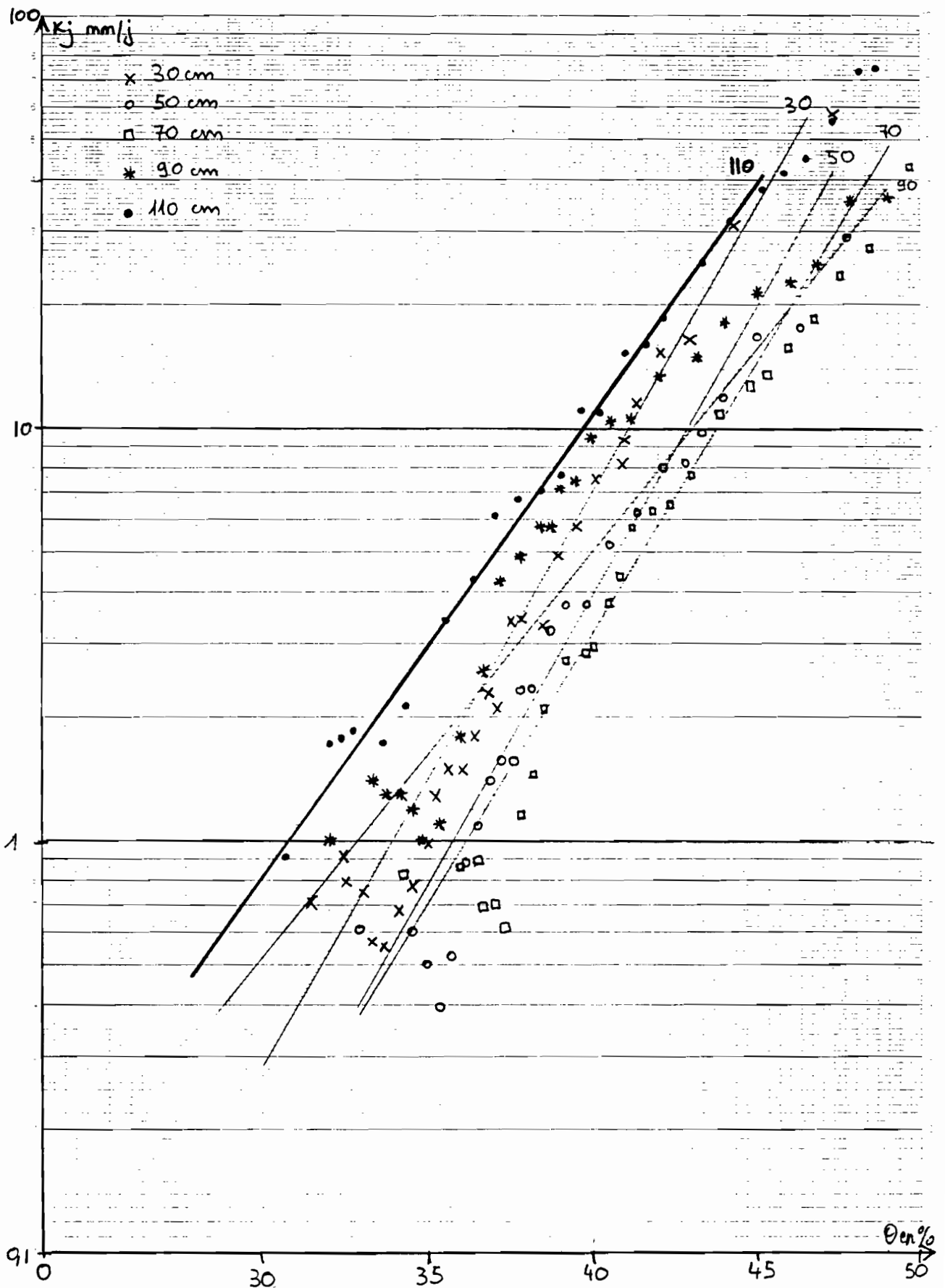
exemple: H60



Prof.	$t = 0 \text{ à } 145$	$r$	$t = 145 \text{ à } \infty$	$r$
20	$H_{20} = 104 + 1,00 t$	0,99	$H_{20} = 193 + 0,36 t$	0,99
40	$H_{40} = 120 + 1,04 t$	0,99	$H_{40} = 215 + 0,34 t$	0,99
60	$H_{60} = 147 + 1,12 t$	0,98	$H_{60} = 258 + 0,31 t$	0,99
80	$H_{80} = 173 + 1,15 t$	0,97	$H_{80} = 290 + 0,29 t$	0,99
100	$H_{100} = 201 + 1,09 t$	0,96	$H_{100} = 319 + 0,27 t$	0,98
120	$H_{120} = 215 + 1,13 t$	0,97	$H_{120} = 338 + 0,26 t$	0,99

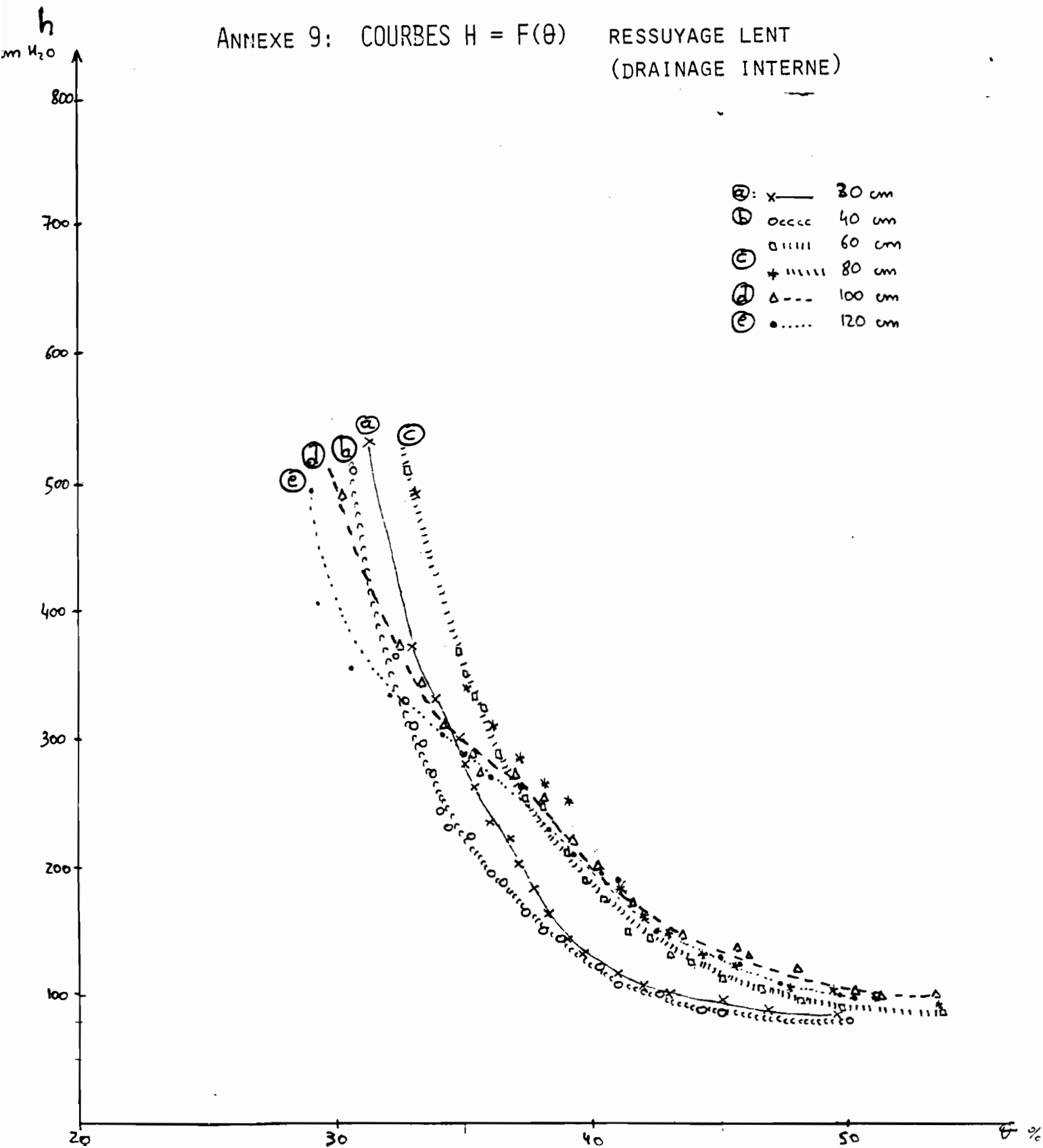


ANNEXE 7: EVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES. INFILTRATION



ANNEXE 8: VARIATIONS DES CONDUCTIVITES HYDRAULIQUES EN FONCTION DE L' HUMIDITE

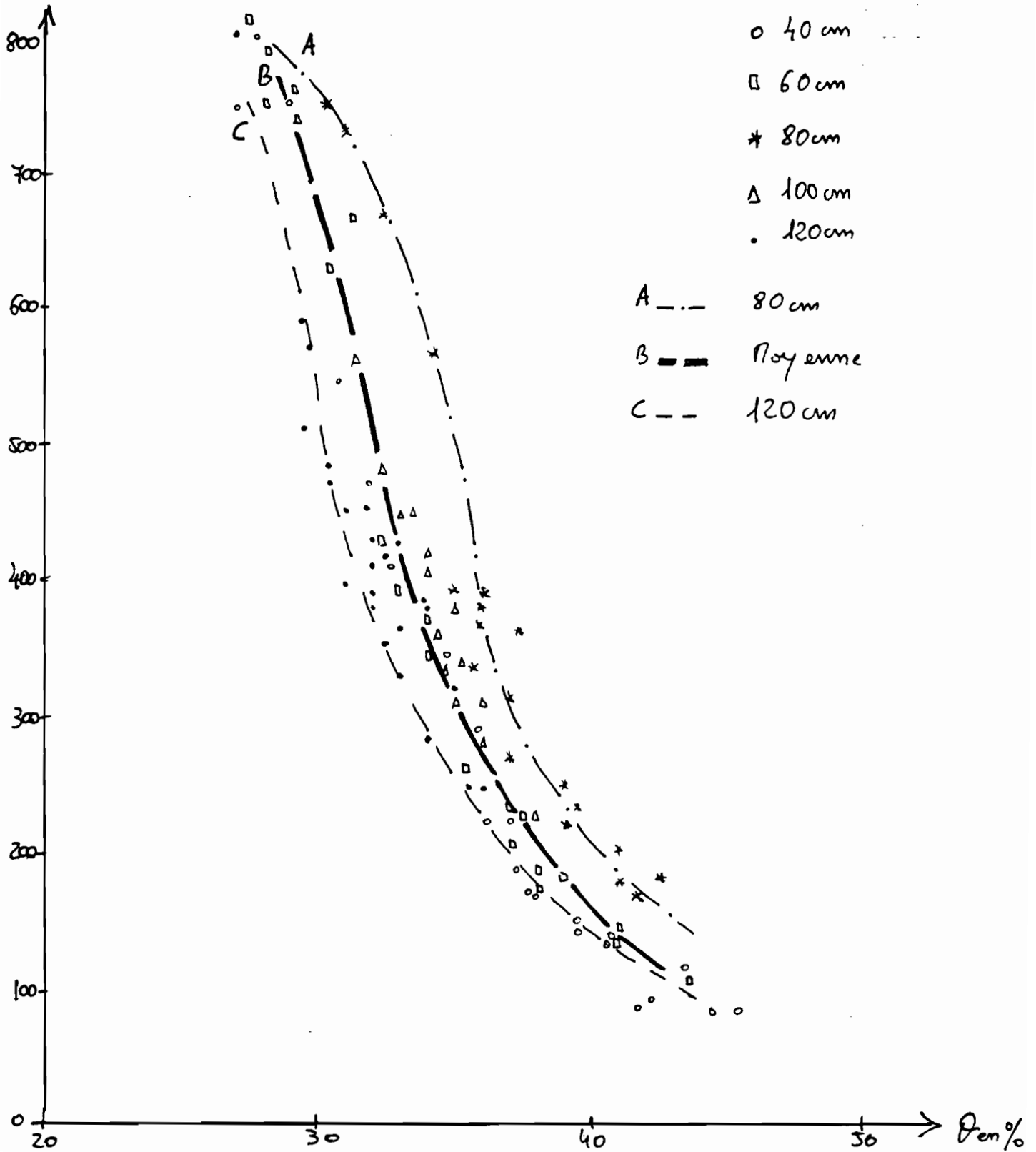
ANNEXE 9: COURBES  $H = F(\theta)$     RESSUYAGE LENT  
 (DRAINAGE INTERNE)



ANNEXE 9: COURBES  $H = F(\theta)$

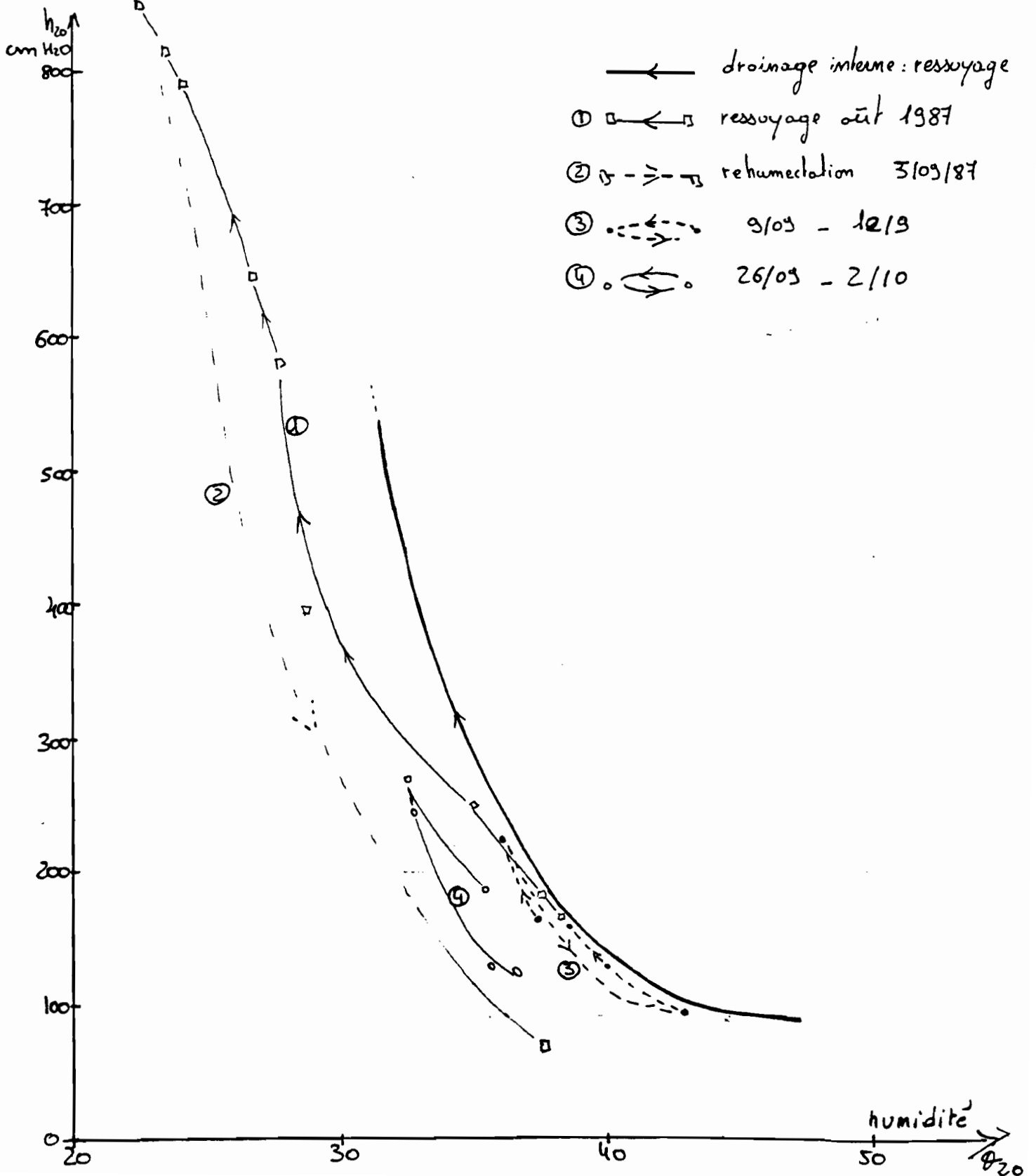
(BILAN HYDRIQUE)

$h$  en  $\text{cm H}_2\text{O}$



ANNEXE 10: PHENOMENES D'HYSTERESIS (20 CM DE PROFONDEUR)

potentiel  
matriciel



## ANNEXE 11: EVALUATION DU DRAINAGE.

Principe de calcul :

$$Dr = K_{110}(\theta) \times \text{Grad}_{110} \quad \text{avec} \quad K_{110}(\theta) = 6.24 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^{0,24}$$

Période	$\theta_{110}$	K110	Gr 110	Dr	Source d'imprécision
11/06/87 24/06/87	<30%	0,8	6 ± 1	30 ± 4	Manque de données Période infiltration
14/07/87 21/07/87	34%	2,3	Diminue de 1,6 à 0,6	20	Aucune
22/07/87 27/07/87	34,2%	2,5	1,1±0,1	14 ± 2	Aucune
28/07/87 02/08/87	34%	2,3	1,5±0,3	21 ± 4	Incertitude sur les gradients
06/08/87 10/08/87	36±0,5%	3,9±0,5	Diminue de 1,8 à 0,4	25 ± 3	Incertitude sur les conductivités
12/09/87 25/09/87	34%	2	1,7	50	Manque de données Grande imprécision
26/09/87 02/10/87	33,5±0,3	2±0,3	1,7±0,1	24 ± 4	Variations d'humidité

Remarques :

\* Les humidités et les gradients correspondent aux moyennes sur les données mesurées. Les incertitudes sont données par la variance.

\* Lorsque les gradients varient régulièrement sur la période considérée, le drainage a été estimé chaque jour à partir du gradient mesuré, puis cumulé sur la période.

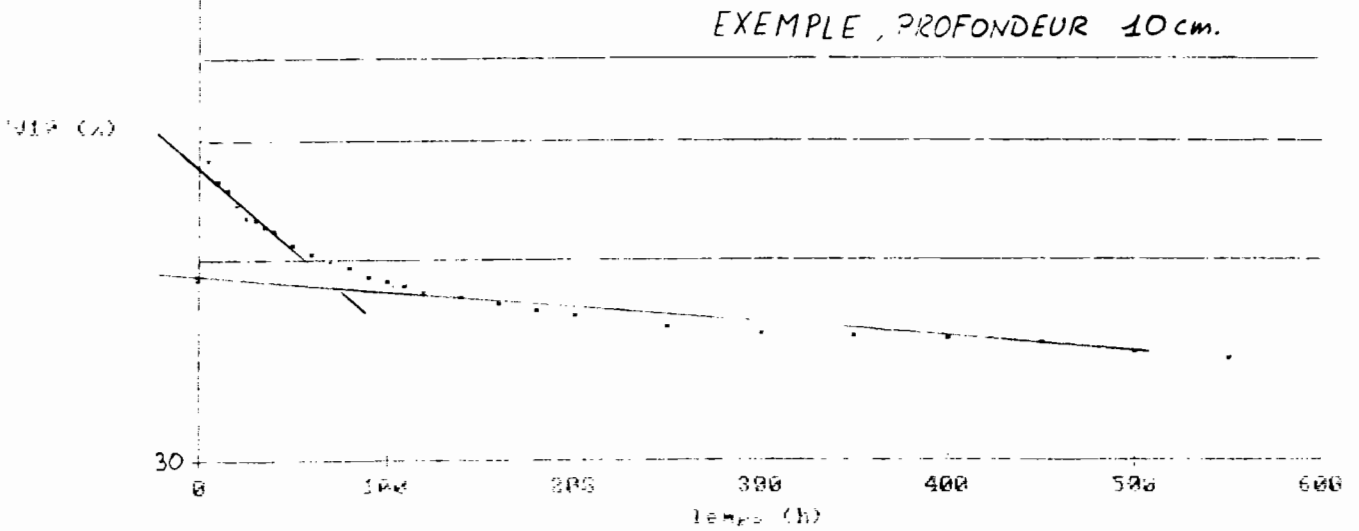
## ANNEXE 12: CALCUL DES VARIATIONS DES STOCKS (A 110 CM DE PROFONDEUR)

\* Les stocks ont été calculés sur une profondeur de 110 cm, à partir des humidités fournies par chacun des tubes BH0 à BH4.

\* Par la suite, nous avons calculé les variations de stock pour chacun des tubes (chiffres en gris) et éliminé les valeurs aberrantes (entre parenthèses) pour obtenir des variabilités inférieures à 10 %.

DATE	STOCKS ET VARIATIONS					VARIATION MOYENNE	VARIABILITE
	BH0	BH1	BH2	BH3	BH4		
11/06	339	318	348	321	323		
	+51	+58	+59	+55	+49	55 ± 4	7 %
29/06	390	376	407	376	372		
	-	-	-	-	-	-	-
14/07	410	398	432	414	404		
	(-33)	-52	-48	-49	-40	-47 ± 4	8 %
22/07	377	346	384	365	364		
	+15	(+29)	+13	+14	+16	15 ± 1	6 %
28/07	392	375	397	379	380		
	+16	+13	+16	+13	-	14 ± 1	7 %
03/08	408	388	413	393	-		
	+17	+22	+33	+24	-	-	-
06/08	425	410	446	416	405		
	-63	-56	-64	-50	-53	57 ± 5	9 %
11/08	362	354	382	366	352		
	-16	-14	-16	-18	(-11)	16 ± 1	7 %
14/08	346	340	366	348	341		
	-28	-25	(-34)	-26	-24	26 ± 1	6 %
20/08	318	315	332	322	317		
	(+3)	-2	-6	-2	-1	-3 ± 3	-
24/08	321	313	326	320	316		
	-17	-13	-12	-14	(-10)	14 ± 2	13 %
28/08	304	300	314	306	306		
	+2	+2	(-6)	0	+2	0 ± 3	-
03/09	306	302	308	306	308		
	-	-	-	-	-	-	-
12/09	429	416	433	408	423		
	-37	-41	-37	-42	(-51)	40 ± 2	5 %
26/09	392	375	396	366	372		
	-3	-4	0	(+21)	+13	5 ± 9	-
03/10	389	371	396	387	385		

Les stocks et les variations sont exprimées en mm.



PROFONDEUR (cm)	CINETIQUE LENTE	$\tau$
10	$HV_{10} = 38,2 e^{-0,0002 t}$	0,93
20	$HV_{20} = 37,7 e^{-0,0002 t}$	0,94
30	$HV_{30} = 36,6 e^{-0,0003 t}$	0,91
40	$HV_{40} = 36,3 e^{-0,0002 t}$	0,88
50	$HV_{50} = 37,5 e^{-0,0002 t}$	0,94
60	$HV_{60} = 38,6 e^{-0,0002 t}$	0,92
70	$HV_{70} = 39,8 e^{-0,0002 t}$	0,92
80	$HV_{80} = 38,9 e^{-0,0003 t}$	0,91
90	$HV_{90} = 37,8 e^{-0,0003 t}$	0,92
100	$HV_{100} = 36,1 e^{-0,0003 t}$	0,94
110	$HV_{110} = 36,0 e^{-0,0004 t}$	0,92
120	$HV_{120} = 36,1 e^{-0,0005 t}$	0,98
130	$HV_{130} = 31,2 e^{-0,0005 t}$	0,95
140	$HV_{140} = 37,3 e^{-0,0006 t}$	0,97
150	$HV_{150} = 32,5 e^{-0,0006 t}$	0,96

→ COURBE CI-DESSUS

ANNEXE 14 :

MODELE DE BILAN HYDRIQUE JOURNALIER ITERATIF : "BILHYJOU"

- Equation de base :  $RHJ = RHJ + PUJ - ETRJ$

avec :  $RHJ$  = réserve hydrique du sol à la fin du jour  $j$   
 $RHI$  = réserve hydrique du sol à la fin du jour  $j - 1$   
 $PUJ$  = pluie utile durant le jour  $j$   
 $ETRJ$  = évapotranspiration réelle du jour  $j$

Nota : Un jour comprend les 24 heures comprises entre 7 ou 8 h du matin du jour  $j$  et 7 ou 8 h du matin du jour  $j + 1$  (comme en pluviométrie).

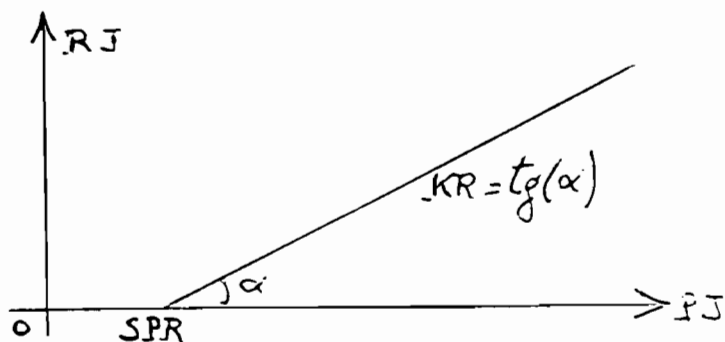
- Modélisation de la pluie utile :  $PUJ$

$PUJ = PJ - RJ - DJ = PEJ - DJ$   
 $PJ$  = pluie enregistrée le jour  $j$  (pluviomètre)  
 $RJ$  = ruissellement du jour  $j$   
 $DJ$  = drainage hors de portée du système racinaire, le jour  $j$   
 $PEJ$  = pluie efficace du jour  $j$  : celle qui rentre dans le sol :  
 $PEJ = PJ - RJ$   
 $PUJ$  = pluie utile du jour  $j$  : celle qui reste dans le sol à disposition du système racinaire

\* Sous-modèle du ruissellement :  $RJ$

$$RJ = KR \cdot (PJ - SPR)$$

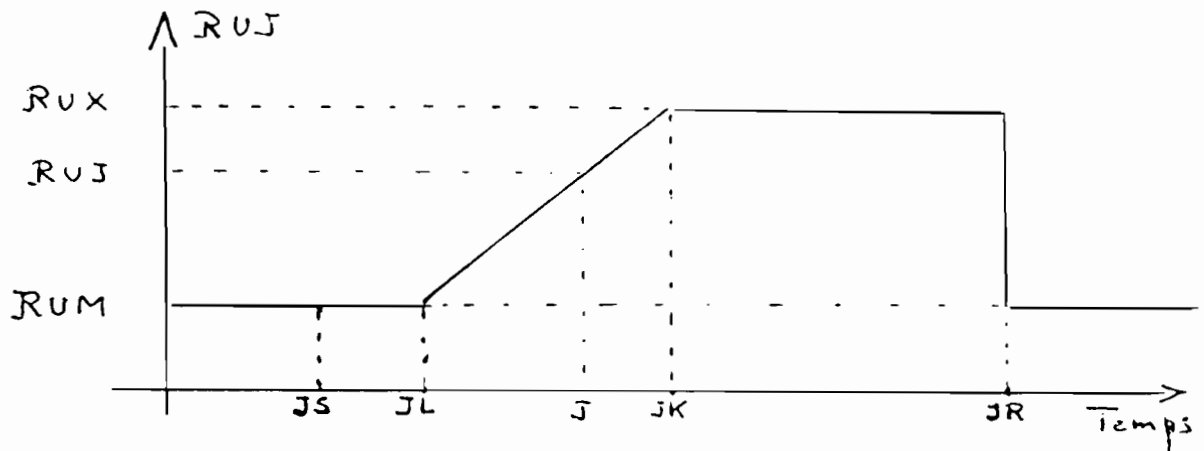
$$\text{Si } PJ < SPR \Rightarrow RJ = 0$$



avec  $SPR$  = seuil pluviométrique de déclenchement du ruissellement  
 $KR$  = coefficient de ruissellement

Nota : Sous modèle très grossier :  $KR$  et  $SPR$  sont censés être des caractéristiques du sol considéré (nature, horizon de surface, pente, rugosité). Il est cependant possible de faire varier le couple  $(KR, SPR)$  au cours du cycle cultural pour tenir compte du recouvrement progressif du sol par la culture.

\* Sous-modèle du réservoir en eau utile du sol : RUJ



Le réservoir utile varie dans le temps entre RUM et RUX en fonction de la profondeur de sol prospectée par les racines. RUM correspond au réservoir utile du sol nu.

A partir de la levée (jour JL), le réservoir utile croît régulièrement pour atteindre le réservoir utile maximal : RUX, le jour JK, lorsque le système racinaire a atteint sa profondeur maximale.

$$\text{Si } J \ll JS \text{ ou } J > JR \Rightarrow RUJ = RUM$$

$$\text{Si } JL < J < JK \Rightarrow RUJ = RUM + (RUX - RUM) \frac{J - JL}{JK - JL}$$

$$\text{Si } JK \ll J \ll JR \Rightarrow RUJ = RUX$$

\* Sous modèle de la pluie utile : PUJ et du drainage : DJ

Soit CSJ la capacité de stockage d'eau du sol le jour j :

$$CSJ = RUJ - RHI$$

$$CSJ = \text{"contenant" en eau du jour } j - \text{"contenu" en eau du jour } j - 1$$

Nota : CSJ est aussi le déficit hydrique du sol; DHJ du jour j, car CSJ représente le volume d'eau qu'il faudrait ajouter à RHI pour remplir totalement le réservoir hydrique utile RUJ du jour j.

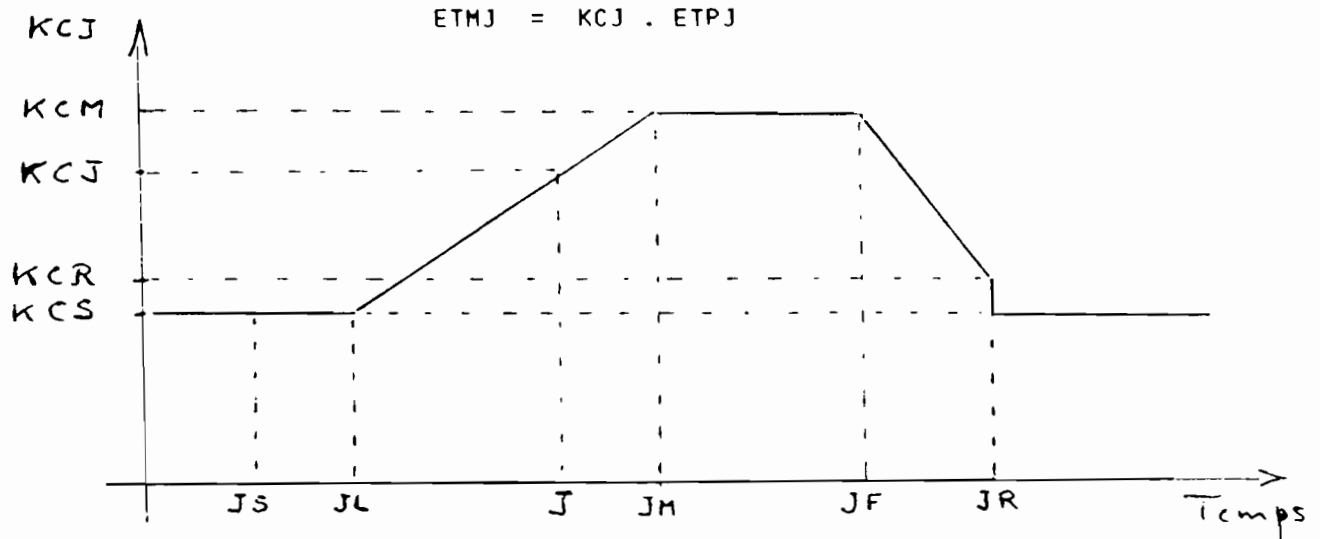
$$\text{Si } PEJ < CSJ \Rightarrow PUJ = PEJ \text{ et } DJ = 0$$

$$\text{Si } PEJ > CSJ \Rightarrow PUJ = CSJ \text{ et } DJ = PEJ - CSJ$$

- Modélisation de l'ETR du jour j : ETRJ

\* Sous-modèle de l'évapotranspiration maximale du jour j : ETMJ

L'évapotranspiration maximale de la culture le jour j est obtenue à partir de l'évapotranspiration potentielle de ce jour ETPJ et d'un coefficient cultural KCJ dont la valeur dépend du stade de développement de la culture (et donc du jour j considéré) :



Le coefficient cultural  $KCJ$  de la culture varie d'une valeur  $KCS$  (coefficient cultural du sol nu) jusqu'à une valeur maximale  $KCM$ , atteinte le jour  $JM$  qui correspond au début de la phase critique de la culture (floraison - remolissage du grain pour une graminée). Il se maintient à cette valeur maximale  $KCM$  pendant la durée :  $DFLO = JF - JM$  de cette phase critique, puis décroît pour atteindre la valeur  $KCR$  le jour  $JR$  de la récolte.

Si  $J \leq JL$  ou  $J > JR \Rightarrow KCJ = KCS =$  coefficient cultural du sol nu

Si  $JL < J < JM \Rightarrow KCJ = KCS + (KCM - KCS) \cdot \frac{J - JL}{JM - JL}$

Si  $JM \leq J \leq JF \Rightarrow KCJ = KCM$

Si  $JF < J \leq JR \Rightarrow KCJ = KCR + (KCM - KCR) \cdot \frac{JR - J}{JR - JF}$

\* Sous-modèle de l'évapotranspiration réelle du jour J : ETRJ

Le sol est caractérisé par le rapport K du volume du réservoir d'eau facilement utilisable : RFUJ le jour i au volume du réservoir d'eau utile ce même jour j : RUJ

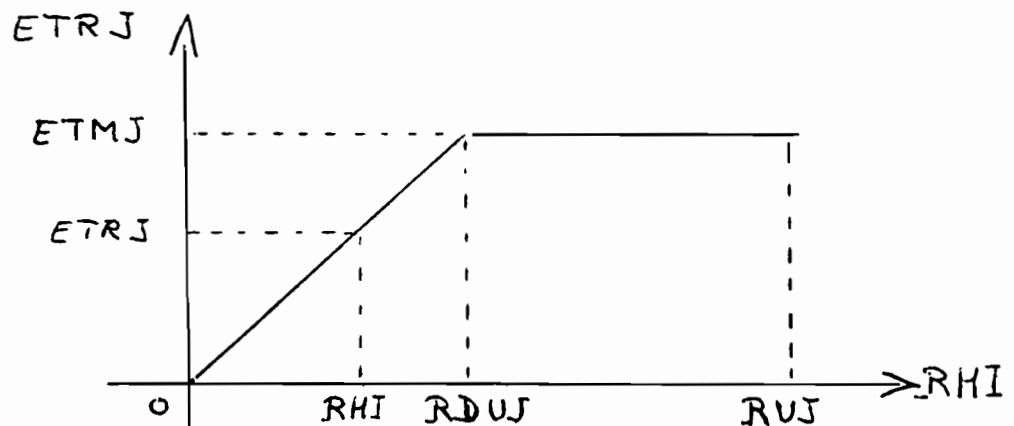
$$K = \frac{RFUJ}{RUJ} \quad \text{quel que soit } j$$

Ce rapport, supposé invariable d'un jour à l'autre, est considéré comme un paramètre intrinsèque du sol.

On peut définir un réservoir en eau difficilement utilisable le jour j : RDUJ

$$RDUJ = RUJ - RFUJ = (1 - K).RUJ$$

L'ETRJ de la culture le jour j dépend de la valeur de ETMJ ce jour-là et de l'état de la réserve hydrique du sol RHI à la fin du jour précédent (j-1).



$$\text{Si } RHI \geq RDUJ \Rightarrow ETRJ = ETMJ$$

$$\text{Si } RHI < RDUJ \Rightarrow ETRJ = ETMJ \cdot \frac{RHI}{RDUJ} = ETMJ \cdot \frac{RHI}{(1 - K).RUJ}$$

RHI étant connu (modélisation de la veille ou initialisation du modèle en déterminant une valeur de départ), P<sub>UJ</sub> et ETR<sub>J</sub> étant modélisés, il ne reste plus qu'à calculer R<sub>HJ</sub> :

$$RHJ = RHI + P_{UJ} - ETRJ$$

- Entrées du modèle :

- Variables météorologiques : PJ, ETPJ

- Paramètres du sol : RUM, RUX,  $K = \frac{RFUJ}{RUJ}$ ,  $KCS = \frac{ETMSJ}{ETPJ}$

- Paramètres cultureux :

- Dates de début des principaux stades de développement :

JS, JL, JK, JM, JF, JR

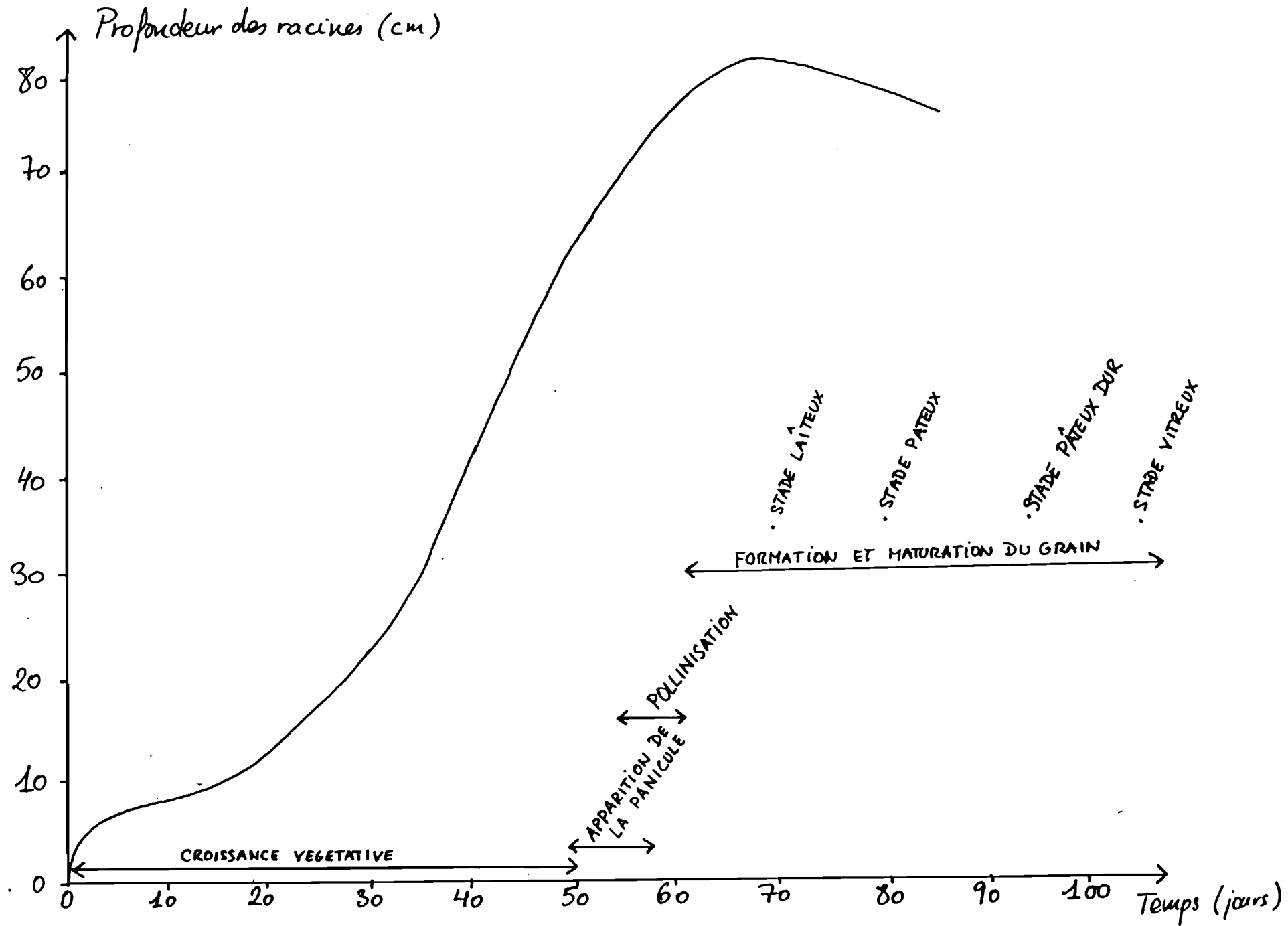
- Coefficients cultureux : KCM, KCR

- Sorties du modèle :

RHJ, DJ, DHJ, ETMJ, ETRJ

et un indice de satisfaction des besoins en eau :  $\frac{ETRJ}{ETMJ}$

---



ANNEXE 15: CROISSANCE RACINAIRE ET STADES PHENOLOGIQUES DU MAIS (S.ROBIN)

## RESUME

Cette étude a pour but de confronter les consommations en eau d'une culture de maïs, mesurées sur le terrain, à celles simulées par un modèle informatique.

Les termes du bilan hydrique ont été déterminés par des méthodes neutroniques et tensiométriques.

Les flux en profondeur ont été mesurés à partir de résultats sur les conductivités hydrauliques du sol, obtenues par un essai-drainage interne.

La caractérisation hydrodynamique des sols, ainsi que le suivi de la culture de maïs ont fourni la plupart des paramètres d'entrée du modèle.

A partir de ces résultats, quelques simulations de bilan hydrique ont permis de vérifier la validité du modèle.

MOTS CLES : Simulation  
Bilan hydrique  
Drainage interne  
Maïs  
Nicaragua