

Rapport scientifique des études tensiométriques pour l'irrigation à la SIRANALA

Rémi Gaudin, Mamisoa Rapanoelina, Philippe Oriol

▶ **To cite this version:**

Rémi Gaudin, Mamisoa Rapanoelina, Philippe Oriol. Rapport scientifique des études tensiométriques pour l'irrigation à la SIRANALA. 1990. hal-01071246

HAL Id: hal-01071246
https://auf.hal.science/hal-01071246

Submitted on 6 Oct 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LABORATOIRE
DES
RADIOISOTOPES

B. P. 3383
TANANARIVE

SIRANALA

DIRECTION
EXPLOITATION AGRICOLE

B. P. 176
MORONDAVA

RAPPORT SCIENTIFIQUE

DES

ÉTUDES TENSIOMÉTRIQUES

POUR

L'IRRIGATION A LA SIRANALA

PAR

R. GAUDIN - M. RAPANOELINA - P. ORIOL

OCTOBRE 1990

RAPPORT SCIENTIFIQUE

DES ETUDES TENSIOMETRIQUES POUR L'IRRIGATION A LA SIRANALA

R. GAUDIN - M. RAPANOELINA - P. ORIOL

OCTOBRE 1990

LABORATOIRE
DES
RADIOISOTOPES

SERVICE DE RADIOAGRONOMIE

S I R A N A L A
DIRECTION EXPLOITATION
AGRICOLE

SERVICE AGRONOMIQUE

CONVENTIONS L R I - SIRANALA
1988 ET 1989 - IRRIG - TENSIO

TANANARIVE B. P. 3383

MORONDAVA B. P. 176

SOMMAIRE

	Page
I. DEFINITION HYDRODYNAMIQUE DES SABLES ROUX	1
1. Texture	
2. Conductivité hydraulique K(h)	
II. PILOTAGE DE L'IRRIGATION PAR TENSIOMETRES	5
1. Choix du site d'implantation de la batterie déclencheuse	
2. Code de pilotage	
3. Justification de la valeur seuil - 5 m	
4. Justification de la prise en compte d'informations tensiométriques profondes en phase de maturation	
III. MOUVEMENTS SOUTERRAINS DE L'EAU INDUITS PAR UN PILOTAGE STRICT PAR TENSIOMETRES	11
1. Méthode d'étude : les courbes isopotentiel	
2. Mouvements souterrains de l'eau	
IV. CONTROLE DU SUIVI DU CODE	21
1. Conséquence d'un non-suivi du code : exemple des percolations	
2. Un outil de contrôle a posteriori : le tracé tensiométrique	
V. ESTIMATION COMPARATIVE DES IRRIGATIONS	27
1. Résultats des expérimentations	
2. Interprétation	
VI. NOTION DE BILAN HYDRIQUE TENSIOMETRIQUE	33
1. Condition d'emploi	
2. Définition de coefficients culturaux restrictifs	
VII. SOLUTIONS TECHNIQUES	38
1. Restriction des irrigations	
2. Pilotage par tensiomètres	
VIII. CONCLUSION	40
IX. BIBLIOGRAPHIE	41

Ce rapport a pour but de présenter et d'analyser les résultats obtenus dans le cadre des conventions **1988-IRRIG-TENSIO** et **1989-IRRIG-TENSIO** passées entre le Laboratoire des Radioisotopes (L.R.I.) et l'Entreprise Socialiste Siramamin'Analaiva (SIRANALA). Il vient en complément du rapport d'avancement des études tensiométriques pour l'irrigation à la SIRANALA, édité en octobre 1989.

Toutes ces études conduisent à proposer à la SIRANALA **deux solutions techniques pour réduire ou éliminer le lessivage des éléments fins vraisemblablement associé aux fortes percolations observées avec le mode de pilotage actuel des irrigations** -la méthode climatique avec des coefficients α trop élevés-, tout en assurant une bonne alimentation hydrique de la plante.

Le choix de la première solution technique **- l'emploi de coefficients culturaux restrictifs dans la méthode climatique-** est à tout le moins préférable au statu quo. Il peut constituer une solution intermédiaire avant la mise en œuvre définitive de la deuxième solution **-le pilotage par tensiomètres-** dont la supériorité est attestée par la figure la plus synthétique de ce rapport (Figure 16).

Un document de vulgarisation viendra en appui pour réussir ce changement.

I. DEFINITION HYDRODYNAMIQUE DES SABLES ROUX

1. Texture

L'essentiel du patrimoine de la SIRANALA est constitué de sols ferrugineux tropicaux plus connus sous le nom de sables roux en raison de leur texture grossière. Des analyses granulométriques effectuées en plusieurs points de zones cartographiées sous cette appellation (Pédologie d'ensemble GERSAR-TECHNISUCRE ; échelle 1/10.000) ou appréhendées comme telles par le Service Irrigation montrent pourtant que cette dénomination ne reflète pas l'appartenance à une classe texturale précise. **Sur le triangle international des textures** (Fig. 1), **ces "sables" apparaissent comme des sols limono-sableux ou sablo-limoneux.**

2. Conductivité hydraulique K(h)

La fonction K(h) est la relation de la conductivité hydraulique K au potentiel matriciel h de l'eau dans le sol. Elle détermine la facilité avec laquelle l'eau s'écoule en présence d'une différence de potentiel total.

Cette relation a la nature d'une fonction puissance puisque les points K-h apparaissent alignés sur un diagramme log-log (Fig. 2). L'expression analytique correspondante est :

$$K = 2{,}5\ h^{-1{,}1}$$

avec K en $mm.j^{-1}$
et h en m

Son emploi numérique (en informatique) ou graphique (lecture de la Fig. 2) est donc facile.

Du fait de leur texture homogène sur une grande épaisseur, les sables roux sont filtrants et ont tendance à prendre un profil d'équilibre hydrodynamique avec un flux d'eau constant sur tout le profil, au moins dans les conditions naturelles. Via la relation K(h), ce flux peut être

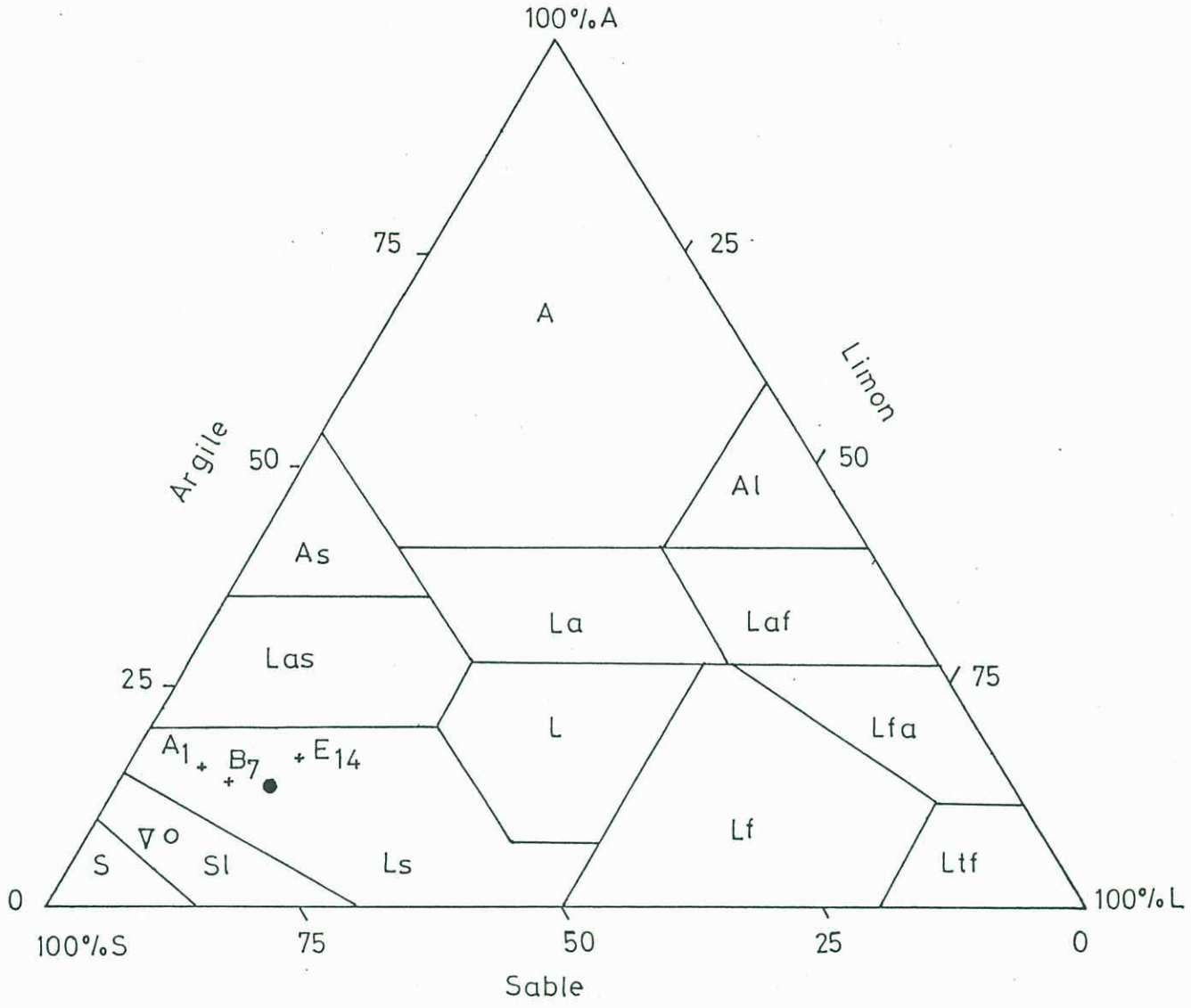


Figure 1 _ Positionnement de points choisis dans des zones planes de sables roux sur le triangle international des textures.

L'appellation sables roux ne correspond pas toujours à la classe texturale dominante. Ceci est aussi vrai pour le point ● tiré avec ∇, o de MARINI et al (1976).

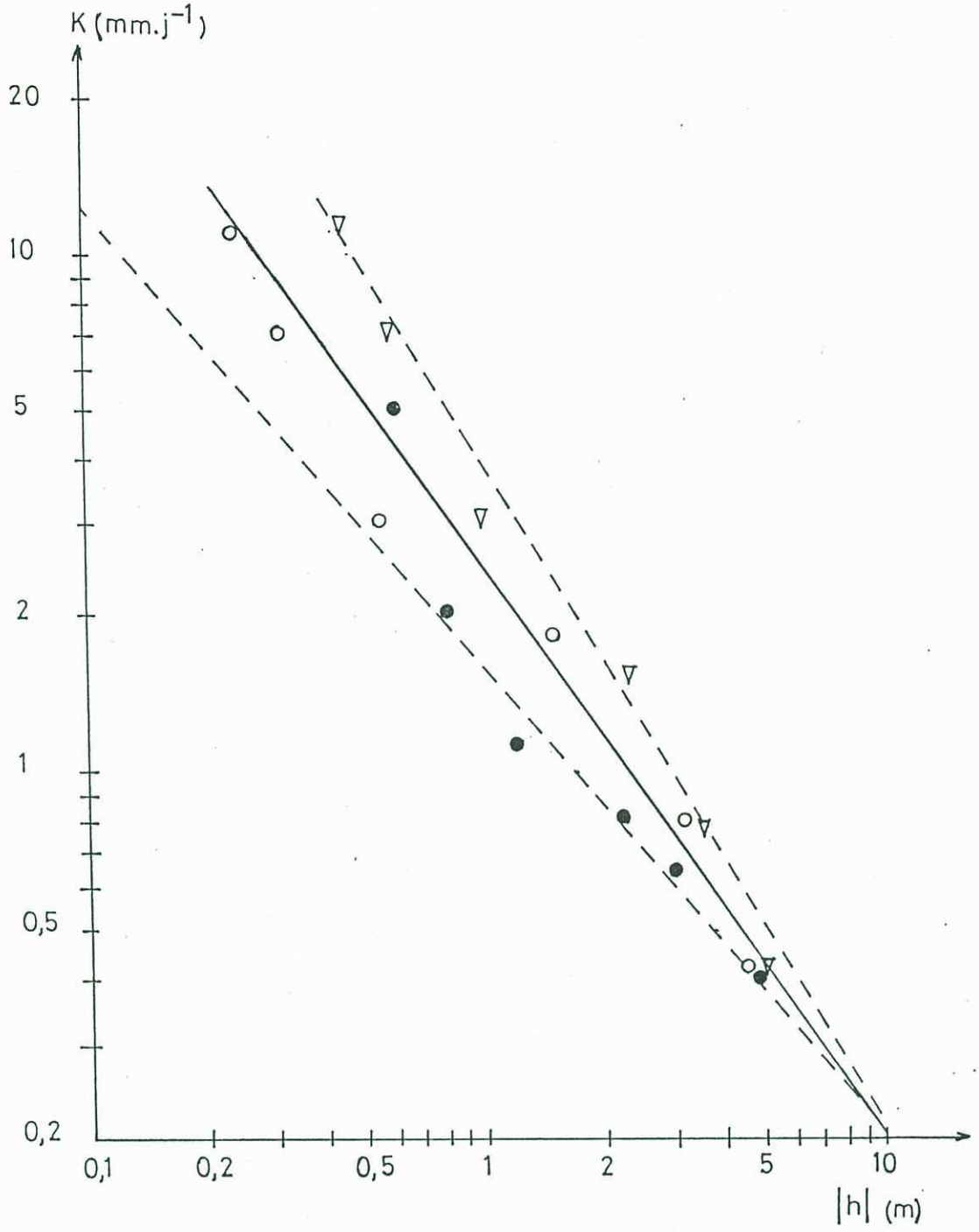


Figure 2 _Relation entre le débit de l'eau (mm.j^{-1}) et le potentiel matriciel (m) pour un gradient unitaire de charge hydraulique ($\frac{dH}{dz} = -1$)

Cette relation est obtenue à partir des courbes $K(\theta)$ et $h(\theta)$ établies par MARINI et al (1976) pour trois sols dont deux à texture sablo-limoneuse (o, ∇) et un à texture limono-sableuse (●) .

estimé indirectement à l'aide de mesures tensiométriques donnant accès au potentiel matriciel h.

Même lorsque la canne exerce une forte succion qui contrarie le mouvement naturel gravitaire de l'eau, les déplacements de l'eau (direction, sens, intensité) peuvent se déduire de multiples observations tensiométriques par la représentation dite isopotentiel (voir III.1).

II. PILOTAGE DE L'IRRIGATION PAR TENSIOMETRES

1. Choix du site d'implantation de la batterie déclencheuse

Le pilotage par tensiomètres utilise des informations relatives au potentiel de l'eau dans le sol mesuré par cet appareil. Le lieu d'implantation des tensiomètres est sélectionné dans une zone plane et étendue de "sables roux", donc à texture limono-sableuse (exemples de B_7 et E_{14} sur la Fig. 1) à sablo-limoneuse.

Une batterie déclencheuse (système Nardeux DTM 5000) est implantée sur une verticale distante de 25 cm d'une ligne de canne. Les cinq bougies en céramique poreuse -partie sensible du dispositif- sont situées aux cotes 25 cm, 50 cm, 100 cm, 150 cm et 200 cm (voir Fig. 3). La ligne de canne adjacente au dispositif étant en quelque sorte une ligne étalon, il convient que la végétation y soit représentative de la zone de sables roux quand ce n'est pas de l'ensemble du plot. Pour de la canne juste bouturée ou en début de repousse, il faut s'assurer vers un mois que la batterie ne soit située près de zones perturbées (mauvaise croissance des boutures, repousse lente liée à un passage d'engins lourds, etc.). Ce risque est atténué **si deux batteries sont mises en place par plot et si la concordance de leurs indications est régulièrement vérifiée.**

2. Code de pilotage

Les consignes de déclenchement de l'arrosage dépendent de l'âge de la culture (Fig. 3) :

a) de la coupe - ou plantation - jusqu'à l'âge de 10 semaines, une irrigation de 20 mm est apportée lorsque le tensiomètre à 25 cm de profondeur indique un potentiel matriciel inférieur à - 5 m

b) en période de pleine croissance, le tensiomètre à 50 cm devient l'outil de référence et une irrigation de 20 mm sera déclenchée lorsque le potentiel matriciel à cette profondeur passera au-delà du seuil - 5 m

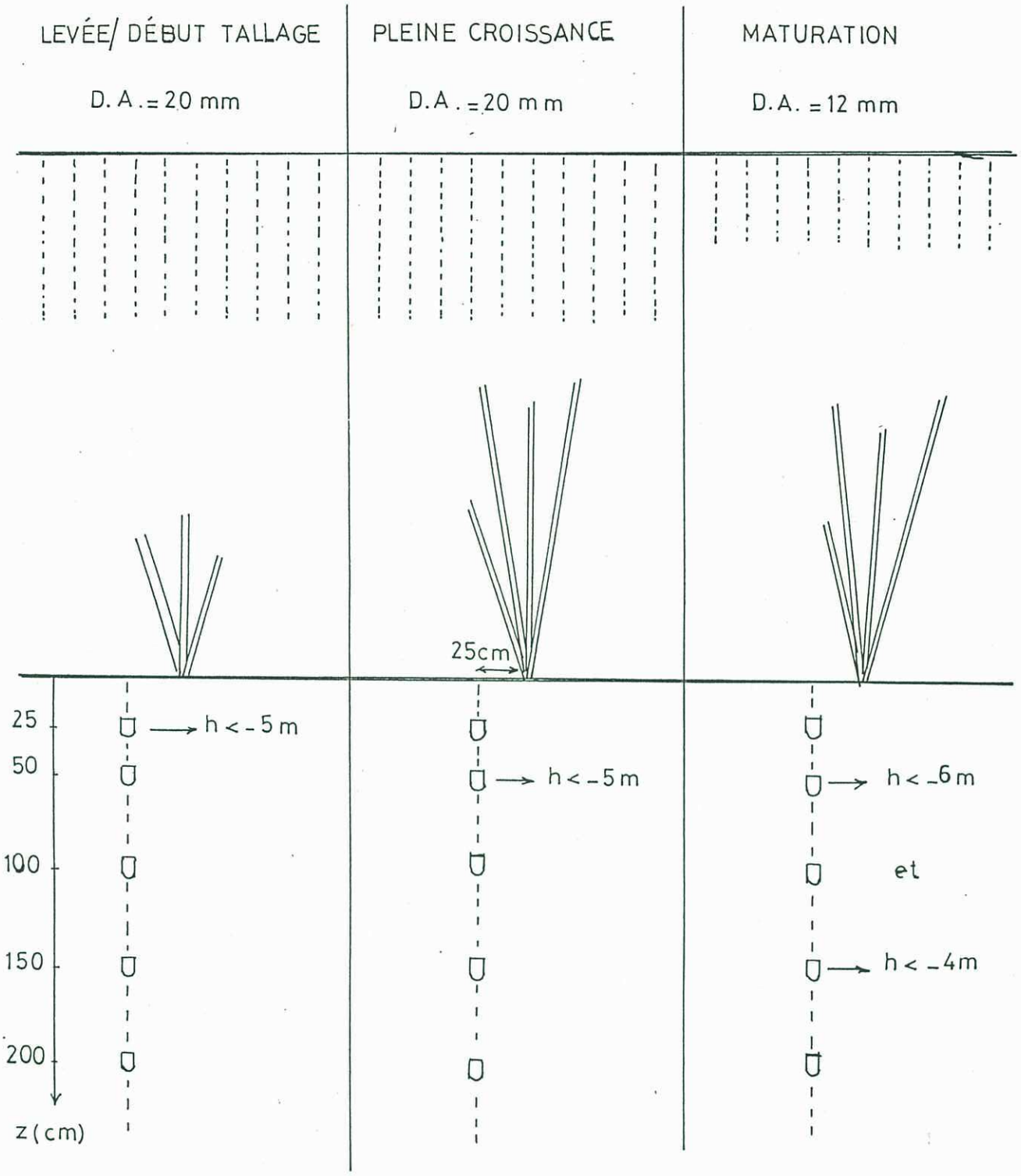


Figure 3 - Code de pilotage des irrigations précisant la dose d'arrosage (D.A.) et le potentiel matriciel (h) au seuil de déclenchement.

c) en période de maturation, soit environ 3 mois avant coupe, une irrigation de 12 mm est apportée lorsque le tensiomètre à 50 cm indique un potentiel matriciel inférieur à - 6 m, et le tensiomètre implanté à 150 cm indique un potentiel matriciel inférieur à - 4 m (potentiel total - 5,5 m).

Les tensiomètres sis à 100 cm et 200 cm, non utilisés dans le code, apportent des renseignements complémentaires sur la dynamique de l'eau.

3. Justification de la valeur seuil - 5 m

Ce code se justifie par l'examen approfondi de l'évolution du potentiel total mesuré sur la batterie déclencheuse à 25 cm de profondeur (ou à 50 cm). La Figure 4 montre des données obtenues sur le plot B_7 en septembre-octobre 1988, soit sur une canne de 3 mois. Il apparaît que la courbe H(t) est quasiment périodique et qu'une période correspond à l'intervalle de temps séparant deux irrigations. L'irrigation est déclenchée après dépassement plus ou moins marqué du seuil de déclenchement ($H = h - z = - 5\ m - 0{,}25\ m = - 5{,}25\ m$; $|H| = 5{,}25\ m$) ; une chute de la valeur absolue du potentiel suit l'irrigation puis cette valeur augmente progressivement. L'allure de $|H(t)|$ est toutefois différente sur les périodes intermédiaires et extrêmes de la Figure 4.

Sur les périodes intermédiaires, la courbe $|H(t)|$ est toujours concave. Ceci s'explique par l'allure concave et asymptotique de la courbe caractéristique de l'humidité du sol dans la zone de potentiel considérée. En assèchement, l'obtention d'un même $\Delta\theta$ (intervalle d'humidité) ne peut se faire que par des $|\Delta h| = |\Delta H|$ de plus en plus grands (voir Fig. 5). **L'allure concave de $|H(t)|$ signifie donc une consommation en eau constante de la canne. L'eau est facilement utilisable.**

Sur les première et dernière périodes de la Figure 4, la courbe $|H(t)|$ présente **un point d'inflexion I au voisinage de la valeur seuil.** Ceci indique une modification dans la cinétique de prélèvement de l'eau par la canne. **Au-delà de cette valeur, l'eau devient "sensu stricto" difficilement utilisable.** Pour continuer à s'alimenter normalement, la

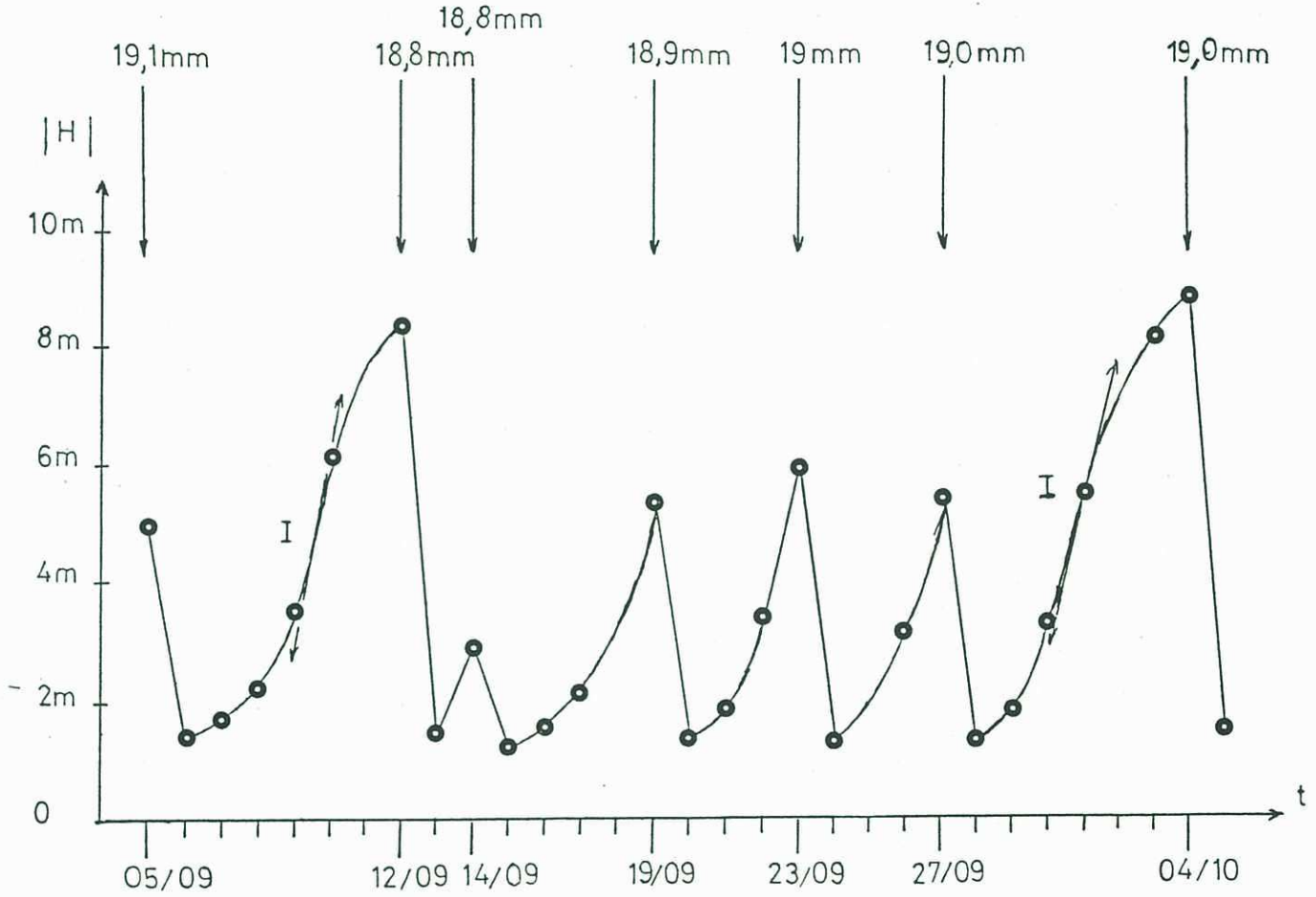


Figure 4_ Evolution du potentiel total sur le tensiomètre déclencheur sis à 25 cm.
Noter le point d'inflexion I sur les périodes extrêmes.

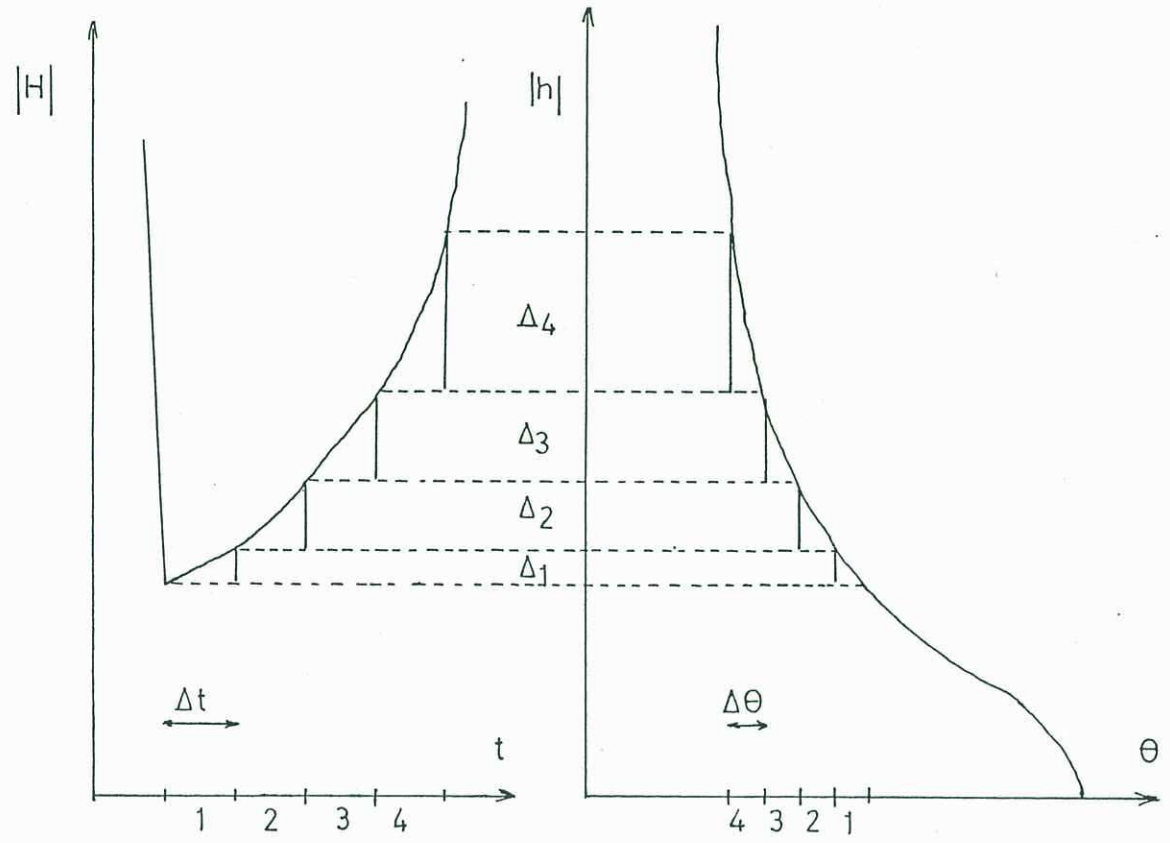


Figure 5 _Mise en correspondance d'une période de la courbe $|H(t)|$ et de la courbe caractéristique $h(\Theta)$. Il apparaît que le découpage de H(t) en Δt constants correspond sur la courbe caractéristique à des $\Delta\Theta$ constants ; la canne consomme donc la même quantité d'eau à chaque Δt ; l'eau est facilement utilisable. Si la courbe $|H(t)|$ présente un point d'inflexion (exemple des première et dernière périodes de la Figure 4), ceci indique des $\Delta\Theta$ de plus en plus petits pour le même Δt ; la canne consomme de moins en moins d'eau ; l'eau est donc difficilement utilisable.

NB: de façon stricte, il faudrait comparer $|H|$ et $|h|$ translaté de z. Mais la faible valeur de z (0,25m) vis-à-vis des valeurs de H (de 2 à 5 m) rend superflue la correction.

canne devra réagir de façon dynamique en allant chercher l'eau plus loin. Ceci valide le choix de la valeur seuil - 5 m mais montre également la nécessité d'étudier la réaction "souterraine" de la canne.

4. Justification de la prise en compte d'informations tensiométriques profondes en phase de maturation

En visant un assèchement du sol en profondeur, le code permet d'utiliser à bon escient les éventuelles **remontées capillaires** nées d'une nappe ou d'un sous-sol plus humide (KATERJI et al, 1984) **et d'obtenir de façon certaine leur tarissement au moment critique du sevrage** (voir III.2, Fig.12).

III. MOUVEMENTS SOUTERRAINS DE L'EAU INDUITS PAR UN PILOTAGE STRICT PAR TENSIOMETRES

1. Méthode d'étude : les courbes isopotentiel

La méthode a été adaptée des travaux de GASSER et ROSS (1975) et est détaillée dans GAUDIN et RAPANOELINA (1989) ainsi que dans GAUDIN et al. Elle utilise les données de potentiel obtenues à l'aide de trente tensiomètres implantés de part et d'autre d'une ligne de canne (Voir Photos 1 et 2) de façon à observer les mouvements d'eau dans un plan perpendiculaire à cette ligne (symétrie évidente de part et d'autre de ce plan). Les données de potentiel sont translatées puis transformées logarithmiquement. Une interpolation quadratique (ou cubique) pratiquée sur ces nouvelles données permet de visualiser les courbes d'isopotentiel - 1 m, - 2 m, - 6 m et - 8 m en sélectionnant les seuls nombres à partie entière paire. Des flèches placées perpendiculairement à ces courbes indiquent la direction des flux d'eau. L'intensité des flux est calculée grâce à la loi de Darcy généralisée ; la conductivité K correspondant au potentiel matriciel au niveau de la flèche est lue sur la Figure 2 ou calculée à partir de l'expression analytique correspondante ; le gradient de potentiel est lié à l'écartement des courbes isopotentiel et à leurs valeurs, il se calcule donc rapidement.

2. Mouvements souterrains de l'eau

Les Figures 6 à 12 illustrent les différents régimes hydriques qui se succèdent au cours d'une année d'un cycle de canne. Le dispositif isopotentiel à la base de ces observations est implanté sur le plot B_7, à proximité mais à un tour de pivot de la batterie déclencheuse, dans une aire de "sables roux" à texture limono-sableuse.

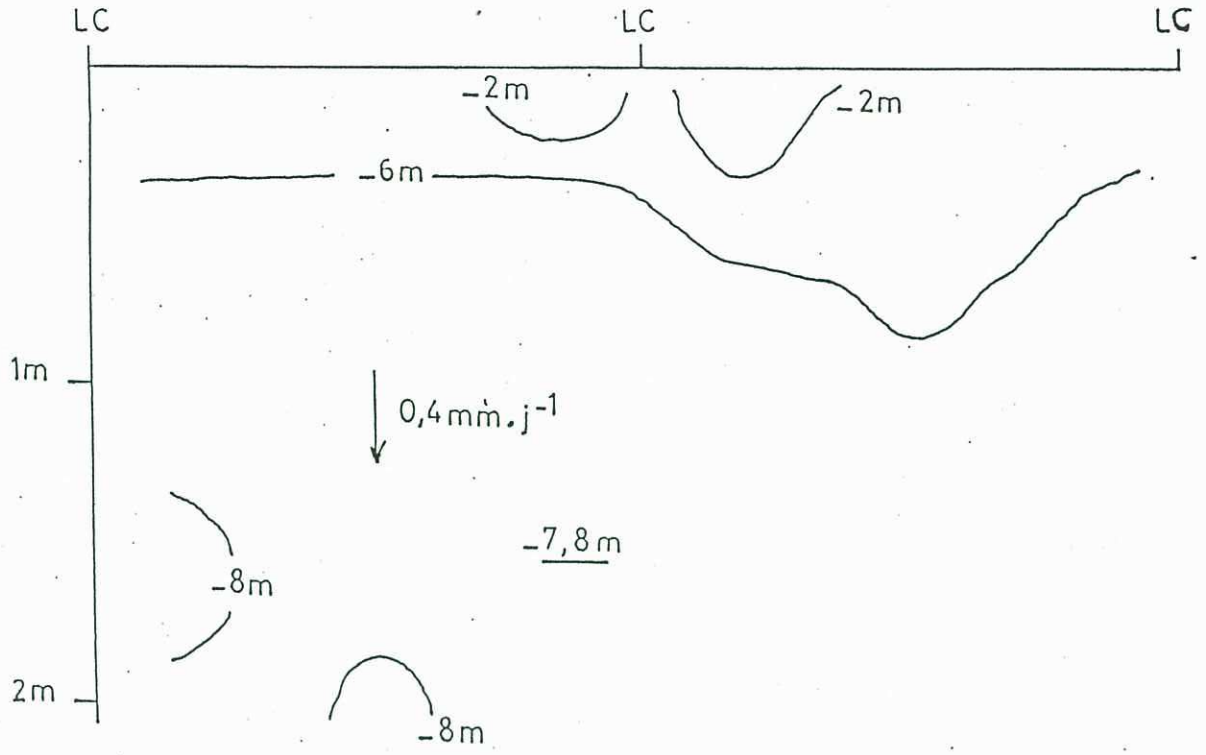
La Figure 6 indique que le pilotage strict par tensiomètres permet **en tout début de repousse d'avoir un débit de percolation faible de l'ordre de 0.4 mm.j^{-1}.**
Dans les semaines qui suivent, un important prélèvement d'eau intervient vers 0,50 m à 1 m sous les lignes de canne (Fig. 7).



PHOTO 1 - Vue partielle du dispositif ayant servi à l'acquisition des données isopotentiel.



PHOTO 2 - Batterie tensiométrique comprenant le système de lecture du potentiel total et ses 5 cannes tensiométriques.



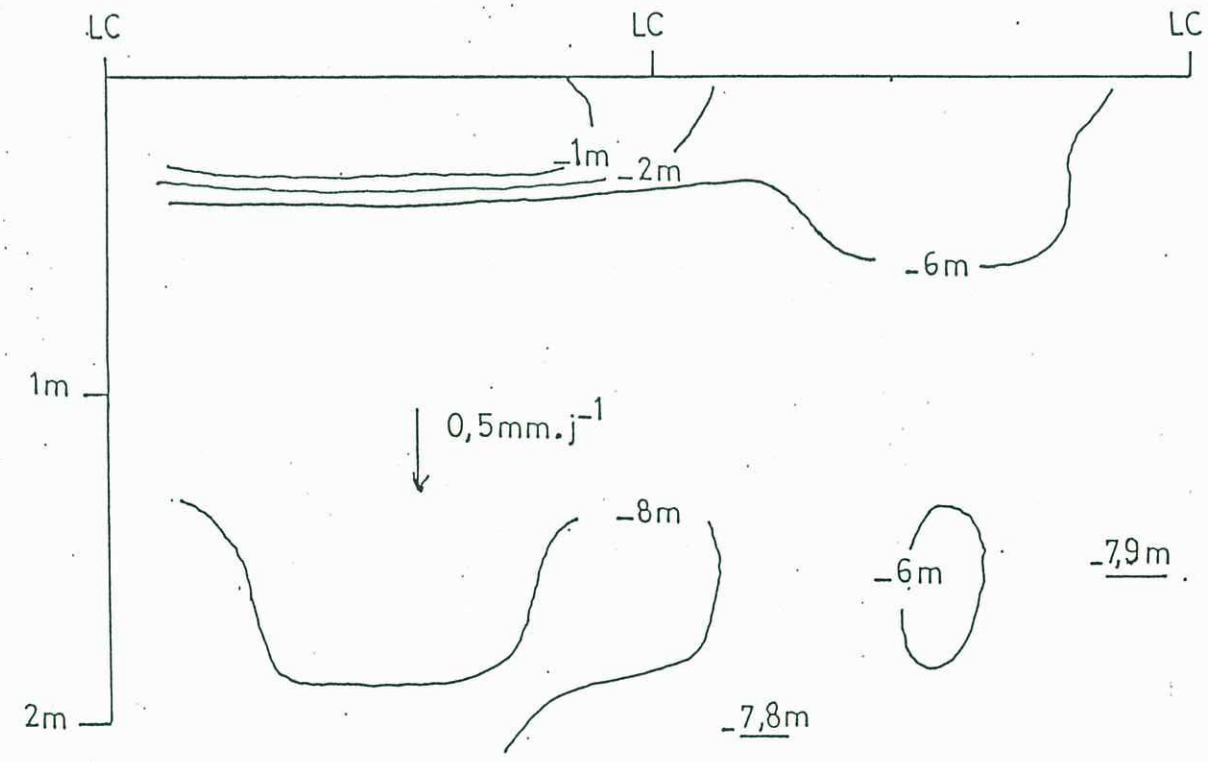
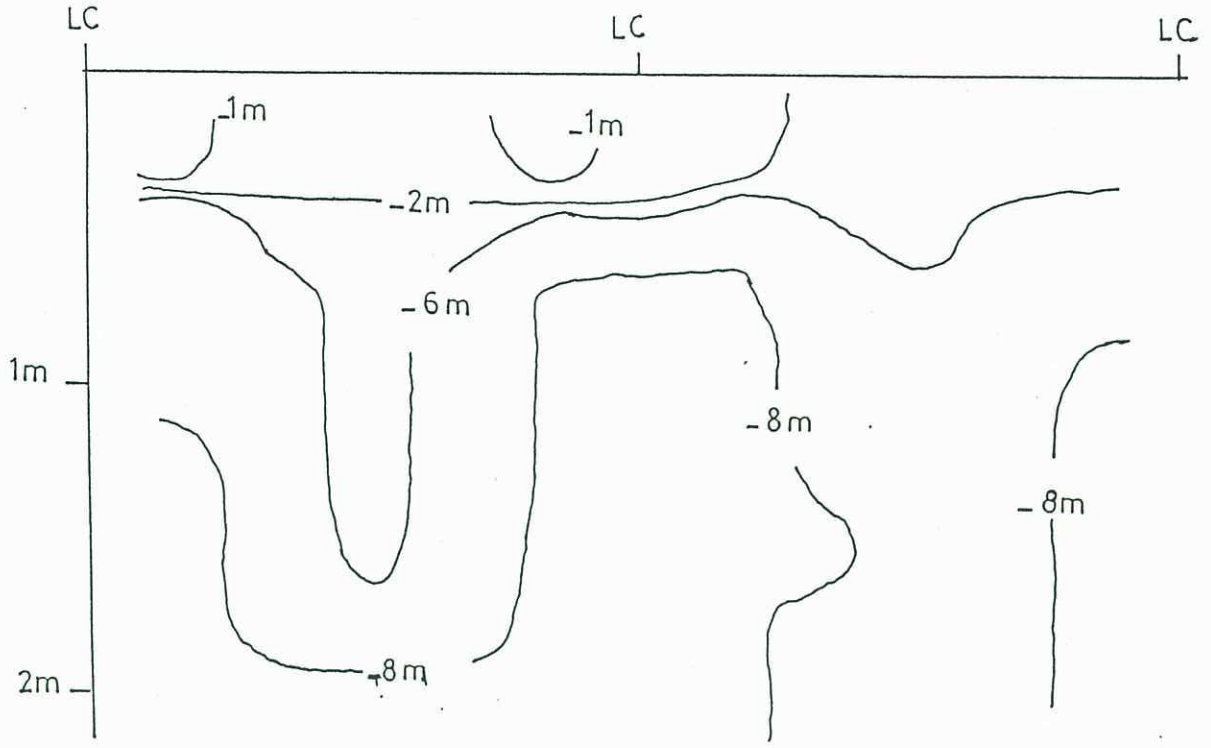
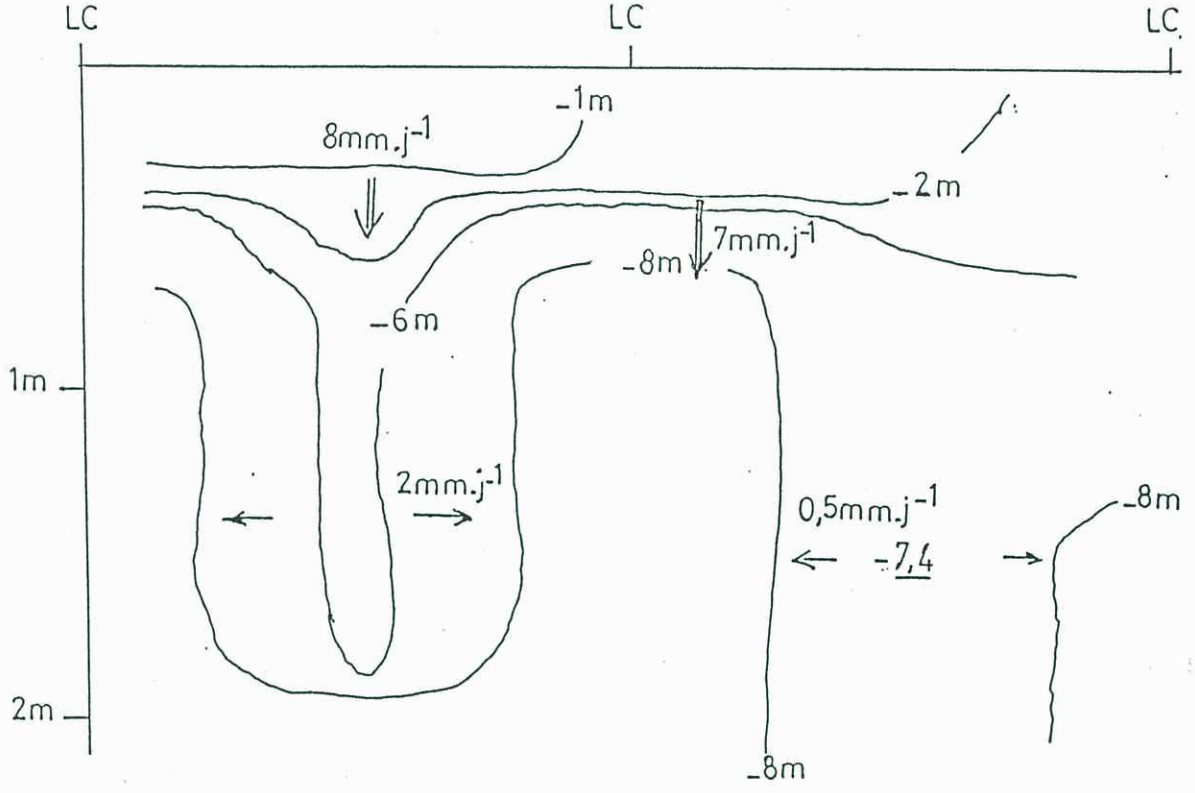


Figure 6 _ Faible niveau de percolation en tout début de repousse.
LC: Ligne de canne.



27/07/88



28/07/88, 8h après irrigation de 20,9mm

Figure 7 - Mise en évidence d'un prélèvement important d'eau vers 0,5 m à 1m sous les lignes de canne vers 3 semaines de 1ère repousse.

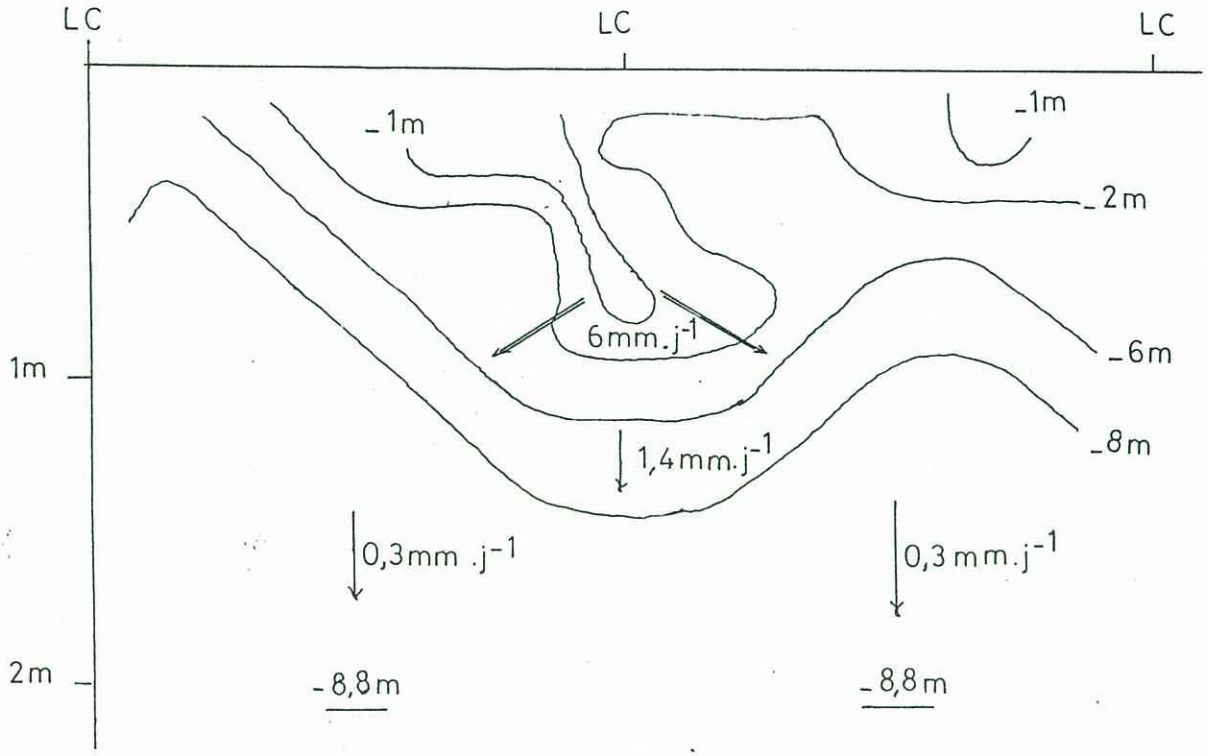
Vers 4 à 5 mois (Fig. 8), une infiltration préférentielle est observée au niveau des rangs de canne : **cet effet entonnoir découle du rôle de drain joué par les cannes en éventail et de l'absence de buttage du sol de chaque côté de la ligne de canne** -façon culturale propre à la SIRANALA-; **l'eau est en profondeur interceptée par la fraction la plus active du système racinaire.** Le niveau de percolation est alors très faible.

Cette situation hydrologique idéale du point de vue de l'économie de l'eau sous canne est complètement perturbée en saison des pluies (Fig. 9 ; débit de percolation de quelques $mm.j^{-1}$) mais **la situation est maîtrisée dès qu'un flux d'eau ascendant se met en place** (Fig. 10). Plus tard, l'infiltration préférentielle de l'eau d'irrigation à la verticale des lignes de cannes (effet entonnoir) est à nouveau observée mais cette fois en même temps que le flux ascendant profond (Fig. 11). L'aspect idéal de cette situation est attestée par sa pérennité après apport cumulé (mais imprévisible) d'une pluie et d'une irrigation. La pluie est utilisée comme irrigation et n'empêche pas le sevrage ultérieur car le sol était préalablement sec.

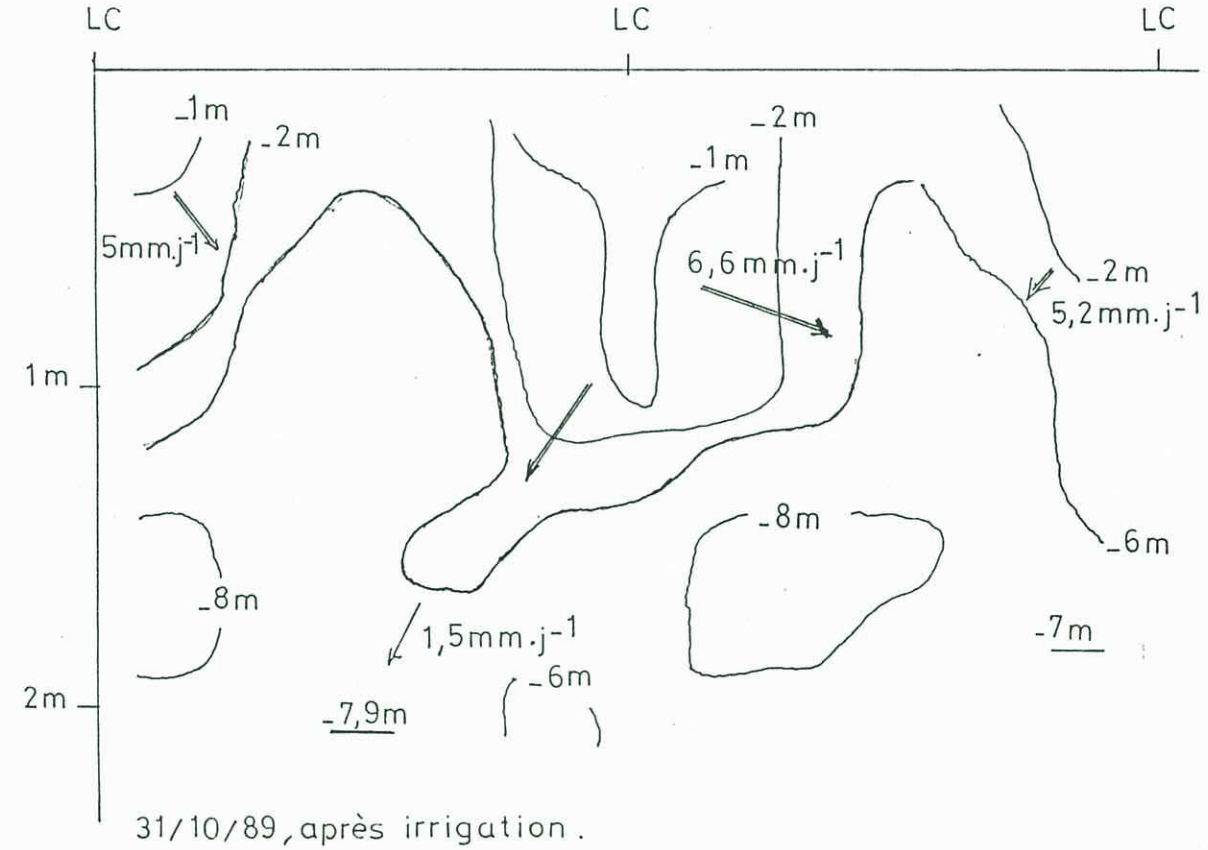
Juste avant récolte, le stock d'eau du sol est très faible. Le débit ascendant de 1 $mm.j^{-1}$ (Fig. 12) est vraisemblablement lié à un sous-sol (vers 4 m) beaucoup plus humide mais aussi à la forte succion exercée par la canne. Notons que l'observation d'un flux ascendant de 1,8 $mm.j^{-1}$ le 24/05/89 alors que le potentiel de surface est très faible (- 6 à - 8 m) **justifie la prise en compte d'informations tensiométriques profondes dans le code de pilotage en phase de maturation.**

Au bilan, les avantages suivants semblent associés au suivi strict du code de pilotage par tensiomètres élaboré pour les sables roux :

- **taux de percolation inférieur à 0,5 $mm.j^{-1}$** en saison sèche ;
- **effet entonnoir** bien marqué conduisant à une **pleine interception de l'eau** par la plante ;
- **flux hydrique ascendant** au sortir de la saison des pluies et **donc, sevrage effectif.**



07/11/88, après irrigation.



31/10/89, après irrigation.

Figure 8 - Effet entonnoir au pied de canne de 4,5 mois

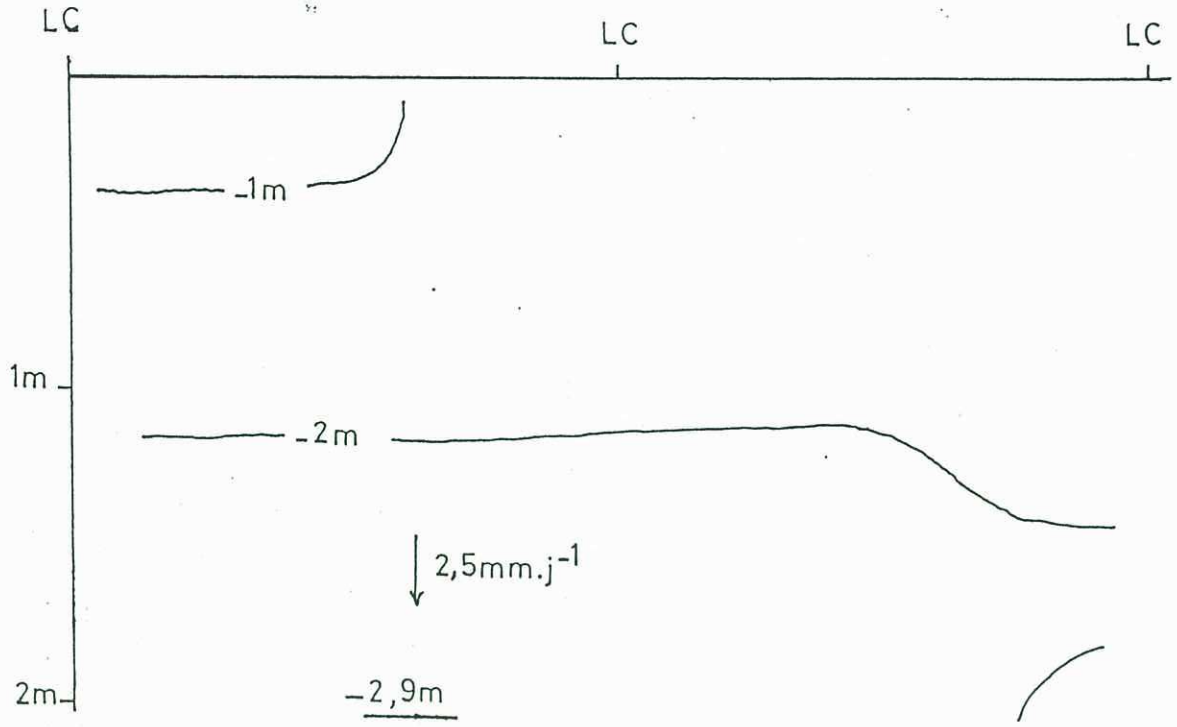


Figure 9 _ Situation hydrodynamique typique de la saison des pluies (canne de 7 mois, relevé du 11/02/89)

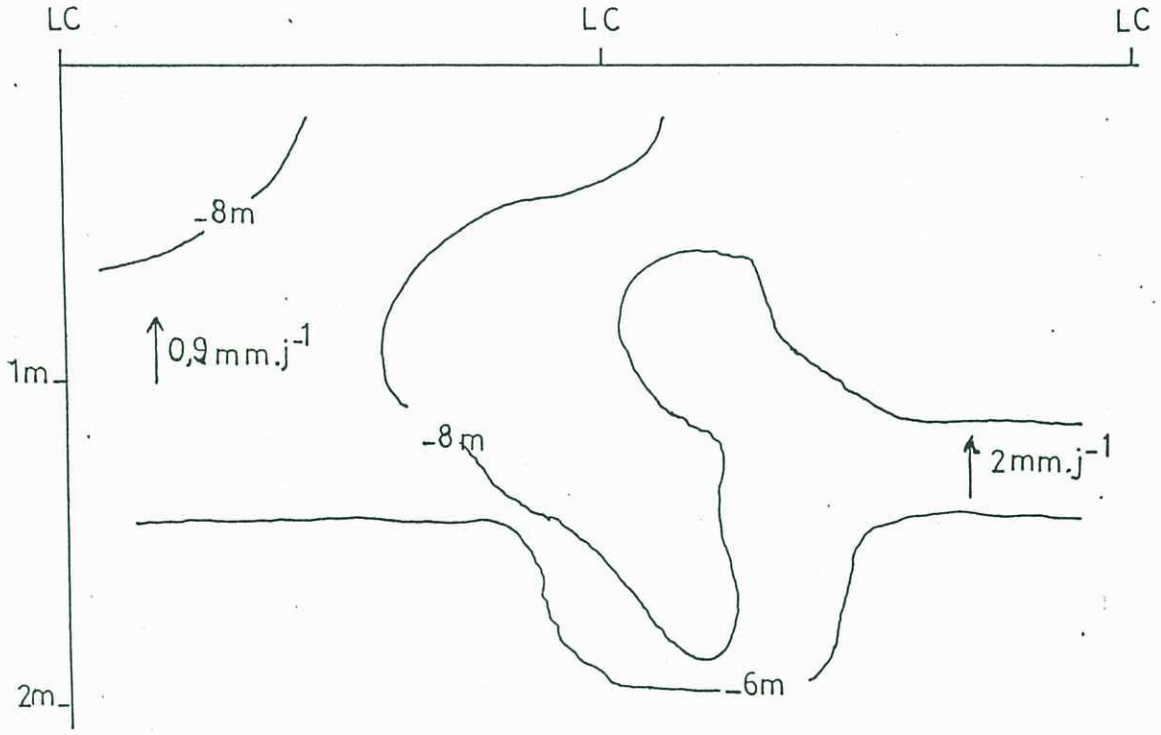


Figure 10 _ Situation hydrodynamique deux mois plus tard (17/04/89)

Noter le flux ascendant profond.

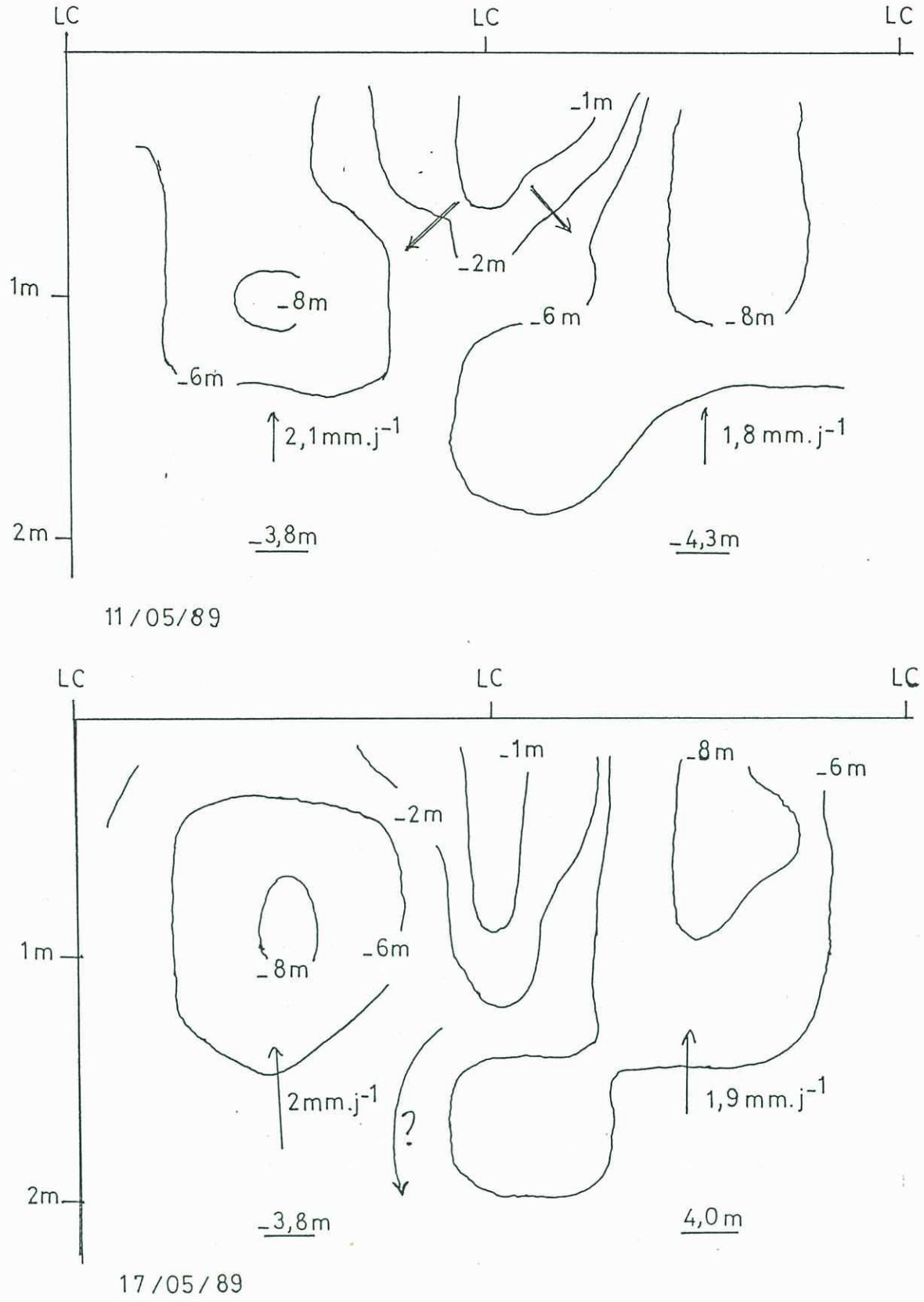
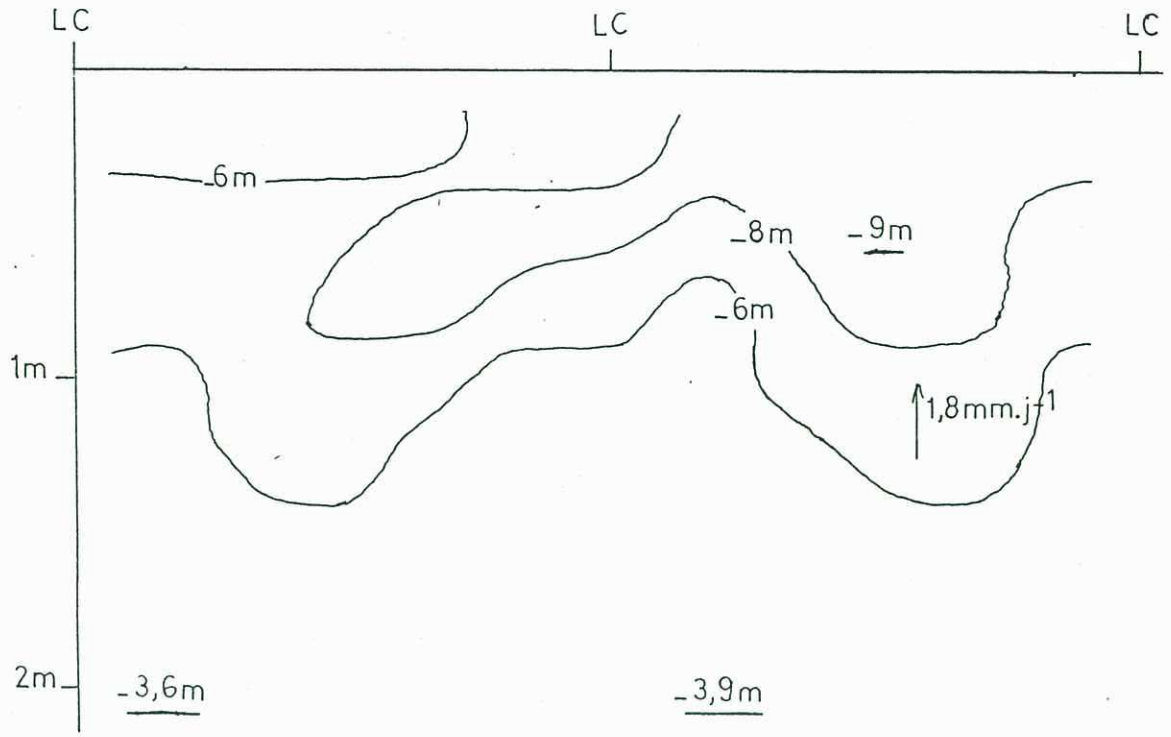


Figure.11 _ Pluie imprévue de 17,5mm après irrigation de 20,0mm. Le flux ascendant profond tient bon. Les deux apports sont intégralement utilisés par la canne.



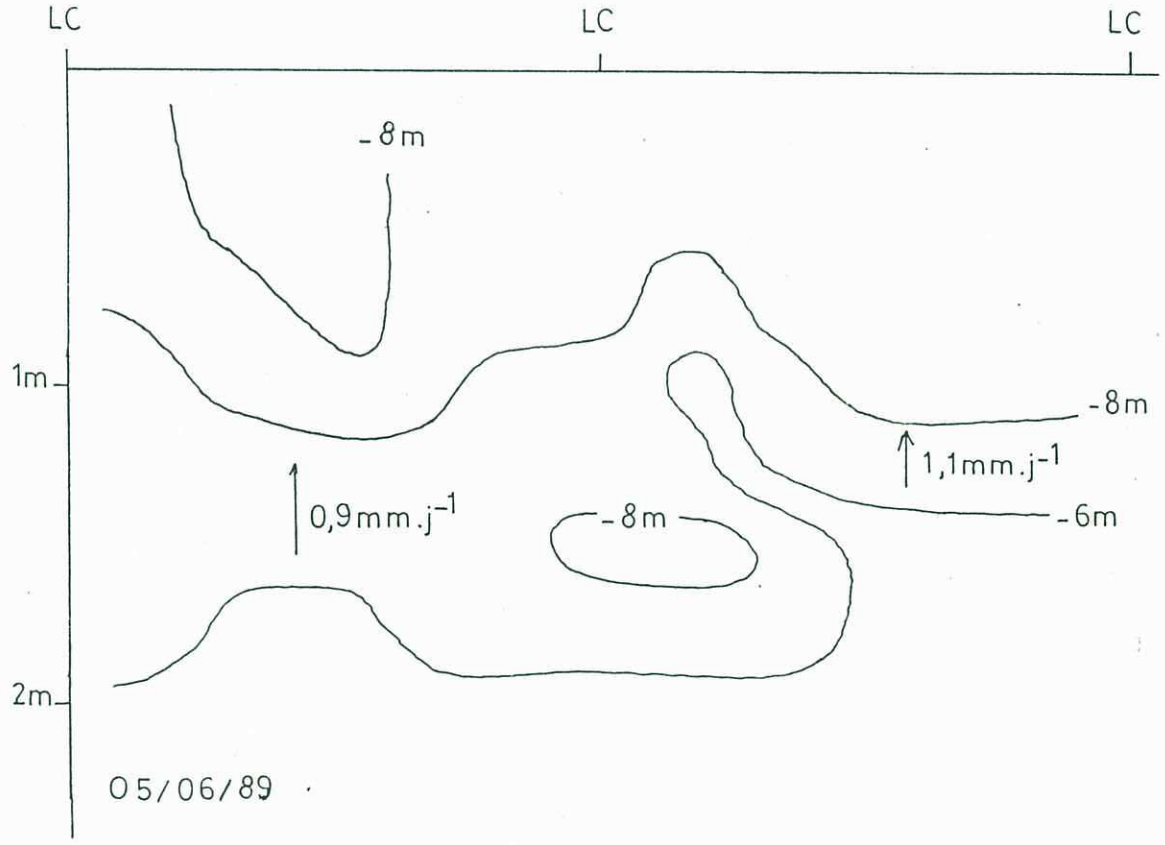


Figure 12 - Sevrage depuis le 15/05/89.
Noter le flux ascendant dégressif.

Ces phénomènes sont variables selon le statut de chaque parcelle (âge, sol, antécédents, etc.) et justifient donc la présence obligatoire sur chacune d'entre elles des tensiomètres déclencheurs.

IV. CONTROLE DU SUIVI DU CODE

1. Conséquence d'un non-suivi du code : exemple des percolations

Les observations ultérieures avec le dispositif isopotentiel montrent qu'en 2ème repousse des percolations importantes se sont produites (Fig. 13, 14 et 15). Celles-ci ont eu lieu en pleine saison sèche.

L'examen attentif des données de la batterie déclencheuse renseigne sur leur origine : le pilotage se faisait à partir du seul tensiomètre déclencheur installé à 25 cm et le responsable du pivot anticipait la décision d'irriguer (souvent à h ≈ - 4 m). En conséquence, les percolations apparaissent à 1,5 mois de repousse. La surface de percolation augmente avec le temps. A 2,5 mois, elle occupe 50 % du plan total ; à 3 mois, elle englobe tout le plan. Les percolations moyennes sont :

. le 07/08/89 (1,5 mois) : entre 0,7 et 1 $mm.j^{-1}$
. le 06/09/89 (2,5 mois) : 1,6 $mm.j^{-1}$
. le 16/09/89 (3 mois) : supérieures à 3 $mm.j^{-1}$

Ces percolations se résorbent dans le 4ème mois après rappel des instructions par le seervice irrigation. La situation normale est recouvrée le 28/10/89. L'effet entonnoir lié à la ligne de canne est évident après irrigation le 31/10 (Fig. 8).

Ainsi l'existence de **percolation trouvant leur origine dans un non-respect du code** constitue un élément d'une **démonstration par l'absurde du bien-fondé du pilotage strict par tensiomètre.**

2. Un outil de contrôle a posteriori : le tracé tensiométrique

Le non-suivi du code peut avoir des conséquences diverses selon la nature de l'infraction et le stade de la végétation. Dans le répertoire des observations, ces conséquences ont toujours été néfastes. Pour une mise en relation de ces infractions et de leurs conséquences, il est apparu opportun de disposer d'un **outil approprié** qui intègre notamment **le délai de réponse à la faute.** Cet outil est le **tracé**

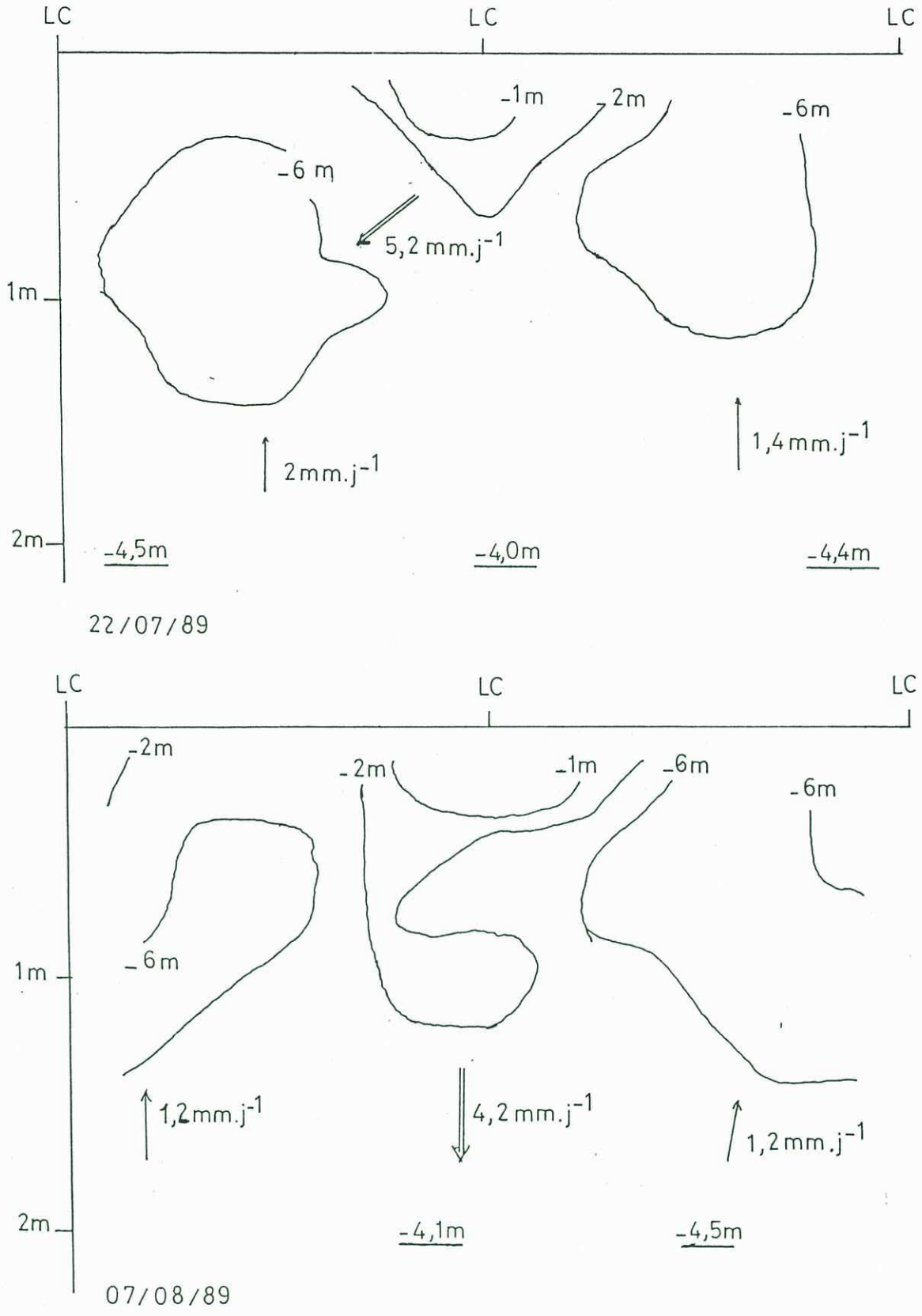
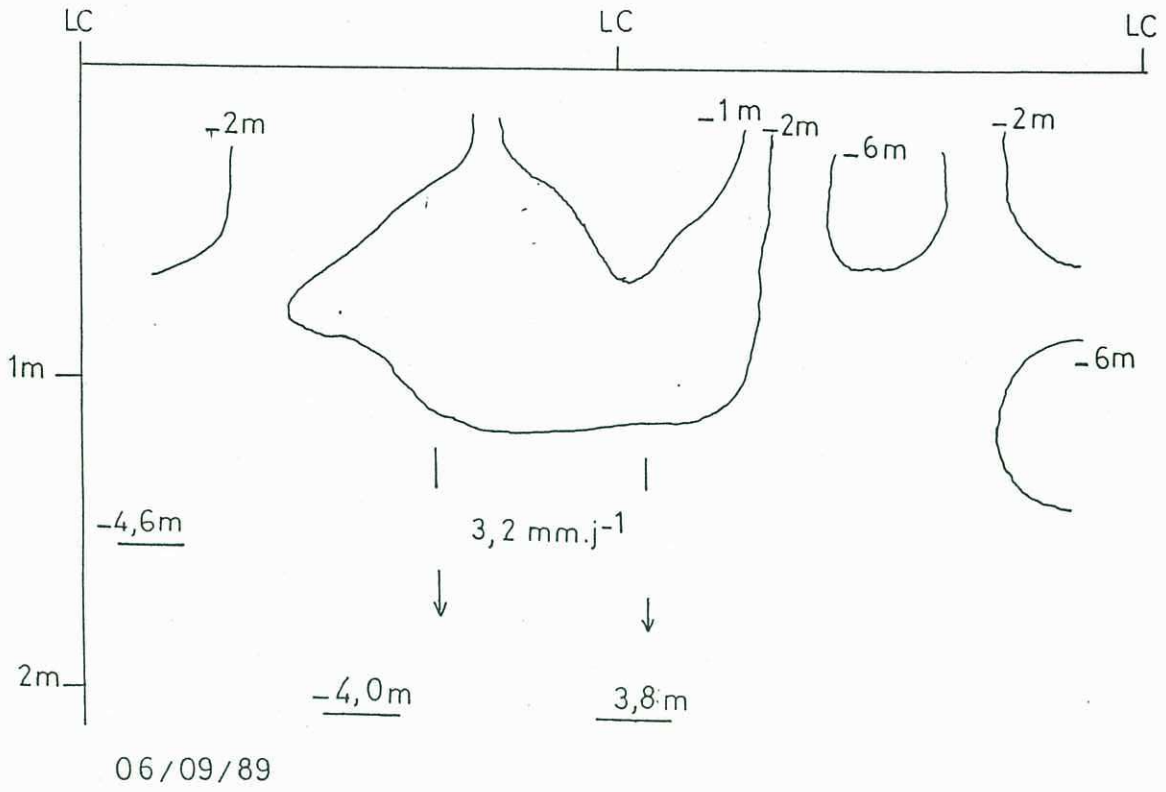


Figure 13 _ Apparition d'une fenêtre de percolation



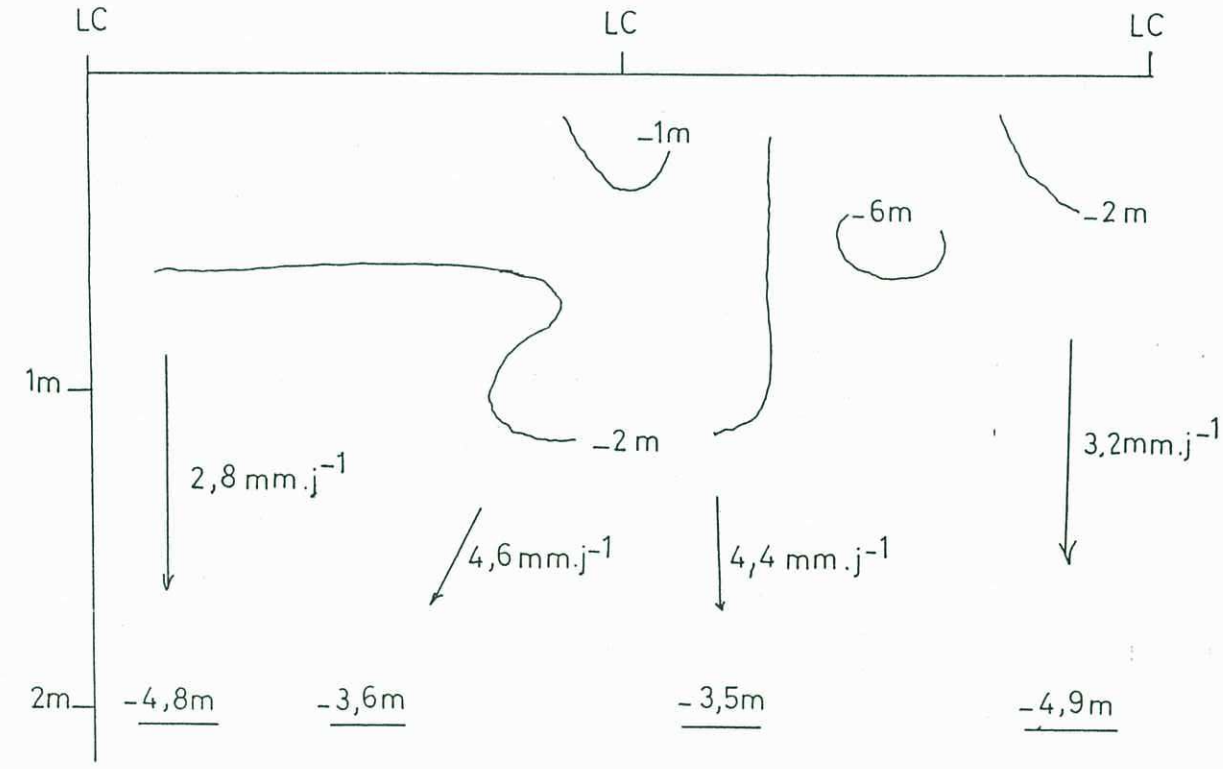
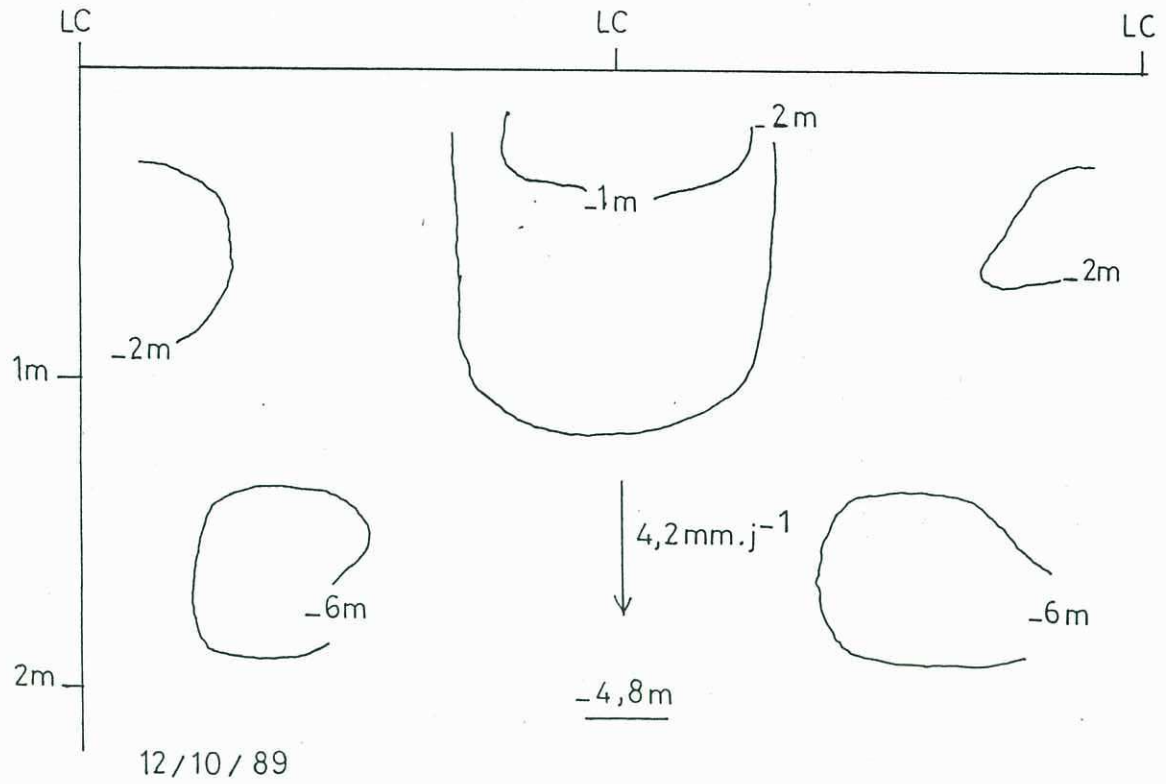


Figure 14 _ Formation d'un plan de percolation .



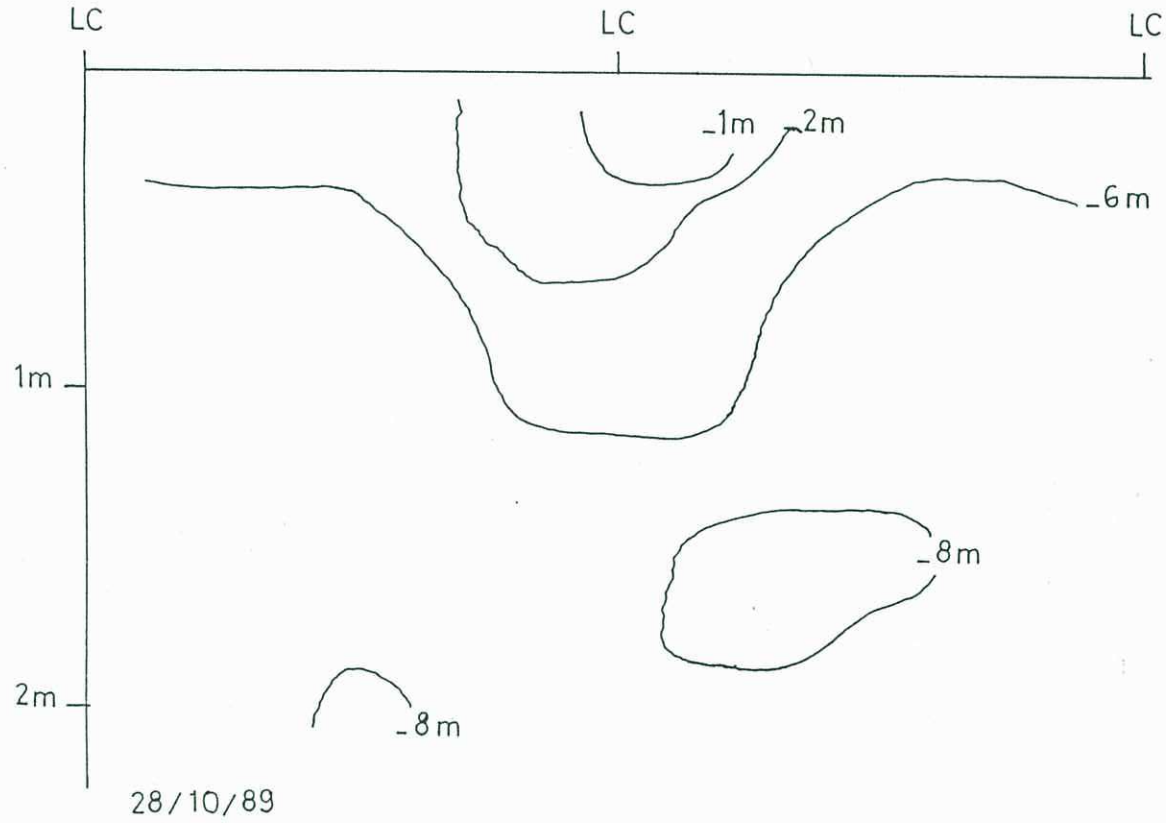


Figure 15 - Résorption progressive des percolations

tensiométrique qui présente une vue synthétique de l'alimentation hydrique d'un plot au cours d'une année ; sur un tel graphique (Fig. 16), sont reportées :

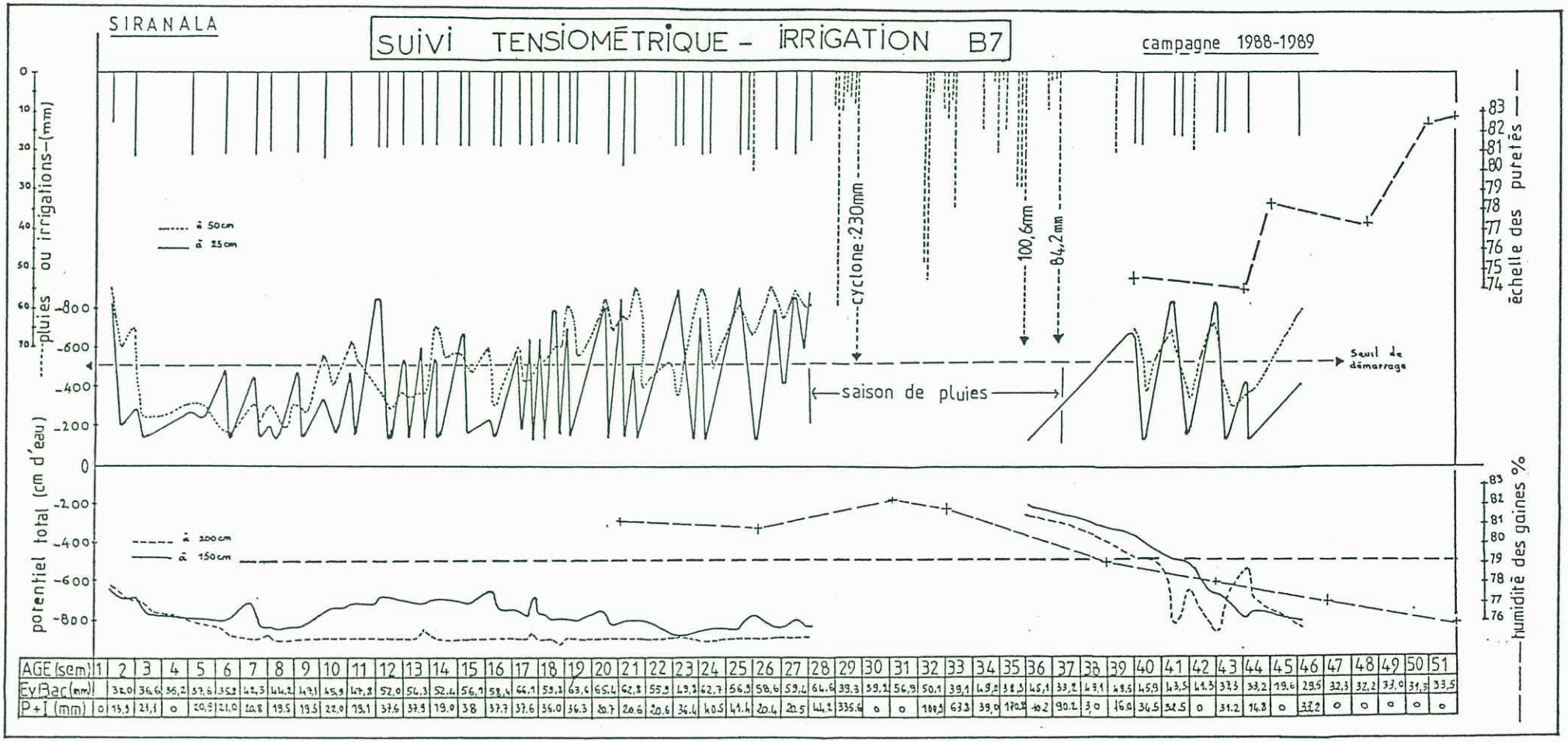
. les pluies (trait vertical pointillé) ;
. les irrigations (trait vertical plein) ;
. les valeurs du potentiel dans la zone de surface et en profondeur ;
. des informations physiologiques relatives à la canne : humidité des gaines et pureté des jus.

Le découpage en deux moitiés des aires de potentiel permet tout de suite de se rendre compte du suivi réel des instructions de pilotage -dans la zone haute- et des éventuelles percolations -dans la zone basse-.

La Figure 16 représente le tracé tensiométrique d'un plot globalement bien piloté puisqu'apparaissent :

. les oscillations de potentiel des tensiomètres déclencheurs, signe de la vigueur de la canne ;
. la maîtrise progressive des flux profonds après la saison des pluies, condition préalable à une bonne maturation.

Ce suivi peut être informatisé, ce qui permet de visualiser à tout moment les conditions hydriques passées et présentes de la culture, qui seront une composante essentielle du rendement à la récolte.



AGE (sem)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
Evbac (mm)		32,0	34,6	36,2	37,6	35,2	42,3	44,2	47,1	45,9	47,8	52,0	54,3	52,4	56,1	58,4	64,1	59,3	63,6	65,4	62,8	55,9	49,3	62,7	56,5	58,6	59,4	64,6	39,3	59,2	56,9	50,1	39,1	49,8	38,5	45,1	33,2	43,1	49,5	45,9	43,5	44,3	37,3	33,2	19,6	29,5	32,3	32,2	33,0	31,3	33,5
P+I (mm)	0	13,5	21,1	0	20,5	21,0	10,8	19,5	19,5	22,0	13,1	37,6	37,9	19,0	38	32,7	37,6	36,0	36,3	20,7	20,6	20,6	34,4	40,5	41,4	20,4	20,5	44,2	335,4	0	0	188,5	63,3	39,0	170,2	40,2	90,2	3,0	16,0	34,5	32,5	0	31,2	14,8	0	33,2	0	0	0	0	0

Figure 16 _ Suivi de l'alimentation hydrique d'un plot grâce au tracé tensiométrique.

Noter les oscillations du tensiomètre superficiel autour de la valeur seuil et le tarissement progressif des percolations après la saison des pluies suivi d'une inversion des flux permettant le contrôle de la maturation. Avant la saison des pluies, les percolations sont négligeables, voire inexistantes.

V. ESTIMATION COMPARATIVE DES IRRIGATIONS

1. Résultats des expérimentations

Pour comparer les méthodes de pilotage de l'irrigation en présence -la méthode classique $\alpha.E_V$Bac et le suivi du code tensiométrique-, deux approches sont possibles. La première consiste en une expérimentation en grandeur nature. La seconde utilise les données climatiques de l'année pour calculer les irrigations théoriques et les mettre en relation avec celles pratiquées sur un plot pilote où le code tensiométrique est suivi à la lettre.

Le tableau I ci-dessous présente les résultats des essais comparatifs en grandeur nature. Il met en évidence de façon systématique une meilleure efficience des irrigations dans le cas de la méthode tensiométrique.

Année de repousse	1ère		2ème		5ème		6ème	
Plot tensio	E_{14}		E_{14}		B_5		B_5	
Plot E_VBac	E_{15}		E_{15}		B_6		B_6	
Age à la coupe	12,9	12,7	12,6	12,7	11,3	12	12,6	12,1
Irrigation (mm)	765	827	852	1170	678	795	919	1017
TC.ha^{-1}	118	109	114	127	95,9	107	88,0	79,3
TC.ha^{-1}.mois^{-1}	9,15	8,56	9,05	9,97	8,50	8,89	6,98	6,60
TC.ha^{-1}.cm^{-1} ETR*	0,81	0,77	0,89	0,83	0,77	0,77	0,65	0,57
mm.TC^{-1}	6,5	7,6	7,5	9,2	7,1	7,5	10,4	12,8

Tableau I - Résultats de plots entiers pilotés respectivement par les méthodes climatique (E_{15}, B_6) et tensiométrique (E_{14}, B_5).

* Notion d'efficience introduite par YATES et TAYLOR (1988).

L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle ne tient pas compte de l'insatisfaction de certains besoins en irrigation par suite de l'indisponibilité partielle du pivot qui peut atteindre 20 à 30 %. L'origine de ces arrêts est diverse : travaux de sarclage, épandage d'engrais, traitement, graissage ou autre opération d'entretien, panne, manque de gas-oil, etc. La comparaison au champ des deux modes de pilotage conduira donc à sous-estimer les irrigations dans la situation où le pivot est le plus sollicité, ici dans le cas du pilotage par la méthode $\alpha.E_V Bac$.

Par contre, dans une mise en correspondance des besoins théoriques estimés par une simulation de bilan hydrique (voir pages suivantes) et des doses effectivement apportées sur le plot pilote B_7 à irrigation menée tensiométriquement, cette sous-estimation jouera bien évidemment en faveur des secondes puisque l'indisponibilité du pivot n'est pas prise en compte dans la simulation. Il est toutefois improbable que ce biais recouvre plus de la moitié des écarts observés (+ 39 % et + 52 % pour la simulation en vierge et 1ère repousse) (Tableau II).

Année de repousse	Vierge	1ère
Age à la coupe (mois)	12,7	11,7
Irrigation (mm)	961	842
$TC.ha^{-1}$	136	106
$TC.ha^{-1}.mois^{-1}$	10,7	9,06
$TC.ha^{-1}.cm^{-1}$ ETR	0,91	0,85
$mm.TC^{-1}$	7,1	7,9
I ($\alpha E_V Bac$)	1331	1281
$\frac{I\ (\alpha E_V Bac) - I\ (tensio)}{I\ (tensio)}$	0,39	0,52

Tableau II - Résultats du plot pilote B_7 à irrigation dirigée à partir d'informations tensiométriques ; comparaison avec la dose d'irrigation apportée théoriquement par la méthode $\alpha\ E_V Bac$.

Simulation du bilan hydrique B7 87/88 Avant pluies

IN°	EvBaC	Kc	Pluie	Irrig	ETR	Stock	i *	PERC.
0				45		45		
1	32,8	0,5	0	16,4	9,99	51,4	0,61	
2	40,8	0,5	0	20,4	13,7	58,1	0,67	0
3	36,7	0,5	0	18,4	13,5	63	0,73	0
4	35,7	0,5	0	17,9	13,8	67	0,77	0
5	34,6	0,5	0	17,3	13,9	70,4	0,8	0
6	35,2	0,5	0	17,6	14,6	73,4	0,83	0
7	34,4	0,7	0	24,1	20,4	77	0,85	0
8	38,5	0,7	0	27	23,5	80,5	0,87	0
9	37,8	0,7	0	26,5	23,6	83,3	0,89	0
10	49,4	0,7	0	34,6	31,4	86,6	0,91	0
11	46,4	0,7	0	32,5	30	89,1	0,92	0
12	43,2	0,7	0	30,2	28,2	91,1	0,93	0
13	45,2	0,7	0	31,6	31,6	91,1	0,94	0
14	48,5	0,7	0	34	34	91,1	0,94	0
15	52,4	0,9	0	45	47,2	88,9	0,94	0
16	54,3	0,9	0	45	48,9	85,1	0,93	0
17	60,1	0,9	0	45	54,1	76	0,92	0
18	60,1	0,9	0	45	54,1	66,9	0,87	0
19	60,9	0,9	0	45	44,1	67,8	0,8	0
20	70,7	0,9	0	45	51,6	61,2	0,81	0
21	64,2	0,9	0	45	43,9	62,3	0,76	0
22	64,8	0,9	0	45	44,8	62,5	0,77	0
23	67,6	0,9	1,4	45	45,5	63,4	0,77	0
24	69,9	0,9	0	45	48,9	59,5	0,78	0
	1184		1,4	843	785		0,72	0

Simulation du bilan hydrique B7-87-88 durant les pluies

IN°	EvBaC	Kc	Pluie	Irrig	ETR	Stock	i	PERC.
25	65,9	0,9	68,3	0	44,5	83,3	0,75	0
26	56,6	0,9	20,4	30,5	46,2	88,1	0,91	0
27	61,6	0,9	2,4	45	51,5	84	0,93	0
28	61	0,9	11	43,9	49,9	88,9	0,91	0
29	61,6	1	83,2	0	57,5	115	0,93	0
30	57,7	1	131	0	57,6	120	1	68,1
31	58	1	0	0	58	62	1	0
32	61	1	252	0	46,7	120	0,77	147
33	45,4	1	13,3	0	45,4	87,9	1	0
34	46,2	1	0	45	42,9	90	0,93	0
35	41,6	1	120	0	39	120	0,94	51
36	47,3	1	30,2	0	47,3	103	1	0
37	43,1	1	33,1	10	42,2	104	0,98	0
38	46,6	1	0	45	45,7	103	0,98	0
39	38,4	1	0	45	37,6	110	0,98	0
40	40,6	1	95,3	0	40,3	120	0,99	45,4
41	51,2	1	0	0	51,2	68,8	1	0
42	46,9	0,7	0	32,8	26,9	74,8	0,82	0
43	43,6	0,7	17,3	13,2	26,2	79,1	0,86	0
	974			310	857		0,93	312

Simulation bilan hydrique B7 87/88-Apres pluies.

IN°	EvBaC	Kc	Pluie	Irrig	ETR	Stock	i	PERC.
44	43,5	0,7	0	30,5	27	82,6	0,88	0
45	42,5	0,7	0	29,8	27	85,5	0,9	0
46	42,4	0,7	0	29,7	27	87,9	0,92	0
47	38	0,7	0	26,6	25	89,8	0,93	0
48	46,4	0,7	0	32,5	30	91,9	0,94	0
49	41,5	0,7	0	29,1	27	93,5	0,95	0
50	38,2	0,7	0	0	25	68,1	0,95	0
51	36,6	0,7	0	0	21	47,2	0,81	0
52	36,4	0,7	0	0	16	31,1	0,63	0
53	36,4	0,7	0	0	12	19,6	0,45	0
54	33,8	0,7	0	0	7,1	12,5	0,3	0
55	34	0,7	0	0	4,7	7,81	0,2	0
	470		0	178	249		0,74	0

* i défini par le polynôme d'EAGLEMAN (1971)

Simulation du bilan hydrique B7 88/89 Avant pluies

N°	EvBaC	Kc	Pluie	Irrig	ETR	Stock	i	PERC.
0				45		45		
1	32,5	0,5	0	16,3	9,9	51,3	0,61	
2	38	0,5	0	19	12,8	57,6	0,67	0
3	36,6	0,5	0	18,3	13,3	62,5	0,73	0
4	36,2	0,5	0	18,1	13,9	66,7	0,77	0
5	37,6	0,5	0	18,8	15,1	70,4	0,8	0
6	35,8	0,5	0	17,9	14,8	73,4	0,83	0
7	42,3	0,7	0	29,6	25,2	77,9	0,85	0
8	44,2	0,7	0	30,9	27,1	81,7	0,88	0
9	47,1	0,7	0	33	29,6	85,1	0,9	0
10	45,9	0,7	0	32,1	29,4	87,8	0,92	0
11	47,8	0,7	0	33,5	33,5	87,8	0,93	0
12	52	0,7	0	36,4	36,4	87,8	0,93	0
13	54,3	0,7	0	38	38	87,8	0,93	0
14	52,4	0,7	0	36,7	36,7	87,8	0,93	0
15	56,1	0,9	0	45	50,5	82,3	0,93	0
16	58,4	0,9	0	45	52,6	74,7	0,9	0
17	66,1	0,9	0	45	51	68,7	0,86	0
18	59,8	0,9	0	45	44	69,7	0,82	0
19	63,6	0,9	0	45	47,2	67,5	0,82	0
20	65,4	0,9	0	45	47,6	64,9	0,81	0
21	62,8	0,9	0	45	44,6	65,3	0,79	0
22	55,9	0,9	0	45	39,9	70,4	0,79	0
23	49,8	0,9	0	44,8	37,2	78,1	0,83	0
24	62,7	0,9	0	45	56,4	66,7	0,88	0
	1203		0	873	807		0,84	0

Simulation du bilan hydrique B7-88-89 durant les pluies

N°	EvBaC	Kc	Pluie	Irrig	ETR	Stock	i	PERC.
25	56,9	0,9	24	27,2	41,1	76,8	0,8	0
26	58,6	0,9	0	45	45,9	75,9	0,87	0
27	59,4	0,9	0	45	46,2	74,7	0,86	0
28	64,6	0,9	10	45	49,8	79,8	0,86	0
29	39,3	1	336	0	34,9	120	0,89	261
30	39,2	1	0	0	39,2	80,8	1	0
31	56,9	1	0	45	50,8	75	0,89	0
32	50,1	1	101	0	43	120	0,86	12,9
33	39,1	1	63,8	0	39,1	120	1	24,7
34	49	1	39	0	49	110	1	0
35	38,3	1	171	0	38	120	0,99	123
36	45,1	1	10,2	0	45,1	85,1	1	0
37	33,2	1	90,2	0	30,4	120	0,92	24,9
38	49,1	1	3	0	49,1	73,9	1	0
39	49,5	1	16	33,5	42,2	81,2	0,85	0
	728			241	644		0,92	446

Simulation bilan hydrique B7 88/89-Apres pluies.

N°	EvBaC	Kc	Pluie	Irrig	ETR	Stock	i	PERC.
40	45,9	1	0	45	41,3	84,9	0,9	0
41	43,5	1	0	43,5	39,8	89,6	0,91	0
42	41,3	0,7	0	28,9	26,9	90,6	0,93	0
43	37,3	0,7	0	26,1	24,3	92,2	0,94	0
44	33,2	0,7	0	23,2	22	93,4	0,95	0
45	19,6	0,7	7	0	13	87,4	0,95	0
46	29,5	0,7	17,5	0	19,1	85,7	0,93	0
47	32,3	0,7	0	0	20,8	65	0,92	0
48	32,2	0,7	0	0	17,8	47,2	0,79	0
49	33	0,7	0	0	14,6	32,6	0,63	0
50	31,3	0,7	0	0	10,3	22,3	0,47	0
51	33,5	0,7	0	0	7,91	14,4	0,34	0
	413		24,5	167	259		0,8	0

En conclusion, les économies d'eau à attendre d'un suivi du code tensiométrique sont de l'ordre de 10 à 25 % de l'eau apportée par la méthode α E_VBac, sans réduction des rendements.

2. Interprétation

Cette eau économisée est de l'eau qui aurait percolé. En effet, la satisfaction des besoins calculés par la méthode α E_VBac impose que les réserves hydriques du sol soient toujours dans le domaine facilement utilisable, c'est-à-dire que l'humidité soit comprise entre la CR (capacité de rétention) et les 2/3 CR. A ces niveaux d'humidité, les sables roux percolent. Pour les sols les plus proches (o et ● sur la Fig. 1) de ceux objet de cette étude, MARINI et al (1976) et JOURDAN (1983) estiment ce débit de percolation à plusieurs $mm.j^{-1}$ à la CR et entre 0,2 et 0,8 $mm.j^{-1}$ aux 2/3 CR. Ce sont des valeurs de flux descendant que l'on retrouve quand le code tensiomémtrique n'est plus suivi (2,8 à 4,6 $mm.j^{-1}$ sur la Fig. 14). **L'eau facilement utilisable est malheureusement percolable.**

La méthode tensiométrique contourne ce problème en faisant osciller le potentiel matriciel autour de la valeur seuil. Cet effet a été particulièrement bien observé par MOUTONNET et BRANDY-CHERRIER (1981) et PEYREMORTE (1984) et est visualisé ici de belle façon sur les Figures 4 et 16. Pour les sables roux, la valeur seuil - 5 m correspond grosso modo sur la courbe caractéristique à l'humidité 2/3 CR. **L'eau est successivement difficilement utilisable (après passage du seuil) puis facilement utilisable (après irrigation). Cette conclusion est aussi attestée par l'existence d'un point d'inflexion sur les relevées |H(t) (Fig. 4) dont la signification se déduit de l'allure de la courbe caractéristique (Fig. 5).Numériquement, ce point d'inflexion survient au voisinage immédiat de la valeur seuil. Cette distinction entre eaux facilement utilisable et difficilement utilisable revêt donc sa pleine signification. La canne confrontée à ces à-coups hydriques réagit en tirant parti de toute l'eau du profil. Ceci conduit progressivement à un**

sous-sol sec, l'eau ne percole plus ; toute l'eau apportée est utilisée ; le bilan hydrique est bouclé.

VI. NOTION DE BILAN HYDRIQUE TENSIOMETRIQUE

1. Conditions d'emploi

Dans un bilan hydrique classique, les entrées et les sorties d'eau au niveau sol s'équilibrent :

$$P + I = \Delta S + C + D$$

avec P, pluies
I, irrigations
ΔS, variation de stock d'eau du sol
C, consommation en eau de la plante
D, drainage

Le suivi strict du code tensiométrique permet d'abaisser considérablement le dernier terme (III.2).

L'astuce du bilan hydrique tensiométrique consiste à ne considérer que des intervalles de temps où le stock d'eau du sol aura in fine très peu varié. Pour remplir cette condition, les bornes de temps retenues doivent correspondre à des profils tensiométriques secs car l'allure générale des courbes caractéristiques indique qu'alors l'humidité volumique ne varie pratiquement plus avec le potentiel. Des profils de potentiel faiblement décalés impliqueront donc des profils humidimétriques superposés. La condition $\Delta S = 0$ sera alors vérifiée.

La Figure 17 illustre ces propos. Les profils initial (i) et final (f) sont choisis au-delà de h = - 6,00 m, valeur située en haut de la branche concave de la courbe caractéristique (Fig. 5 ; GAUDIN et RAPANOELINA, 1989). Le passage de h de - 6 m à - 8 m correspond à une variation d'humidité volumique inférieure à 0,8 % soit sur cinquante cm de sol, inférieur à 4 mm. Ceci est minime par rapport aux quantités I et P mises en jeu.
Les percolations sont également du même ordre de grandeur. En effet, la loi de Darcy généralisée s'écrit :

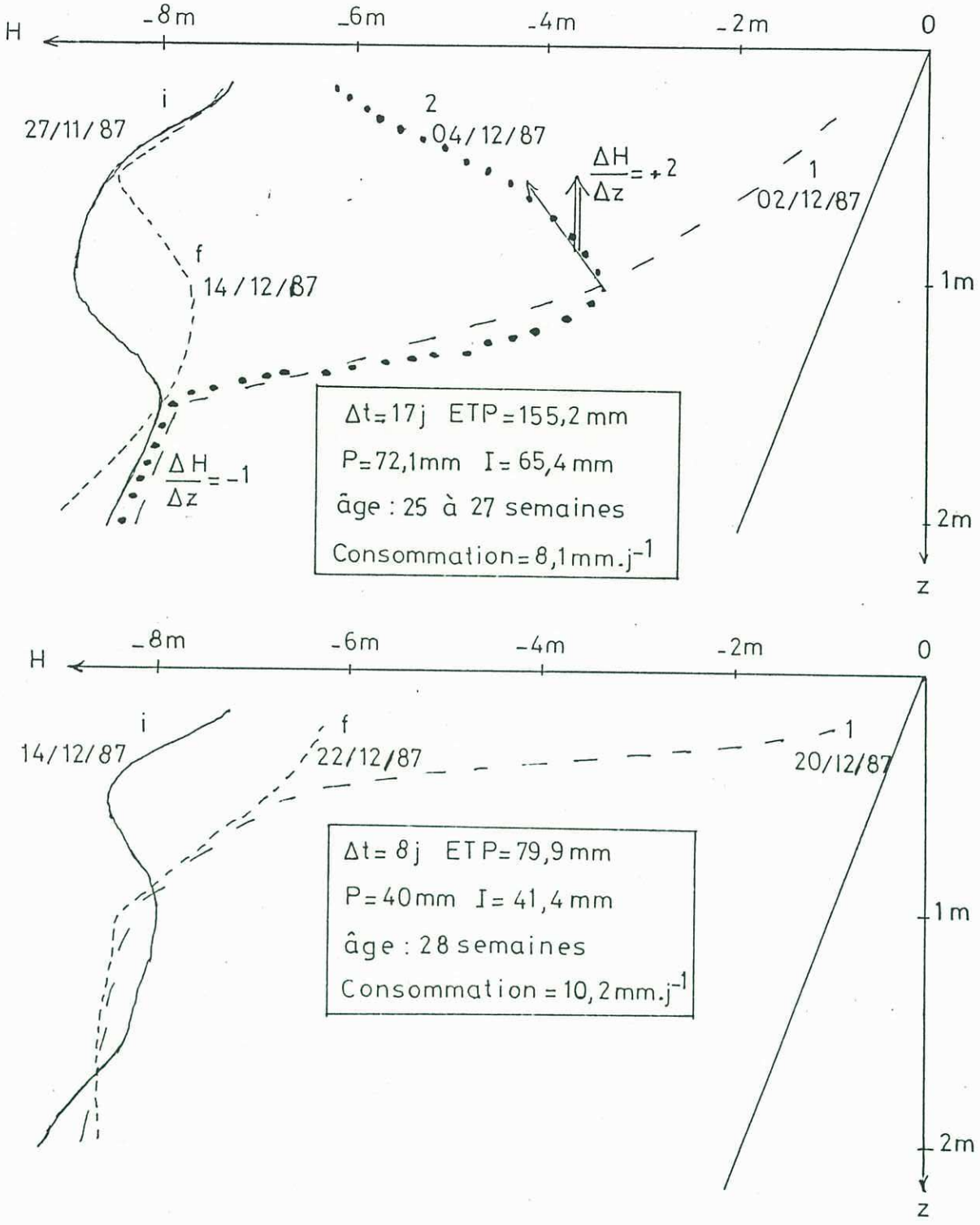


Figure 17 - Calcul de consommation par la méthode du bilan hydrique tensiométrique.

$$q = - K(h) \frac{\Delta H}{\Delta z}$$

à z voisin de 2 m, l'on a :

. $\frac{\Delta H}{\Delta z} \simeq - 1$

. $h \simeq - 6$ m d'où $K \simeq 0,34$ mm.j^{-1} (Fig. 2)

q vaut donc approximativement 0,34 mm.j^{-1}. Pour une durée totale de 17 jours (exemple du haut de la Fig. 17), le drainage approchera 6 mm.
La consommation en eau durant cette période est donc :

$$C = P + I$$
$$= 72,1 + 65,5$$
$$= 137,5 \text{ mm}$$

La consommation journalière vaut donc 8,1 mm.j^{-1}. L'erreur relative liée aux approximations peut être estimée à

$\frac{\Delta S + q \Delta t}{C}$, soit 7 %.

2. Définition de coefficients culturaux restrictifs

L'emploi de la méthode du bilan hydrique tensiométrique conduit à définir un coefficient cultural tensiométrique de la façon suivante :

$$k_t = \frac{P + I}{ETP}$$

Ce coefficient k_t sera évalué avec d'autant plus de précision que la période envisagée pour son calcul sera plus longue car la source d'erreur ΔS perdra relativement de son importance. Mais ce coefficient ne peut être qualifié de cultural que si une condition supplémentaire est imposée à la méthode : le profil intermédiaire entre les profils i et f doit présenter, à l'exemple de la Figure 17, à moins d'un mètre cinquante de profondeur un renflement de potentiel bien marqué en-deçà de h = - 5 m indiquant que l'eau est facilement utilisable par

la plante. Sous réserve de cette condition parfois difficile à réaliser, les besoins en eau de la culture peuvent être considérés comme assurés.

Dans la pratique, cette condition est théoriquement remplie par un plot piloté tensiométriquement puisque celui-ci montre l'oscillation du potentiel autour de la valeur seuil - 5 m (Fig. 4). Le coefficient tensiométrique k_t peut alors être mis en correspondance avec le coefficient α appliqué dans la méthode climatique d'évaluation des besoins d'irrigation. Cette opération a été effectuée graphiquement (Fig. 18) pour le plot B_7 (année 1988-1989). Elle montre que là où le calcul de k_t est possible (c'est-à-dire hors saison des pluies), ce coefficient cultural tensiométrique apparaît proche de 0,8 fois le coefficient déterminé par BARAN (1982).

En inversant la démarche, ces coefficients 0,8 α peuvent être conçus comme des coefficients culturaux restrictifs dont l'emploi en méthode climatique permettrait de limiter les besoins en eau. Cette conception est renforcée par l'évaluation du niveau des percolations associées à 1 α : de 0,1 à 0,25 α (voir V), soit à peut près 1 α - 0,8 α = 0,2 α. Toutefois, il est évident que si cette méthode peut réduire les percolations (et donc le risque de lessivage des sols), elle n'assurerait pas systématiquement l'adéquation de l'offre en irrigation aux besoins de la canne aussi bien que la méthode de pilotage tensiométrique. Des décalages interviendraient à terme d'une part et d'autre part, la maturation ne serait pas forcément bien assurée.

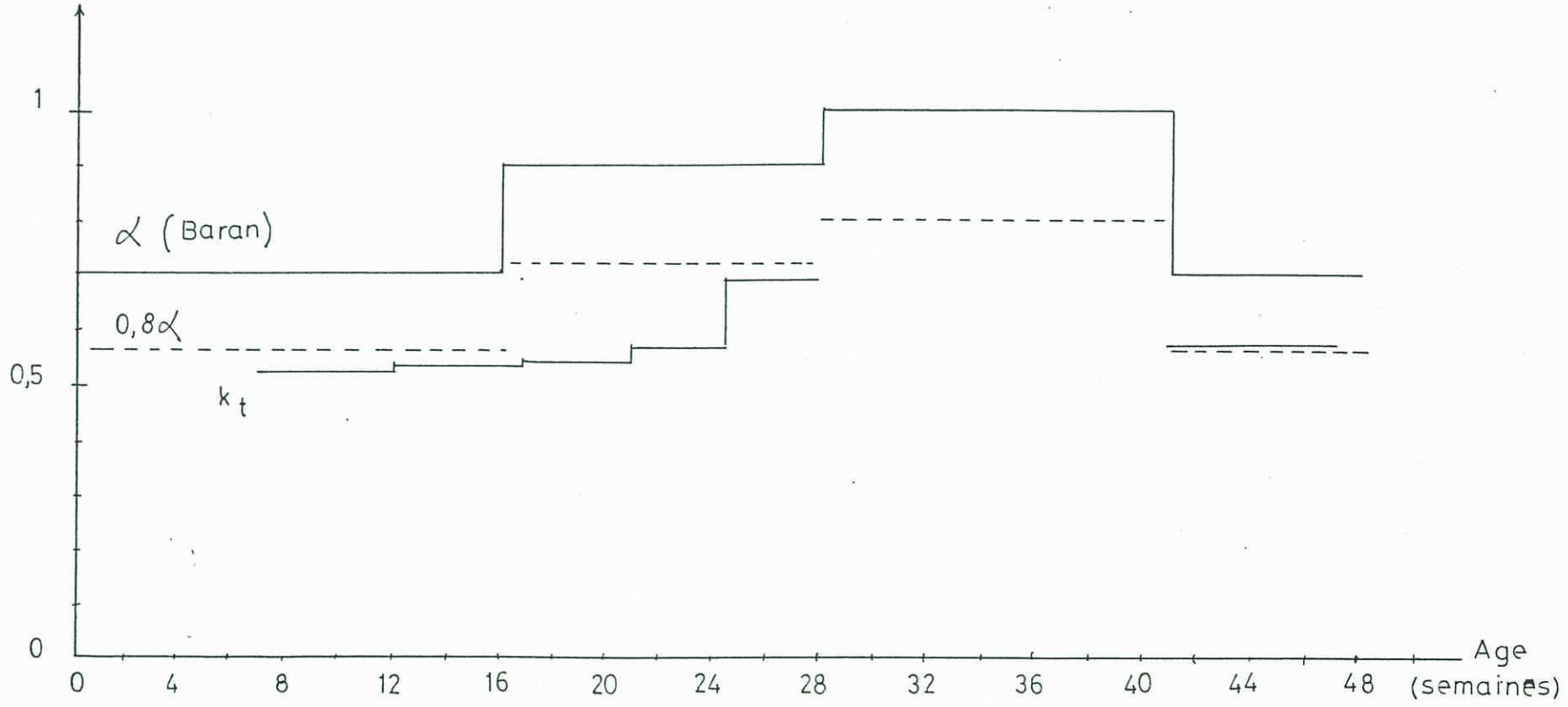


Figure 18_ Comparaison de coefficients climatiques et du coefficient cultural tensiométrique.

VII. SOLUTIONS TECHNIQUES

1. Restreindre l'irrigation en appliquant 0,8 α

Cette méthode est l'application des culturaux restrictifs approchés par la méthode du bilan hydrique tensiométrique (Fig. 18) et en tire donc ses limites.

Avantages	Inconvénients
- diminution des percolations à certaines époques =→ économie d'eau → donc de gas-oil =→ moindre lessivage des sols - conserver le mode de gestion existant	- pilotage en aveugle - non garantie de la satisfaction des besoins en eau en période de pointe ou en cas de panne - maturation assez mal contrôlée - dégradation possible des sols à long terme

2. Appliquer de façon stricte le code de pilotage par tensiomètres

Cette méthode est **justifiée théoriquement** par l'étude du code (II). Elle assure scientifiquement les besoins en eau de la canne, sous réserve d'une **infrastructure (Service Irrigation) efficiente et rapide** dans ses interventions.

Avantages	Inconvénients
- **percolations identiques à celles du milieu naturel** (couvert) => pas de lessivage => économie d'eau -> donc de gas-oil - **contrôle de la maturation** - outil de recherche agronomique Exemple : teneur en sucre fonction de la maturation - informatisation possible du suivi des plots	- achat, entretien de matériel tensiométrique - **création d'un service irrigation** . matériel de liaison (véhicule, radio) entre le surveillant de pivot chargé d'appliquer le code et le Service Irrigation qui le contrôle . contrainte accrue sur la coordination (approvisionnement en carburant, problème de panne) . coût de fonctionnement d'un service irrigation - formation et sélection des surveillants de pivot

VIII. CONCLUSION

De nombreux résultats sont présentés dans ce rapport. Leur intérêt pratique est indissociable de leur fondement scientifique :

- la vie hydrique de la canne peut être suivie aussi bien au jour le jour -par les courbes isopotentiel- que de façon cumulée -par le tracé tensiométrique-
- la mise en relation des courbes H(t) avec la courbe caractéristique de l'humidité du sol conduit à faire la distinction entre eaux facilement et difficilement utilisables et ainsi à définir le seuil de déclenchement des irrigations.

Devant une telle convergence de résultats probants **en faveur du pilotage par tensiomètres,** il est évident que celui-ci doit être généralisé à l'ensemble de la SIRANALA. D'ores et déjà, ce changement est à envisager comme une **MUE** permettant au nouveau service irrigation d'accomplir ce pourquoi il aura été voulu mais aussi d'acquérir de nouvelles connaissances (sur le stress hydrique par exemple) et de nouvelles fonctions par suite du développement de **nouveau organes** (outil H(t), informatisation du suivi des plots, etc.). Pour la réussite de cette mue, la nécessité d'avoir un **bon pilote** se doit d'être rappelée.

IX. BIBLIOGRAPHIE

- BARAN R. 1982
Synthèse de l'expérimentation agronomique de 1973 à 1978 à la Station de Recherches Agronomiques d'Analaiva.
153 p. + 47 p. annexes

- EAGLEMAN. 1971
An experimentally derived model for actual evapotranspiration.
Agric. Meteorol 8 (4-5) : 385-394

- GASSER J.K.R., ROSS G.J.S. 1975
The distribution in the soil of aqueous ammonia injected under grass.
J. Sci. Fd. Agric. 26 : 719-729

- GAUDIN R., RAPANOELINA M. 1989
Rapport d'avancement des études tensiométriques pour l'irrigation à la SIRANALA ; Convention LRI-SIRANALA 1988
IRRIG-TENSIO ; 35 pages

- GAUDIN R., RAPANOELINA M., ORIOL P.
Etude de la dynamique de l'eau sous canne à sucre cultivée en sol léger et irriguée par système pivomatique.
I.- Mise au point d'une méthode d'étude : le tracé des courbes d'isopotentiel hydrique.
Soumis pour publication à L'Agronomie Tropicale

- JOURDAN O. 1983
Contribution à l'étude de la capacité de rétention en eau des sols. Cas de deux sols malgaches.
Thèse de Doctorat-Ingéniorat en Agronomie, option Pédologie, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 136 p.

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

- MARINI P., VILLEMIN P., JOURDAN O.
Définition des propriétés hydrodynamiques des sols du périmètre sucrier d'Analaiva.
Rapport de Convention LRI-CENRADERU 1976-6-Hp, 41 pages

- MOUTONNET P., BRANDY-CHERRIER M. 1981
Possibilités d'utilisation des tensiomètres pour l'automation des cultures.
Plant and Soil 59 : 335-345

- ORIOL P., RAPANOELINA M., GAUDIN R.
Etude de la dynamique de l'eau sous canne à sucre cultivée en sol léger et irriguée par système pivomatique.
II.- Mise en évidence de l'intérêt du pilotage de l'irrigation par tensiomètres.
Soumis pour publication à L'Agronomie Tropicale

- PEYREMORTE P. 1984
Pilotage des irrigations : adéquation des estimations ou des mesures ?
Bulletin du G.F.H.N. 16 : 17-36

- YATES R.A., TAYLOR R.B. 1988
Water use efficiencies in relation to sugar cane yields.
Sugarcane 1 : 6-10

Tananarive, le 8 octobre 1990