



Transfert d'eau dans le systeme sol-plante et pilotage de l'irrigation

B. Cabibel

► To cite this version:

B. Cabibel. Transfert d'eau dans le systeme sol-plante et pilotage de l'irrigation. Symposium franco bresilien sur l'irrigation, Nov 1987, Rio de Janeiro, Brésil. 77 p., 1987. hal-02856542

HAL Id: hal-02856542

<https://hal.inrae.fr/hal-02856542>

Submitted on 8 Jun 2020

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.

TRANSFERT D'EAU DANS LE SYSTEME SOL-PLANTE

ET

PILOTAGE DE L'IRRIGATION

B.CABIBEL

Station de Science du Sol
Domaine St Paul
INRA 84140 Montfavet

.....

Symposium franco brésilien sur l'irrigation, Rio de Janeiro, 1987/11/23-26

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I TRANSFERT D'EAU ET MAITRISE DE L'IRRIGATION:

I.1 TRANSFERT De L'EAU DANS LE SOL:

I.2 TRANSFERT DE L'EAU DANS LA PLANTE:

I.2.1. Flux conservatif:

I.2.2. Flux non conservatif:

I.3 MAITRISE DE L'IRRIGATION:

II LES MOYENS D'AIDE A LA DECISION:

II.1 METHODES OPERATIONNELLES:

II.1.1 Approche statistique: le bilan hydrique

II.1.2 Mesures à la parcelle: la tensiométrie

II.2 METHODES EN PREDEVELOPPEMENT OU EN COURS D'ELABORATION

II.2.1 Mesures des températures de surface:

II.2.1.1 La télédétection.

II.2.1.2 La radiothermométrie infrarouge.

II.2.2 Suivi des indicateurs physiologiques:

II.2.2.1 Micrométrie des organes de la plante:

A) Théorie

B) Mise en oeuvre

1. Le capteur.

2. Acquisition des données.

3. Expressions des résultats.

4. Résultats caractéristiques.

II.2.2.2 Mesure des flux de sève:

A) Théorie

1. Principe.

2. Equations de base.

3. Relation d'étalonnage.

4. Analyse théorique de l'erreur.

B) Mise en oeuvre

1. Installation des capteurs.
2. Acquisition des données.
3. Mesure des flux dans la plante.

II.2.2.3 Couplage micrométrie-fluxmétrie et pilotage de l'irrigation.**III CONCLUSIONS**

INTRODUCTION

Les méthodes, actuellement les plus utilisées, pour le contrôle et le pilotage de l'irrigation, notamment l'irrigation localisée, se fondent soit sur la détermination du bilan d'énergie de la culture, soit sur la mesure de la répartition et de la disponibilité de l'eau du sol. Ces méthodes présentent des limitations qui leurs sont à la fois spécifiques, dans leur mise en oeuvre à la parcelle, et communes quant à l'analyse qui est faite du comportement hydrique de la plante.

Les premières, outre qu'elles ne prennent que peu ou pas en compte les propriétés du sol qui gouvernent les conditions de transfert de l'eau de son point d'apport aux sites d'extraction racinaire, apparaissent, dans leur application, réservées à des cultures de grande extension au sol et à couverture totale. Les secondes, outre qu'elles interrogent sur la définition et la signification des valeurs seuils de potentiel hydrique utilisées dans le sol pour le contrôle de l'apport d'eau, posent le problème de la représentativité, au niveau parcellaire, des mesures, du fait de la variabilité spatiale importante pouvant exister dans le sol pour ce paramètre. Toutes, elles ne font intervenir la plante qu'à travers une mesure globale de sa consommation en eau et de valeurs seuils qui ne sont que plus ou moins bien reliées à l'évolution dans le temps de son état hydrique.

De fait les modalités d'irrigation sembleraient devoir être mieux contrôlées par l'analyse de l'évolution de l'état hydrique de la plante au travers:

- d'une part du suivi en continu d'indicateurs physiologiques, sensibles à l'évolution de son déficit hydrique,

- d'autre part de la mesure des flux de sève la traversant.

Ces paramètres intègrent en effet, simultanément et à un pas de temps court, l'importance relative de la contrainte climatique subie et de la disponibilité des réserves en eau du sol, la variabilité spatiale des phénomènes à étudier étant par ailleurs reconnue moindre au niveau de la plante (arbre) que du sol.

I TRANSFERT D'EAU ET MAITRISE DE L'IRRIGATION:

I.1 TRANSFERT DE L'EAU DANS LE SOL:

La loi de DARCY généralisée , $q = K() \cdot H$, indique que le flux q , entre deux points considérés d'un sol:

-s'établit dans le sens des potentiels décroissants (fig.1),

-est égal au produit de la conductivité $K()$ par le gradient hydraulique H .

On rappellera seulement que la conductivité et la succion sont des propriétés caractéristiques du milieu. Elles dépendent de sa porosité , de la distribution par taille de ses pores, de sa tortuosité et, pour un milieu donné, de sa teneur en eau. En conséquence la circulation de l'eau dépendra, en intensité et en direction, des relations liant les paramètres K , H et θ lors de toute variation de l'état et/ou de la teneur en eau du sol pendant l'écoulement (Fig.2 et 3).

En milieu saturé la circulation de l'eau, généralement monodimensionnelle, est sous la dépendance d'un gradient de pressions positives du à la charge d'apport et à la pesanteur (circulation gravitaire). La conductivité étant alors maximale et considérée comme constante (cas d'un sol isotrope et homogène) le flux est proportionnel au gradient de charge. En milieu non saturé c'est de l'adéquation du débit d'apport aux propriétés hydrauliques du milieu et à leurs variations dans le temps et l'espace que dépendra la circulation de l'eau. En milieu non continu, et notamment sous irrigation localisée, c'est de l'adéquation de la zone d'apport en surface du sol à la maille de fissuration que dépendra le devenir de l'eau apportée (Fig.4,5,6,7)

I.2 TRANSFERT DE L'EAU DANS LA PLANTE:

Dans une végétation suffisamment dense , le flux de chaleur latente, induit un flux d'eau continu qui transite essentiellement à travers la plante, flux appelé flux transpiratoire.

I.2.1: FLUX CONSERVATIF: Compte tenu des faibles réserves hydriques présentes dans les plantes par rapport au flux transpiratoire total, VAN HONERT (1948) avait admis que la transpiration et l'absorption étaient deux quantités égales sur l'intervalle de temps choisi (condition de flux conservatif). Dans le système sol-plante-atmosphère les divers processus de circulation de l'eau étaient décrits se dérouler d'une manière interdépendante, le flux, alors assimilé à l'intensité d'un courant électrique dans un conducteur, ayant pour expression la relation linéaire:

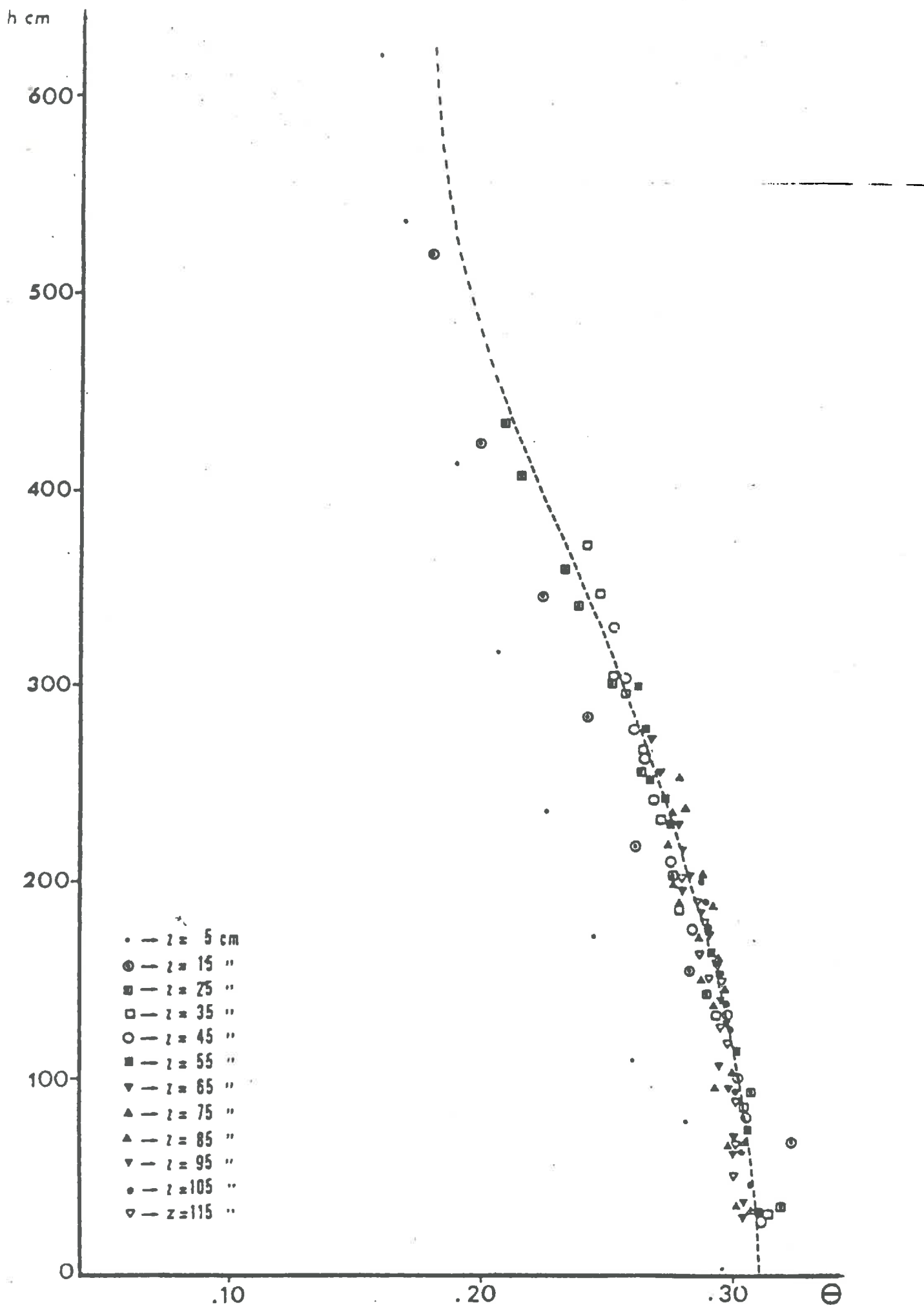


Fig 2 Courbe Potentiel - Teneur en eau

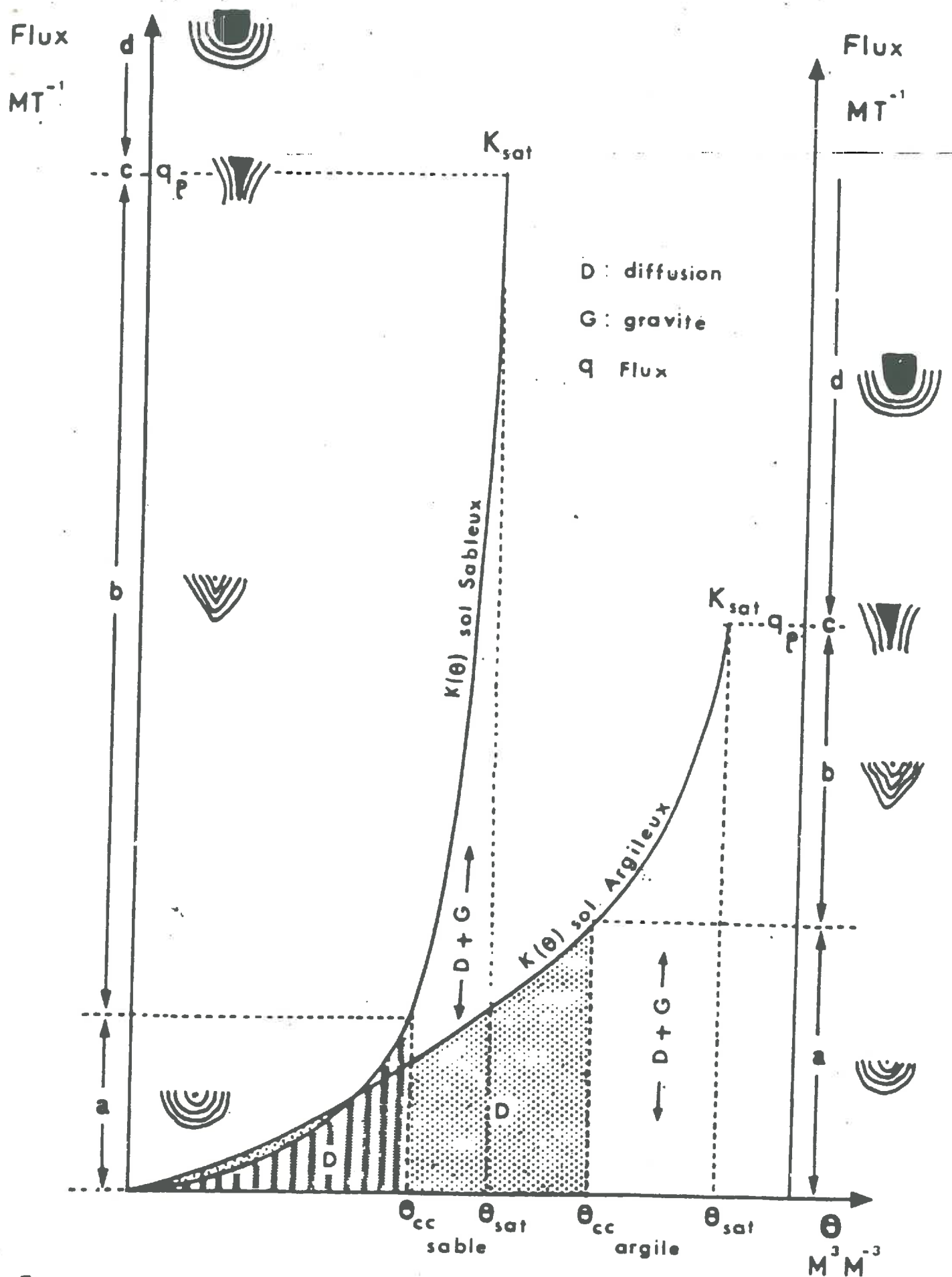


Fig: 3 Morphologie des zones mouillées , régime de circulation de l'eau en fonction des paramètres hydrodynamiques du sol et du débit appliqué

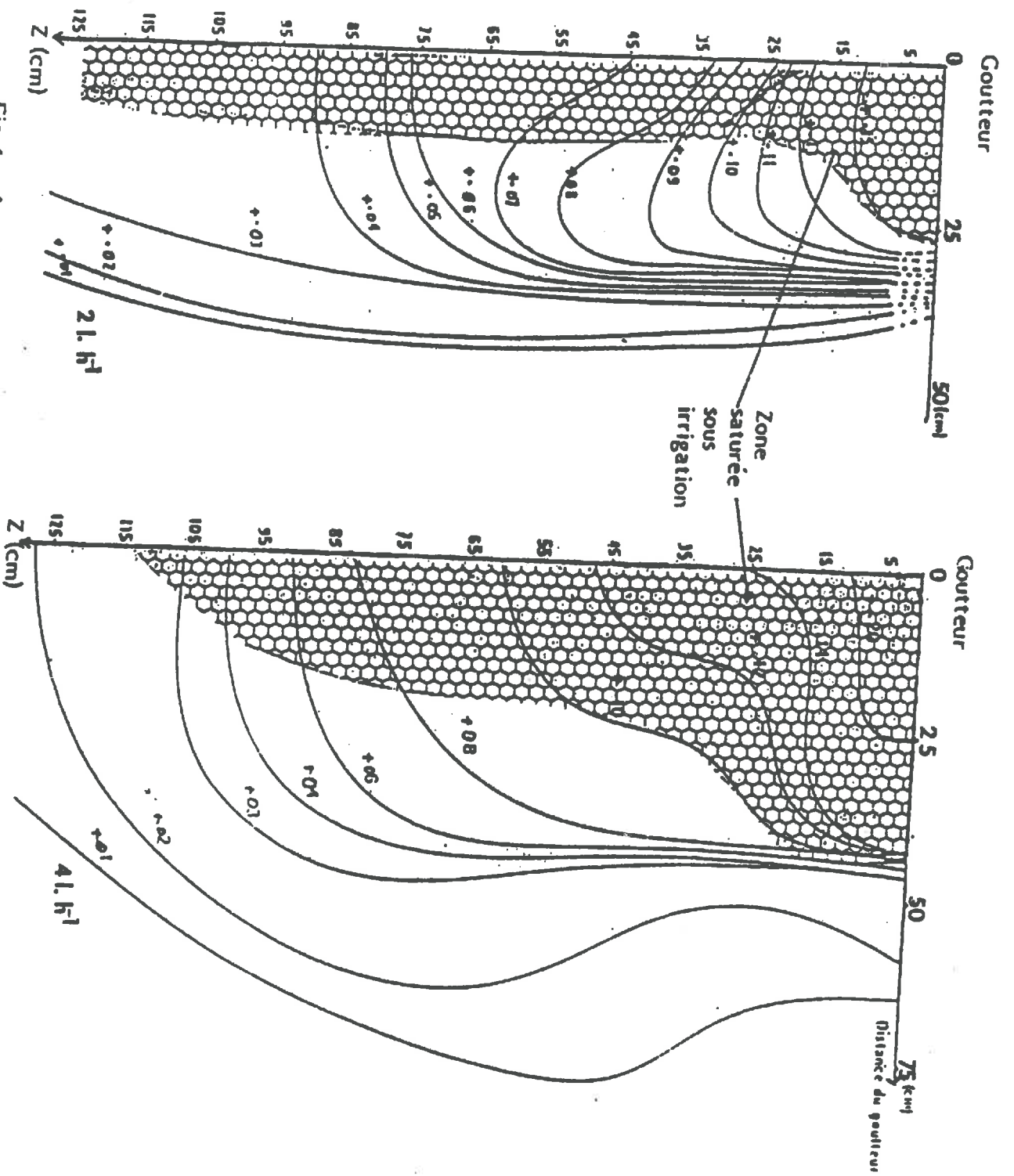


Fig.4 - Installation du bulbe : Distribution des écarts à la teneur en eau moyenne (cm^3/cm^3).

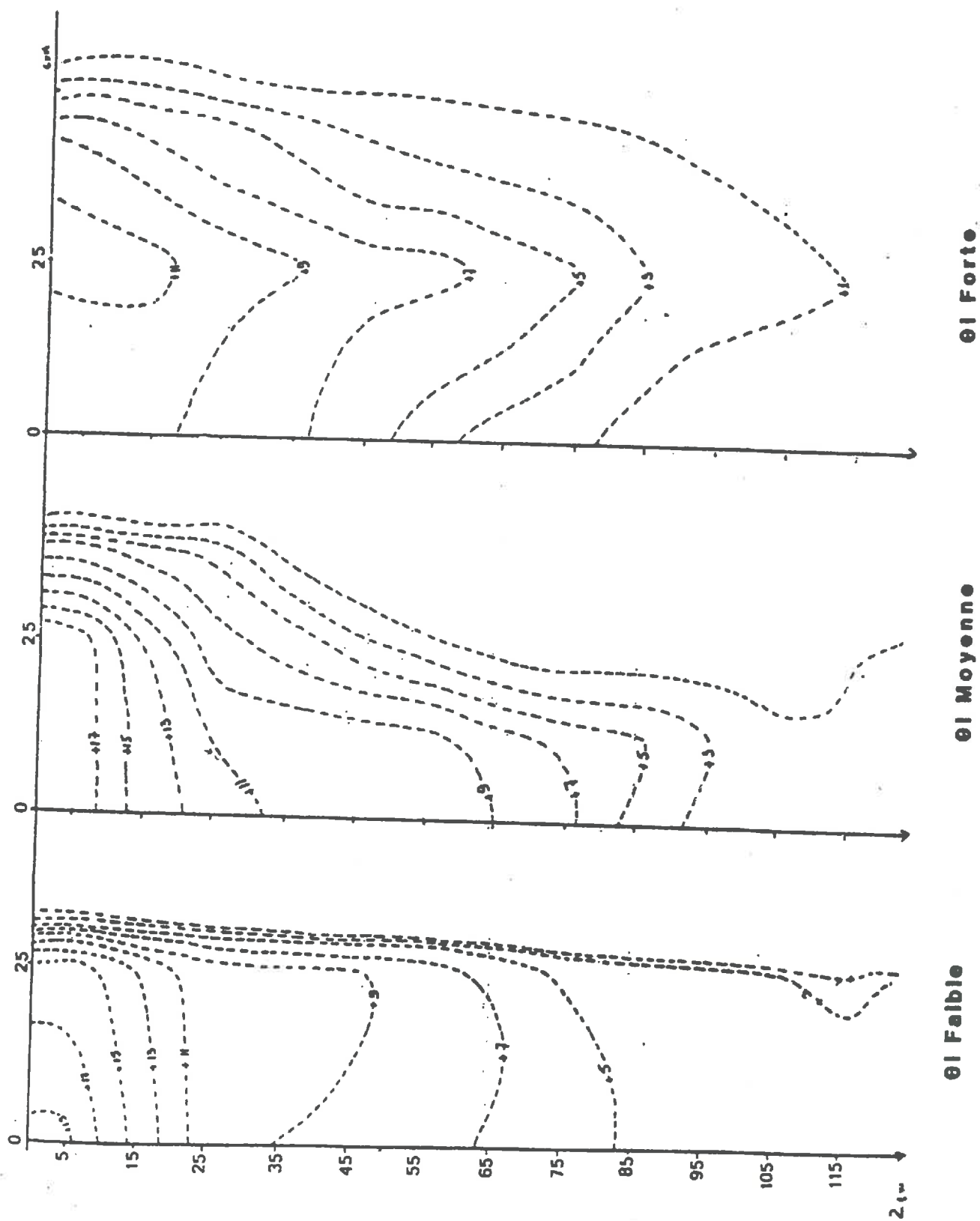


FIG. 5 - BULBE OBTENU A 2L/h A DIFFERENTE TENEUR EN EAU H INITIALE

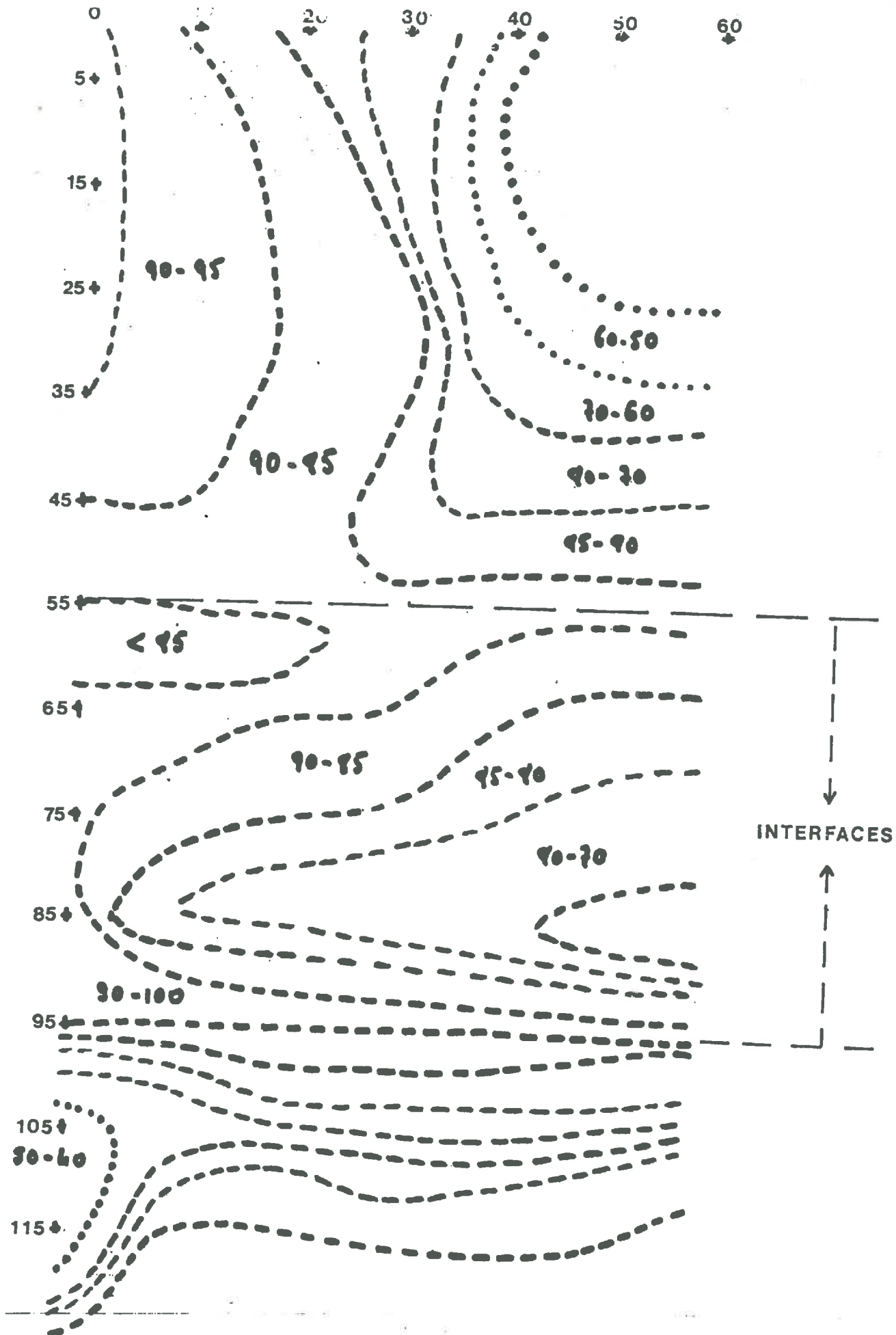


Fig.6: Effet Structure

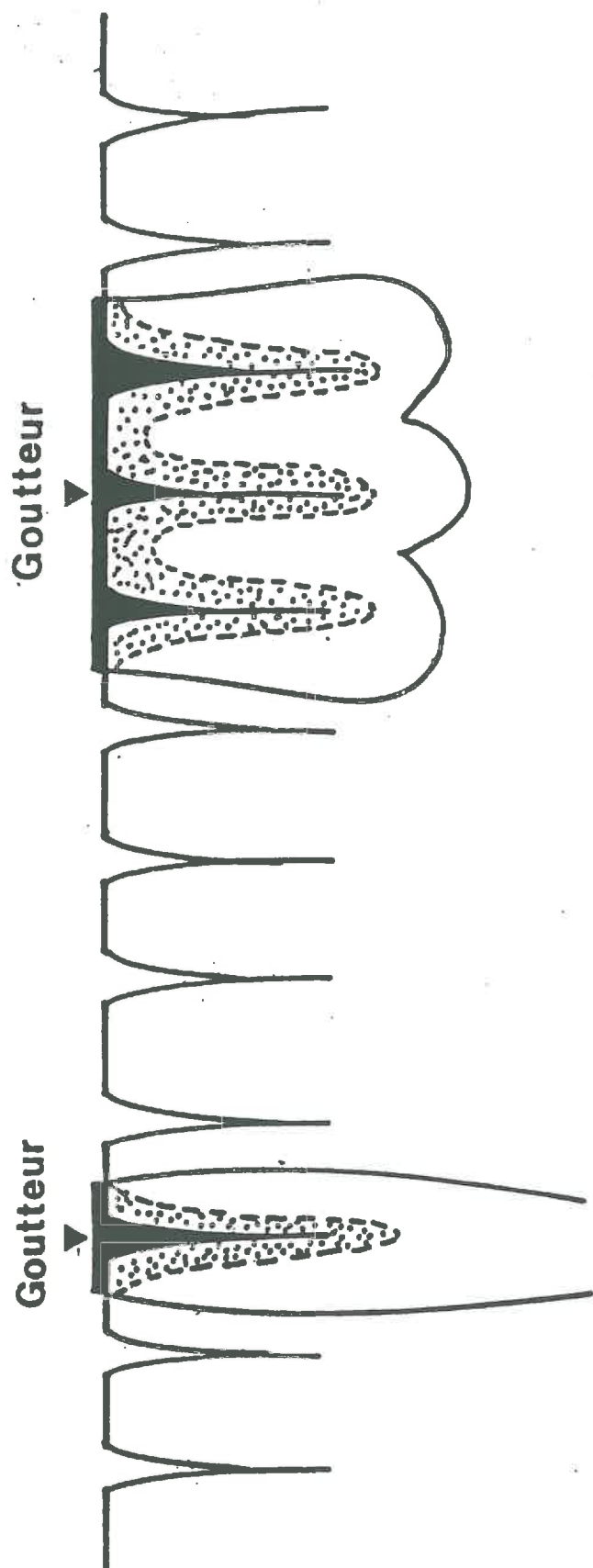


Fig. 7 : Adéquation zone d'alimentation maille de fissuration

$$T = \frac{F - S}{R_{sp}}$$

Où:

F est le potentiel dans les feuilles,
S est le potentiel dans le sol,

R_{sp} est la résistance sol-plante à la circulation de l'eau. Elle est la somme de la résistance, dans le sol, à la circulation de l'eau vers les racines (R1), de la résistance à la pénétration radiale de l'eau dans les racines (R2), de la résistance à la circulation de l'eau dans le xylème (R3) et de la résistance à la circulation de l'eau dans la feuille (R4). Dans la plante R2 serait la résistance essentielle à la circulation de l'eau. Dans le sol R1 deviendrait très élevée dès que le potentiel de l'eau du sol dépasserait certaines valeurs seuils, par ailleurs très variables selon les conditions de leur obtention : culture en pot (S .6 bar) ou culture en conditions naturelles (S voisin du point de flétrissement), conditions qui déterminent la morphologie, le maillage et la longueur du système racinaire donc les conditions d'extraction de l'eau.

La vérification du modèle de Van HONERT, par de nombreux chercheurs, a de fait conduit à montrer que la formule proposée apparaît souvent en défaut. Ainsi dans la gamme des transpirations élevées, la relation linéaire entre T et F n'est généralement pas respectée, cette relation pouvant par ailleurs présenter au cours de la journée une hystérésis (fig.8). Le modèle physique simplifié proposé n'est donc pas susceptible de fournir une interprétation satisfaisante, du point de vue physique, du phénomène de transfert hydrique dans le continuum sol-plante, les conditions d'un flux conservatif ne pouvant être envisagées que dans un sol où l'eau resterait très disponible sur des périodes de temps non inférieures à 24 heures.

1.2.2: FLUX NON CONSERVATIF: La mise en évidence, par de nombreux auteurs, de cycles nycthémeraux au cours desquels se produisent une phase diurne de dessèchement des organes de la plante suivie d'une phase de réhumectation la nuit a permis de montrer que la plante était susceptible de céder, de façon réversible et à partir de tous ses organes, de l'eau au courant de transpiration. Cette dernière peut alors devenir, selon la phase considérée, supérieure ou inférieure à l'absorption correspondante (condition de flux non conservatif). La consommation en eau de la plante (Fig.9) serait donc satisfaite par l'utilisation simultanée:

- des réserves en eau du sol (R_s),
- des réserves en eau propres au végétal (R_v).

avec:

$$ETR \text{ ou } ETM = k.ETP = p + s$$

$$s = \frac{s - f}{R}$$

$$p = \frac{v - f}{r}$$

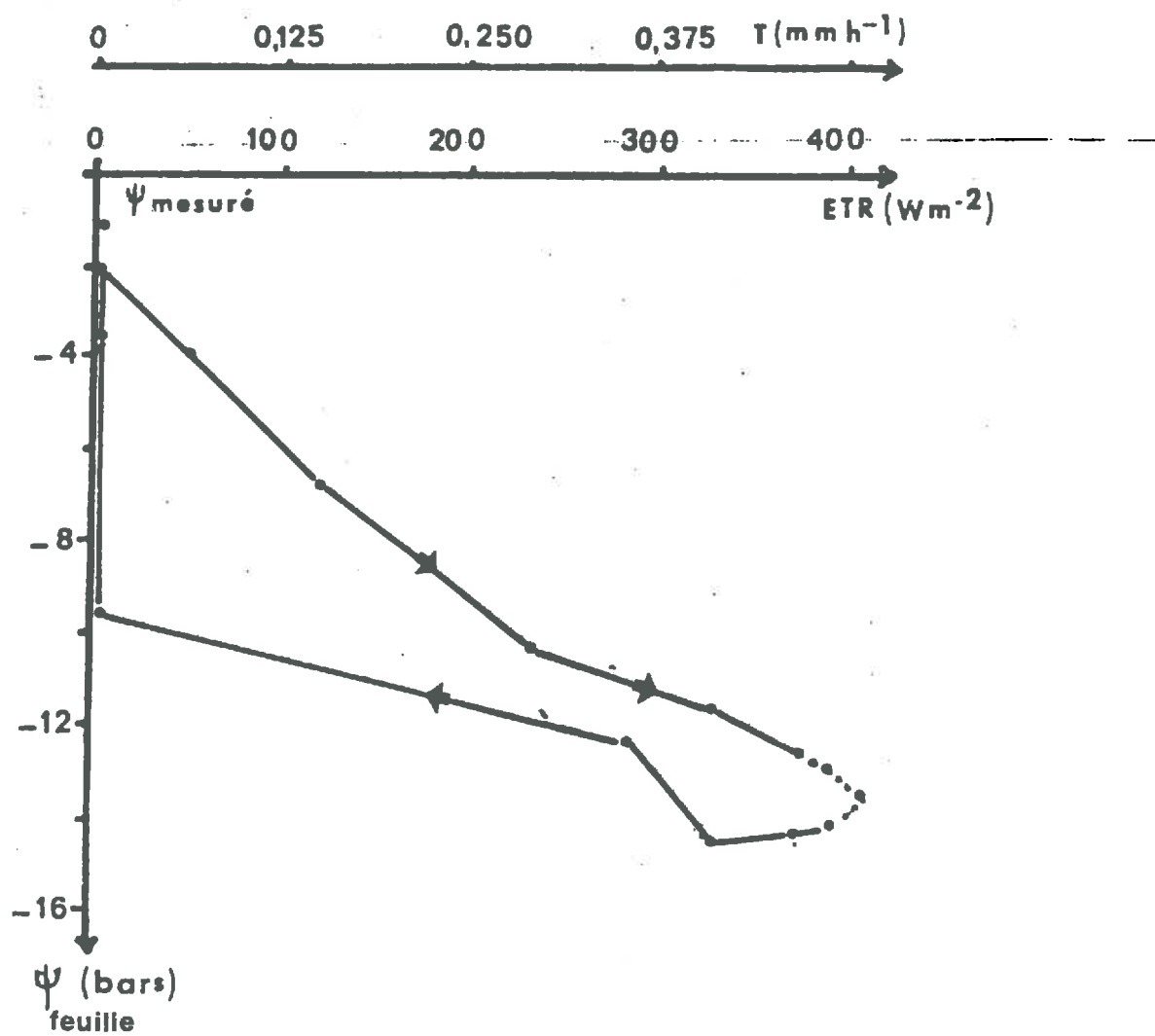
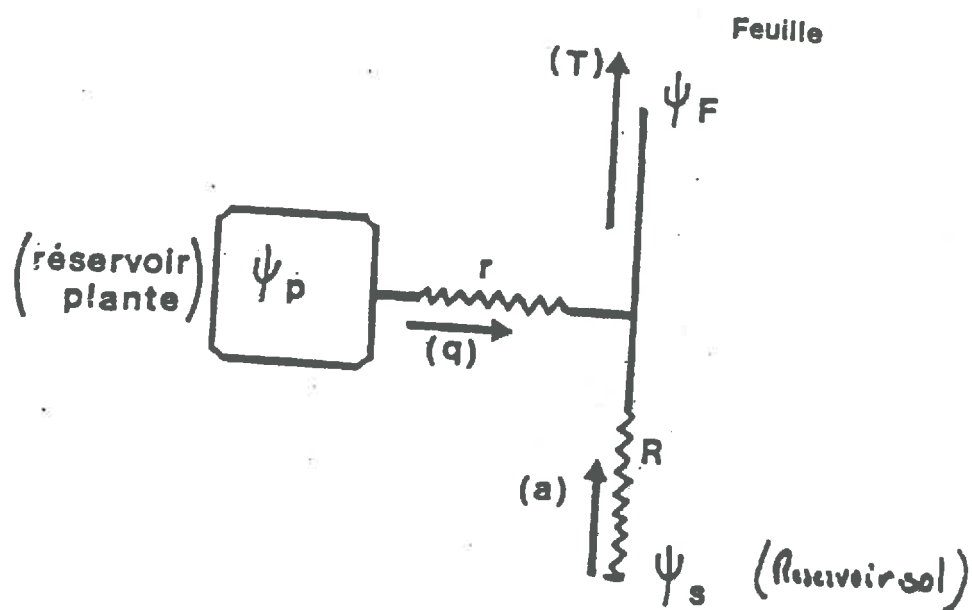


Fig.8: RELATION TRANSPIRATION — POTENTIEL



$T = a + q$
$\psi_s - \psi_F = R a$
$\psi_p - \psi_F = r \cdot q$
$q = -V/p \frac{d\psi_p}{dt}$

avec $p = \frac{V d\psi_p}{dv}$

V = Volume du réservoir à saturation
 v = " " " à l'instant "t"

FIG.9 — Modèle de transfert en flux non conservatif
 [N.KATERJI 1983]

k = coefficient cultural

R et r = résistances dans le sol et dans la plante

f , v et s = potentiels dans la feuille, dans le réservoir plante et dans le réservoir sol.

Les parts relatives des flux s (flux prélevé par les racines à partir de R_s) et p (flux prélevé à partir de R_v) dans ETR ou ETM sont fonction, dans le temps, des intensités relatives de l'ETP et de l'extraction potentielle de l'eau du sol par les racines.

I.3 MAITRISE DE L'IRRIGATION: Si l'ETP est directement liée aux conditions climatiques, l'intensité relative du flux racinaire s , dont dépendra l'état hydrique de la plante, sera fonction de la quantité et de la mobilité de l'eau stockée dans le volume de sol exploré par les racines, qui, sous irrigation, seront directement fonction des modalités de l'apport d'eau (déclenchement, débit, fréquence et dose) dans un contexte sol-plante-climat donné.

En conséquence c'est de l'optimisation de l'irrigation et de sa maîtrise à la parcelle que dépendra la minimisation du flux p , origine du stress hydrique, et l'obtention in fine de récoltes importantes et de qualité.

MAITRISER L'IRRIGATION, pour l'entrepreneur agricole, **CONSISTERA** donc, en vue de satisfaire ses objectifs techniques (accroissement et régulation des rendements) et économiques (au coût optimal) **A REPONDRE AU MIEUX AUX QUESTIONS QUE SONT:**

QUAND ARROSER? QUELLE DOSE APPORTEE? COMMENT L'APPORTER?

en tenant compte pour définir la stratégie d'irrigation, lorsqu'il y a risque de coïncidence entre une période de sensibilité de la culture à la sécheresse et l'existence ou la probabilité d'existence d'un déficit hydrique pendant la même période:

- des besoins de la culture et du rythme de ces besoins,
- des réserves en eau utilisables et de leurs conditions d'extraction par les racines (réserves utilisables et degré de disponibilité),
- des incidences, ponctuelles ou permanentes, du déficit en eau sur le comportement de la culture et le devenir de la récolte,
- du type de la culture (nature, enracinement, rendement visé, plus value associée),
- du mode d'irrigation considéré au sein de l'ensemble des techniques culturales mis en oeuvre,

-des contraintes économiques et techniques de l'entreprise agricole: équipement, main-d'oeuvre, disponibilité en eau (volume de la ressource, débit mobilisable ...etc).

Pour être efficace, l'apport d'eau devra donc théoriquement:

-compenser, dans le temps, la fraction des besoins réels en eau de la culture dès que le seuil de pauvreté des réserves en eau du sol sera tel que:

+soit la satisfaction de ces besoins devient insuffisante,

+soit qu'il aboutisse à une maximisation des besoins de pointe de la culture, donc des équipements, incompatibles avec le contexte économique lié au type de culture à irriguer.

-localiser l'eau d'irrigation à proximité des racines tout en minimisant les pertes par drainage profond, ruissellement ou évaporation directe,

-maintenir élevée la disponibilité de l'eau du sol dans la zone d'extraction racinaire.

La réponse aux questions posées, pour une mise en oeuvre optimale de l'irrigation, nécessite dès lors, pour leur élaboration, que soient utilisés des aides à la décision, concernant notamment la fixation des besoins en eau de la culture et du moment de l'apport, aides pouvant concourir à mieux garantir l'effet attendu des arrosages.

II LES MOYENS D'AIDE A LA DECISION:

II.1 METHODES OPERATIONNELLES: Les méthodes d'estimation et de contrôle des besoins en eau de la plante actuellement les plus utilisées se rattachent:

-soit à une approche à dominante statistique (bilan d'énergie de la culture),

-soit à une approche basée sur des mesures ponctuelles à la parcelle (mesure de la répartition et de la disponibilité de l'eau du sol).

II.1.1 APPROCHE STATISTIQUE: Le bilan d'énergie:

En considérant que l'ET des cultures est conditionnée par le pouvoir évaporant de l'air, il est possible, pour une culture dans un état de développement donné, d'établir le niveau potentiel de la demande, estimée par $k \cdot ETP_c$ où k est le coefficient cultural correctif de ETP_c pour la période et la

région considérées. Combinée aux autres termes du bilan hydrique, réserves mobilisables dans le sol (RSm) et pluviométrie (P), cette estimation permet de définir le besoin d'irrigation et donc la dose d'eau à apporter par période selon l'expression:

$$\text{Dose} = k.ETPc - RSm - P$$

Remarques:

- la méthode est utilisable en grandes cultures (grande extension et couverture totale),
- le coefficient k représente le plus souvent une valeur moyenne intégrant de multiples facteurs d'erreur,
- à la valeur de ETPc sont liés les problèmes de la validité et de la représentativité de ce paramètre quant à la durée (jour, décade,...), et quant à la surface à laquelle on l'attribue (parcelle,..., bassin versant) (fig.10), de sorte que la valeur k.ETPc ,délivrée le plus souvent par les services d'avertissement en irrigation, n'est en fait qu'une valeur approximative des besoins réels.
- la méthode minimise souvent les facteurs sol: choix d'une valeur de réserve utile souvent arbitraire, variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques du sol (réserves, disponibilité de l'eau, remontées d'eau par capillarité) et de l'enracinement, représentativité de la placette de mesure si ces paramètres sont mesurés,
- la méthode minimise la variabilité des besoins d'une culture selon l'objectif de rendement visé (fig.11).

Néanmoins, si tous les termes du bilan sont correctement approchés, cette méthode, aujourd'hui souvent associée à des logiciels susceptibles de gérer les bilans hydriques, permet d'établir une courbe moyenne des besoins qui garde une signification intéressante tant en ce qui concerne les différences des besoins périodiques liées aux cycle de développement de la culture que les différences résultant du climat à l'échelle de la région. Cette approche est souvent utilisée sous forme de calendriers d'arrosage, intégrés dans une stratégie globale d'équilibre des besoins de la plante et des moyens d'arrosage, leur validité reposant sur l'aptitude de l'irrigant à intégrer l'ensemble des contraintes de l'exploitation et d'analyser correctement les données du bilan hydrique (fig.12,13,14).

II.1.2 MESURES A LA PARCELLE: La tensiométrie:

Cette approche ne vise plus à apporter quantitativement les besoins en eau estimés de la culture mais à contrôler que les réserves en eau du sol, dans l'espace exploré par les racines, sont telles que les besoins de la plante pourront être satisfaits. On contrôle alors l'état hydrique du réservoir-sol, généralement la disponibilité de l'eau par mesure de son potentiel, dans le volume de sol affecté, à priori, au système racinaire irrigué (fig.15 et 16). On régénère les réserves en eau du sol si nécessaire, par irrigation, de façon:

- à garantir avant tout le potentiel de production,
- à obtenir la mobilisation des ressources en eau naturelles sur l'ensemble du cycle de culture,
- à éviter tout apport inutile voire nuisible (limitation du drainage, des ruissellements et de l'évaporation).

Remarques:

Cette méthode, actuellement très utilisée, nécessite, pour sa mise en oeuvre, la connaissance et l'évaluation de paramètres dont la détermination peut devenir rapidement limitante tant au niveau de la mesure que de la plante ou de l'utilisateur de la méthode. Il peut en être ainsi:

+de la fixation des seuils de potentiel commandant le déclenchement et l'arrêt de l'apport d'eau (fig 17),

+de la fixation du volume de mesure (profondeurs et distances latérales des points de mesure) qui nécessite, à priori, une bonne connaissance du développement du système racinaire et de ses variations dans le temps qui peuvent elles-mêmes dépendre des modalités de l'irrigation notamment pour les plantes annuelles (fig.18 et 19),

+de la représentativité des mesures faites par suite de la variabilité toujours importante du paramètre mesuré (le potentiel). Elle nécessite que les conditions de mise en oeuvre et d'exploitation des mesures soient telles qu'elles soient représentatives de l'ensemble parcelle-plante irriguée (choix de la placette de mesure, nombre minimal de mesures, intégration des données),

+de la nécessité d'une fréquence élevée de mesure pour assurer à l'optimum le fonctionnement du système contrôle-exploitation des données-irrigation, nécessité non toujours compatible avec les contraintes de l'exploitant-irrigant, et le degré de technicité réclamée pour ce dernier.

+L'automatisation des apports d'eau, souvent associée à cette approche du contrôle et du pilotage de l'irrigation, n'est pas toujours concevable. Il ne l'est que pour des cultures à haut niveau de produit brut, seules capables de rentabiliser les investissements en équipement adaptés à un taux exhaustif de couverture des besoins qu'impose tout système de pilotage des arrosages en temps réels. C'est le cas pour l'arboriculture et l'horticulture, notamment en irrigation localisée, où le pilotage de l'apport d'eau par tensiométrie est aujourd'hui très développé (fig.20 et 21).

II.2 METHODES EN PREDEVELOPPEMENT OU EN COURS D'ELABORATION:

Ces méthodes sont basées:

- soit sur la mesure de la température de surface d'un couvert végétal donnée à une échelle donnée,

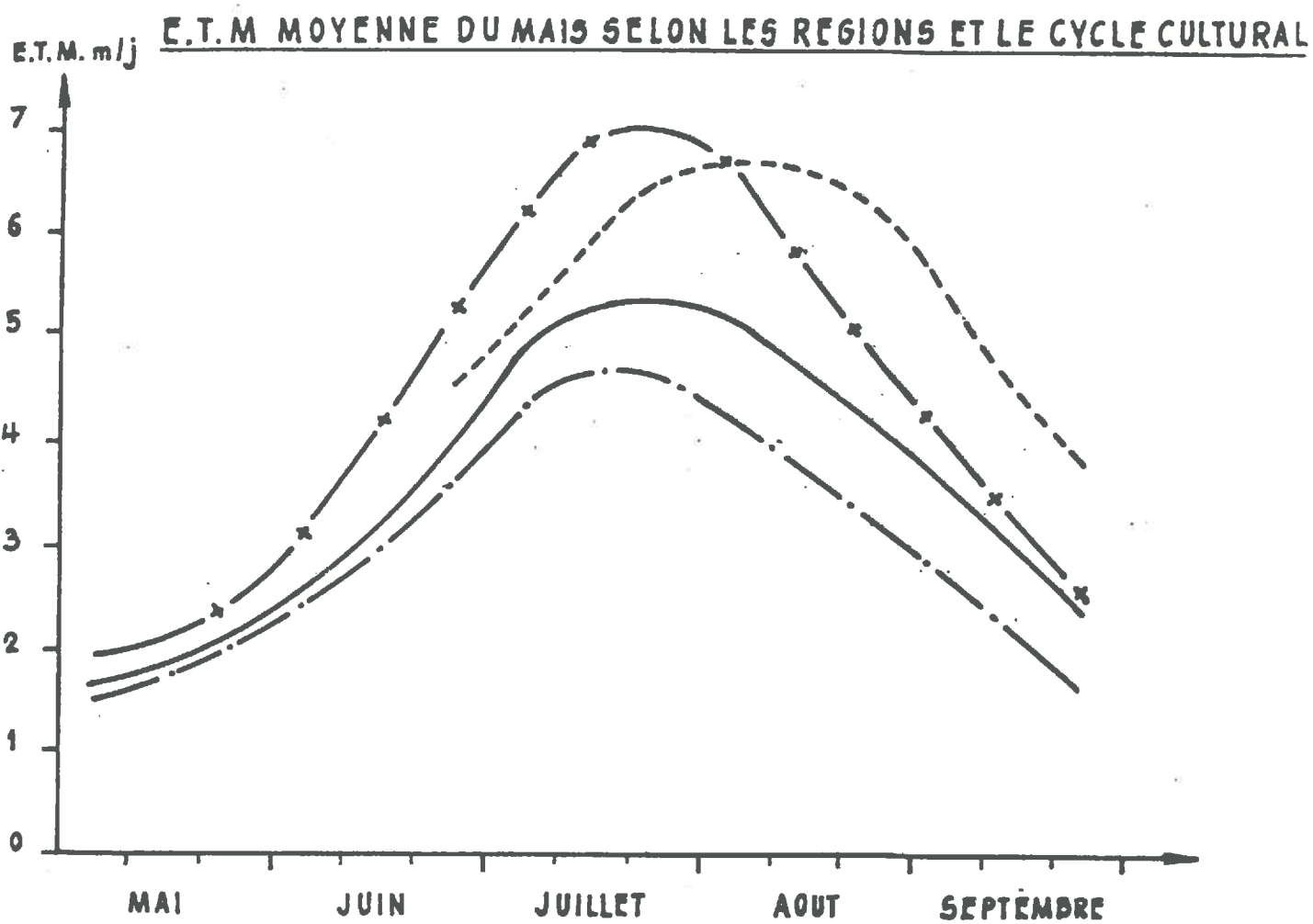


Fig.10 (origine S.C.P)

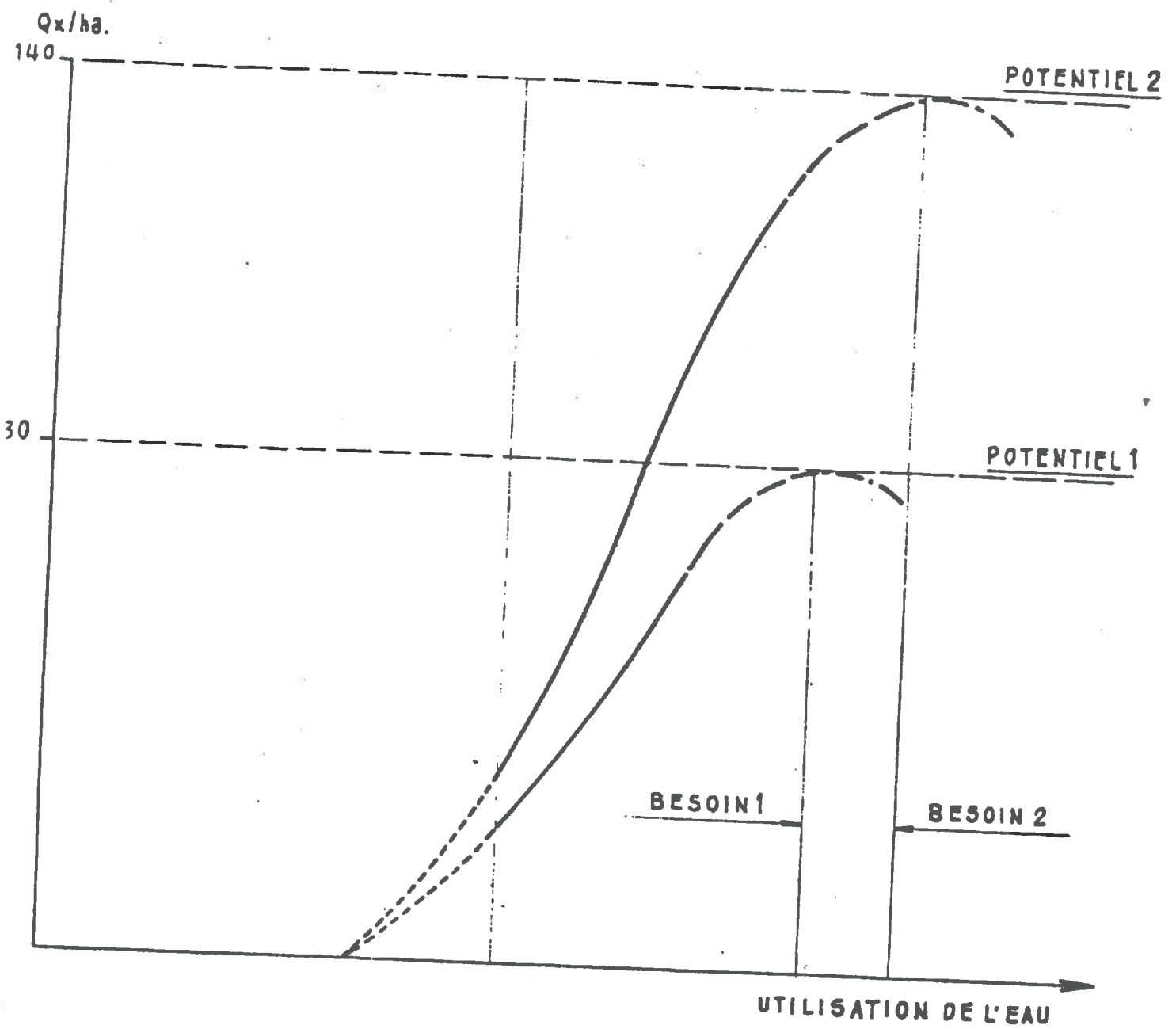


Fig 11: BESOIN EN EAU SELON LE RENDEMENT VISE (origine S.C.P)

CULTURE CEREALES

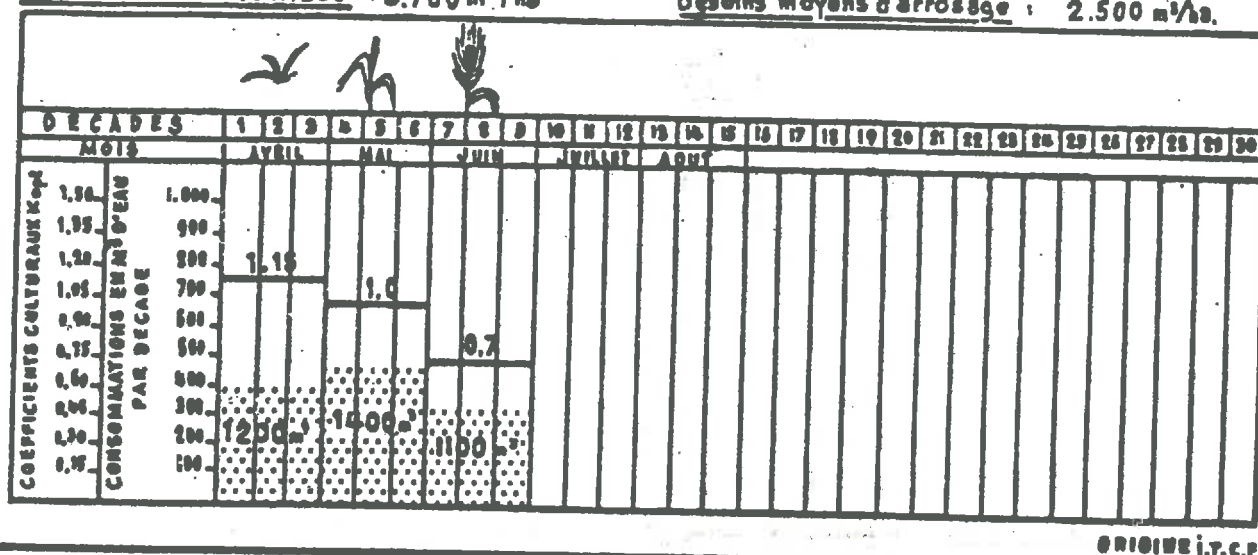
ZONE INTERIEURE

7

A paille, semis d'automne
Rendement, blé tendre : 70 - 75 qx/ha
blé dur : 55 - 60 qx/ha
Fertilisation azotée : 150 à 250 U

CONSUMMATIONS TOTALES : 9.700 m³/ha

Besoins moyens d'arrosage : 2.500 m³/ha.



ORIGINE I.T.C.P

CULTURE MAÏS

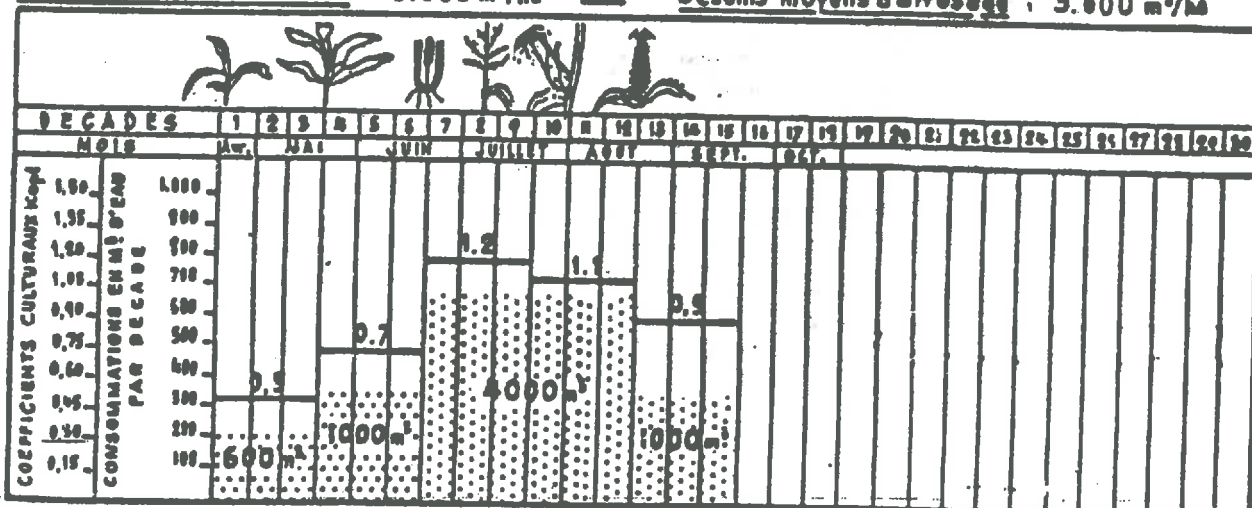
ZONE INTERIEURE

Grain ou ensilage
Précocité : indice 400 à 500
Rendement: 80 qx/ha grain à 15% d'humidité
soit 12.000 U.F/ha d'ensilage de plantes entières.

Irrigation pouvant être limitée du 20-6 au 20-8 : début d'intervention impératif à partir du stade apex à 15-20 cm de hauteur dans la tige. Possibilité d'irrigation quasi-systématique (assurant entre 80 et 100 % du rendement potentiel) à raison de 50 mm par décade entre 20-6 et 20-8 en sol capable de libérer 100 mm pendant cette période (à déduire pluies supérieures à 20 mm par décade).

CONSUMMATIONS TOTALES : 6.600 m³/ha

Besoins moyens d'arrosage : 3.600 m³/ha



ORIGINE I.T.C.P



Consommations globales à l'hectare (pluies + arrosages)

— Coefficients culturaux Kopt (consommation = Kopt x E.T.P)

FIG. 12 :

CULTURE LAITUE D'ETE

ZONE INTERIEURE ^①

Culture de plein air

Variété : Kagrano

Semis : début mai

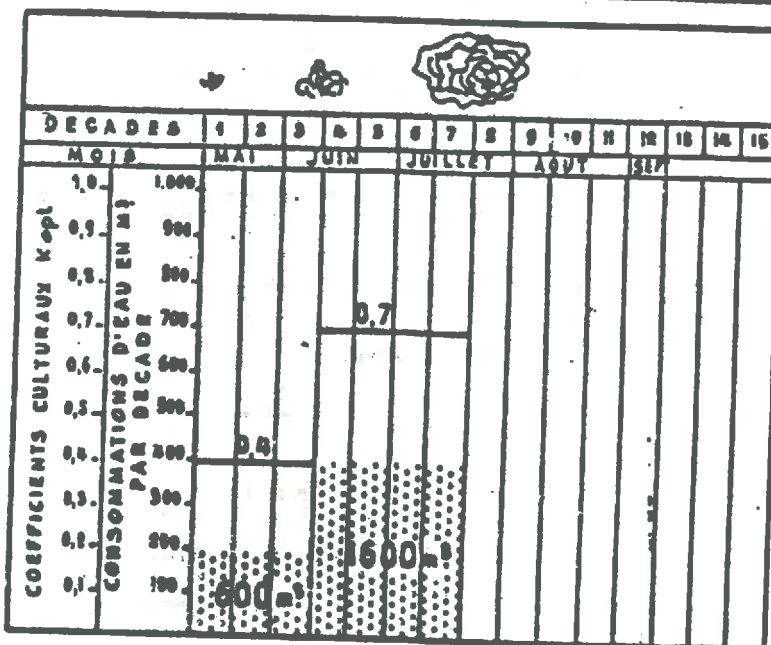
Récolte : deuxième décade de juillet

Rendement : 15-18 t/ha

Croissance végétative régulière, sans périodes caractéristiques au niveau des besoins en eau. Arrosages fréquents (périodicité inférieure ou égale à 4 jours).

CONSUMMATIONS TOTALES : 2.200 m³/ha

Besoins moyens d'arrosage : 1.500 m³/ha



ORIGINE S.C.P

CULTURE TOMATE

ZONE INTERIEURE

Culture de plein air

Variété : ROMA V. F

Plantation : fin mai

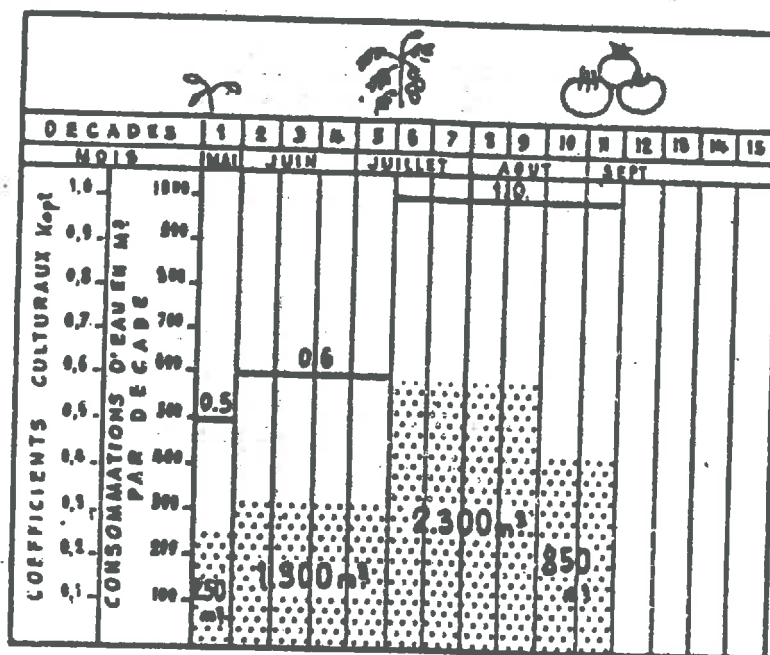
Récolte : première quinzaine de septembre

Rendement : 35-40 t/ha

Consommation d'eau importante pendant le grossissement des fruits, en baisse mais toutefois égale à l'E.T.P. pendant la phase de maturité.

CONSUMMATIONS TOTALES : 4.700 m³/ha

Besoins moyens d'arrosage : 3.800 m³/ha



ORIGINE S.C.P



Consommations globales à l'hectare (pluies + arrosages)

— Coefficients culturels Kopt (consommation = Kopt x E.T.P.)

FIG 13

CULTURE PECHER

ZONE : LITTORALE
(Fréjus)

14

Culture de plein air

Variété : Red Haven

Porte-greffe : franc

Plantation : 5 x 5 m, sol nu

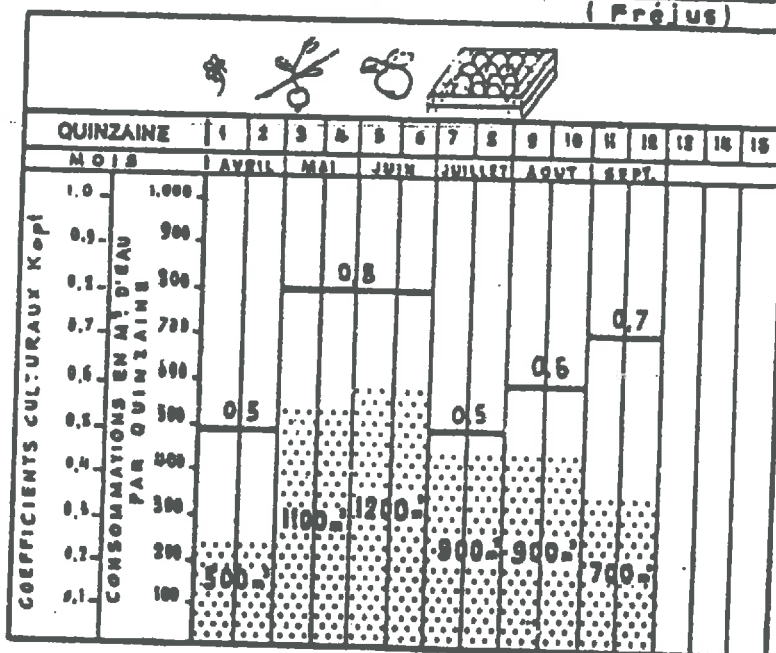
Récolte : deuxième quinzaine de juillet

Consommation assez régulière de mai à août.

Eviter tout risque de déficit hydrique pendant la période de grossissement des fruits ; réduire le niveau d'alimentation en eau une quinzaine de jours avant la récolte.

CONSUMMATIONS TOTALES : 5.500 m³/ha

Besoins moyens d'arrosage : 2.800 m³/ha



ORIGINE S.C.P.

CULTURE POMMIER

ZONE INTERIEURE
(Saint Rémy)

Culture en sol nu

Variété : Golden Delicious

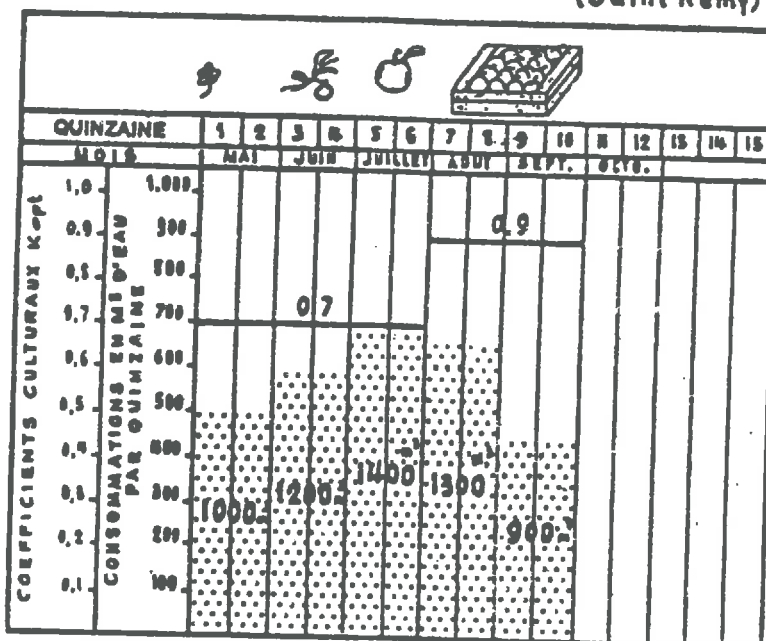
Porte-greffe : Mallingerton 104

Plantation : 4 m x 2,5 m.

Consommation en eau croissant régulièrement de début mai à fin juillet, puis diminuant progressivement de début août à fin septembre.

CONSUMMATIONS TOTALES : 5.800 m³/ha

Besoins moyens d'arrosage : 3.800 m³/ha



ORIGINE S.C.P.



Consommations globales à l'hectare (pluies + arrosages)

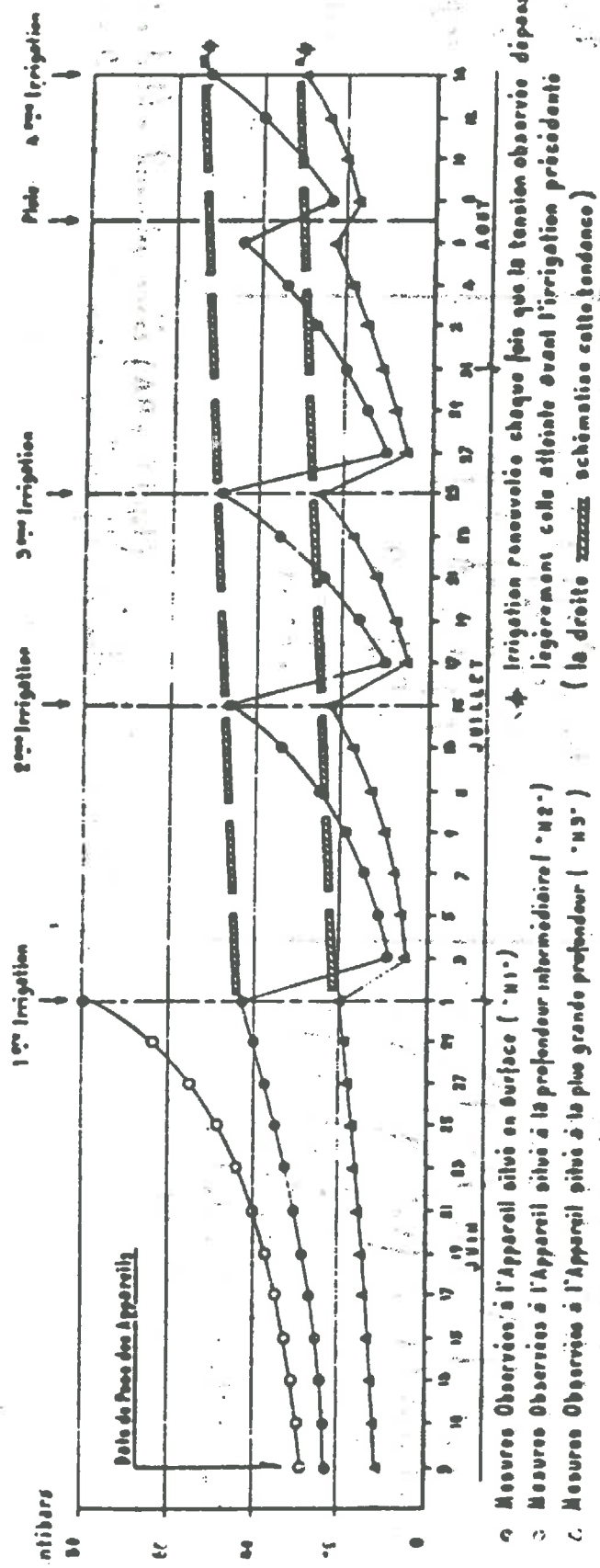


Coefficients culturaux Kopt (consommation = Kopt x E.T.P)

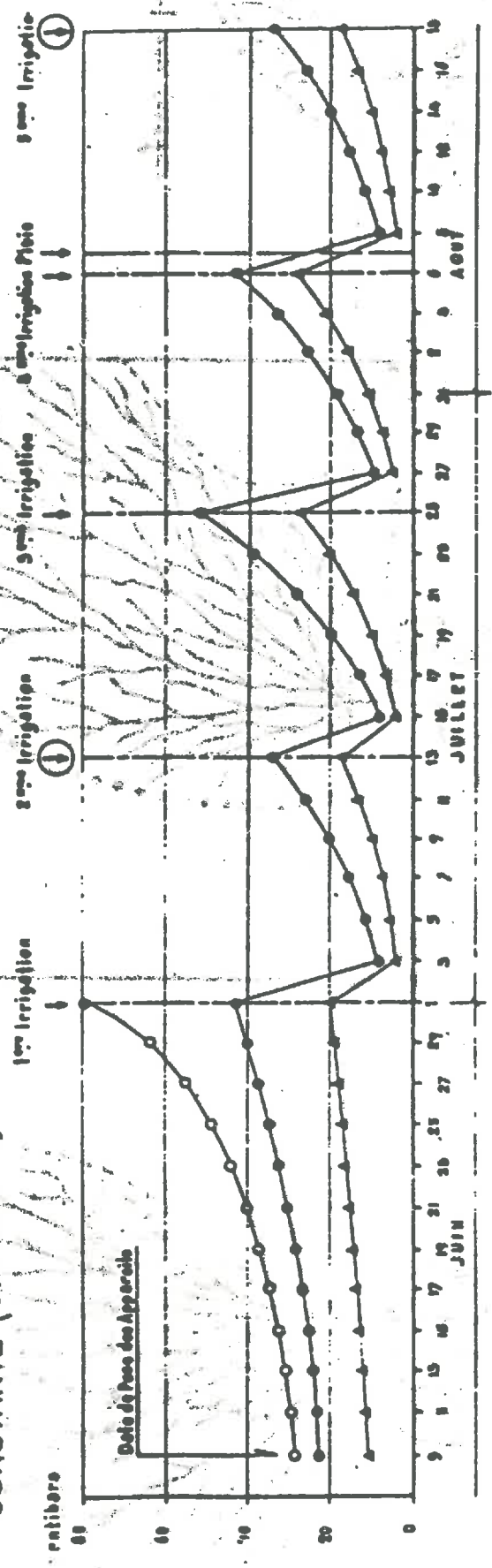
FIG. 14

Fig 14'

			PECHER PRECOCE				PECHER TARDIF				POMMIER POIRIER			
			LOC				LOC				LOC			
MOIS	PERIODE	ETP PRAIRIE	K coef. cultur.	Restitution base asperson sol m	RATIONNEMENT	Doses journalieres localites	K coef. cultur.	Restitution base Asperson sol m	RATIONNEMENT	Doses journalieres localites	K coef. cultur.	Restitution base asperson sol m	RATIONNEMENT	Doses journalieres localites
AVRIL	01 au 07	3,0	0,6	1,8	80 %	1,4	0,6	1,8	80 %	1,4	0,6	1,8	80 %	1,4
	08 au 14	3,3		2,0		1,6		2,0		1,6		2,0		1,6
	15 au 21	3,6		2,2		1,8		2,2		1,8		2,2		1,8
	22 au 28	3,9		2,3		1,8		2,3		1,8		2,3		1,8
MAI	29 au 05	4,1	0,6	2,5	80 %	2	0,6	2,5	80 %	2	0,6	2,5	80 %	2
	06 au 12	4,3		2,6		2,1		2,6		2,1		2,6		2,1
	13 au 19	4,6		2,8		2,2		2,8		2,2		2,8		2,2
	20 au 26	4,6										2,8		2,2
JUN	27 au 02	4,7	0,6		80 %		0,6		80 %		0,6		80 %	
	03 au 09	4,8												
	10 au 16	5,4												
	17 au 23	5,6												
JUILLET	24 au 30	5,8	0,6	3,4	80 %	2,7	0,6		80 %		0,6		80 %	
	01 au 07	5,9		3,5		2,8								
	08 au 14	5,9		3,5		2,8								
	15 au 21	5,9		3,5		2,8								
AOUT	22 au 28	5,9	0,6	3,5	80 %	2,8	0,6		80 %		0,6		80 %	
	29 au 04	5,6		3,4		2,7								
	05 au 11	5,3		3,2		2,6								
	12 au 18	4,8		2,9		2,3								
SEPTEMBRE	19 au 25	4,5	0,6	2,7	80 %	2,2	0,6		80 %		0,6	2,7	80 %	2,2
	26 au 01	4,3		2,6		2,1								
	02 au 08	3,6		2,2		1,8								
	09 au 15	3,2		1,9		1,5								
	16 au 22	2,9		1,7		1,4								
	23 au 29	2,6		1,6		1,3								1,3



UTILISATION DE LA TENSIONMETRIE DANS LE CAS D'IRRIGATIONS PLANIFIEES A FREQUENCE CONSTANTE (ORIGINE SCP)



① Chaque fois que la flèche indiquant l'irrigation est entourée d'un cercle, cela signifie que la dose pré-déterminée d'irrigation a été réduite pour tenir compte du fait que la Tension n'avait pas atteint la Valeur initiale observée avant la 1^{re} Irrigation.

O, O, A Voir Légende du Graphique M13

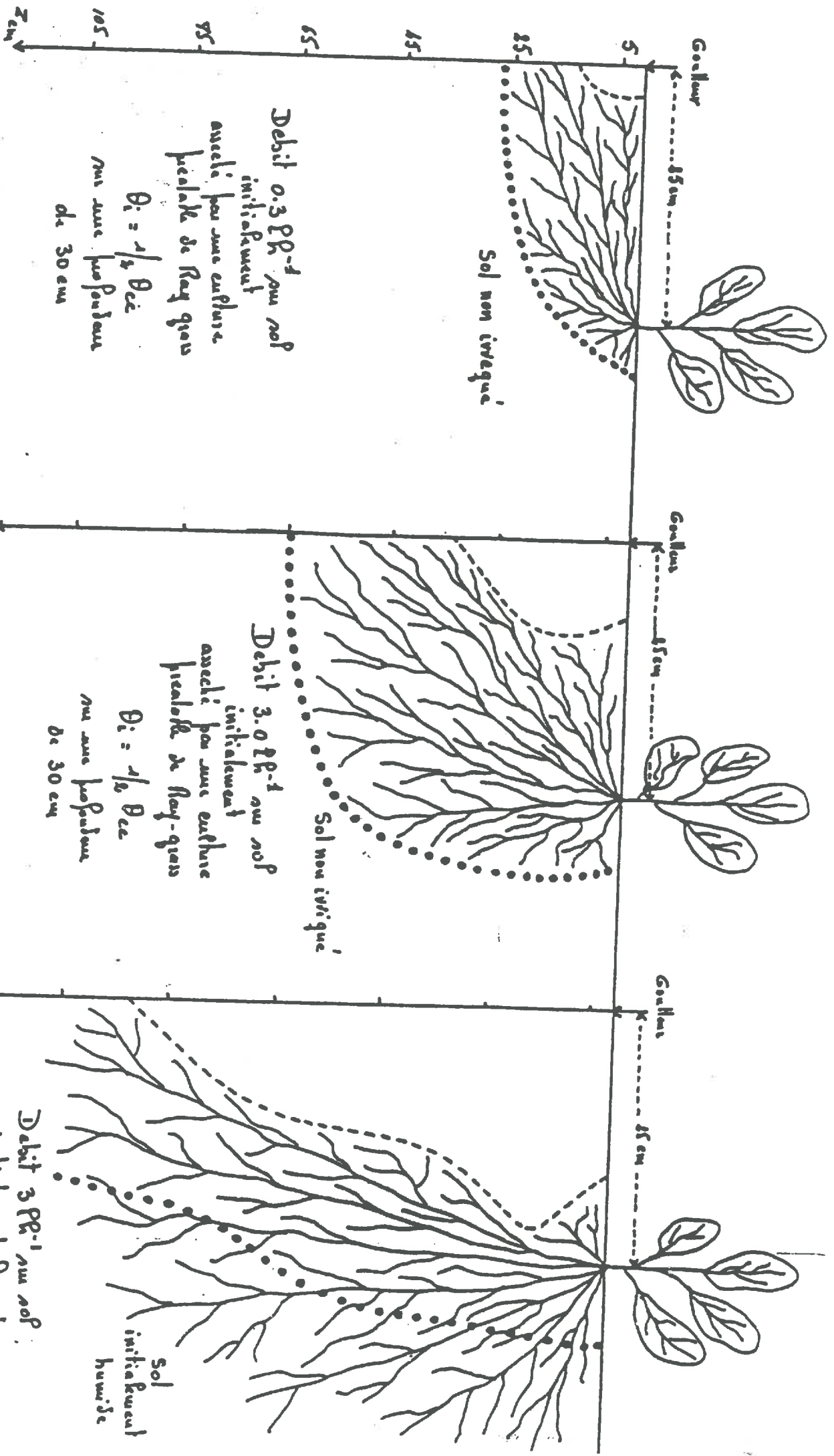


Fig 3 : schématisation de l'enracinement et l'embayure pour irrigation localisée au point de l'irrigation.

-----> limite des bulles humides créés ($\Delta\theta = 1$ point)

-----> " " de la zone saturée pour la saturation 90-100 %)

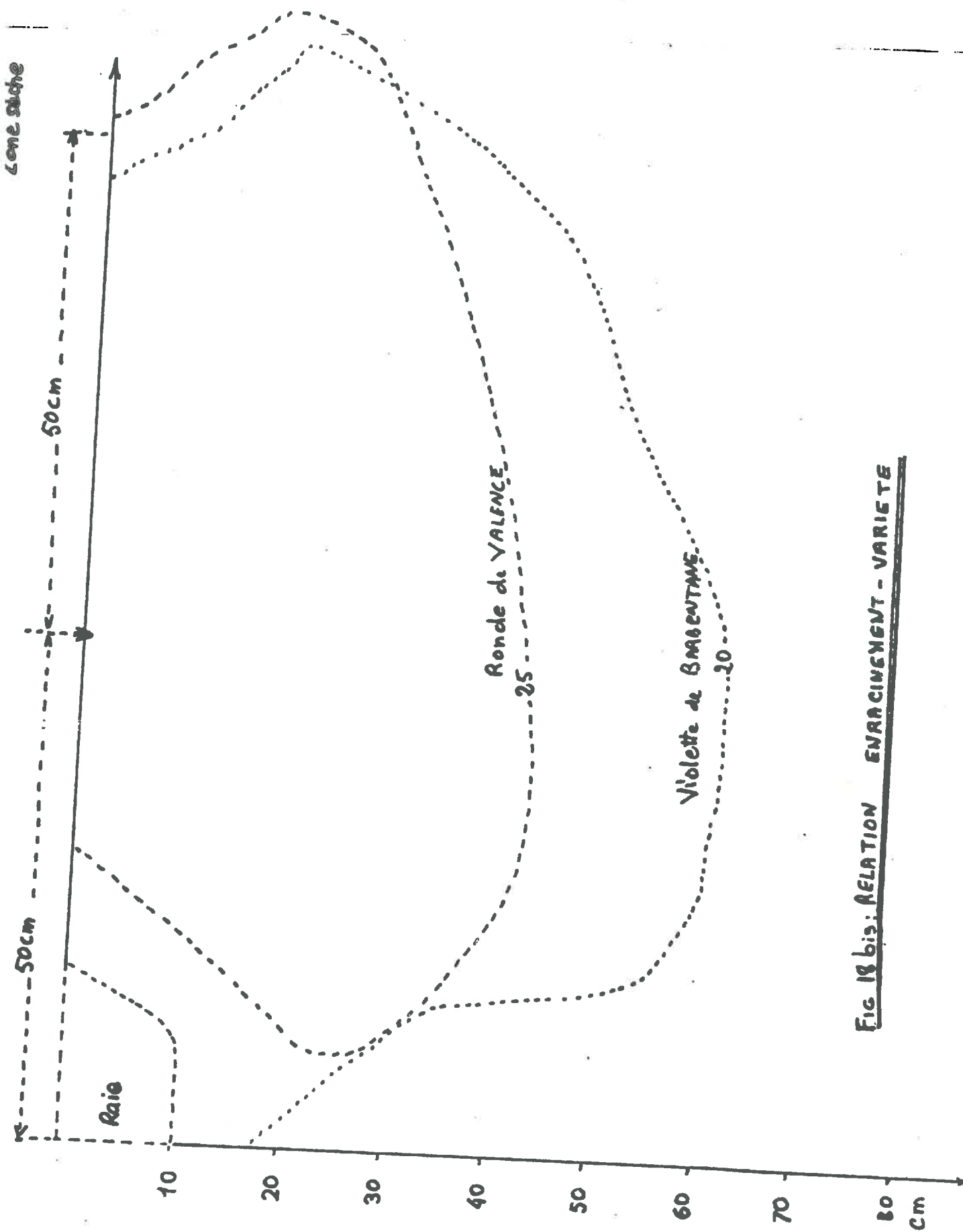
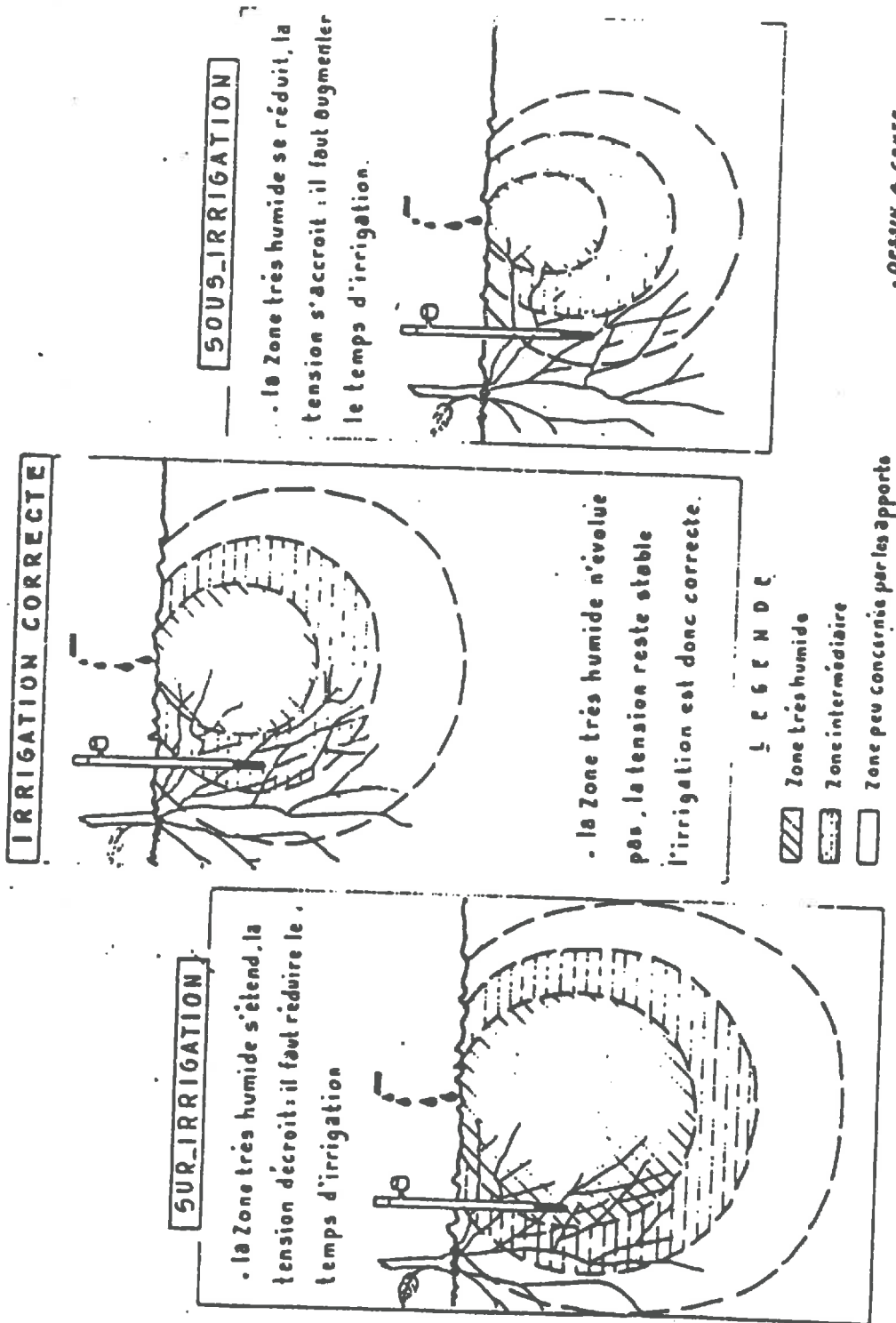
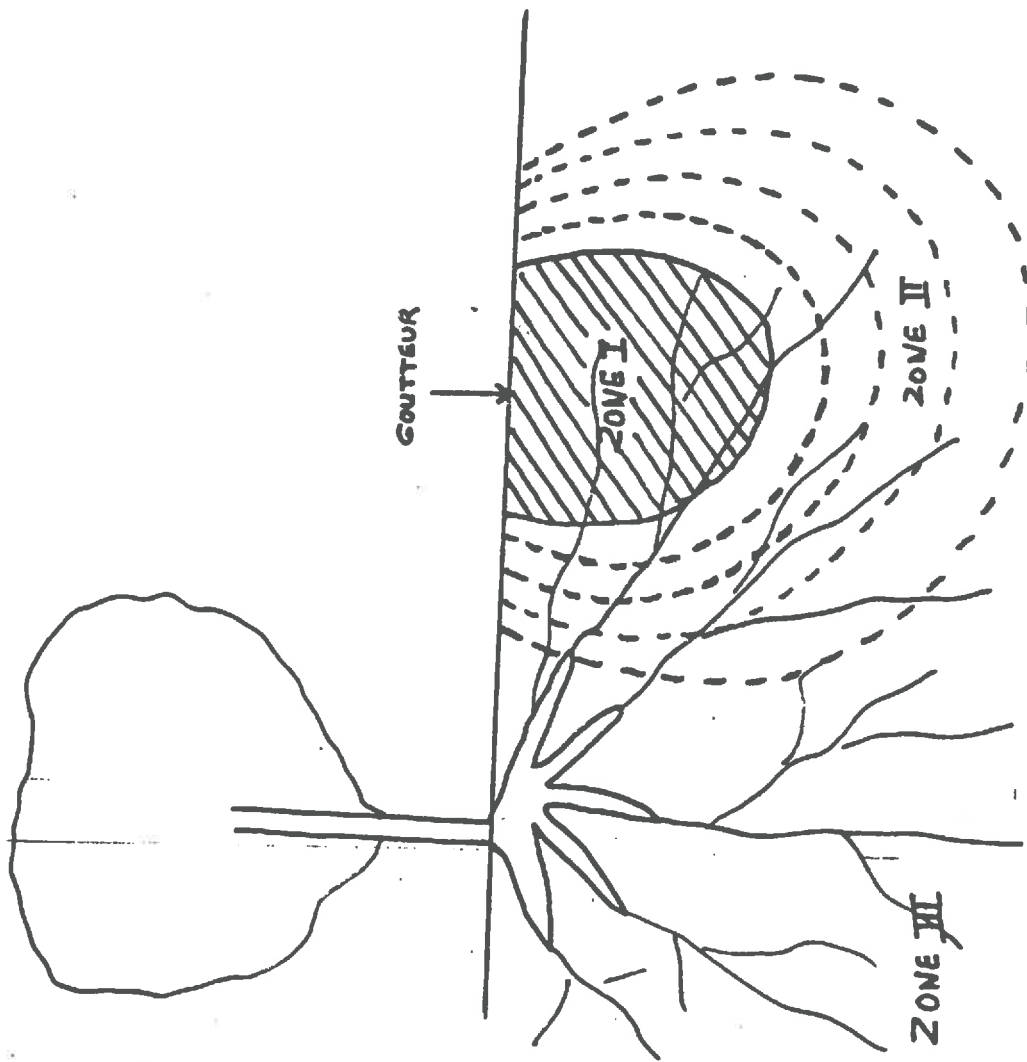


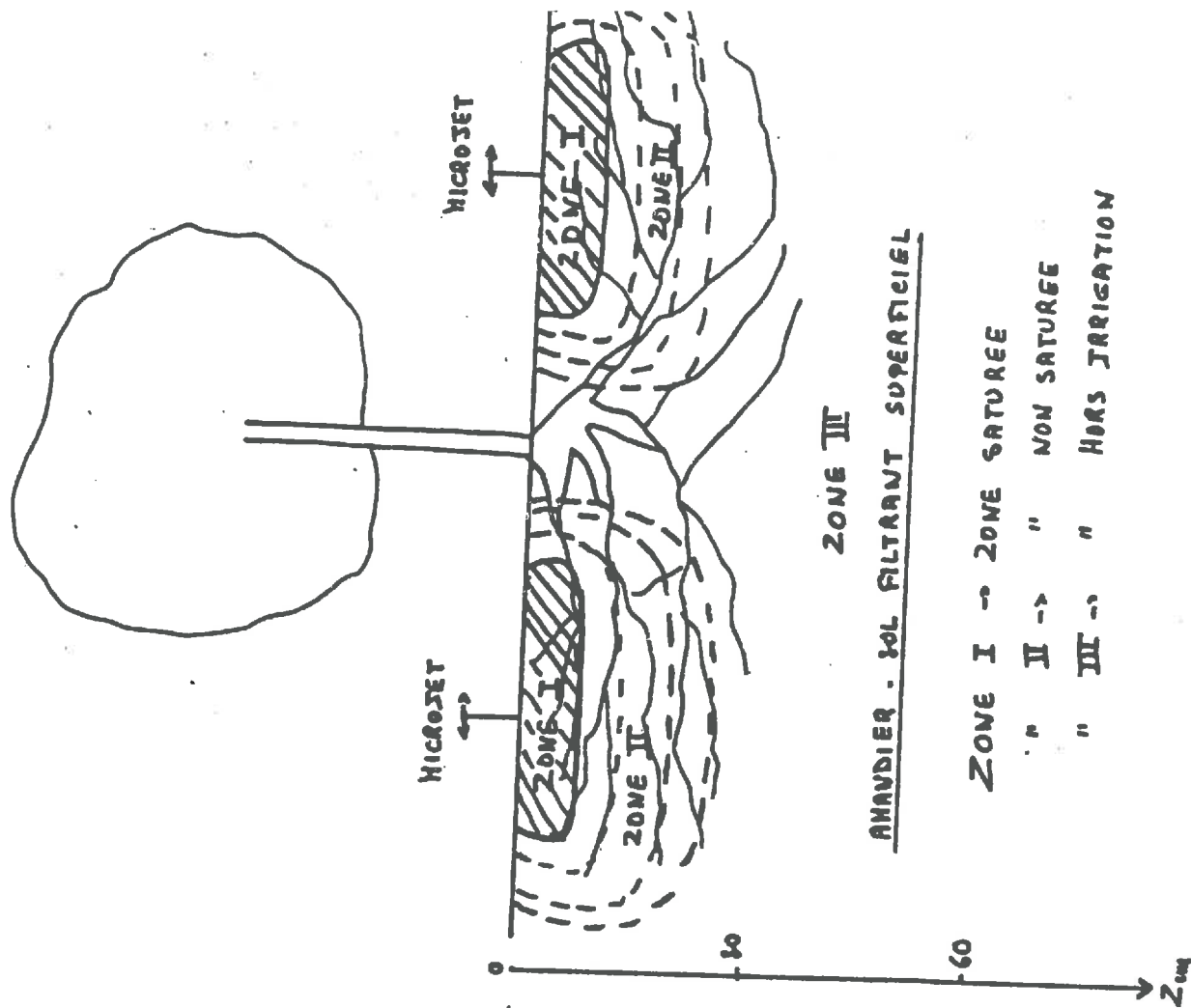
FIG 18 bis: RELATION ENRACINEMENT - VARIETE

Fig. 80: SCHEMAS REPRESENTANTS LES PRINCIPES DE LA METHODE DE PILOTAGE
UTILISANT LES TENSIONMETRES (origine S.C.P)





PONNIER - SOL LIMON ARGILEUX PROFOND

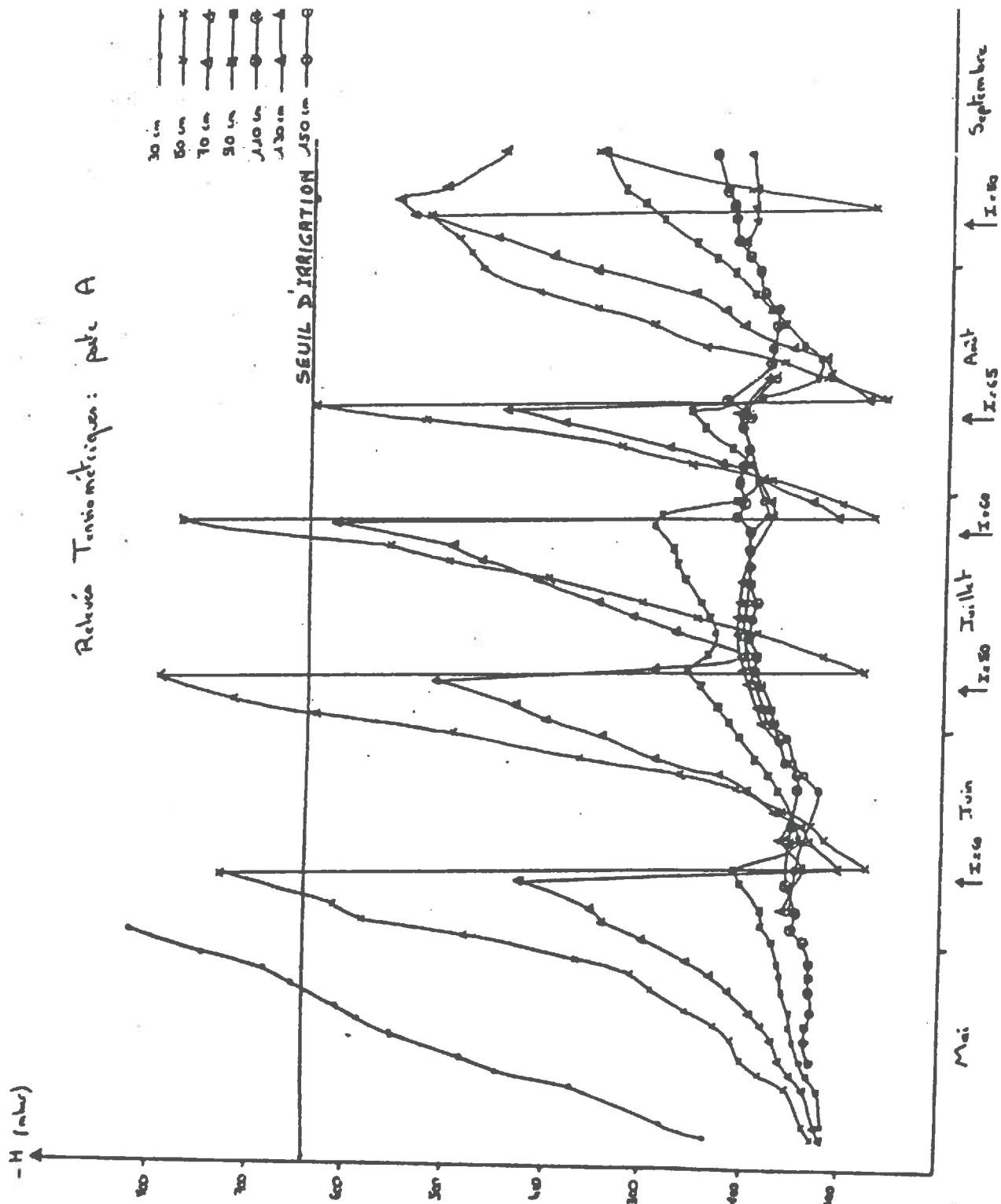


AMANDIER - SOL FILTRANT SUPERFICIEL

ZONE I	→	ZONE SATURÉE
"	→	" NON SATURÉE
"	→	" HORS IRRIGATION

FIG 19: INFLUENCE DU MODE D'IRRIGATION SUR LA MORPHOLOGIE DU SYSTEME RACINAIRE DES ARBRES

FIG. 21:
 Pilotage Tensiométrique
 VERGER POINNIERS
 NARSILLARGUES
 (ORIGINE H. LEROUX)



-soit sur le suivi d'un indicateur physiologique, les paramètres testés étant mis en corrélation avec des états de stress hydriques connus.

II.2.1 MESURE DES TEMPERATURES DE SURFACE: Ces méthodes ne seront citées que pour mémoire. Elles concernent:

II.2.1.1 LA TELEDETECTION: On mesure au niveau régional la différence de température entre le couvert végétal et l'air ambiant, et on peut dès lors calculer ET journalier à partir du rayonnement net, R_n étant intégré sur la journée, et de $(T_s - T_a)$ au moment du maximum de température.

II.2.1.2 LA RADIOTHERMOMETRIE INFRA-ROUGE: La mesure des paramètres permettant d'obtenir ET sont effectuées au niveau local ou parcellaire, les différences de température étant mesurées entre le couvert végétal donné et celui d'un témoin irrigué.

II.2.2 SUIVI DES INDICATEURS PHYSIOLOGIQUES:

Les méthodes utilisées reposent sur la mesure des flux liquides existants dans la plante. Les flux, à partir des réserves propres de la plante, sont mesurés indirectement par le suivi d'un indicateur physiologique sensible au stress hydrique (variation des dimensions des organes de la plante), le flux de sève étant mesuré directement par fluxmétrie. Le sens et les intensités relatives des différents flux sont reconnus traduire, à la fois instantanément et globalement, le comportement hydrique du végétal, ses possibilités d'extraction de l'eau du sol et sa consommation en eau en fonction des équilibres successifs entre une demande climatique donnée et l'évolution des réserves en eau disponibles du sol. Leur mesure simultanée devrait permettre de déterminer le besoin d'irrigation, sa localisation dans le temps et son volume.

Concernant ces méthodes, nous présenterons à la fois des résultats de recherche et leurs applications au champ.

II.2.2.1 MICROMETRIE DES ORGANES DE LA PLANTE:

A: THEORIE: Cette approche repose sur les résultats expérimentaux suivants:

- Dès qu'un gradient de potentiel se développe entre un organe d'une plante et les voies de circulation de l'eau et ceci quelle que soit la position de l'organe par rapport aux sites de transpiration, celui-ci (racine, tige, feuille ou fruit) est susceptible de fournir, de façon réversible, de l'eau au courant de transpiration,

- Les gains ou les pertes en eau peuvent être mesurées indirectement par analyse des déformations des organes de la plante (fig.22 et 23), ces déformations, et

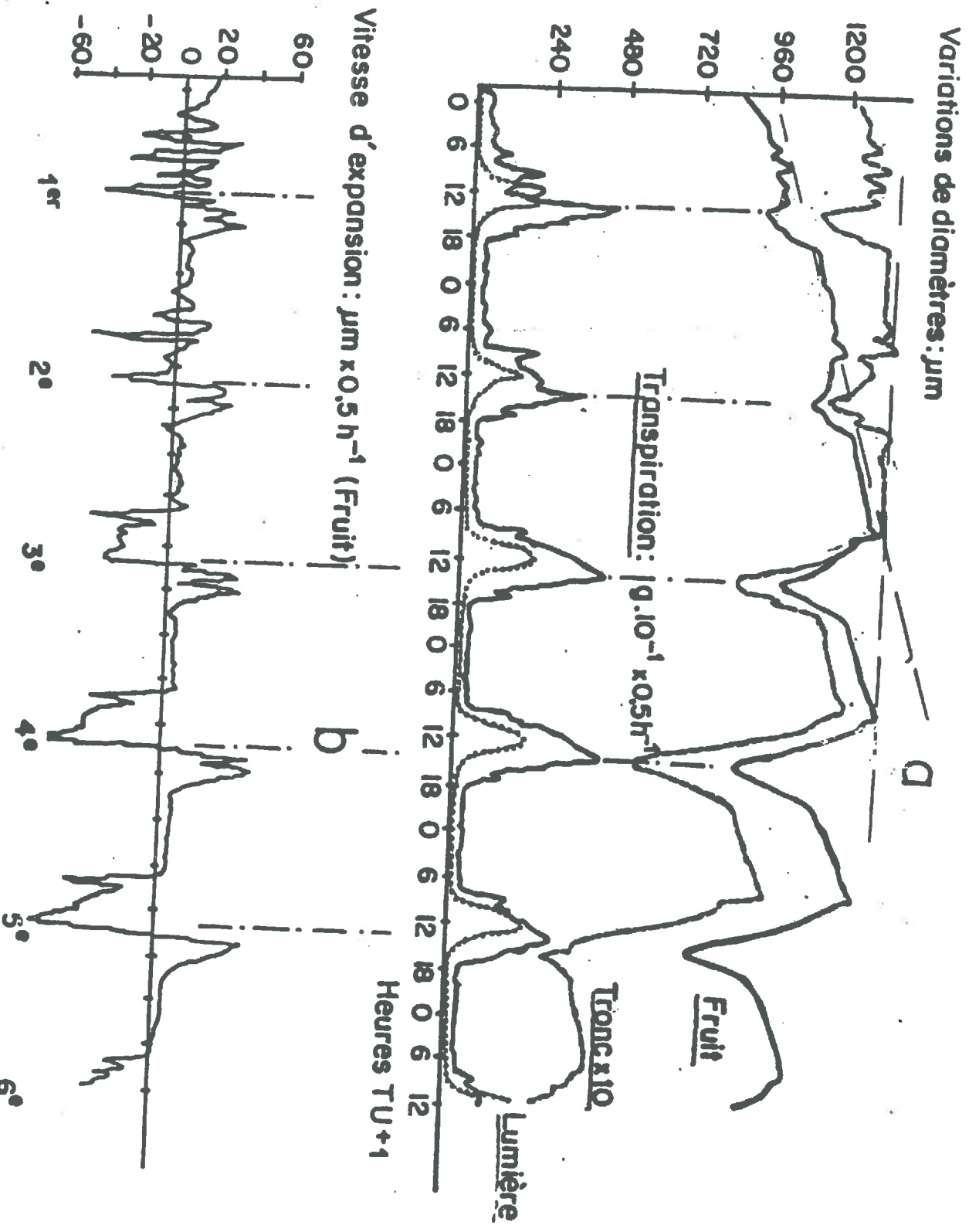


FIG. 24: VARIATIONS DES ϕ DES ORGANES DE L'ARBRE
 (origine INRA-Agronomie)

VARIATIONS de DIAMETRES (mu * 10)

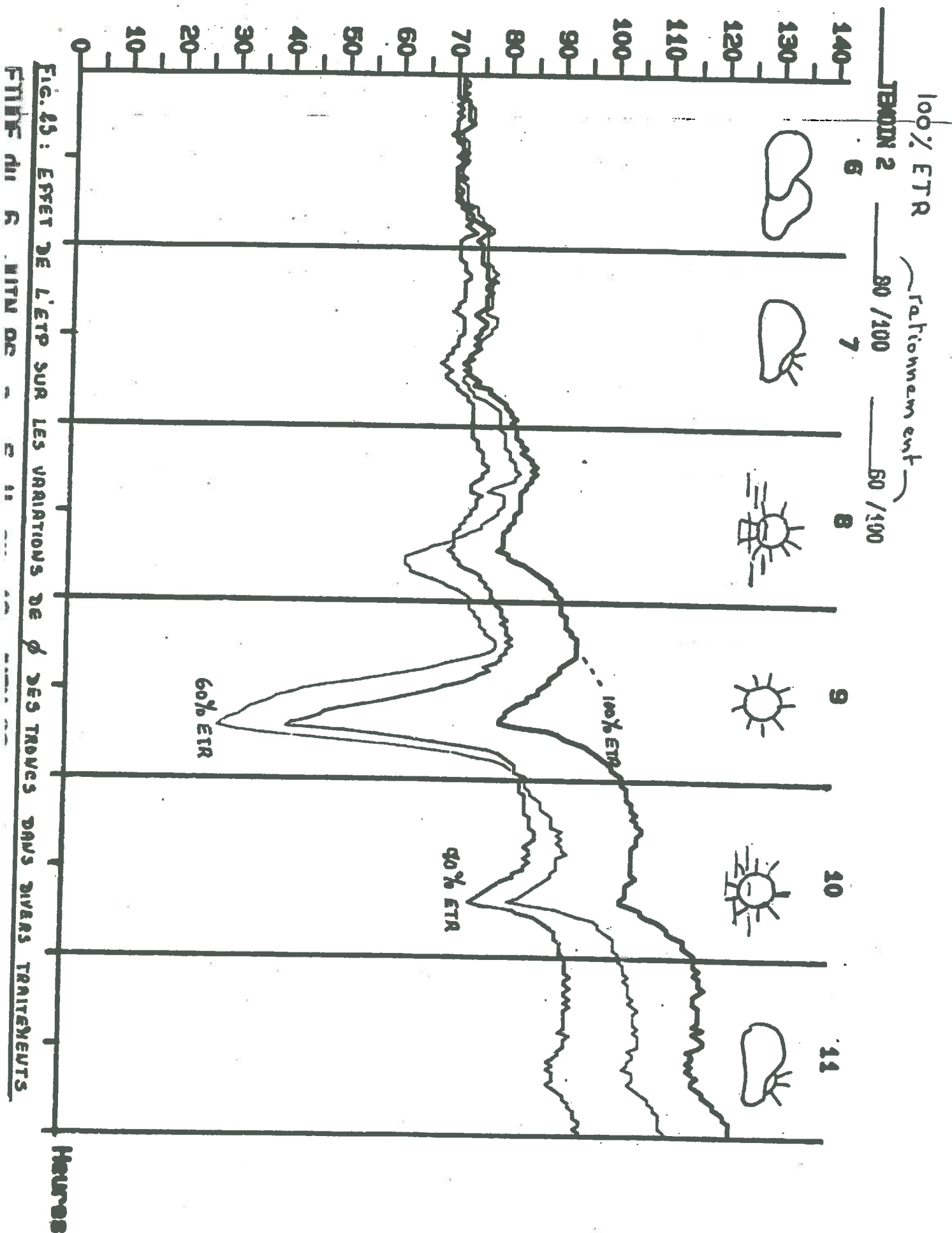


FIG. 45: EFFET DE L'ETP SUR LES VARIATIONS DE ϕ DES TROUS DANS DIFFERENTS TRAITEMENTS

notamment les variations de volume et de diamètre, étant supposées, dans leur ensemble et à un pas de temps court, en relation avec leurs variations de teneur en eau. Cette hypothèse est confortée par le fait que les cinétique de contraction et d'expansion sont du même type que celle de l'évolution, à la même échelle de temps, du potentiel hydrique de la plante (fig.24),

- La plante possède plusieurs réservoirs internes intervenant en cascade dans le courant de transpiration, le réservoir récolte apparaissant intervenir en dernier lieu (fig.25),

- l'amplitude des phénomènes est fonction des intensités relatives de l'ETP et de l'absorption racinaire et de l'état hydrique résultant de la plante (fig.25),

- les déformations des organes sont mesurables, avec une grande sensibilité, en continu et in situ par micrométrie.

Il ressort de l'ensemble des résultats aujourd'hui acquis que, si la majeure partie de l'eau transpirée par la plante provient du sol, les différentes réserves internes de la plante représentent un volant d'eau mobilisable, instantanément important au cours de la journée, qui ne peut cependant pas compenser à long terme, en cas de sécheresse, la diminution de l'absorption racinaire provoquée par une diminution des réserves disponibles du sol.

Les variations des réserves en eau propres au végétal constituent donc un indicateur physiologique :

+qui, d'un point de vue qualitatif, est essentiel, le niveau de ces réserves déterminant la réponse de la plante aux déficits hydriques,

+qui permet de déterminer à quel moment la plante subit une contrainte limite pouvant affecter la production et quelle est son intensité, cette valeur seuil déterminée, par voie expérimentale, constituant un outil objectif de déclenchement de l'apport d'eau.

B: MISE EN OEUVRE DE LA MESURE:

1) LE CAPTEUR:

Le suivi nycthéral des variations de diamètre des différents organes de la plante est effectué à l'aide de capteur inductif de déplacement linéaire (Enertec-Schlumberger) dont la précision est de l'ordre du micron. Sur les ligneux sont installés des dendromètres et sur les fruits des carpomètres. Compte tenu de la haute résolution de ces capteurs, ils sont installés dans des portes capteurs en Invar, alliage dont le coefficient de dilatation thermique est très faible (fig.26). Etalonné dans les conditions de son utilisation in situ ce capteur offre une plage de mesure de ± 3.5 mm pour une classe de linéarité de .5% (fig.27).

2) ACQUISITION DES DONNEES:

L'acquisition des données, leur stockage et les premiers traitements sont effectués par un ensemble micro-ordinateur compatible PC - centrale de mesure, l'ensemble étant monitoré par un logiciel de commande spécifique du système plante-sol-type d'irrigation.

3) EXPRESSION DES RESULTATS:

Les variations de diamètre peuvent être exprimées:

+soit en valeurs brutes, valeurs directement fournies par le capteur. Elles représentent les écarts simples par rapport au diamètre initial sur une période de temps donné. Elles permettent de comparer et d'analyser les variations globales des phénomènes étudiés (contraction, expansion, et croissance sur le long terme) (fig.28),

+soit en valeurs relatives par rapport à l'épaisseur d'écorce, de nombreuses études ayant montré que plus de 90% des déformations affectaient les tissus extérieurs au xylème (fig.29). Ce type d'expression, qui permet de comparer les intensités relatives des phénomènes étudiés quel que soit le traitement considéré (irrigué-non irrigué) ou l'organe testé (racine-tronc-rameau), nécessite que soient connues les relations liant l'épaisseur d'écorce au diamètre total des organes. Ces relations sont déterminées par voie statistique (fig.30).

4) RESULTATS CARACTERISTIQUES:

Pour une demande climatique donnée (ETP et répartition de la demande dans le temps) les variations de diamètre, en valeurs globales ou relatives, sont fonction:

- +du type de l'organe testé (racine, bois, fruit)(fig 31),
- + de ses dimensions (fig.32),
- + de sa position et de son orientation dans la plante,
- + du traitement considéré (disponibilité en eau du sol et enracinement) (fig.33).

Toutes ces variables étant par ailleurs égales les variations de diamètre seront fonction, en valeur globale, de la demande climatique ou ETP, les cinétique d'évolution de ces variations étant fonction des accroissements successifs d'ETP à une échelle de temps beaucoup plus courte, l'échelle horaire étant l'échelle généralement prise comme référence (fig.34).

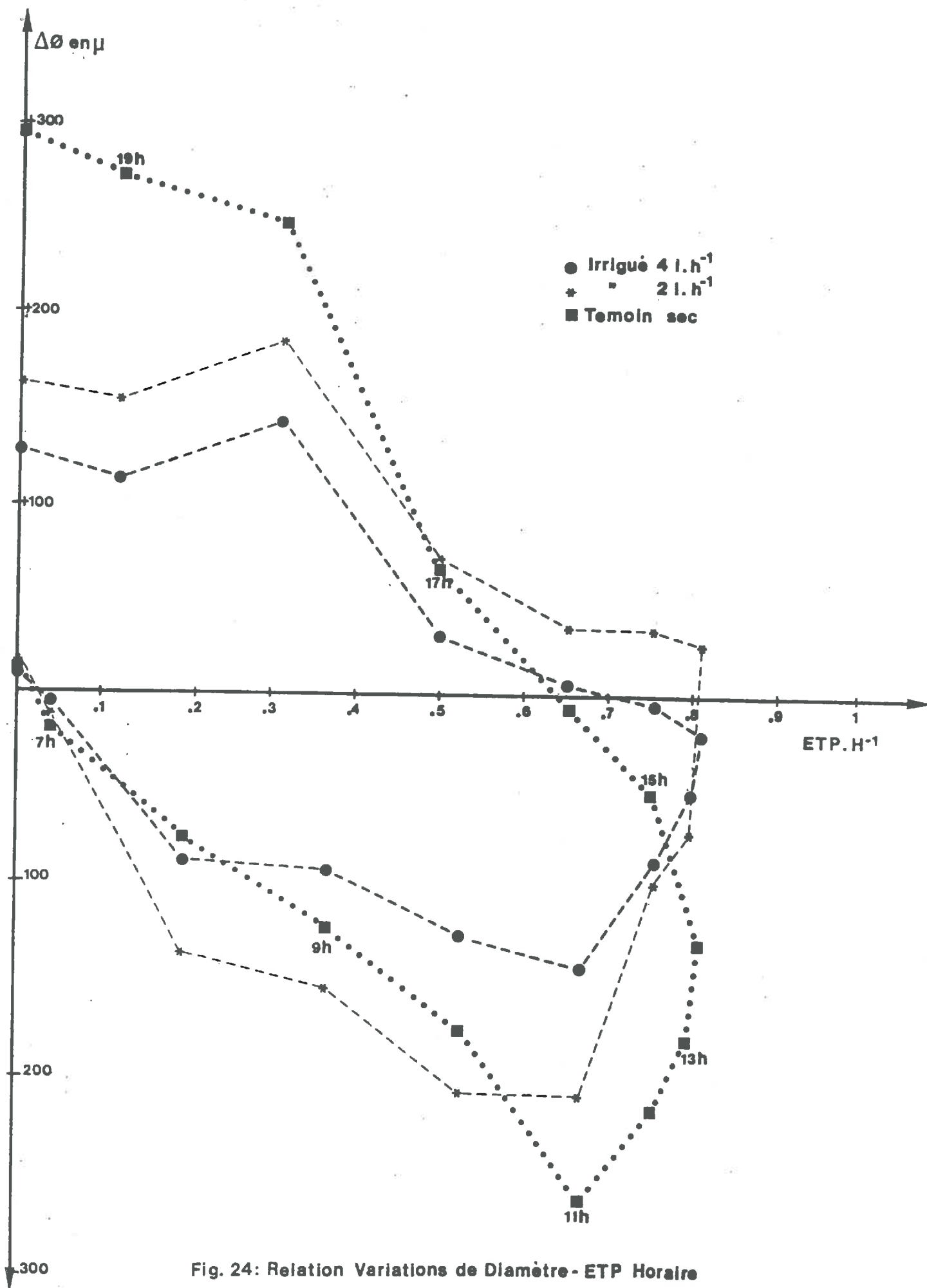
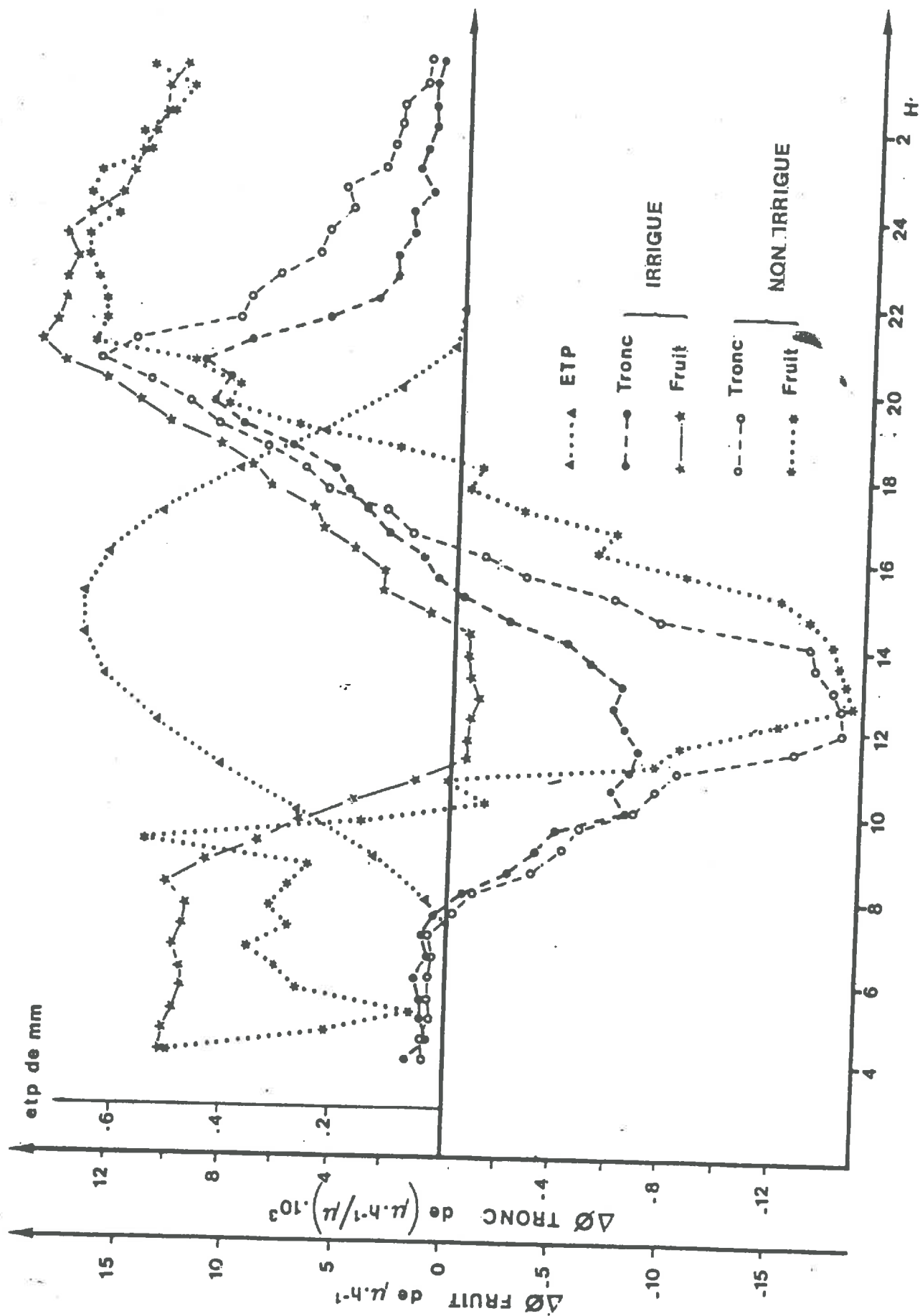


Fig. 24: Relation Variations de Diamètre - ETP Horaire

FIG. 25. Variations des ϕ de différents organes



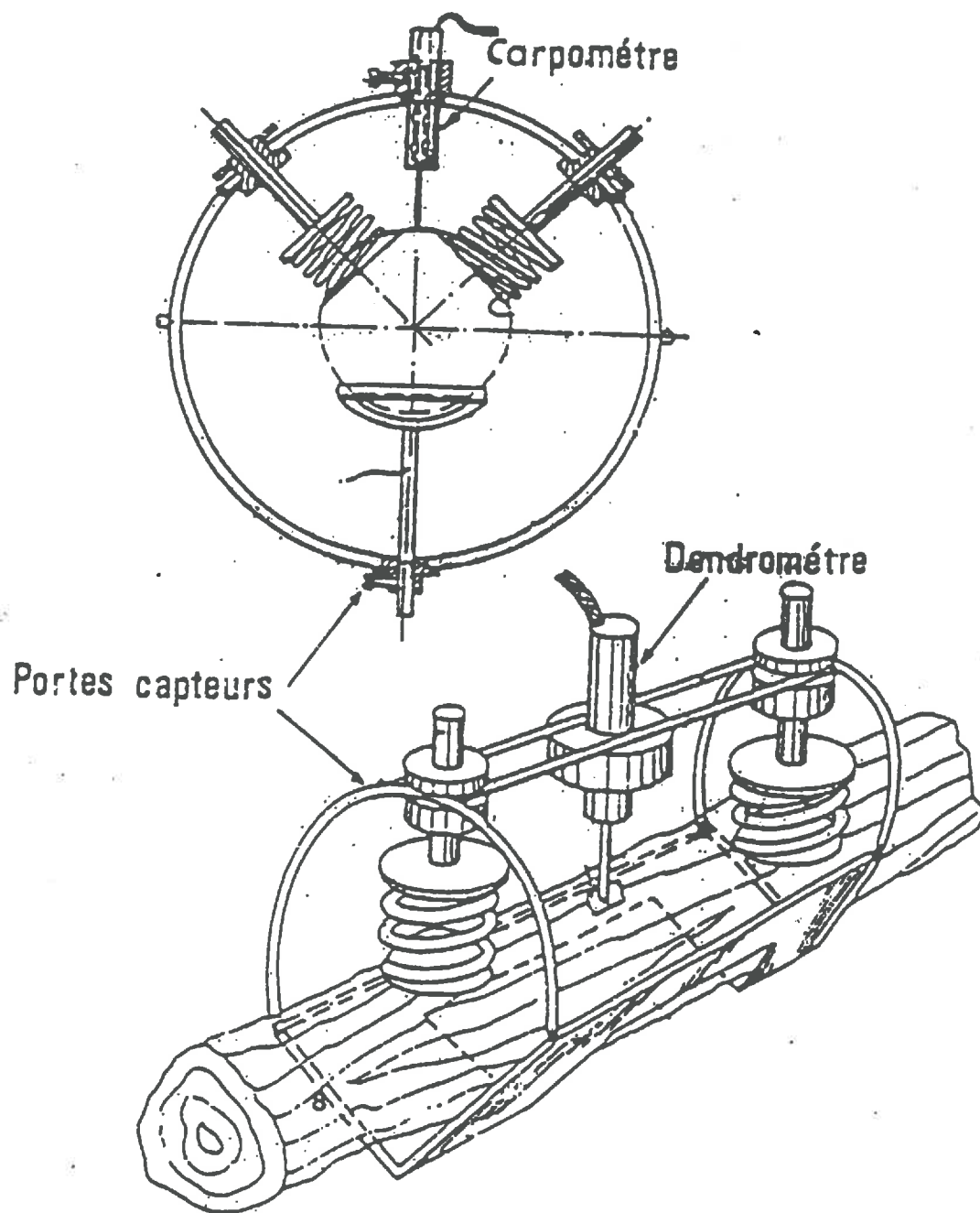


Fig. 26 - Dispositif micrométrique

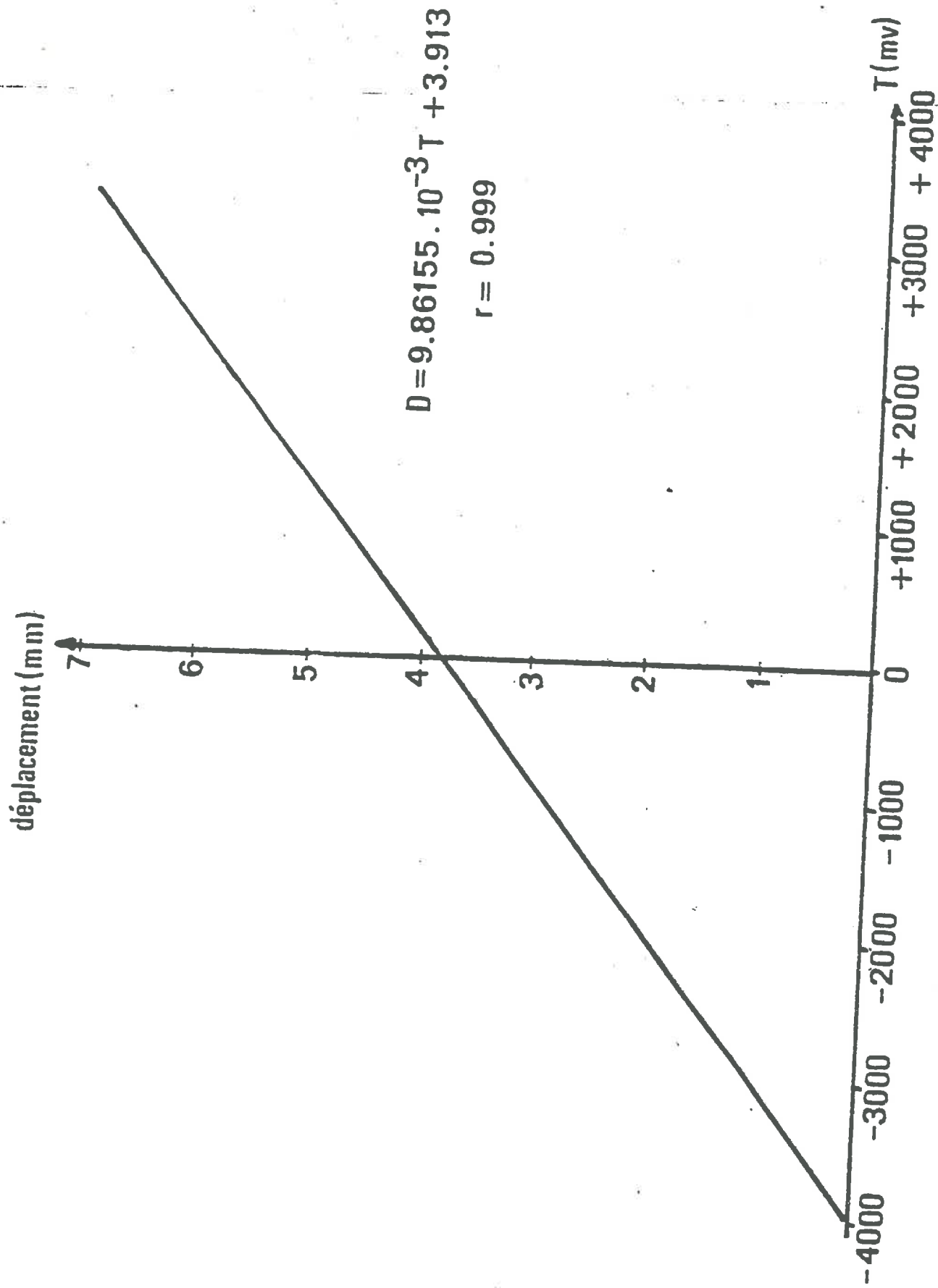


Fig. 21 - Courbe d'étalonnage d'un capteur (Alimentation 12V)

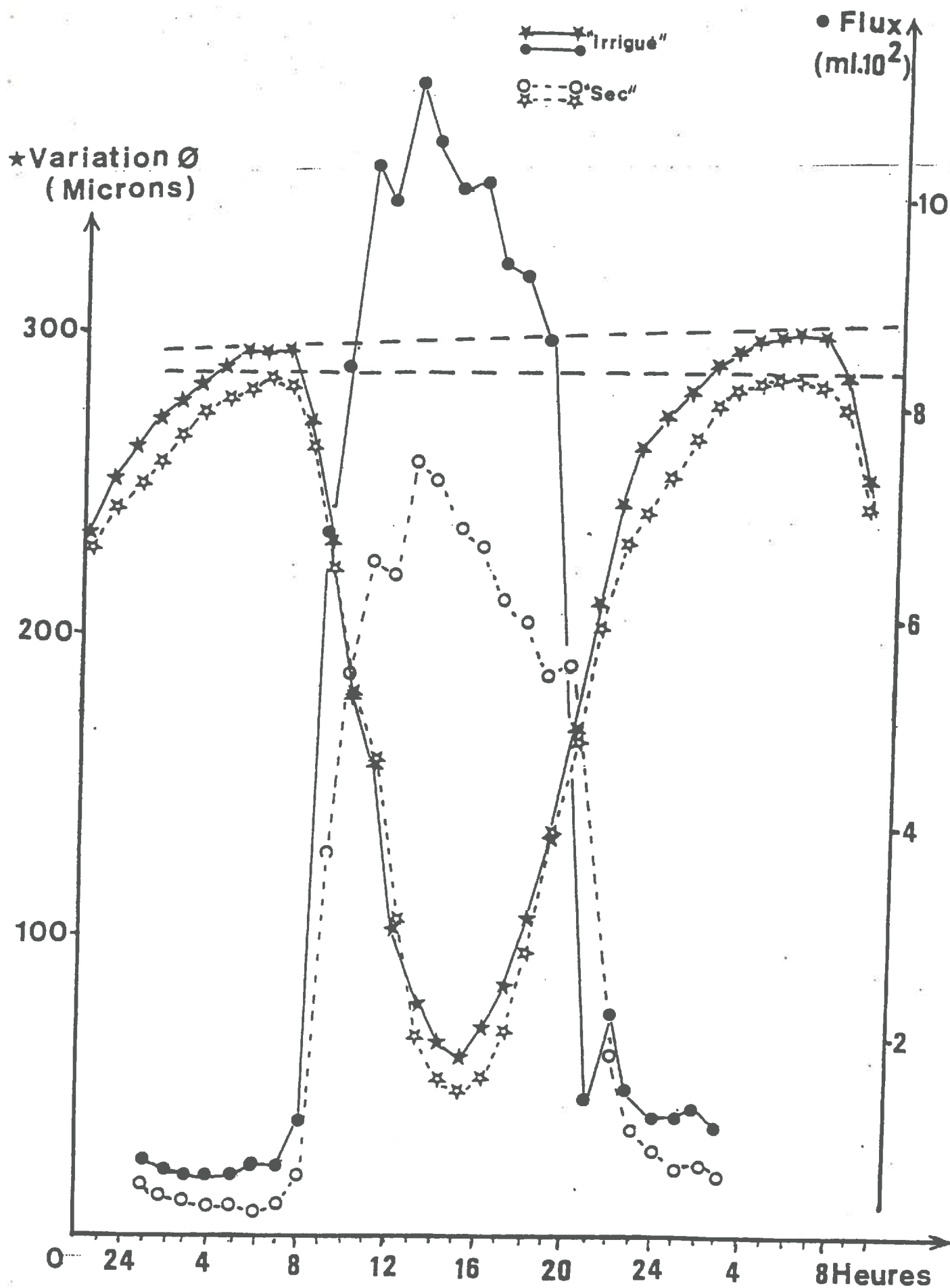


FIG. 28 — VARIATION DE Ø DES CHARPENTIERES AVANT IRRIGATION

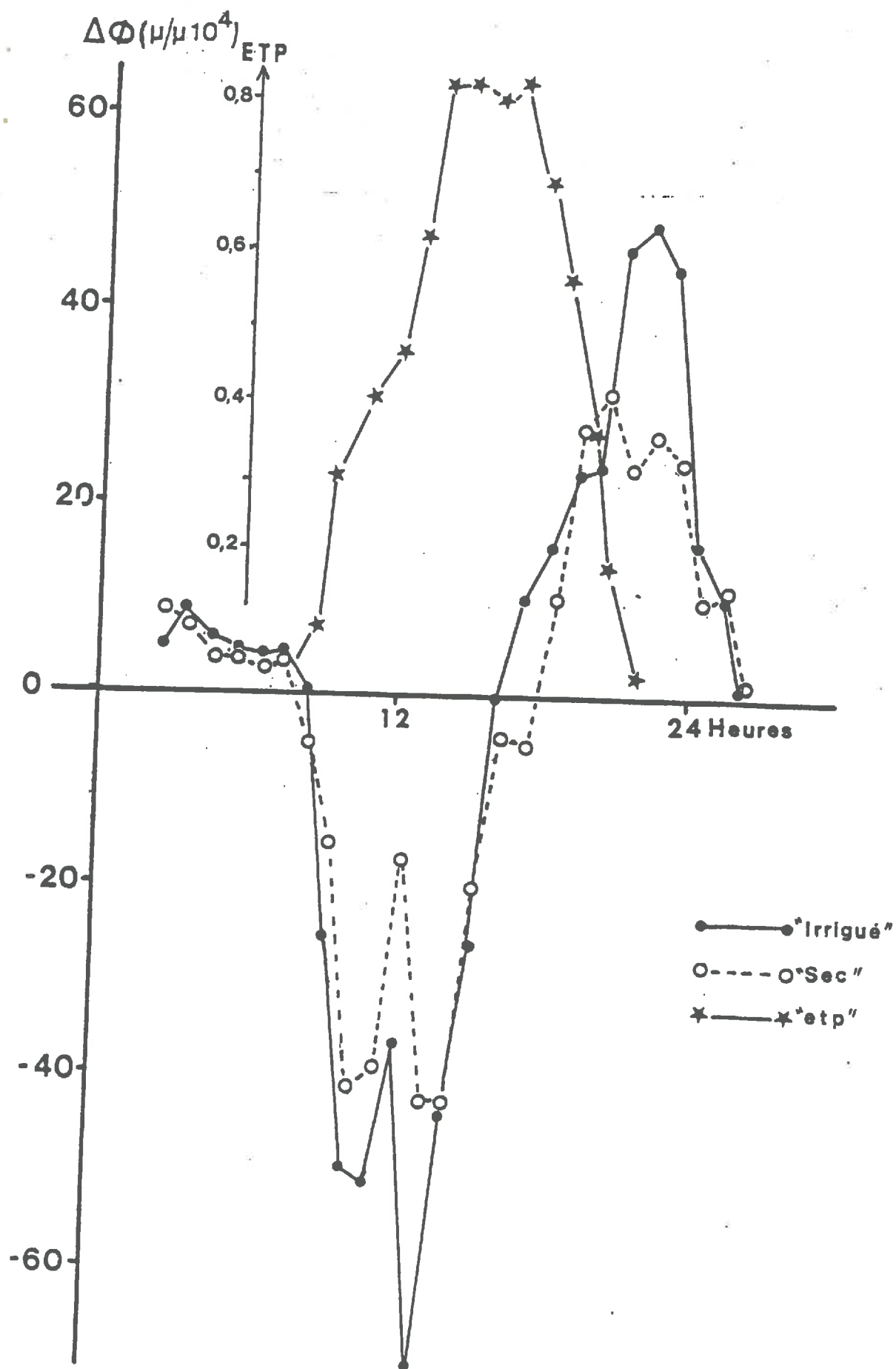


FIG. 29 —EVOLUTION DES VITESSES DE VARIATION DE Φ RELATIVES A L'EPAISSEUR D'ECORCE DE CHARPENTIERES AVANT IRRIGATION

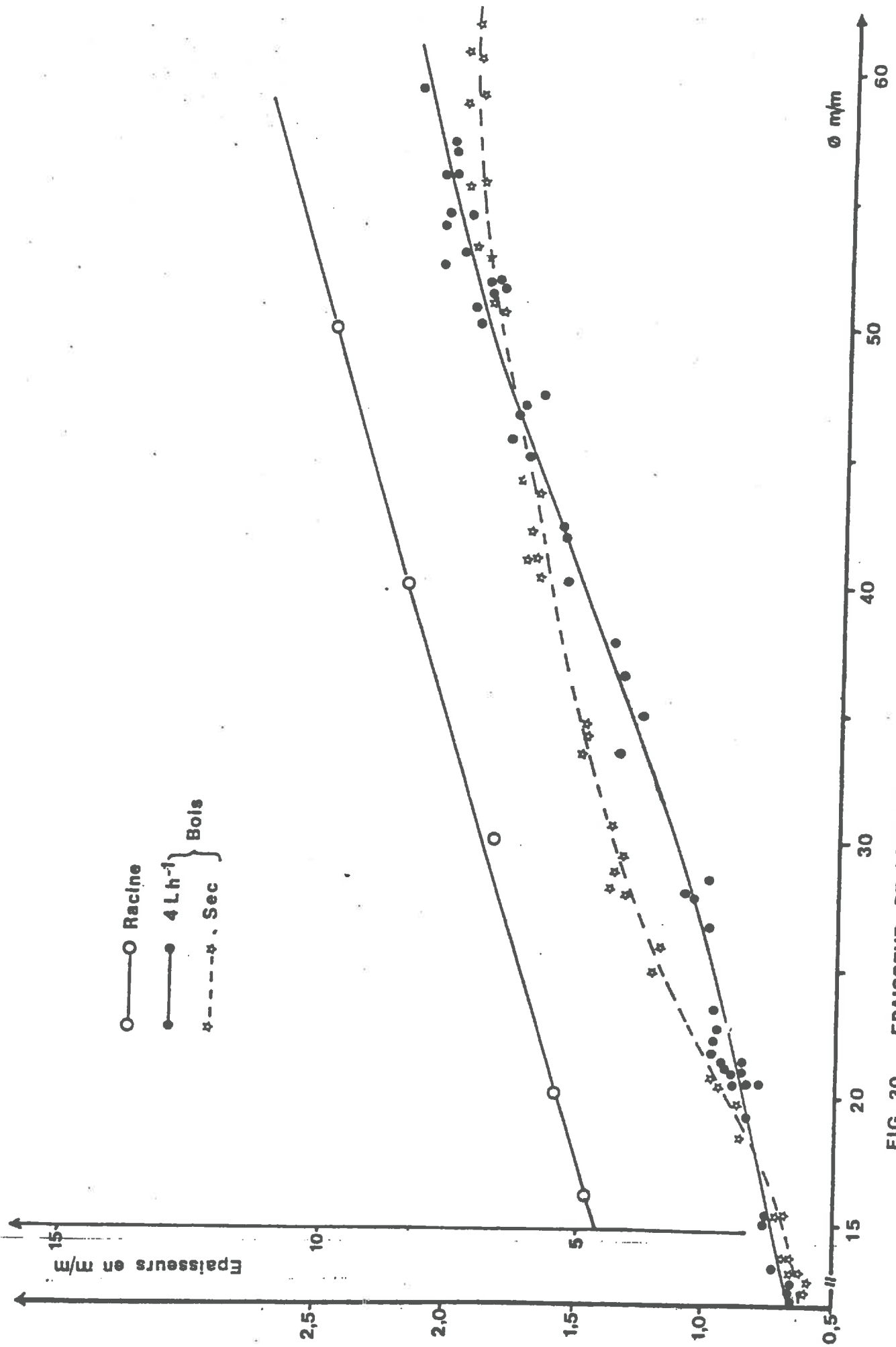


FIG. 30 — EPAISSEUR DE L'ECORCE EN FONCTION DU Ø DE L'ORGANE

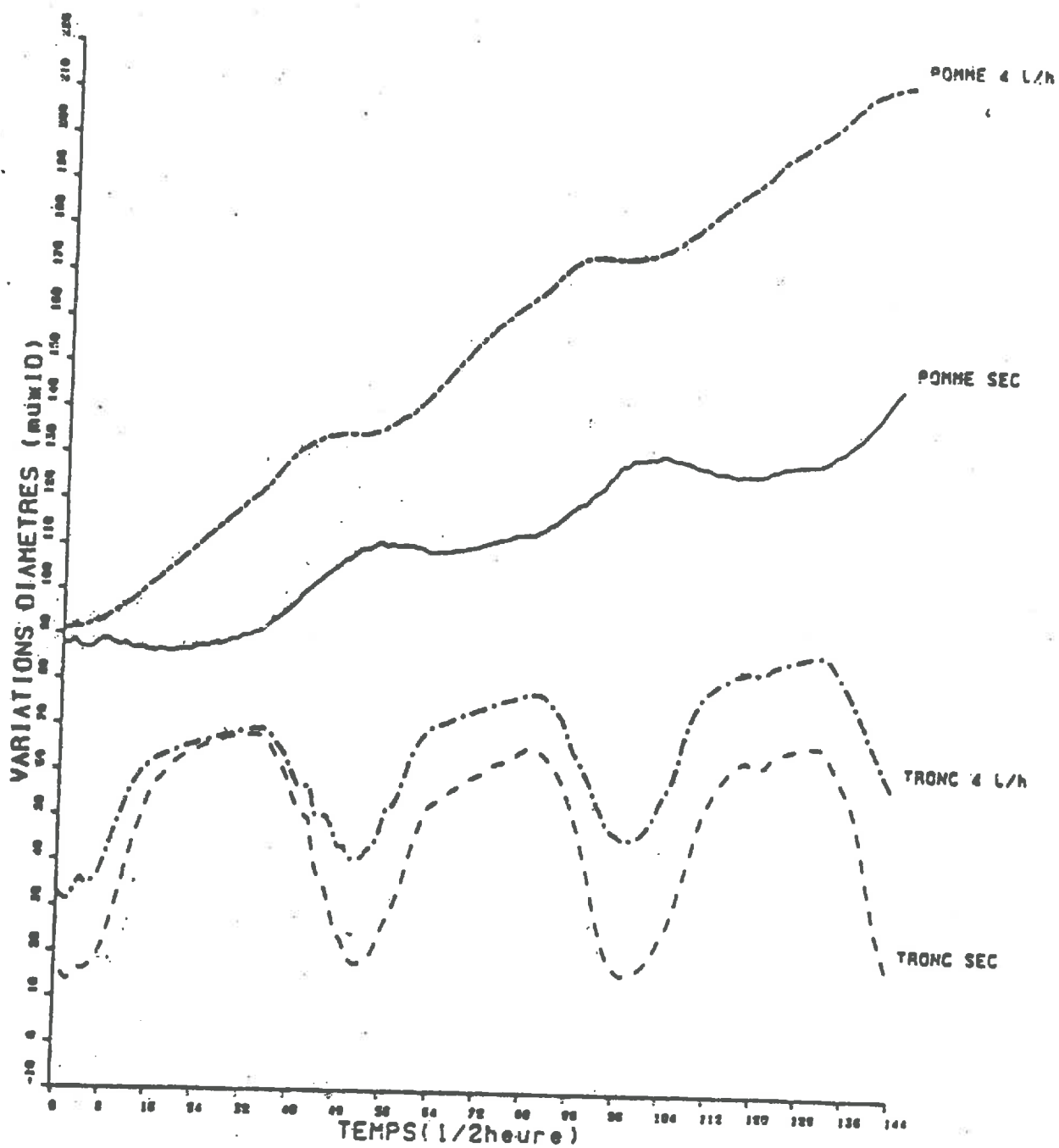
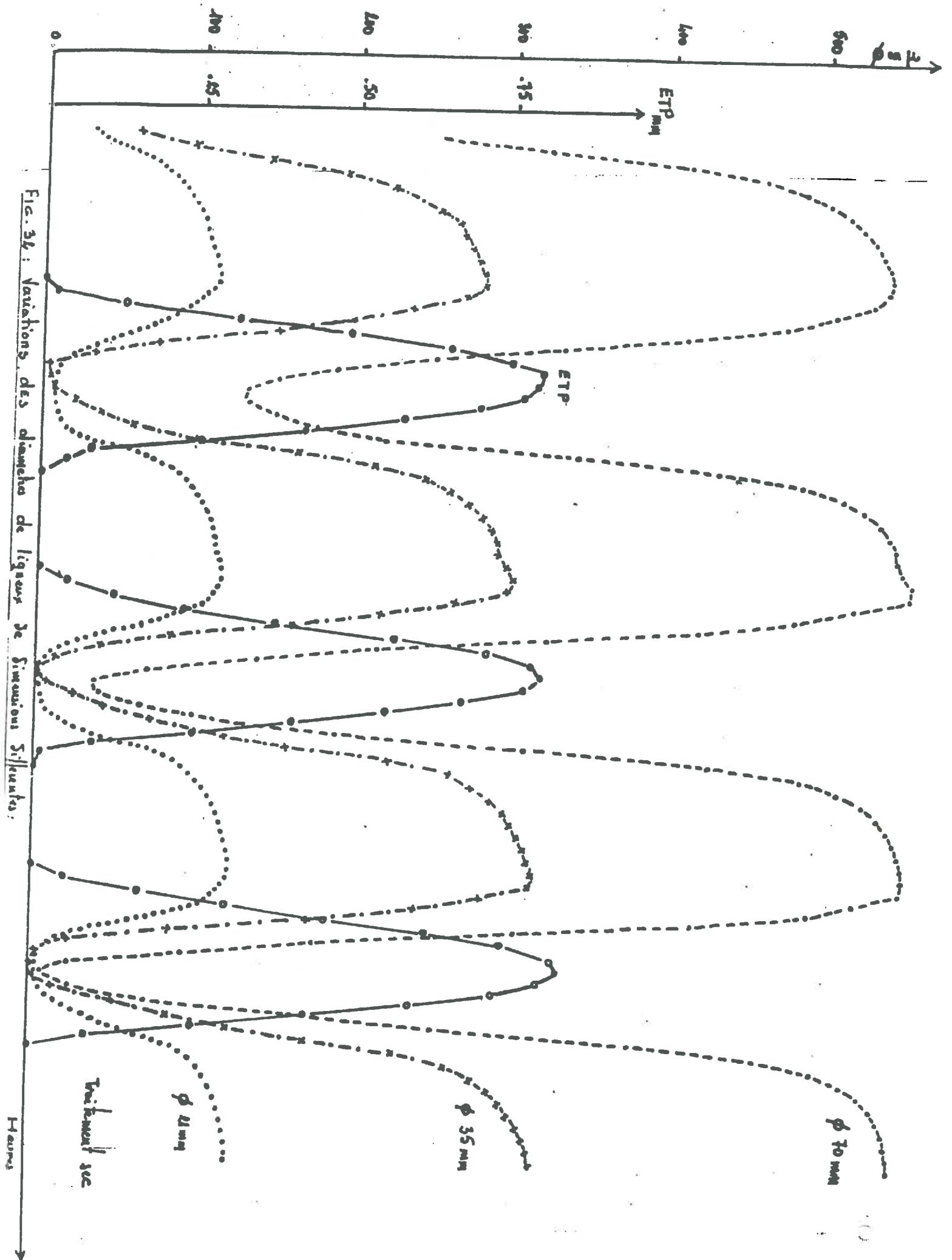


FIG. 31: POMMES TRONCS REINE REINETTE
13.8 14 hL e AU 16.8.84 13 hL e



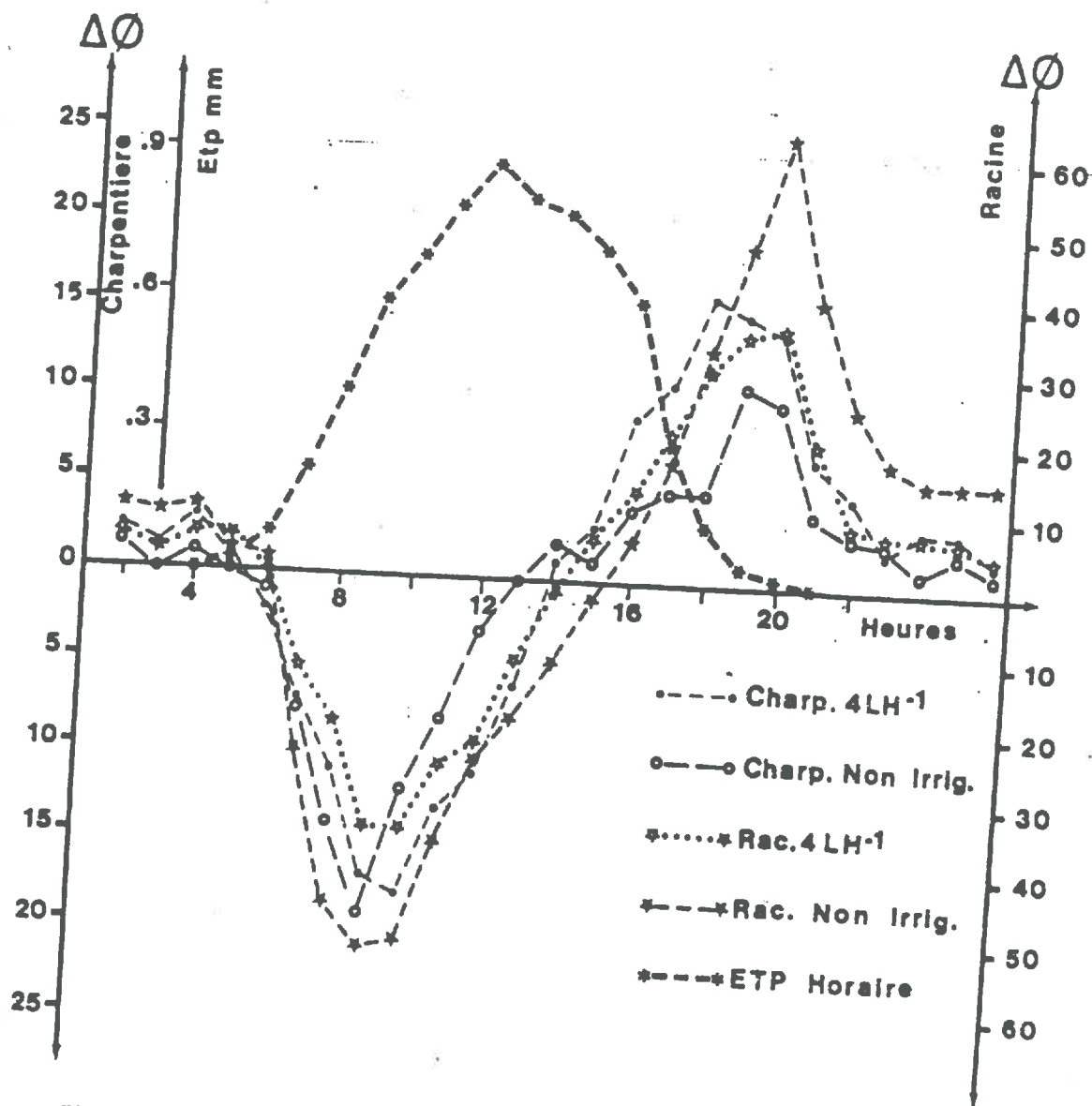


Fig.33 Vitesse de variation des diametres des charpentiers et des racines relative à l'épaisseur de l'écorce

II.2.2.2 MESURE DES FLUX DE SEVE:

A: THEORIE:

1) PRINCIPE:

Les mesures de flux de sève sont effectuées, dans les organes ligneux des arbres (racine, tronc et charpentièr) par voie thermique. Le capteur est constitué de deux thermocouples, insérés dans le bois et montés en opposition, l'un constituant la sonde froide et l'autre, chauffé sous puissance constante, constituant la sonde chaude (fig.35 et 36). Un cylindre en aluminium recouvre chaque sonde pour en uniformiser la température. Les flux de sève sont estimés par évaluation en continu de la variation de la différence de température engendrée entre les deux sondes, lors de la dissipation, au niveau de la sonde chaude, d'une fraction, proportionnelle au flux existant, de la chaleur fournie. En l'absence de flux de sève un écart de température maximal, T_0 apparaît entre les deux sondes. En présence d'un flux, une partie de la chaleur étant dégagée par convection au niveau de la sonde chaude, l'écart de température s'établit à une valeur T_u inférieure à T_0 .

2) EQUATIONS DE BASE:

Pour un flux de sève constant et en condition de régime thermique établi entre la sonde chaude et le milieu bois-sève, l'apport de chaleur, par effet joule, est supposé égal à la quantité de chaleur dissipée au niveau de la paroi du capteur. Son expression est:

$$h.S(T_u - T_b) = RI^2 \quad (1)$$

où:

h est le coefficient de transfert de chaleur ($W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$),
 S est l'aire de la surface d'échange (m^2),
 T_u est la température du cylindre d'aluminium ($^{\circ}C$),
 T_b est la température du bois en l'absence de chauffage ($^{\circ}C$),
 R est la résistance électrique (Ω),
 I est l'intensité du courant électrique (A).

Le coefficient h est supposé dépendre de la densité de flux J_u ($m.s^{-1}$) sous la forme:

$$h = h_0 (1 + \alpha J_u^{\beta}) \quad (2)$$

avec:

h_0 : coefficient de chaleur quand $J_u = 0$,
 J_u : flux de sève,
 α et β : coefficients fonction de la quantité de chaleur apportée
 h_0 a pour expression d'après l'équation 1

$$h_0 = \frac{RI^2}{S(T_0 - T_b)} \quad (3)$$

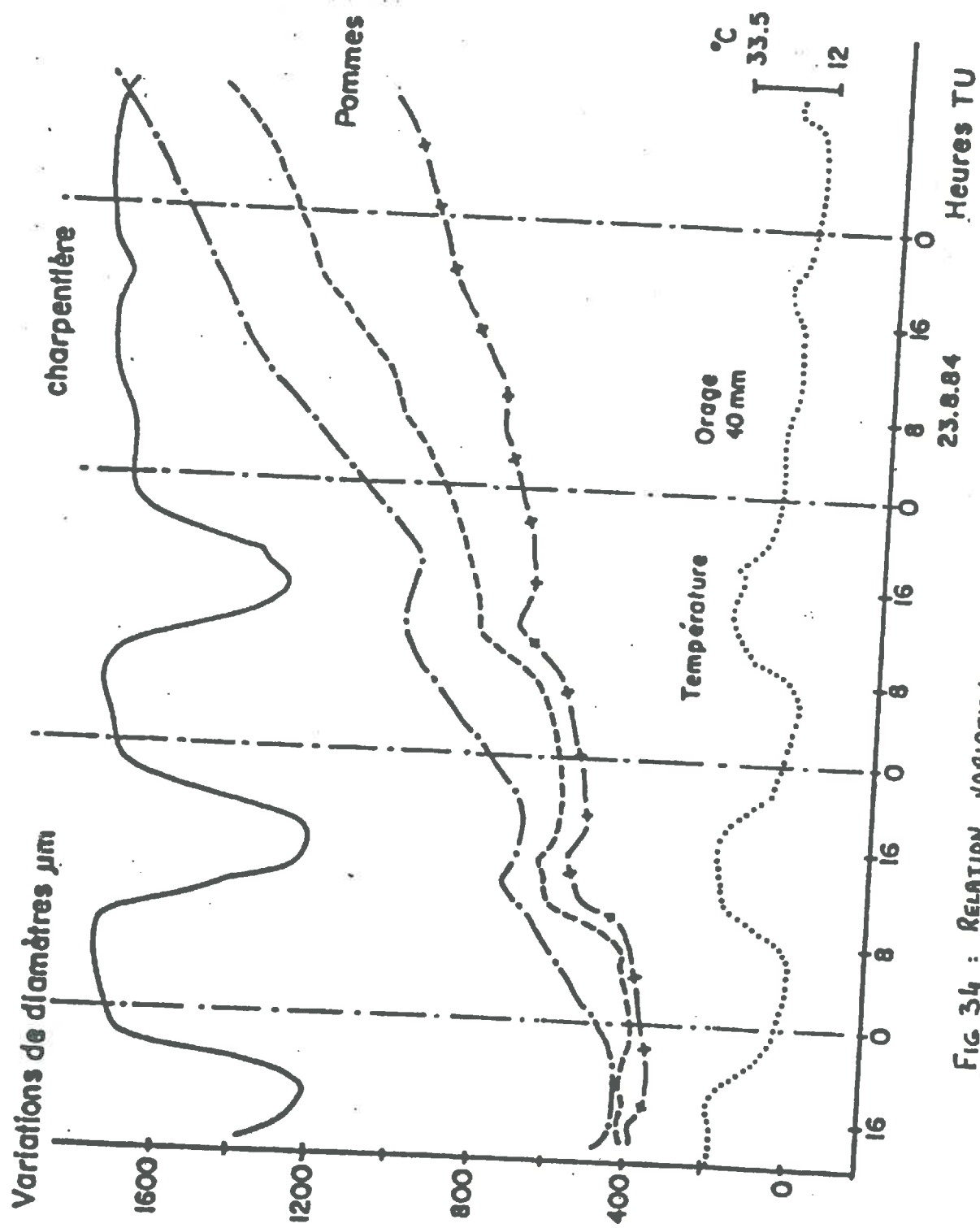
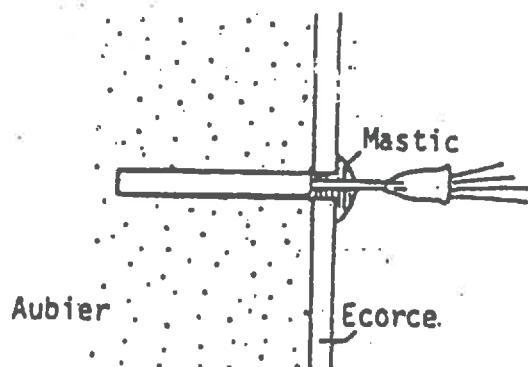
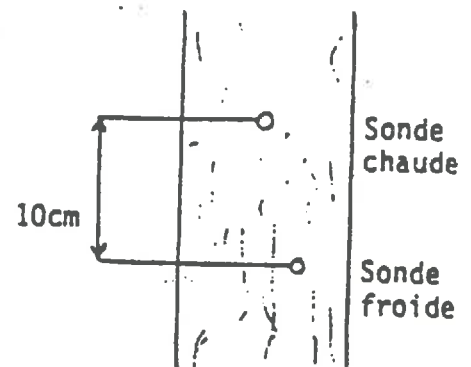


FIG 34 : RELATION VARIATIONS DE DIAMETRES - ETP



- Vue transversale d'une sonde dans un tronc



- Mise en place des sondes dans un tronc

- Installation du capteur

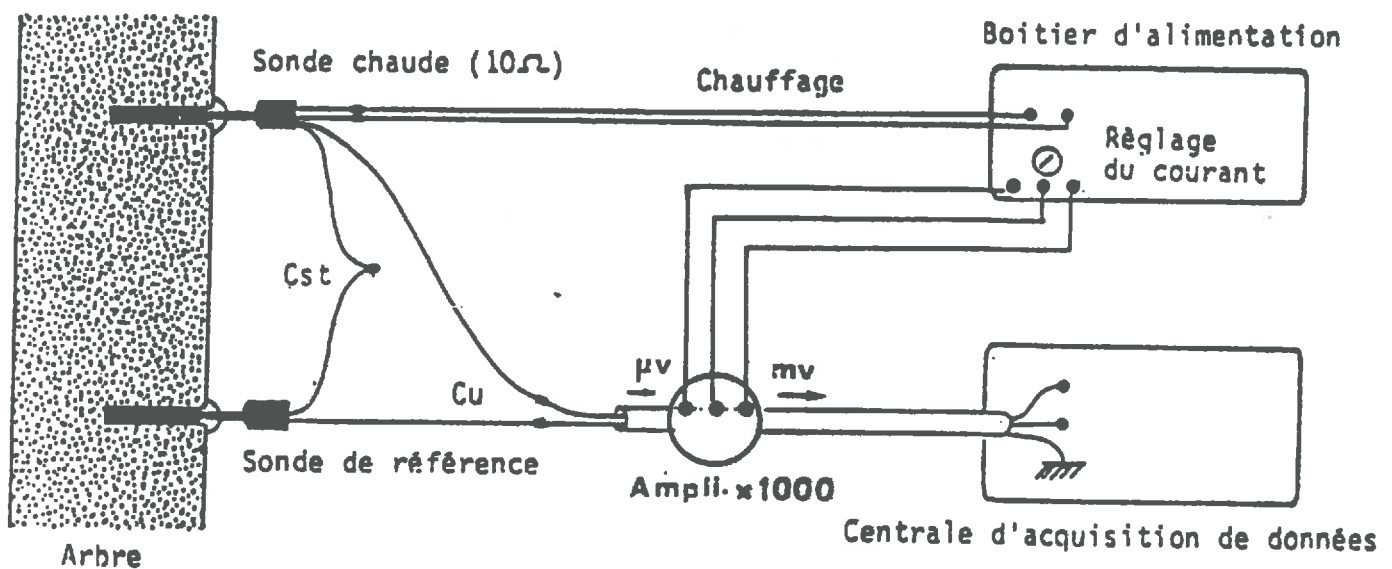


Figure.35 - Schéma simplifié du dispositif expérimental.

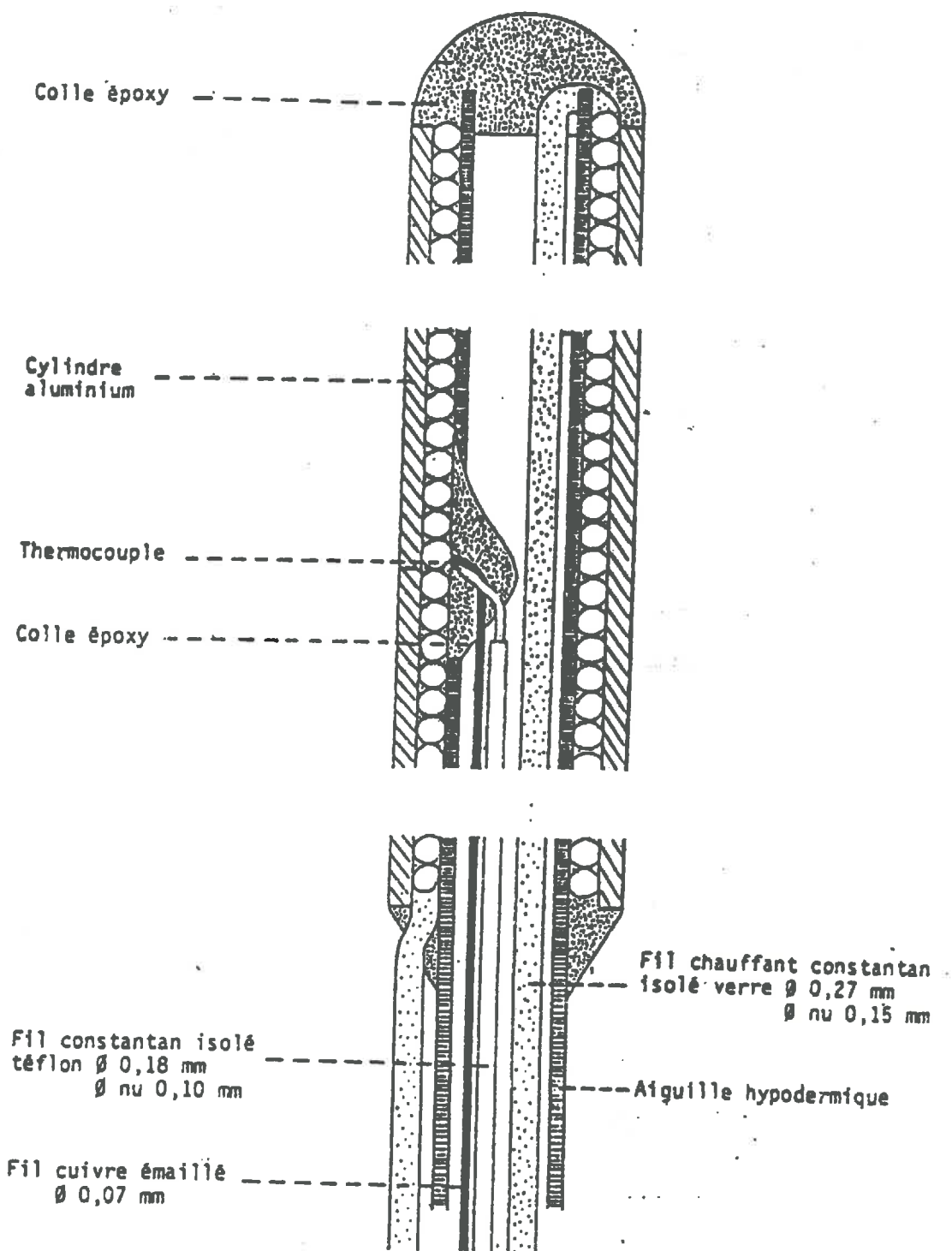


Figure 36- Coupe longitudinale d'une sonde (d'après GRANIER, 1985b)
(Longueur : 20 mm ; diamètre : 2 mm)

avec T_o , température du cylindre d'aluminium à flux de sève nul ($J_u=0$).

Quand J_u est constant et non nul son expression est:

$$J_u = \frac{h - h_o}{a h_o} \quad (4)$$

en utilisant les équations (1),(2),(3) on obtient:

$$J_u = \frac{1}{a^{1/\beta}} \frac{(T_o - T_b) - (T_u - T_b)}{(T_u - T_b)} \quad 1/\beta \quad (5)$$

où:

$$\frac{(T_o - T_b) - (T_u - T_b)}{(T_u - T_b)} = \frac{(T_o - T_u)}{T_u} = K \quad (6)$$

On écrit finalement

$$J_u = \frac{1}{a^{1/\beta}} K^{1/\beta}$$

relation dans laquelle les termes a et β seront obtenus par étalonnage sous la forme:

$$K = a J_u^\beta$$

3) RELATION D'ETALONNAGE:

Sur des fragments de bois, correspondants aux organes étudiés, on mesure simultanément, lors d'une circulation d'eau sous pression dans l'échantillon testé, le débit d'eau par pesée de l'exsudat et le signal délivré par le capteur. Après les n mesures nécessaires pour couvrir la gamme des débits rencontrés in situ l'échantillon est sectionné pour mesurer la section de bois d'aubier au niveau de l'élément chauffant du capteur:

10^{-6} m.s^{-1} : -Le flux d'eau par unité de surface est égal en

$$J_u = (\text{poids d'eau}) / (\text{temps} \times \text{surface conductrice})$$

-le rapport K , nombre sans dimension est calculé à partir des données du capteur T_o , T_b et T_u :

$$K = (T_o - T_u) / T_u$$

La relation $K(J_u)$ est obtenue par ajustement non linéaire à partir des couples de paramètres obtenus en étalonnage (fig. 37). Il est intéressant de souligner que la relation $K(J_u)$ est

peu différente d'une espèce de bois à une autre (GRANIER, 1985).

Le flux se sève total est estimé à partir de la densité de flux J_u et de la surface conductrice SA . J_u est obtenue à partir de la relation d'étalonnage et SA est déduite de relations statistiques liant la surface conductrice au diamètre total de l'organe testé, relations établies pour chaque organe sous les différents traitements étudiés. Le flux, généralement exprimé en $cm^3.h^{-1}$, en $l.h^{-1}$ ou, dans le cas du flux global, en $mm.h^{-1}$ si l'on connaît la surface de sol attribuable à l'arbre considéré, est donné par:

$$U = A.K^3.R^2$$

La relation $K(J_u)$ étant obtenue en conditions isothermes (température constante dans tout le milieu bois-sève en l'absence de chauffage, permanence du gradient thermique propre à chacune des sondes lors du chauffage et à flux nul) son utilisation in situ (variations importantes et rapides de la température extérieure) a nécessité l'analyse de l'influence des gradients thermiques extérieurs sur la réponse des capteurs. Deux effets ont été étudiés:

a) la variation différentielle des gradients thermiques au niveau des deux sondes: toute variation importante et rapide de la température extérieure conduit à une variation préférentielle du gradient thermique de la sonde froide (dérive du T_0 généralement négative) qui induit le plus souvent une sous-estimation des flux mesurés. La minimisation de cette interférence est obtenue par l'élaboration d'une protection efficace des sondes à leur insertion dans le bois. La protection retenue est déduite de l'étude de la dérive relative du T_0 induite par la variation du gradient thermique extérieur dans des conditions de protection différentes des sondes dans des environnements variables (conditions naturelles et chambre climatique).

b) la variation de la température du milieu bois-sève en l'absence de chauffage sous l'effet d'un gradient vertical extérieur de température: l'analyse des variations de la différence de température entre les sondes, en l'absence de chauffage (fig.38), montre l'existence d'un gradient de température interne dans le bois qui est fonction:

- de la position de l'organe étudié,
- de la verticalité de l'organe testé,
- de la distance sonde froide-sol,
- du climat et de ses variations.

En conséquence à partir de relations liant, pour chaque système bois-capteur, la dérive moyenne en température à l'ETP journalière (fig.39), on a établi un algorithme de calcul de l'index de flux corrigé utilisant un facteur additif $\beta(T)$ sur le terme constant T_0 . $\beta(T)$ est spécifique du

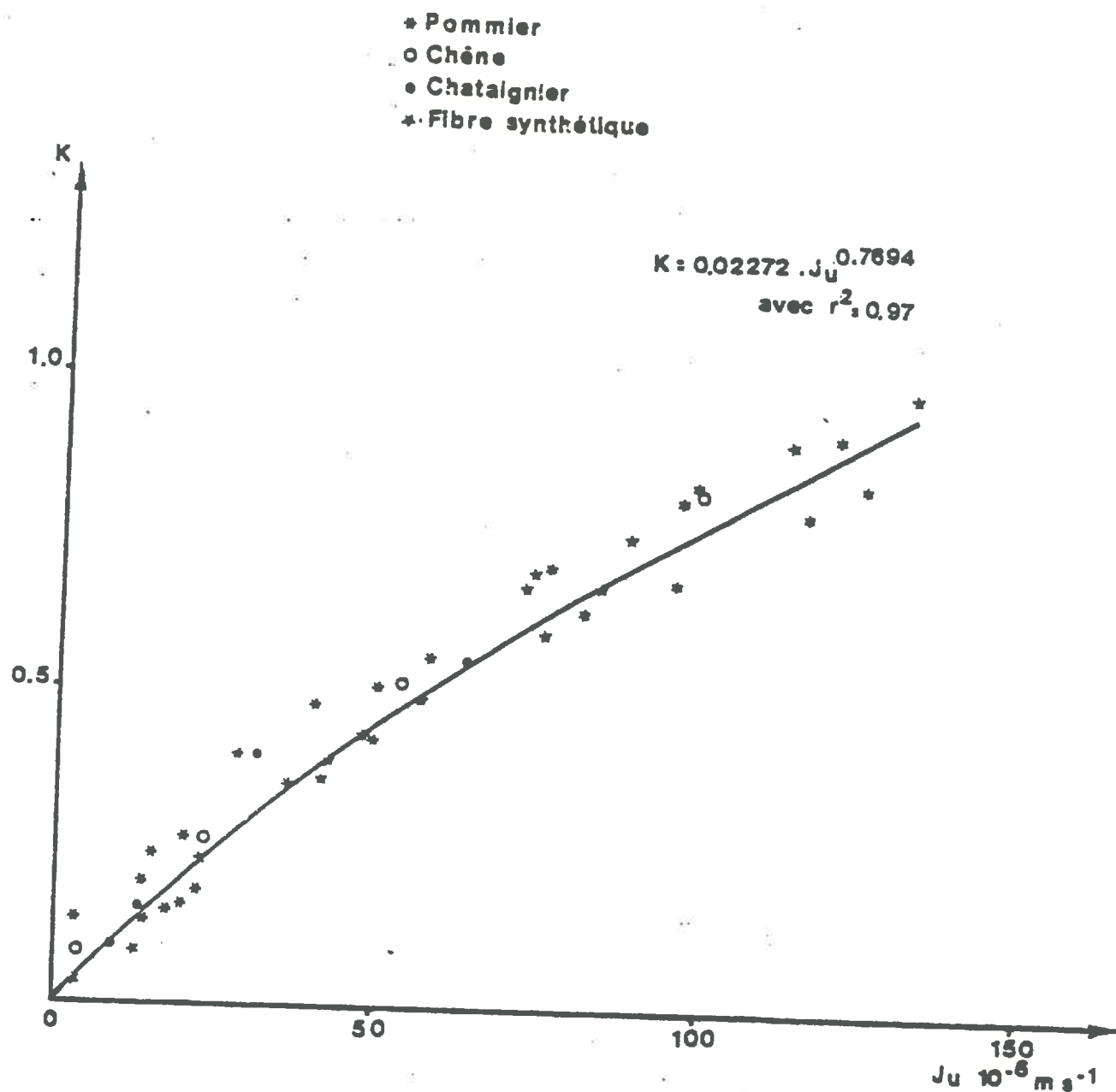


Fig. 37 RELATION ENTRE LE SIGNAL RELATIF DU CAPTEUR (index de flux) K ET LE FLUX D'EAU PAR UNITE DE SURFACE DE BOIS CONDUCTEUR J_u

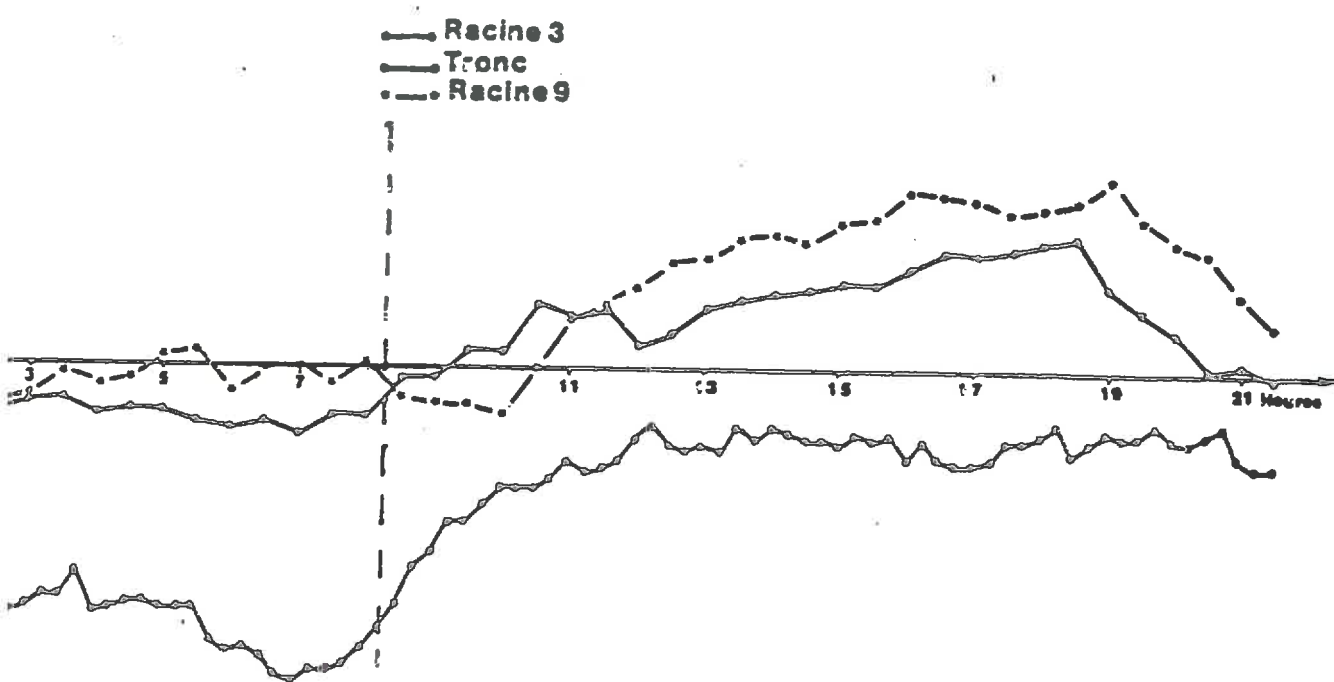


Figure 38 Cinétiques des gradients verticaux de température en absence de chauffage

-trois zones de sensibilité différente quant à la précision des mesures:

+une zone où la précision des mesures est très faible ($\pm 57\%$). Elle correspond à des flux très faibles ($K < .1$). La composante relative à T_u doit par ailleurs être sur-estimée, la dispersion de T_u étant en période nocturne (période à flux très faible) inférieure à celle choisie,

+une zone où la précision des mesures est faible ($\pm 23\%$). Elle correspond à des flux faibles ($.1 < K < .3$).

Dans ces deux zones la part prépondérante de l'erreur est liée aux termes constants A, B et T_o (62%).

+une zone, domaine des flux moyens et forts, où l'intervalle de confiance obtenu, $\pm 12\%$, entraîne, sur les bilans journaliers établis in situ, une précision du même ordre de grandeur que celle obtenue en conditions contrôlées. Dans cette gamme de flux ($K > .3$) la part prépondérante de l'erreur est liée au terme T_u (55%).

-que le phénomène de la réduction de l'erreur sur la mesure des flux dans les conditions théoriques se ramène à réduire les termes $\sigma^2(A)$ et $\sigma^2(B)$ pour lesquels les sensibilités sont les plus élevées. La réduction de l'erreur est donc liée à la qualité de l'étalonnage donc à celle de la relation $K(J_u)$.

B: MISE EN ŒUVRE DE LA MESURE:

1) INSTALLATION DES CAPTEURS

Les sondes constituant le capteur sont insérées, sur toute leur longueur et en force, dans le bois, dans des prétrous de diamètre équivalent à celui des sondes et creusés préalablement sur des génératrices légèrement décalées latéralement de façon à ne pas interrompre les vaisseaux conduisant la sève jusqu'à la sonde supérieure. La qualité du contact sonde-bois est essentielle à la réalisation de bonnes mesures.

Pour éviter toute interférence thermique entre les deux sondes la sonde chaude est placée à 10 cm au-dessus de la sonde froide. Une protection thermique efficace est de plus nécessaire à l'insertion des sondes dans le bois pour minimiser l'effet de tout gradient extérieur sur le terme de conductivité thermique différentielle de l'écart de température mesuré.

2) ACQUISITION DES DONNEES

Les tensions en provenance des capteurs sont généralement enregistrées par une acquisition de données ayant un pouvoir de résolution de 1 μV et pilotée par un

système de mesure et du climat du jour des mesures. Cet algorithme de correction ne représente qu'une solution partielle du problème posé (fig.40) et tableau 1, la solution rigoureuse reposant sur une modélisation du fonctionnement thermique du capteur.

4) ANALYSE THEORIQUE DE L'ERREUR SUR LA MESURE:

La méthodologie utilisée à consister à décomposer la variance totale de U, le flux, au sens d'une dispersion de U estimée autour de U réel, en analysant la contribution de chacune des variables du modèle de calcul, à savoir A, B, T_0 , T_u et R. En posant $Y=U$, en appelant X_i toute variable de U, et en supposant que les $\sigma(X_i)$ soient petits, la variance totale de Y à pour expression:

$$\sigma^2(Y) = \sum_i \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \right)^2 \cdot \sigma^2(X_i) + \sum_{i \neq j} \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial Y}{\partial X_j} \right) \cdot \left[X_i, X_j \right] \cdot \sigma(X_i) \cdot \sigma(X_j)$$

où:

$\sigma^2(X_i)$ correspond à une dispersion expérimentale de X_i autour de X_i réel,

$\partial Y / \partial X_i$ à le sens d'une sensibilité de X à une plus ou moins grande dispersion de la variable X_i ,

X_i, X_j correspond à la corrélation entre les dispersions expérimentales de X_i et X_j .

Les limites maximales de l'erreur sur R, T_0 et T_u étant déterminées à partir des observations de terrain (tab.2), les caractéristiques liées à A et B étant déduites de l'étalonnage et la loi de distribution de U autour de U réel étant supposée normale, le développement de l'équation pour l'ensemble des variables intervenant dans Y permet d'estimer la variance totale $\sigma^2(U)$ ainsi que les intervalles de confiance pour U tels que:

$$U \pm U - 2\sigma(U) ; U + 2\sigma(U) \quad \text{à } 95\%$$

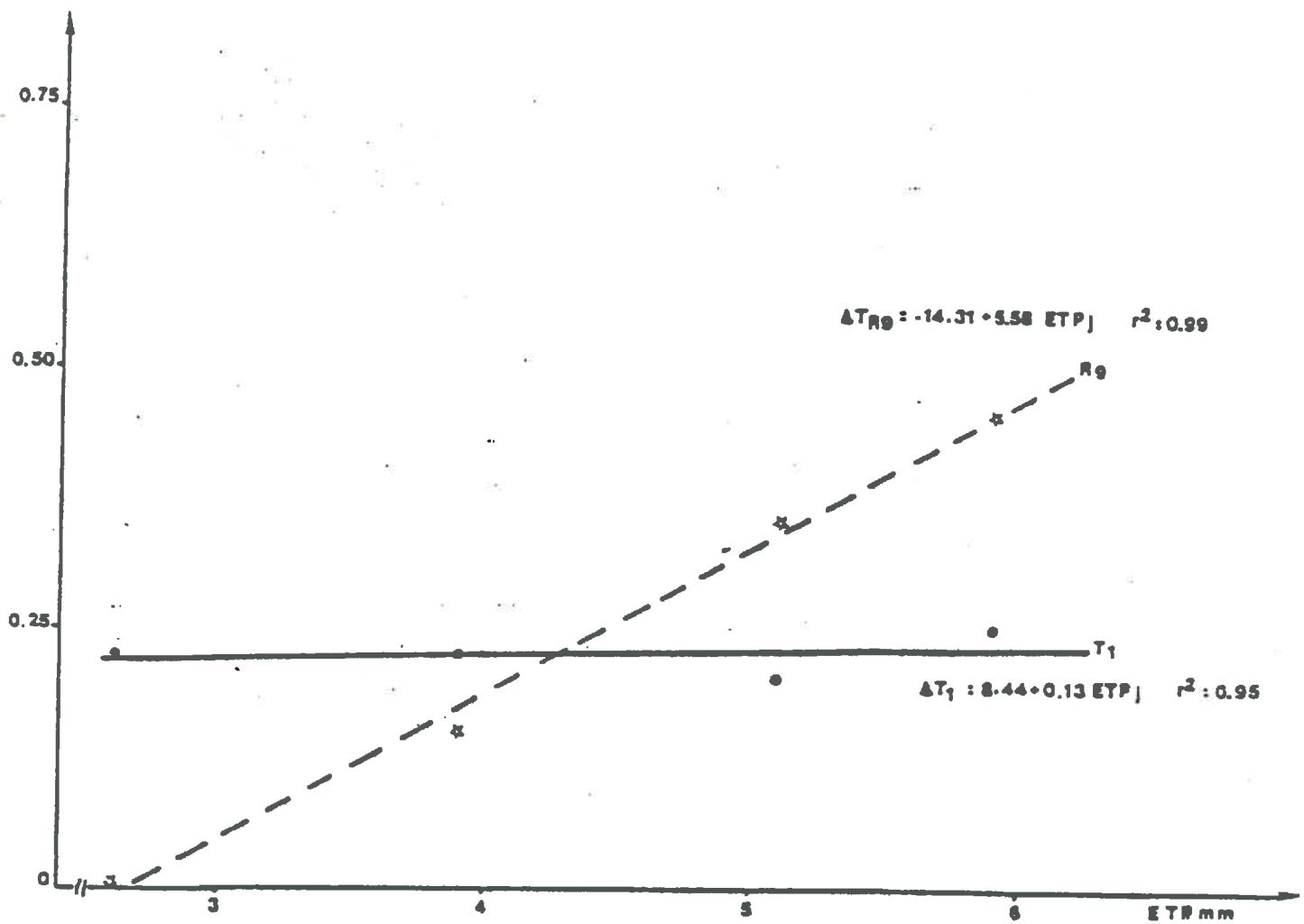
On donne l'incertitude relative (IR) sur la mesure des flux et la contribution des différentes sources d'erreur à la formation de l'erreur totale dans deux cas caractéristiques (tab.3) et le diagramme de l'évolution de IR totale sur la mesure des flux dans les racines (fig.41).

Les résultats font essentiellement apparaitre:

-deux types de structure de l'erreur selon les termes considérés:

+pour A et B, ce sont les valeurs numériques élevées des sensibilités qui déterminent fortement leur contribution à l'erreur totale,

+pour T_0 , T_u et R, ce sont les valeurs de $\sigma^2(X_i)$ choisies qui déterminent l'importance de leur contribution à l'erreur totale.



: Relations entre le gradient vertical diurne de température et l'ETP.

$$\beta = \Delta T'_U \frac{\Delta T_0 - [\Delta T'_U - \Delta T]}{(\Delta T'_U - \Delta T)} - [\Delta T_0 - \Delta T_U]$$

avec $\Delta T'_U = \Delta T_U + \Delta T = \text{écart de température mesuré}$

β est déduit de l'égalité entre K' (index biaisé) et K Théorique

$$K' = \frac{\Delta T_0 - \Delta T'_U}{\Delta T'_U}$$

$$K = \frac{\Delta T_0 - (\Delta T'_U - \Delta T)}{(\Delta T'_U - \Delta T)}$$

Fig. 39: Algorithme de correction sur U

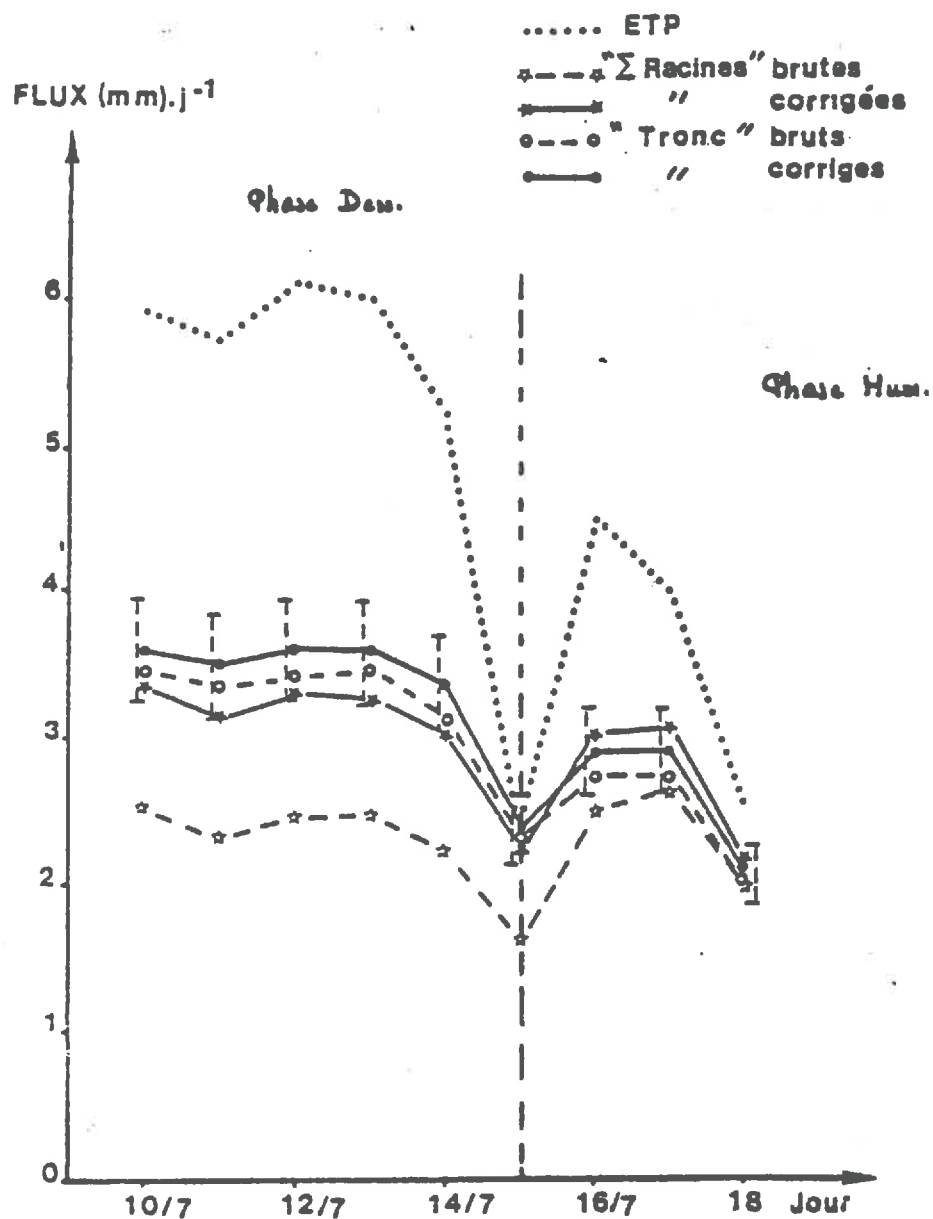


Figure 40 Estimation du flux total (mm.j⁻¹) dans le tronc et dans les racines en valeurs brutes et corrigées.

jours juillet	pluviometrie mm. j-1	ETP mm	ECART RELATIF				(E R - T)	
			BRUT (%)	moyen	T CORRIGE		(%)	moyen
10	0	5.9	- 27.2		-	3.3		
11	0	5.7	- 31.1		-	11.2		
12 §1	0	6.1	- 28.4	- 29.4	-	7.3	- 8.9	
13dessechement	0	6.0	- 29.7		-	9.7		
14	0.4	5.2	- 30.5		-	9.5		
15-----	5.4	2.4	- 30.7	-----	-	1.4	-----	
16 §2	36.5	4.5	- 10.2		+	5.2		
17re-	13.1	4.0	- 5.7	- 4.8	+	6.0	+ 4.9	
18 humectation	0.2	2.5	+ 1.5		+	3.6		

tableau1 : ECART RELATIF DE LA SOMME DES FLUX RACINAIRES
AU FLUX MESURE DANS LE TRONC

X_i	$2 \sigma_{xi}$	σ_{2xi}
α	$6.3 \cdot 10^{-3}$	$9.92 \cdot 10^{-6}$
β	$6.13 \cdot 10^{-2}$	$9.39 \cdot 10^{-4}$
avec $r(\alpha, \beta) = -0.9937$ (UWHAUS)		
σ_{To}	$\pm 5 \mu V$	6.25
σ_{Tu}	$\pm 5 \mu V$	6.25
R		
- tronc	$\pm 1.0 \text{ mm}$	0.25
- racine	$\pm 0.5 \text{ mm}$	0.06

Tableau 2

ANALYSE STRUCTURELLE DE L'ERREUR

$$U = k \left[\frac{\Delta T_0 - \Delta T_u}{\alpha \Delta T_u} \right]^{\frac{1}{\beta}} \cdot R^2$$

Avec $\gamma = U$ et x_i : variables

$$\sigma_U^2 / U_{\text{reel}}^2$$

$$U = f(\alpha, \beta, \Delta T_0, \Delta T_u, R)$$

$$\sigma_U^2 = \sum \left(\frac{\partial \gamma}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + \sum_{i \neq j} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right) \text{cov}(x_i, x_j) \text{ avec condition } \sigma_{x_i} \text{ petit}$$

INCERTITUDE RELATIVE TOTALE
SUR $U \text{ m.l.h.}^2 / \sigma_{x_i}^2$ (Conditions expérimentales)

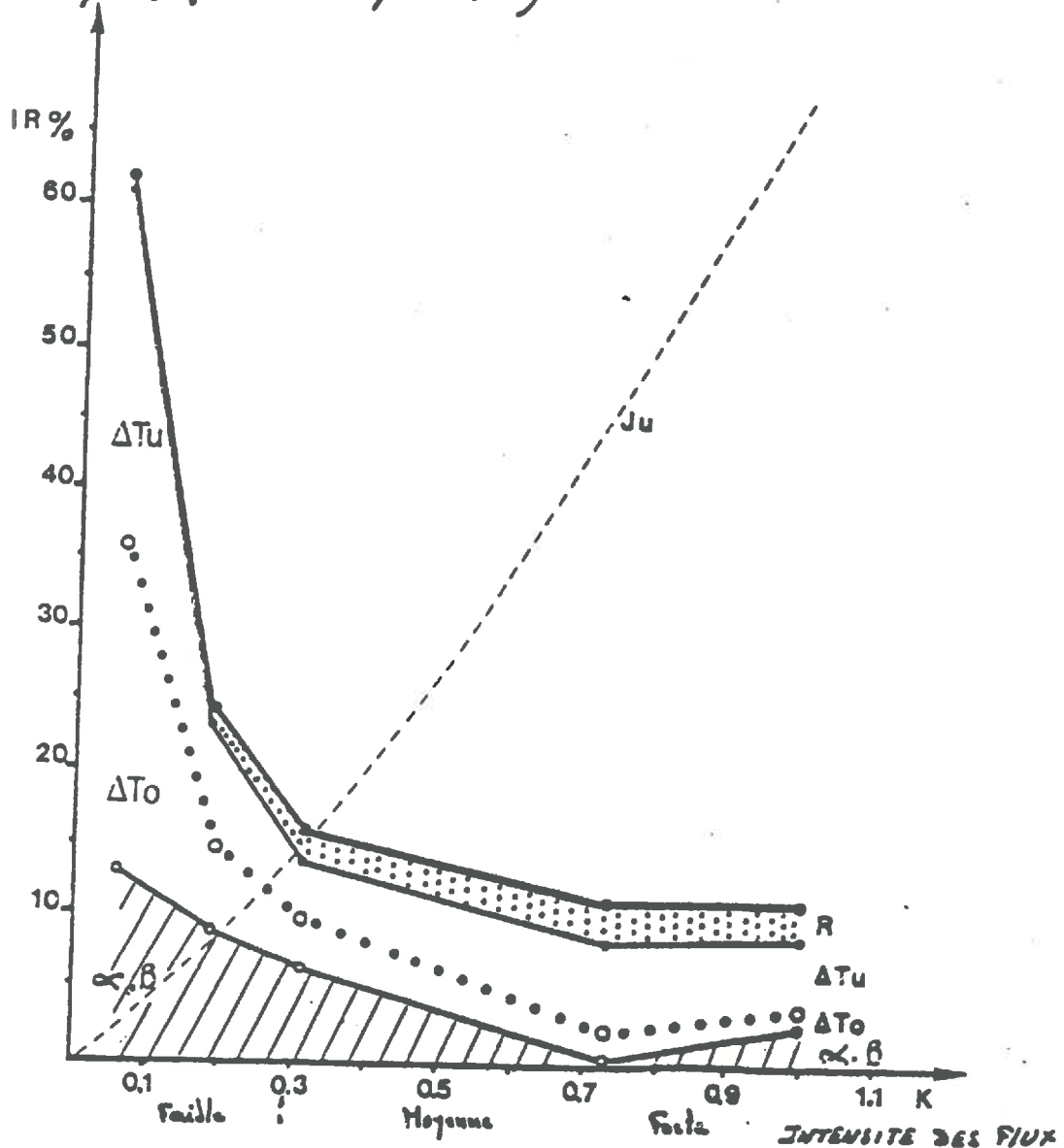


Figure 41 : Diagramme de l'évolution de l'incertitude relative totale sur la mesure en fonction de l'index de flux K. (racine)

Méthode utilisée : Décomposition de la variance totale de U , au sens d'une dispersion $\hat{U}$ estimée autour de U réel, en analysant la contribution de chacune des variables du modèle de calcul (BAUHLER, 1983)

organe : tronc					
	R (mm)	52			
	δT_0 (μv)	385			
U (ml.h-1)	100	500	1000	3000	4200
δT_u (μv)	364	322	289	217	192
K	0.08	0.19	0.77	0.77	1.0
σ_2	723	2913	5148	17273	36050
IR (%)	± 53.8	± 21.6	± 14.3	± 8.7	± 9.0
contribution					
α et β	25.6	40.9	39.1	0.1	12.0
δT_0	34.9	23.0	22.2	19.5	13.9
δT_u	39.0	32.9	31.6	61.3	56.1
R	0.5	3.2	7.1	19.1	18.0
	----	----	----	----	----
	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

ORGANE : RACINE					
	R (mm)	17			
	δT_0 (μv)	345			
U (ml.h-1)	10	50	100	300	450
δT_u (μv)	327	291	262	199	173
K	0.05	0.18	0.31	0.73	1.0
σ_2	9.4	36.4	61	250	564
IR (%)	± 61.2	± 24.1	± 15.6	± 10.5	± 10.6
contribution					
α et β	20.8	35.7	37.7	0.0	8.7
δT_0	37.0	24.7	24.6	17.6	12.4
δT_u	41.2	35.7	24.6	53.2	49.5
R	1.0	3.9	13.1	29.2	29.4
	----	----	----	----	----
	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

tableau 3 : INCERTITUDE RELATIVE TOTALE SUR LA MESURE DE FLUX (IR)
 ET
 CONTRIBUTION DES DIFFERENTES SOURCES D'ERREUR A LA FORMATION
 DE L' ERREUR TOTALE (σ_2)

logiciel implanté sur un micro-ordinateur compatible PC qui assure de plus le stockage des données brutes et leur prétraitement mathématique.

C: MESURES DES FLUX DANS LA PLANTE:

L'utilisation de la fluxmétrie permet simultanément d'estimer, in situ, en intensité et en densité de flux:

+pour une demande climatique et un traitement donné:

- la fonction puits racinaire totale et sa variation dans le temps (mesure au niveau des troncs) (fig.42 et 43),
- la fonction puits racinaire d'une racine donnée et ses variations dans le temps (mesure sur une racine) (fig.44 et 45),
- la variabilité spatiale de la fonction puits racinaire d'un arbre (mesure simultanée sur chacune des charpentières racinaires de l'arbre) (fig.46).

+pour un organe donné et une demande climatique donnée l'influence du traitement appliqué (fig.47,48 et 49).

+pour un organe et un traitement donnés l'influence de la demande climatique et de ses variations.

Elle permet donc de mesurer les relations liant le fonctionnement du système racinaire dans ses différentes composantes aux équilibres instantanés existants entre la demande climatique et la disponibilité de l'eau du sol, cette dernière étant fonction du traitement hydrique appliqué aux cultures. Elle permet de plus de quantifier à l'échelle d'une journée les volumes d'eau évapotranspirés par la plante.

III.2.2.3 COUPLAGE MICROMETRIE-FLUXMETRIE ET PILOTAGE DE L'IRRIGATION:

L'analyse globale des résultats acquis permet de conclure à la complémentarité tant qualitative (sens des flux) que quantitative (intensité des flux) des deux méthodes dans l'estimation du bilan hydrique des arbres, intégré dans un schéma général de la circulation de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère.

La micrométrie, permettant d'appréhender le comportement hydrique des arbres au travers de la participation successive au courant de transpiration de leurs différentes réserves propres en eau (évolution du stress hydrique engendré) doit permettre la fixation du seuil de participation de ces réserves pouvant induire une altération quantitative de la récolte. Elle est donc un outil de décision du besoin d'irrigation dans le temps. A ce titre l'analyse, en temps réel, du comportement relatif des réserves en eau des ligneux et des fruits vis à vis du courant de transpiration

pourrait être considéré comme un argument de décision essentiel (fig.25). De même l'analyse de la reconstitution des réserves en eau, perdues par le végétal sous évapotranspiration, par absorption racinaire de l'eau du sol constitue une approche de l'évolution de la disponibilité de l'eau du sol et de ses modification en fonction des traitements hydriques appliqués aux cultures.

La fluxmétrie, permettant de quantifier l'extraction racinaire, sa variabilité dans l'espace et le temps, et d'estimer à l'échelle de la journée l'ETR si couplée à une approche du potentiel hydrique de l'arbre, doit permettre une approche de la dose d'eau à apporter et de juger de l'efficacité des modalités d'apport notamment en irrigation localisée.

Ces deux méthodes utilisées simultanément permettent donc la définition de l'ensemble des paramètres de l'irrigation à savoir:

- le besoin d'irrigation existe-t-il?
- si oui, quand irriguer?
- combien d'eau apporter?
- quelles sont les meilleures conditions d'apport?

Actuellement seule la micrométrie est utilisée dans le pilotage de l'irrigation des cultures, les seuils de déficit hydrique étant déterminés expérimentalement au champ et la dose d'eau étant raisonner en fonction des caractéristiques de l'ensemble sol-système racinaire. Le "seuil de soif" est alors défini comme la valeur de l'amplitude de contraction au moment où l'insuffisance de la disponibilité hydrique du sol induit une déshydratation de la plante décelable par l'évolution négative du diamètre de l'organe ligneux testé au pas de 24 h (fig.22).

Elle est applicable sur toutes les cultures. Le couplage micrométrie-fluxmétrie ne constitue encore à ce jour qu'une approche de type recherche en arboriculture.

Remarques sur ces méthodes: Ces méthodes:

- présentent les contraintes liées aux mesures ponctuelles définies précédemment. Néanmoins celles ci sont moindres que dans les méthodes basées sur la mesure des paramètres "sol" la variabilité des paramètres mesurés sur le végétal étant reconnue beaucoup plus faible,
- nécessitent des décideurs une haute technicité,
- supposent qu'au niveau parcellaire l'équilibre besoin en eau de la culture-moyens de les assurer en temps réel soit assuré. Ce type de pilotage n'est donc envisageable que pour des cultures à haut niveau de produit brut ou dans des zones de monoculture particulièrement homogènes (rentabilité des installations),

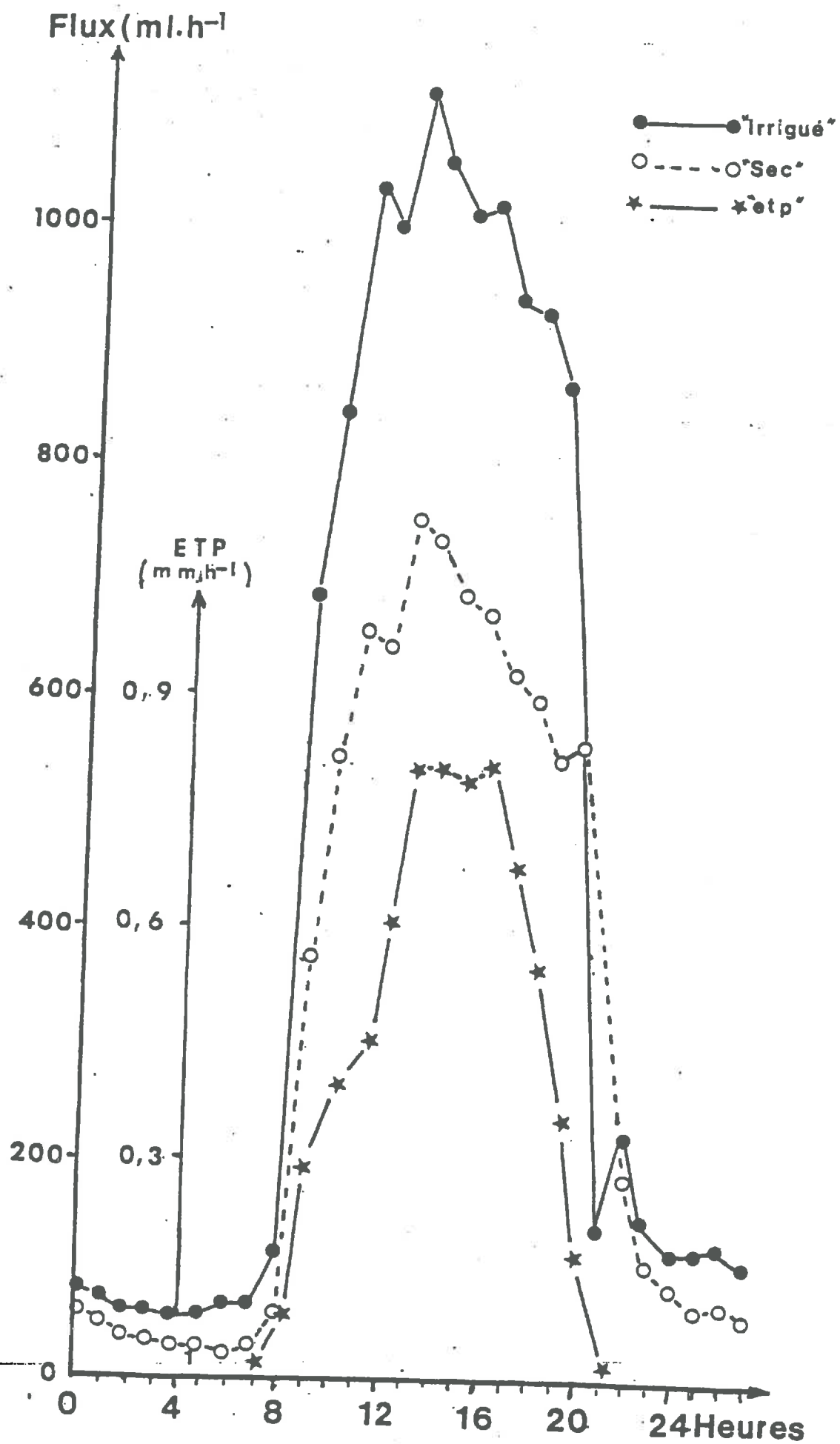


FIG. 42 — FLUX AVANT IRRIGATION (TRONC)

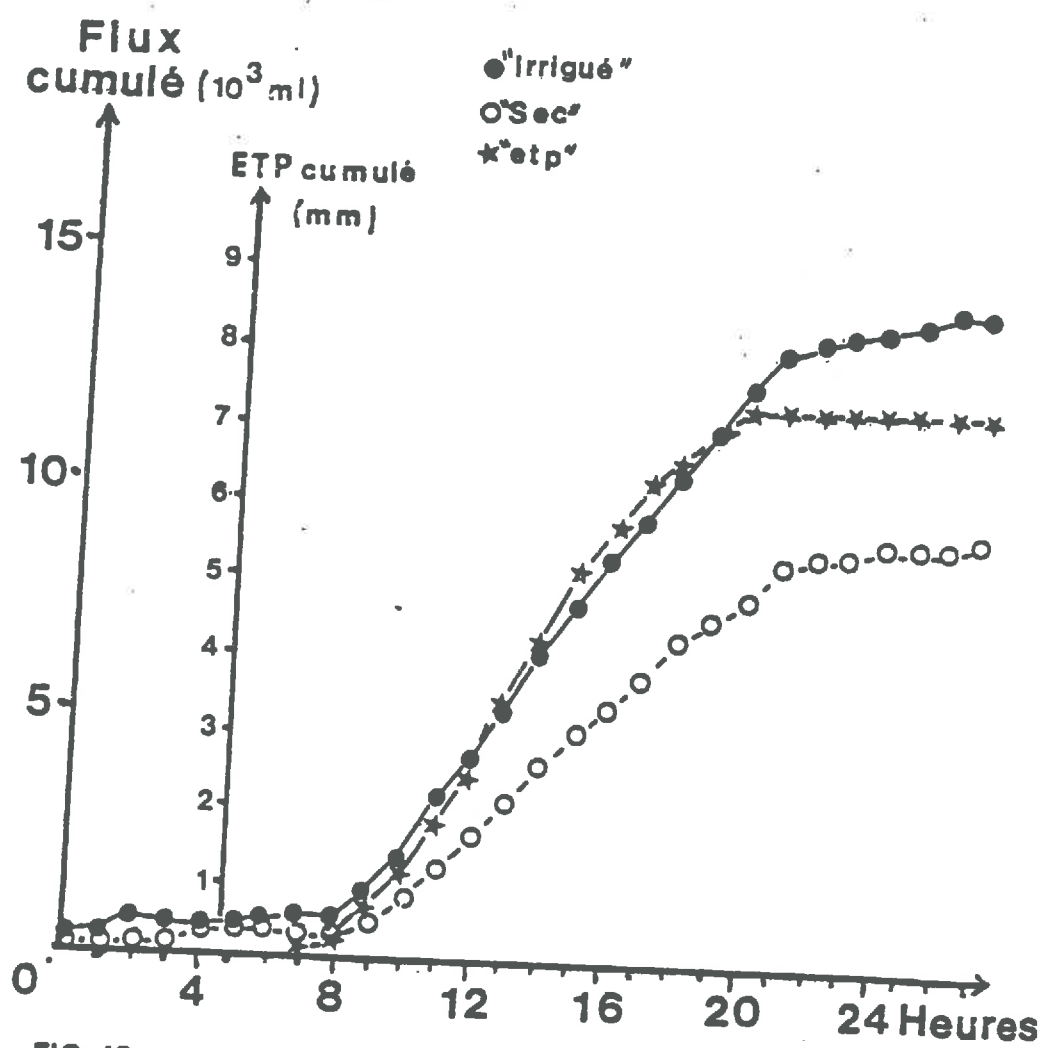


FIG 43 — TRANSPIRATION JOURNALIERE AVANT IRRIGATION

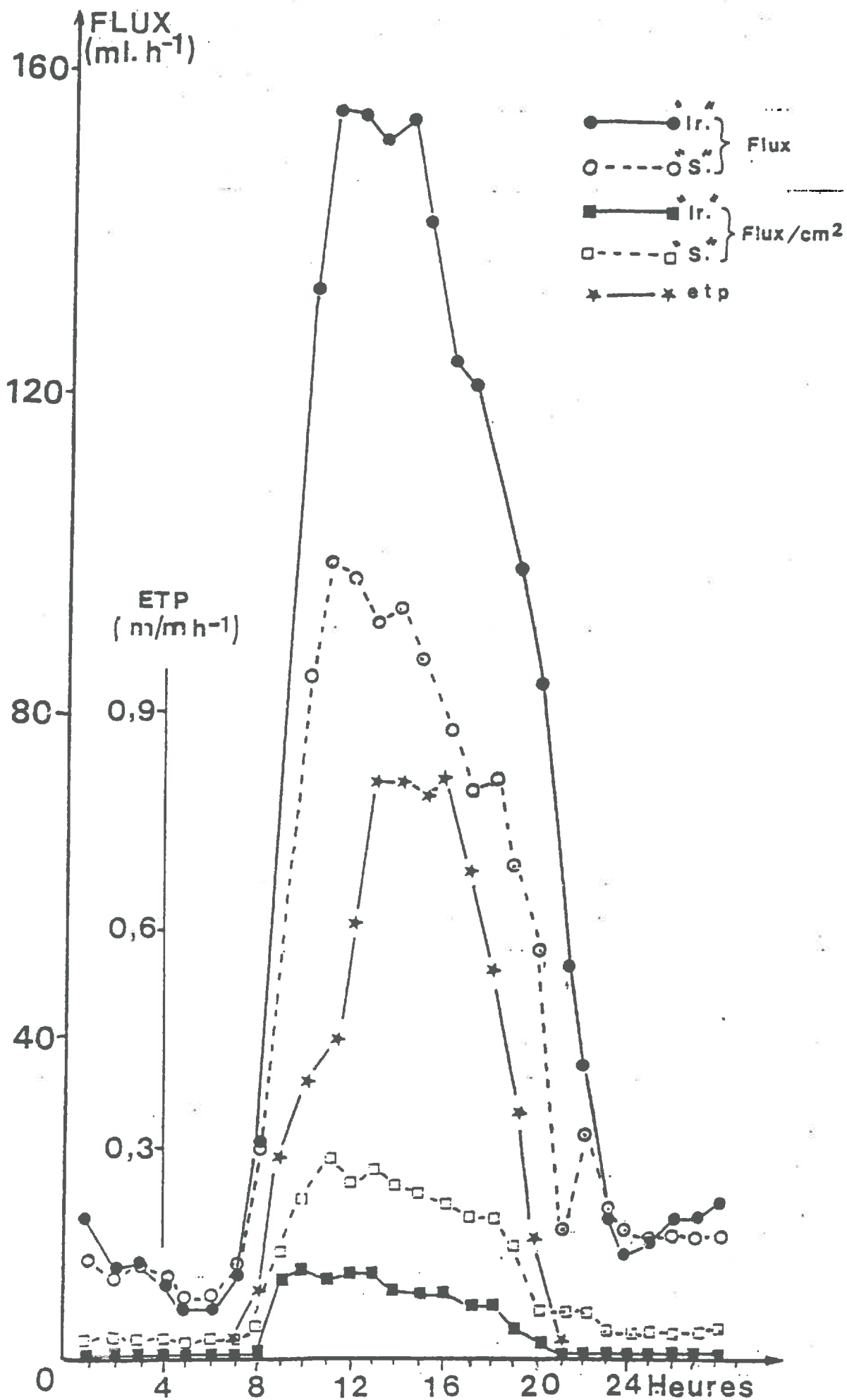


FIG.44 — EVOLUTION DES FLUX ET DES DENSITES DE FLUX RACINAIRES AVANT IRRIGATION

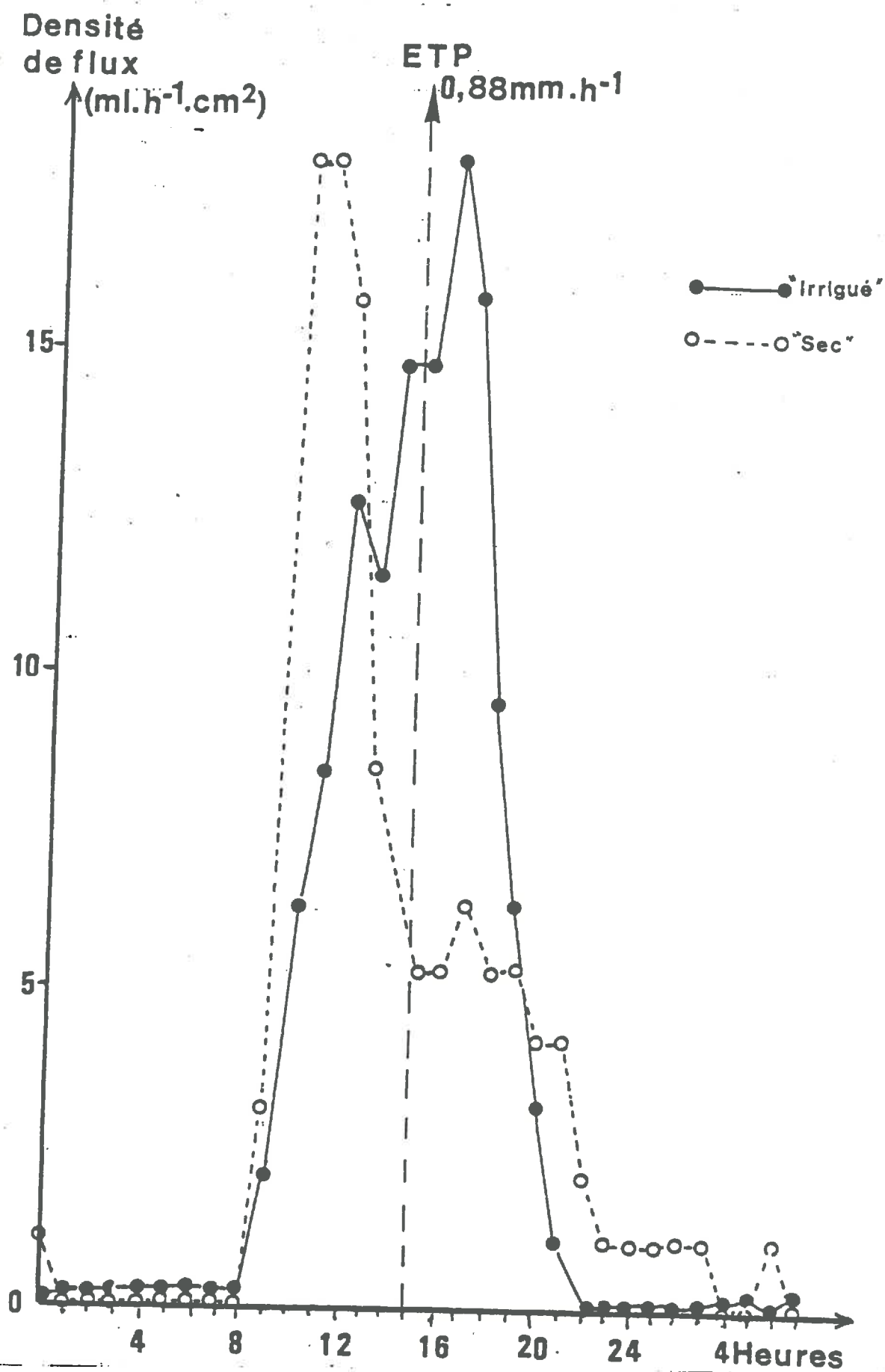


FIG. 45 — CINETIQUE DE DENSITE DE FLUX RACINAIRE (10/8/86)

--- Limite entre secteurs
d'exploration
 ← Direction racinaire

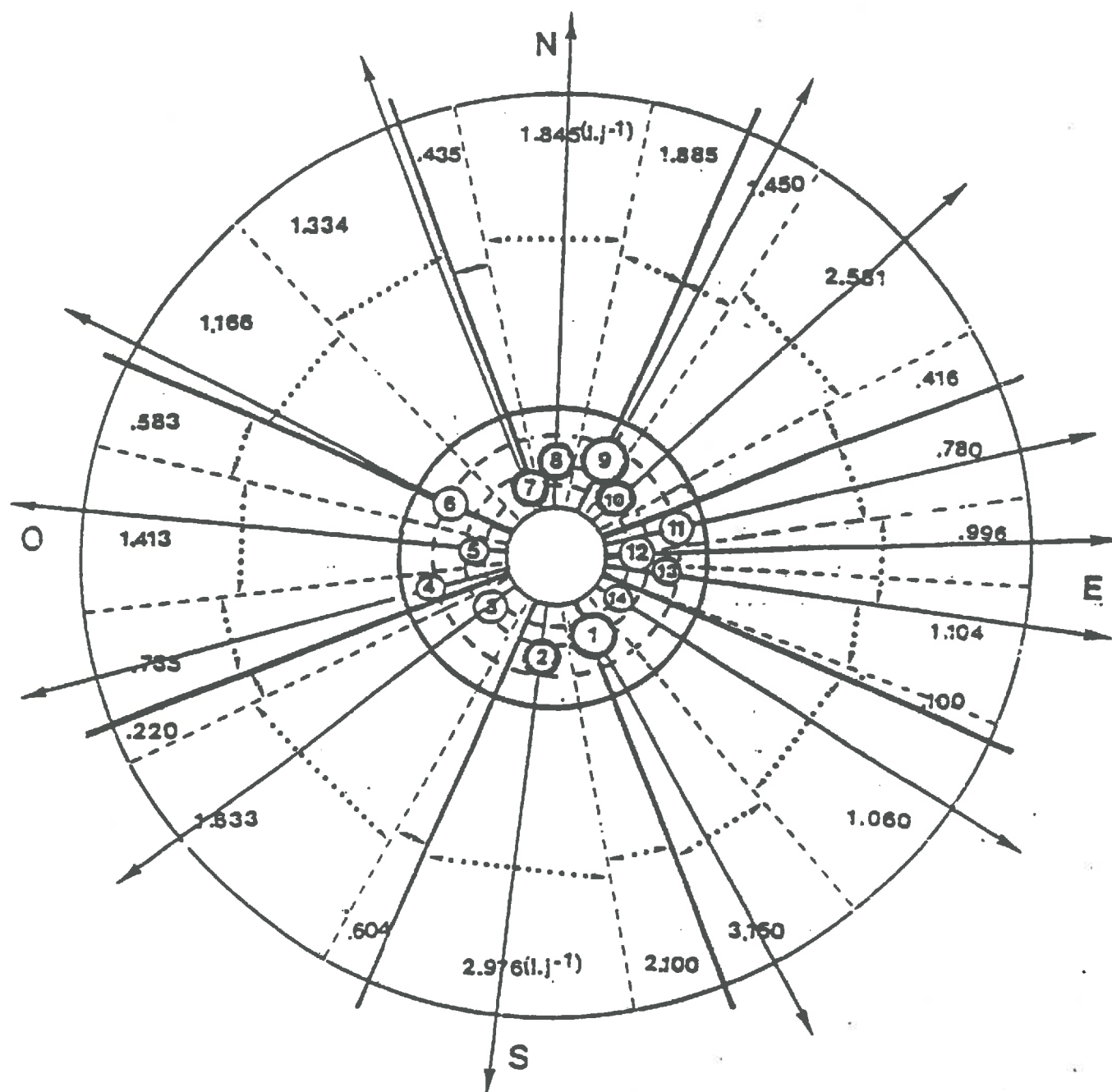
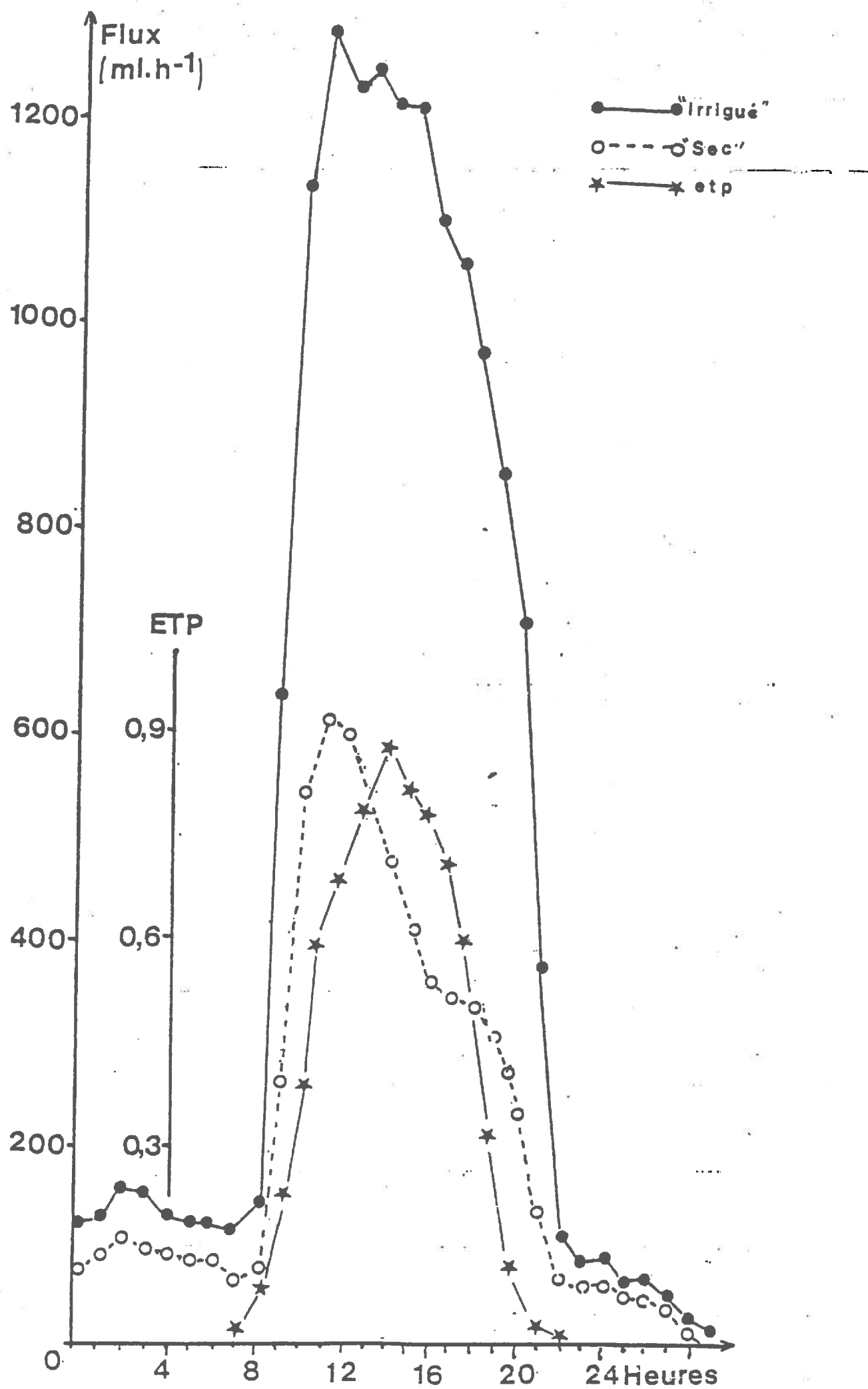


Figure 46 : Estimation pondérée des flux racinaires par secteur de 45°.



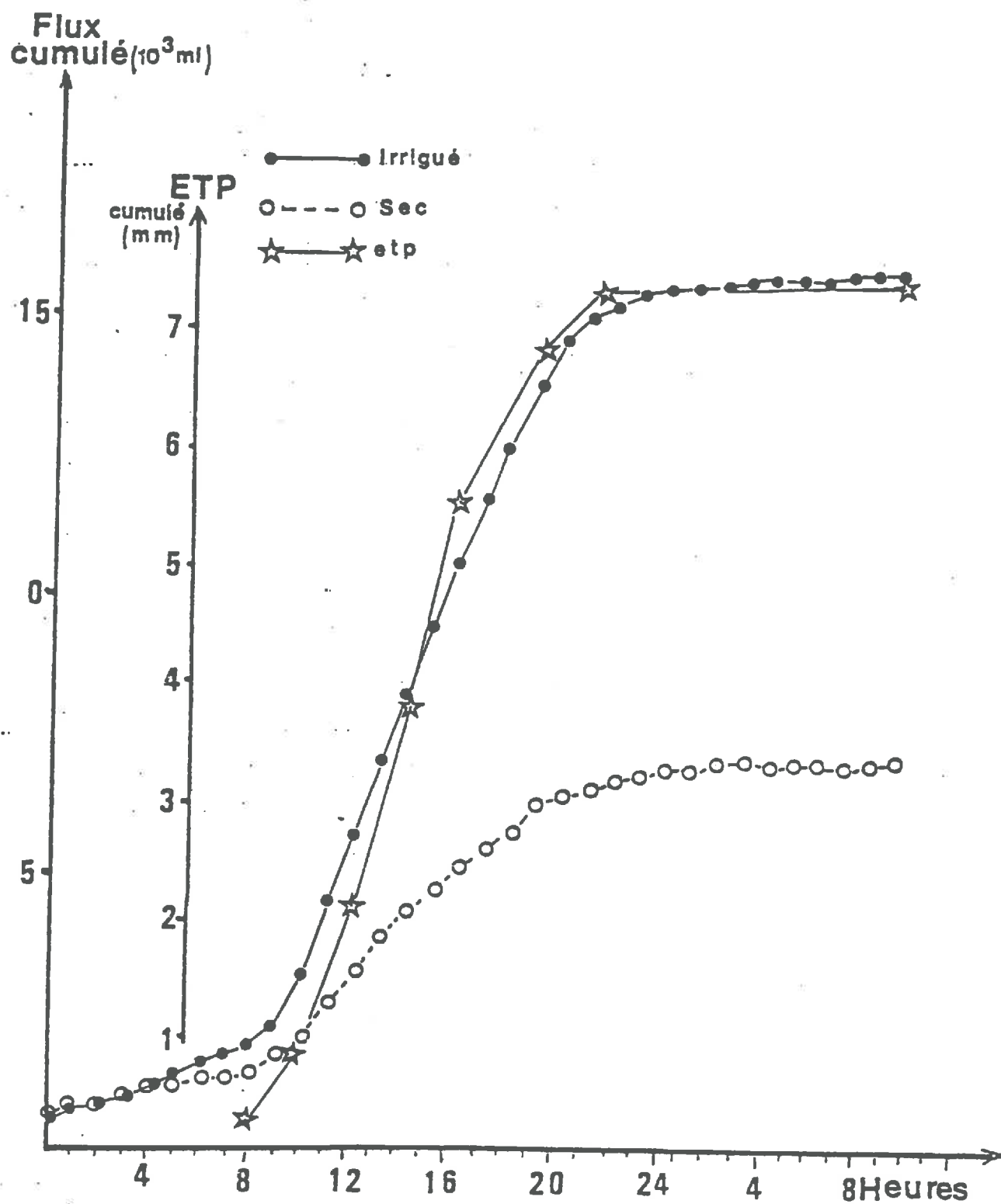


FIG.48 — TRANSPIRATION JOURNALIERE SOUS IRRIGATION

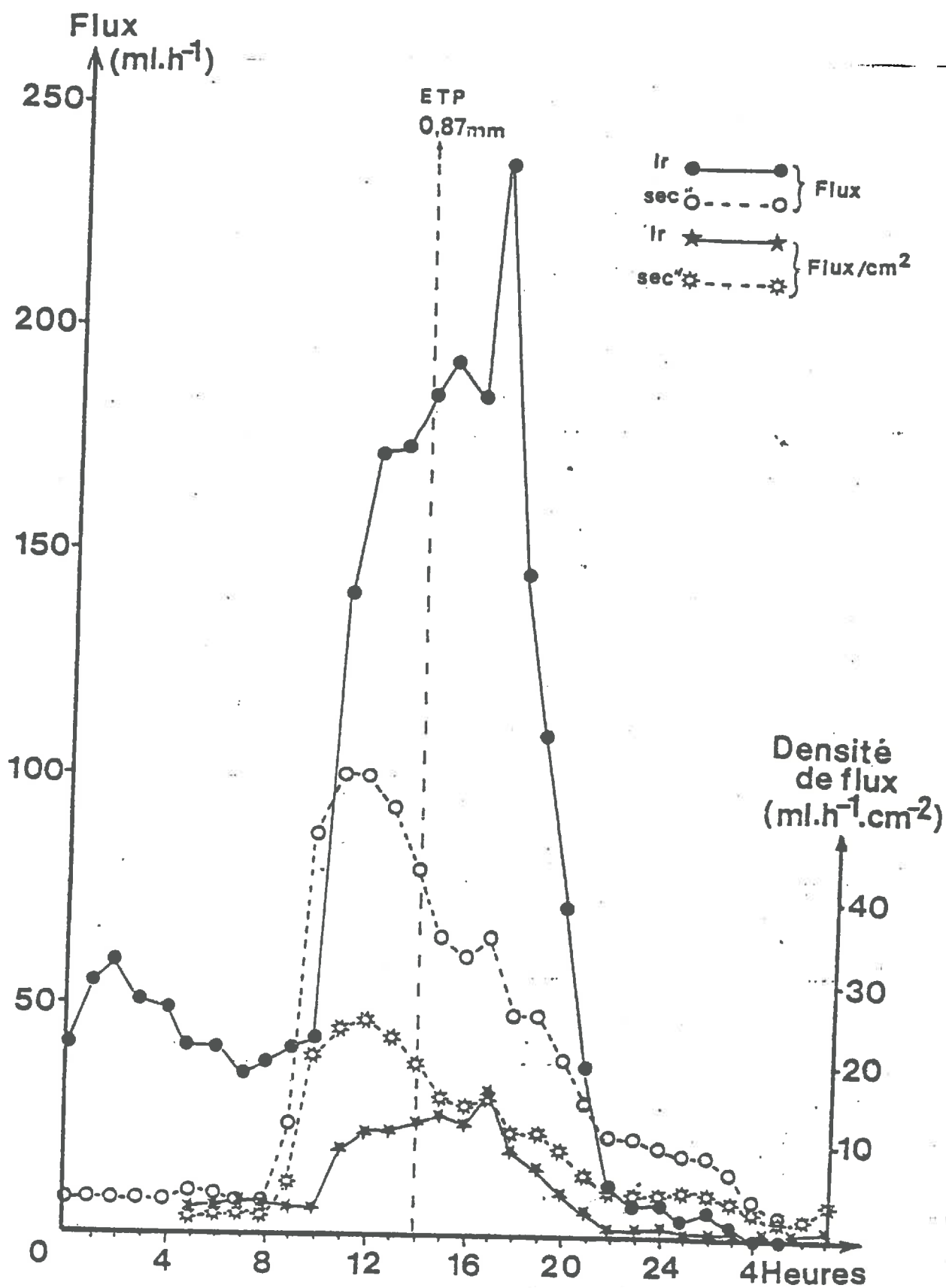


FIG. 49 — EVOLUTION DES DENSITES ET DES FLUX RACINAIRES SOUS IRRIGATION

- sont parfaitement adaptées à l'irrigation localisée quels que soient la culture et le sol, notamment dans les régions où l'économie d'eau constitue une priorité et/ou la main d'oeuvre constitue une ligne budgétaire importante dans la réalisation du prix de revient de la récolte (automatisation totale).

On notera enfin que le couplage des deux méthodes constitue un puissant outil de recherches, tant fondamentales qu'appliquée puisque permettant:

-de décrire et de quantifier les transferts d'eau et le bilan hydrique dans la plante en fonction de la disponibilité de l'eau dans le sol et sous l'effet d'une demande climatique elle même variable (fig.50,51,52 et 53).

-de définir et de quantifier directement la fonction de sortie d'un modèle de fonctionnement racinaire, dans sa composante hydrique.

III CONCLUSIONS

De nombreuses méthodes de contrôle et de pilotage de l'irrigation sont de fait aujourd'hui soit opérationnelles dans des conditions données d'utilisation soit en cours d'élaboration. Chacune de ces méthodes présentent des limitations du fait soit de leurs conditions de mise en oeuvre soit de leur plus ou moins grande spécificité, adaptées quelles sont soit à un type de culture soit à une échelle d'espace, peu d'entre elles prenant encore aujourd'hui la plante comme référence pour le contrôle et le pilotage de l'irrigation. Cette dernière démarche est celle mise en oeuvre au travers des méthodes reposant sur l'analyse des indicateurs physiologiques, sensibles au stress hydrique, et des flux dans la plante comme base de décision en matière d'irrigation.

Il importe donc que l'utilisateur potentiel de ces méthodes de régulation de l'irrigation choisisse celle répondant le mieux aux impératifs qui sont les siens du point de vue:

- de ses propres moyens d'appréhension et d'analyse du bilan hydrique dans le système sol-plante-atmosphère,
- de son échelle spatiale d'application,
- des moyens dont il dispose pour satisfaire la demande d'irrigation définie,
- des impératifs économiques de son entreprise agricole: nature de la culture, objectif de rendement visé, importance relative des composantes du rendement économique (disponibilité en eau, main d'oeuvre, rentabilité du matériel nécessaire ...), plus value attendue.

Le choix de la méthode de contrôle et de pilotage de l'irrigation en fonction des impératifs précédemment cités constitue l'art de l'irrigant.

\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$

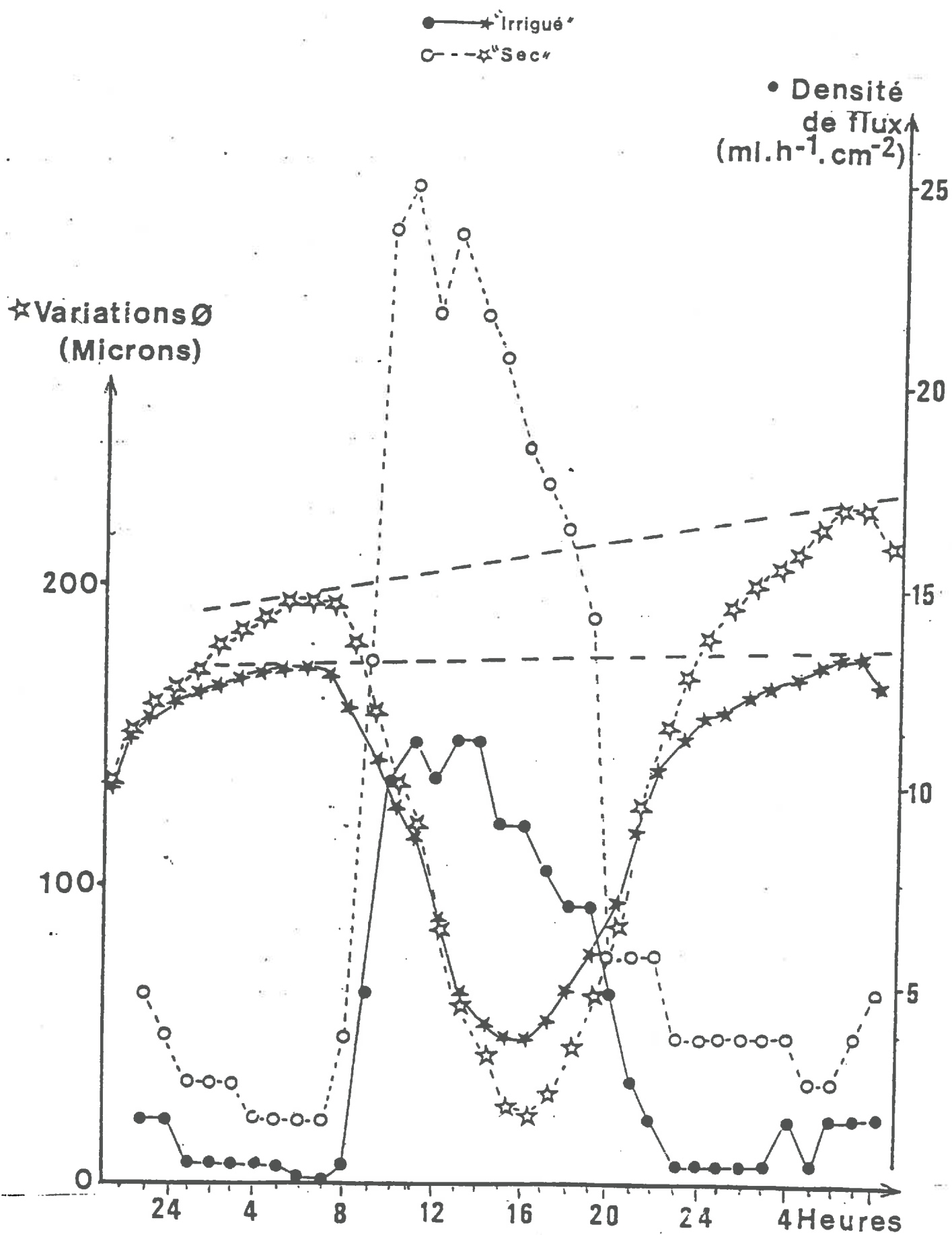


FIG. 50 — VARIATION DE Ø DES RACINES ET DENSITÉ DE FLUX
AVANT IRRIGATION

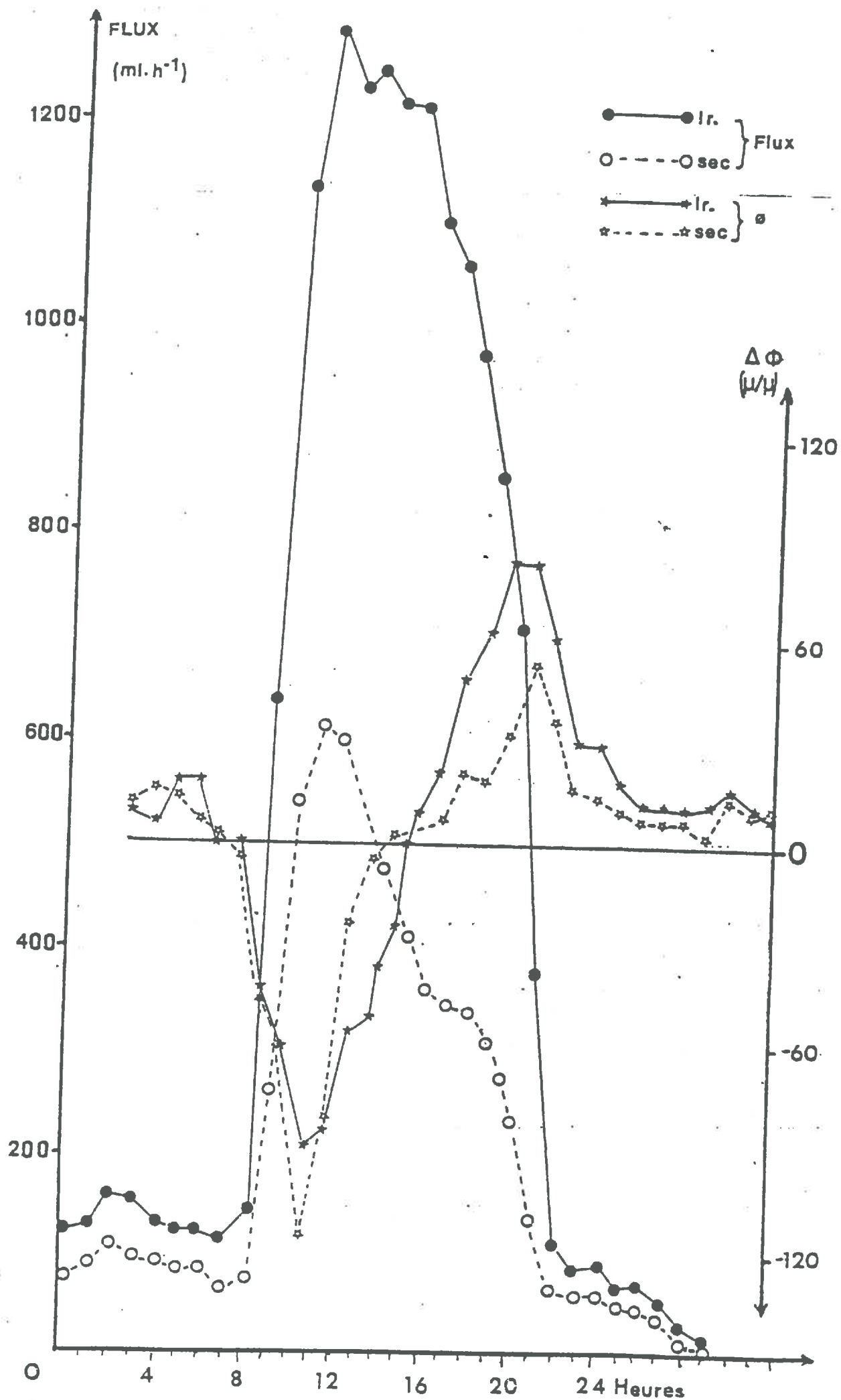
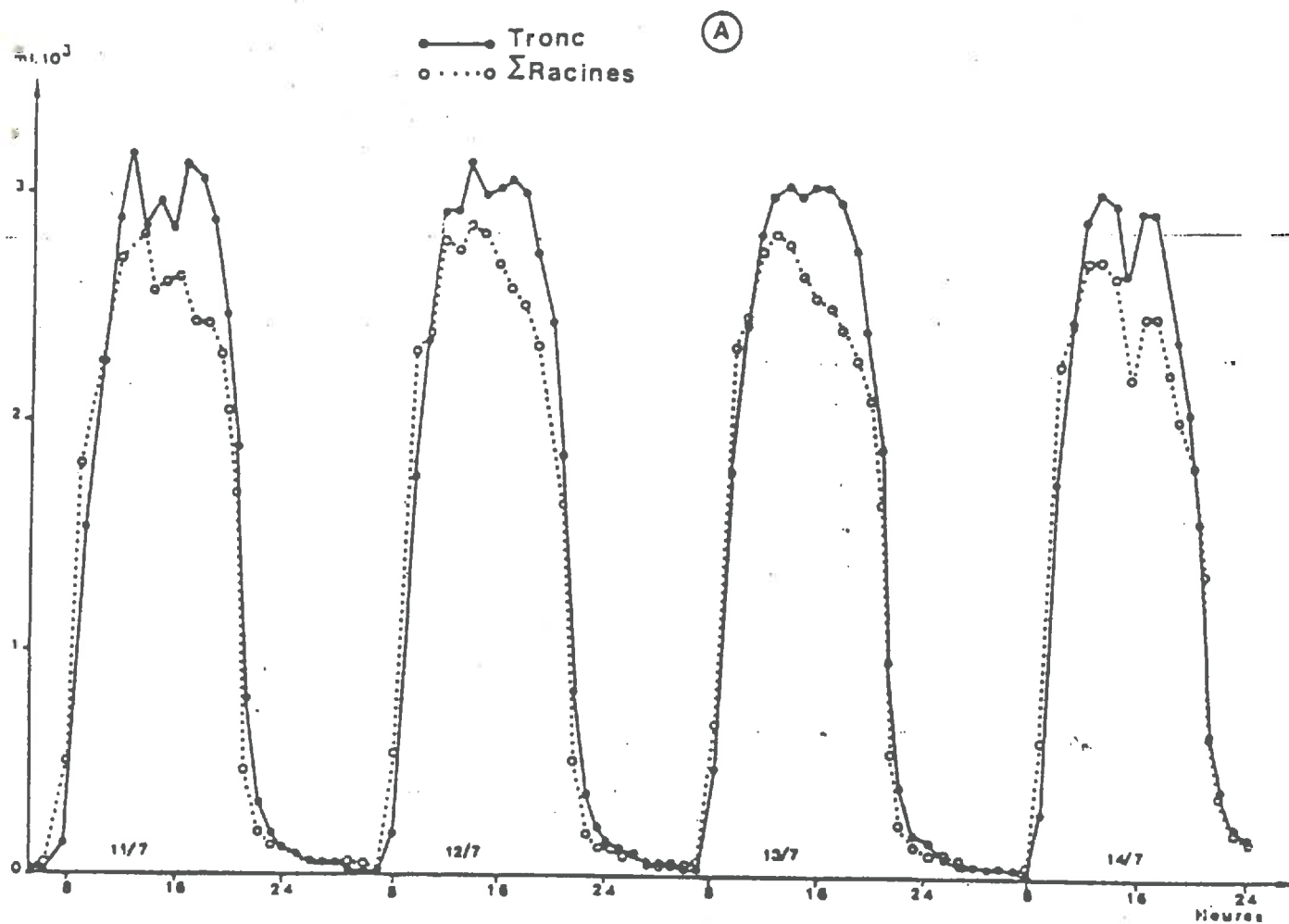
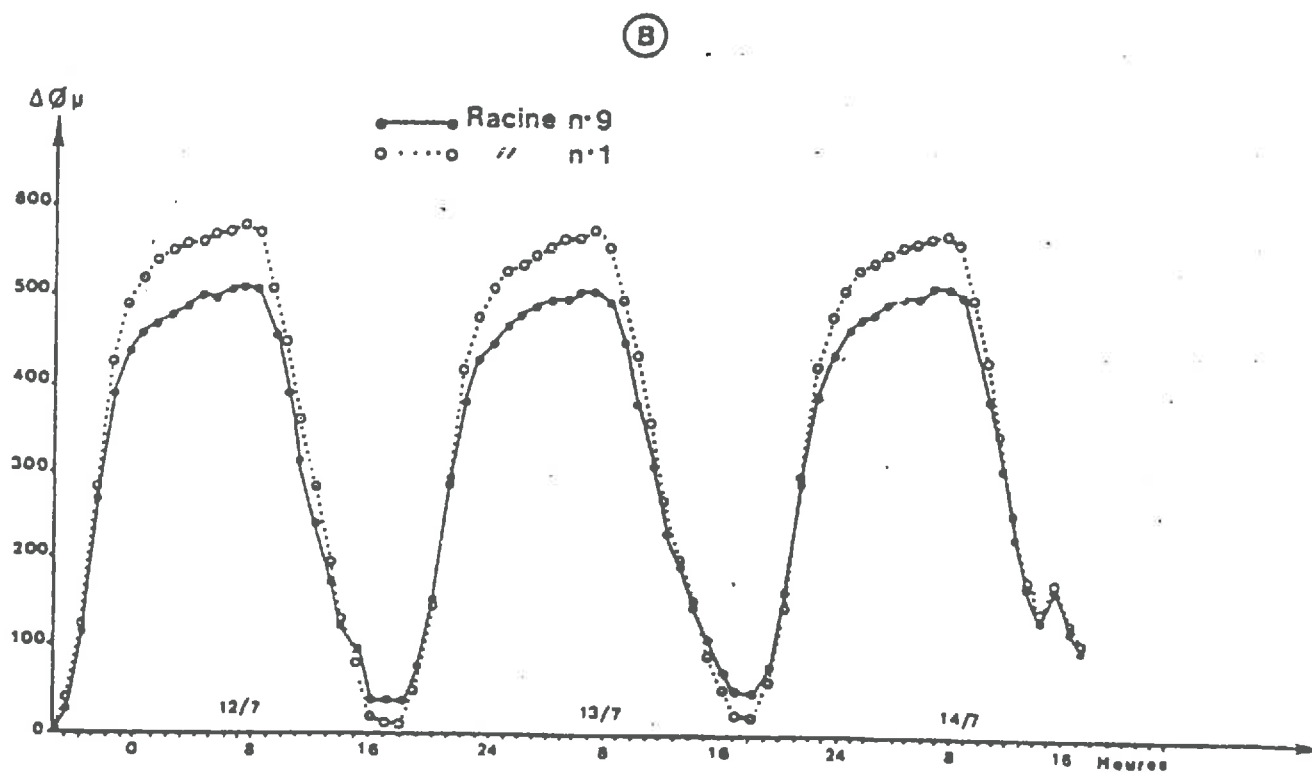
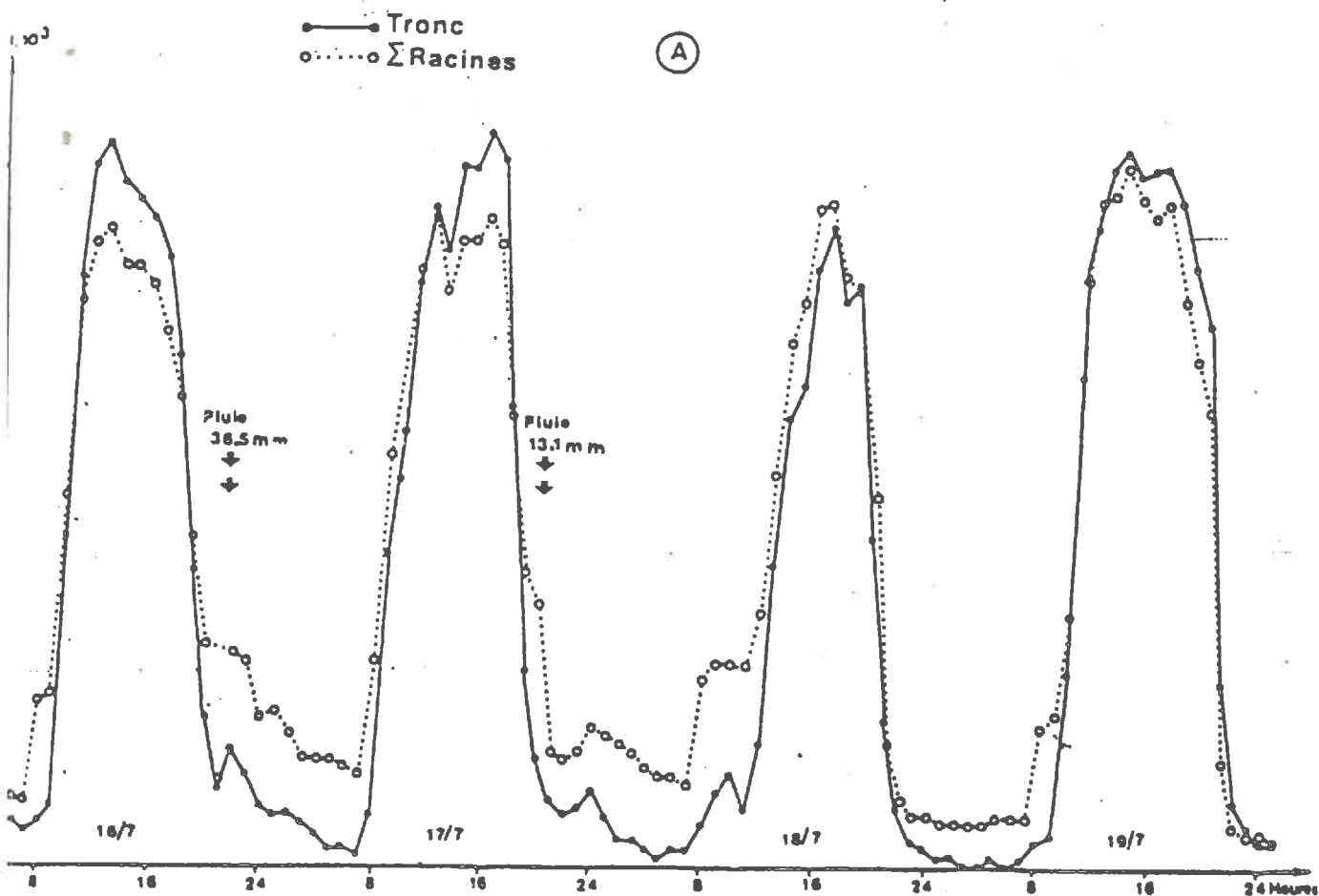


FIG. 51 — VITESSE DE VARIATION RELATIVE A L'ÉPAISSEUR DES COUCHES



Cinétiques des flux (A) et des variations de diamètre (B)
en phase de dessèchement.





Cinétiques des flux (A) et des variations de diamètre (B) en phase de réhumectation.

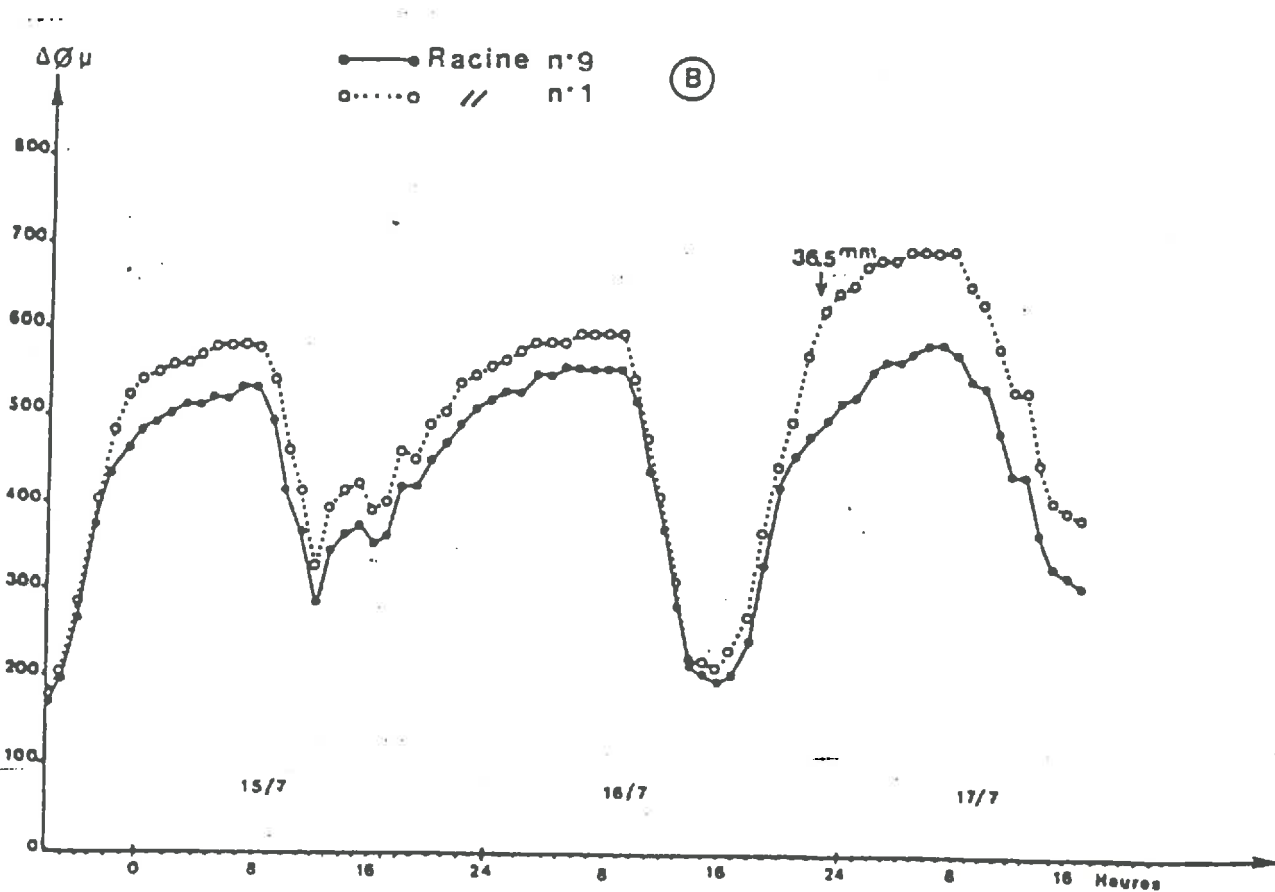


Fig 53