



**HAL**  
open science

## Transfert des nitrates en milieu poreux heterogene. Site experimental: Centre d'etude horticole de Marsillargues (34)

A.M. de Cockborne, Francois Lafolie, B. Cabibel, Pierre Stengel

### ► To cite this version:

A.M. de Cockborne, Francois Lafolie, B. Cabibel, Pierre Stengel. Transfert des nitrates en milieu poreux heterogene. Site experimental: Centre d'etude horticole de Marsillargues (34). 25 p., 1990. hal-02852519

**HAL Id: hal-02852519**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02852519>**

Submitted on 7 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.

256

**TRANSFERT DES NITRATES EN  
MILIEU POREUX HETEROGENE.  
SITE EXPERIMENTAL :  
CENTRE D'ETUDE HOR.TICOLE DE  
MARSILLARGUES (34)**

**Etat d'avancement des travaux 1988**

TRANSFERT DES NITRATES EN MILIEU POREUX HETEROGENE.  
SITE EXPERIMENTAL :  
CENTRE D'ETUDE HORTICOLE DE MARSILLARGUES (34).

ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX 1988.

A.M. de COCKBORNE, F. LAFOLIE, B. CABIBEL, P. STENGEL.

<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL</b>	<b>2</b>
I-) Caractérisation pédologique du site de Marsillargues	2
II-) Aquifères du site de Marsillargues	2
III-) Périmètre expérimental de Marsillargues	3
IV-) Etude au laboratoire	5
V-) Périmètre expérimental de Fréjorgue.	
<b>PRESENTATION DES RESULTATS</b>	<b>8</b>
I-) Expérimentation au terrain	9
II-) Approche modélisation	13
<b>CONCLUSION</b>	<b>21</b>
<b>PERSPECTIVES</b>	<b>23</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>24</b>

## RESUME

Le site expérimental de cette étude est localisé dans une parcelle (verger de pommiers) du C.E.H.M. En ce qui concerne l'I.N.R.A. (Science de Sol, Avignon), l'étude comporte un aspect *expérimentation terrain* et une approche par *modélisation*, l'objectif de ces 2 approches étant la validation du modèle avec possibilité de simuler les flux de nitrate entraînés vers la nappes.

Pour l'*expérimentation de terrain* conduite de Février à fin Aout 1988 nous avons :

- suivi le déplacement des nitrates et l'état hydrique du sol entre 0 et 2 m de profondeur;

- estimé les quantités d'eau prélevées par l'arbre dans le sol sous l'effet d'une contrainte climatique.

Pour l'*approche modélisation* nous disposons d'un modèle de transferts de solutés en milieu poreux hétérogène qui décompose la partie aqueuse en deux phases, une phase mobile et une phase immobile. Ce modèle prend également en compte la fonction puits ou source. Le calage de ce modèle nécessite la détermination expérimentale d'un certain nombre de paramètres de transferts (coefficient de diffusion, courbes d'élution...). Les premières simulations réalisées donnent des résultats en accord avec l'expérimentation.

## LISTES DES FIGURES.

- Figure 1. Plan du domaine expérimental de MARSILLARGUES.
- Figure 2. Emplacement des postes de mesures sur la parcelle expérimentale du C.E.H.M. (GLEMARECK, 1988)
- Figure 3. Plan de prélèvement de sol pour la détermination de la teneur en nitrate avant fertilisation (3/2/88).
- Figure 4. Conductivité hydraulique (m/s) en fonction de la teneur en eau (0-60 m).
- Figure 5. Profil nitrate (Fréjorgue).
- Figure 6. Profil de la teneur en nitrate.
- Figure 7. Profil d'humidité.
- Figure 8. Profil de densité.
- Figure 9. Influence sur la cinétique des flux.
- Figure 10. Effet de l'irrigation sur le flux cumulé.
- Figure 11. Courbe de retrait, horizon 0-60 cm.
- Figure 12. Courbes d'élution nitrate (3 vitesses  $U_{ns}$  cm/h)
- Figure 13. Courbes de lessivage (L1) pour le nitrate à différentes vitesses ( $U_{ns}$  cm/h).
- Figure 14. Comparaison des courbes d'élution mesurées et simulées pour trois débits différents.

## LISTE DES TABLEAUX.

Tableau 1. Caractéristiques du sol de la parcelle expérimentale de MARSILLARGUES.

Tableau 2. Caractéristiques du sol de la parcelle où ont été prélevés les monolithe.

Tableau 3. Coefficient de variation des diverses distributions. (Y. LINDEMAN, 1986).

Tableau 4. Profils de porosité structurale à différentes époques de l'année (S 1 = site 1, S 2 = site 2).

Tableau 5. Teneur en NITRATE et en CHLORURE du sol entre 4,80 et 6,30 m de profondeur.

Tableau 6. Les paramètres de densité et les valeurs de porosité des monolithes. La valeur de densité texturale est donnée pour le sol à la capacité de rétention.

Tableau 7. Caractéristiques physiques du monolithe 1, du niveau 0-60 cm.

Tableau 8. Conditions expérimentales pour le monolithe 1.

Tableau 9. Ensemble des résultats obtenus pour le monolithe 1 (niveau 0-60 cm).

## INTRODUCTION

Cette étude pluridisciplinaire qui réunit :  
le C.H.E.M., le C.E.M.A.G.R.E.F.;, l'E.N.G.R.E.F., l'I.N.R.A.,  
le S.A.R.E. Languedoc Roussillon et l'U.S.T.L., a été engagée  
suite aux problèmes posés par la pollution NITRATE de  
l'aquifère dans la plaine de Mauguio-Lunel et de Marsillargues  
(Hérault).

En matière de pollution de l'aquifère on rencontre deux  
types d'émission :

-L'émission localisée, aisément décelable et mesurable,  
qui est essentiellement due aux rejets d'eaux usées des  
collectivités et des industries.

-L'émission diffuse, plus difficile à appréhender et à  
éliminer, qui résulte bien souvent des pratiques culturales,  
et de l'épandage des matières fertilisantes. C'est à ce type  
de pollution que semble se rattacher celle de l'aquifère qui  
fait l'objet de ce travail. Cependant, cela ne pourra être  
confirmé qu'après détermination du  $\delta^{15}\text{N}$ ; détermination qui  
devrait être faite par l'I.N.R.A. au court de l'année 1989.

Dans ce programme de recherches la charge qui nous a  
incombée, concerne le transfert de l'ion NITRATE dans la zone  
non saturée, zone exploitée par le système racinaire. Notre  
périmètre expérimental est implanté à MARSILLARGUES au  
C.H.E.M., et notre étude comporte deux volets :

-Une expérimentation au terrain;

-Une approche par modélisation.

L'objectif commun de ces deux approches est d'aboutir à la  
validation du modèle avec la possibilité de simuler les flux  
de NITRATE entraînés vers la nappe en fonction des  
contraintes climatiques (excès ou aspect hydrique,  
irrigation, méthodes de fertilisation).

Dans ce qui suit, nous présenterons les premiers résultats  
obtenus.



# PROFONDEUR DE CALCAIRE

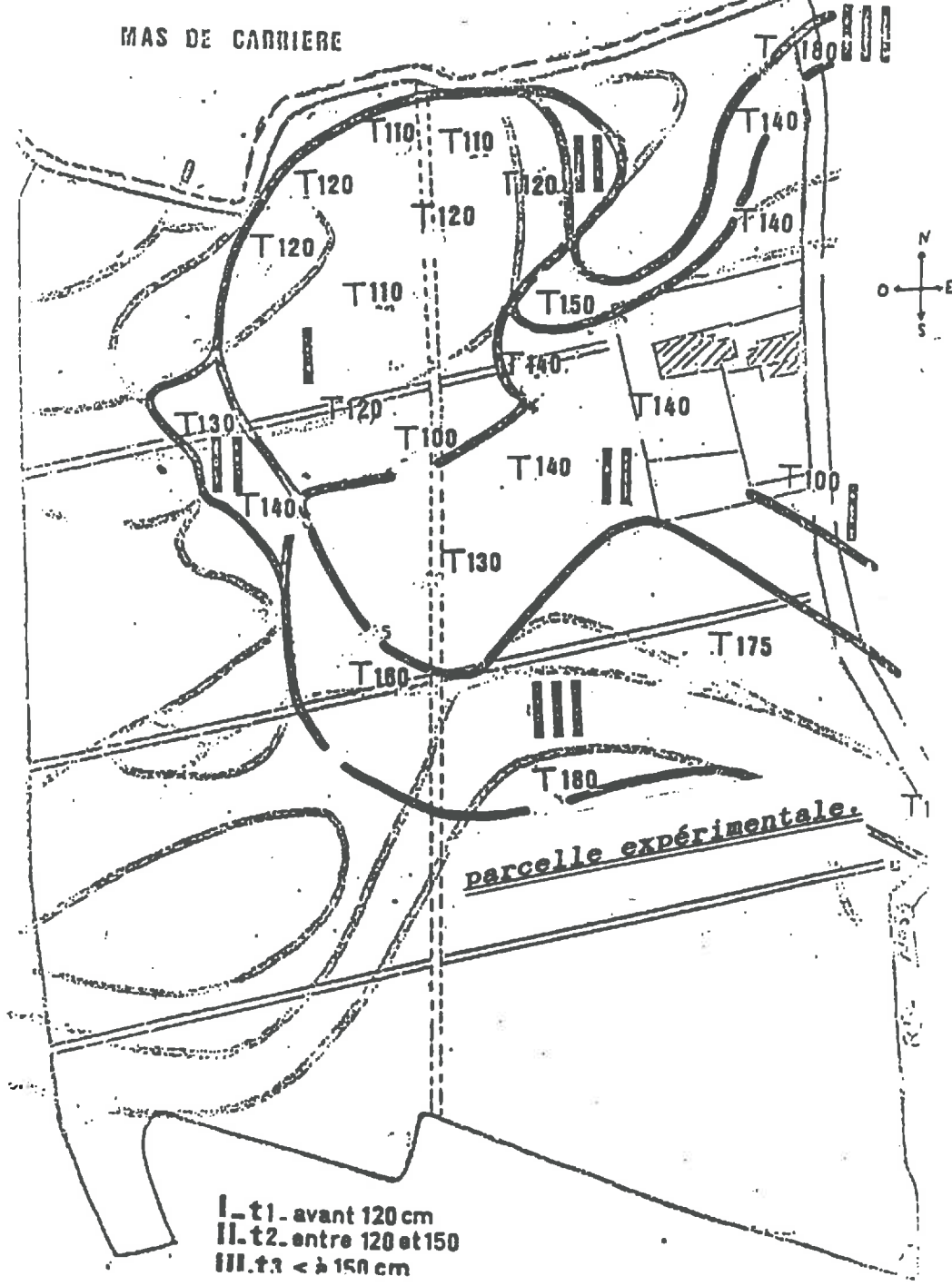


Figure 1. Plan du domaine expérimental de MARSILLARGUES.

## **PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.**

### **I-) CARACTERISTIQUES PEDOLOGIQUE DU SITE DE MARSILLARGUES.**

En 1980, un inventaire des sols du C.H.E.M. a été réalisé par l'I.N.R.A. (BOURLET, 1980). Les résultats de cette analyse montrent que ce sol est constitué :

-En surface, d'alluvions récentes d'origine fluviale (Vidourle), exemptes d'éléments supérieurs à 2 mm., de couleur brun olivâtre clair où prédominent les limons. L'épaisseur de cette couche varie suivant les endroits de 40 à 120 cm.

-En profondeur, un substratum d'alluvions anciennes renfermant de nombreux fossiles coquilliers et localement des éléments de recarbonatation. Ce matériau de couleur gris foncé à brun grisâtre est principalement constitué d'argiles et de limons fins.

-Entre les alluvions récentes et le substratum existe un horizon d'épaisseur variable et de texture intermédiaire entre les deux dépôts. Cet horizon résulte probablement d'un remaniement au contact des deux dépôts.

-Sous le substratum est quelquefois présent un paléosol formant une cuirasse calcaire plus ou moins épaisse. La couleur de celui-ci va du brun très pâle au jaunâtre. Il est presque toujours accompagné de sables limoneux de couleur jaune rougeâtre et dépourvu d'éléments grossiers (<2mm.).

### **II-) AQUIFERES DU SITE DE MARSILLARGUES.**

Ce site présente deux aquifères.

-Une nappe perchée dont le niveau varie en fonction de la saison entre 0,5 et 2,5 à 3,0 m environ. Une teneur en nitrate de 64 mg/l a été relevée au cours du mois de Février et de 40 à 200 mg/l suivant les piézomètres au cours du mois

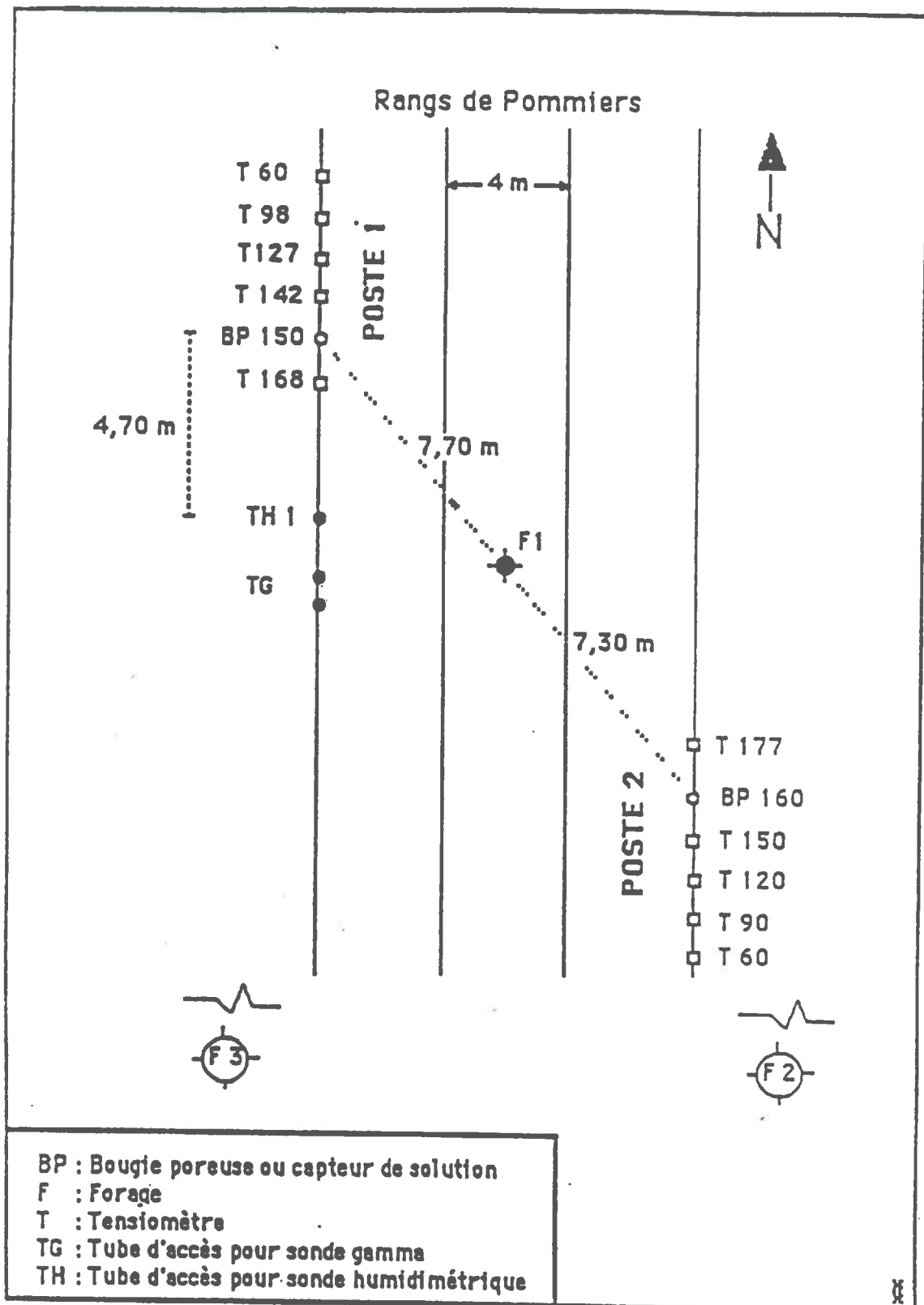


Figure 2. Emplacement des postes de mesures sur la parcelle expérimentale du C.E.H.M. (GLEMARECK, 1988)

de Juin pour l'année 1988, alors qu'elle n'était que de 20 mg/l en Octobre 1987 (QUASH, 1988).

-Le niveau de la nappe villafranchienne se situe aux environs de 10 m de profondeur et sa concentration en nitrate est relativement constante dans le temps ( $\approx 27$  mg/l) (QUASH, 1988).

### III-) PERIMETRE EXPERIMENTAL DE MARSILLARGUES.

Il s'agit d'un verger de pommiers adultes d'une superficie de 3,5 hectares (figure 1). La plantation a été réalisée en 1981 suivant une densité de 4x1,5 m, et avec 3 combinaisons portes greffes/variétés :

Akane/M26  
Smoothee/M9  
Starkrimson/MM109

L'irrigation se fait sur frondaison par aspersion, la fertilisation et le desherbage en bande sur le rang. Entre rangs le sol est enherbé.

#### III<sub>1</sub>-) Equipement de la parcelle.

Compte tenu de l'objectif de l'étude, il a été mis en place :

-Par l'E.N.G.R.E.F. et l'I.N.R.A. au niveau du sol dans la zone non saturée (figure 2) :

\*pour le suivi hydrique, des tensiomètres à différentes profondeurs, des tubes de sonde à neutrons;

\*pour la détermination de la densité du sol en place, des tubes de sonde à transmission gamma;

\*pour le suivi des nitrates, des capteurs de solution.

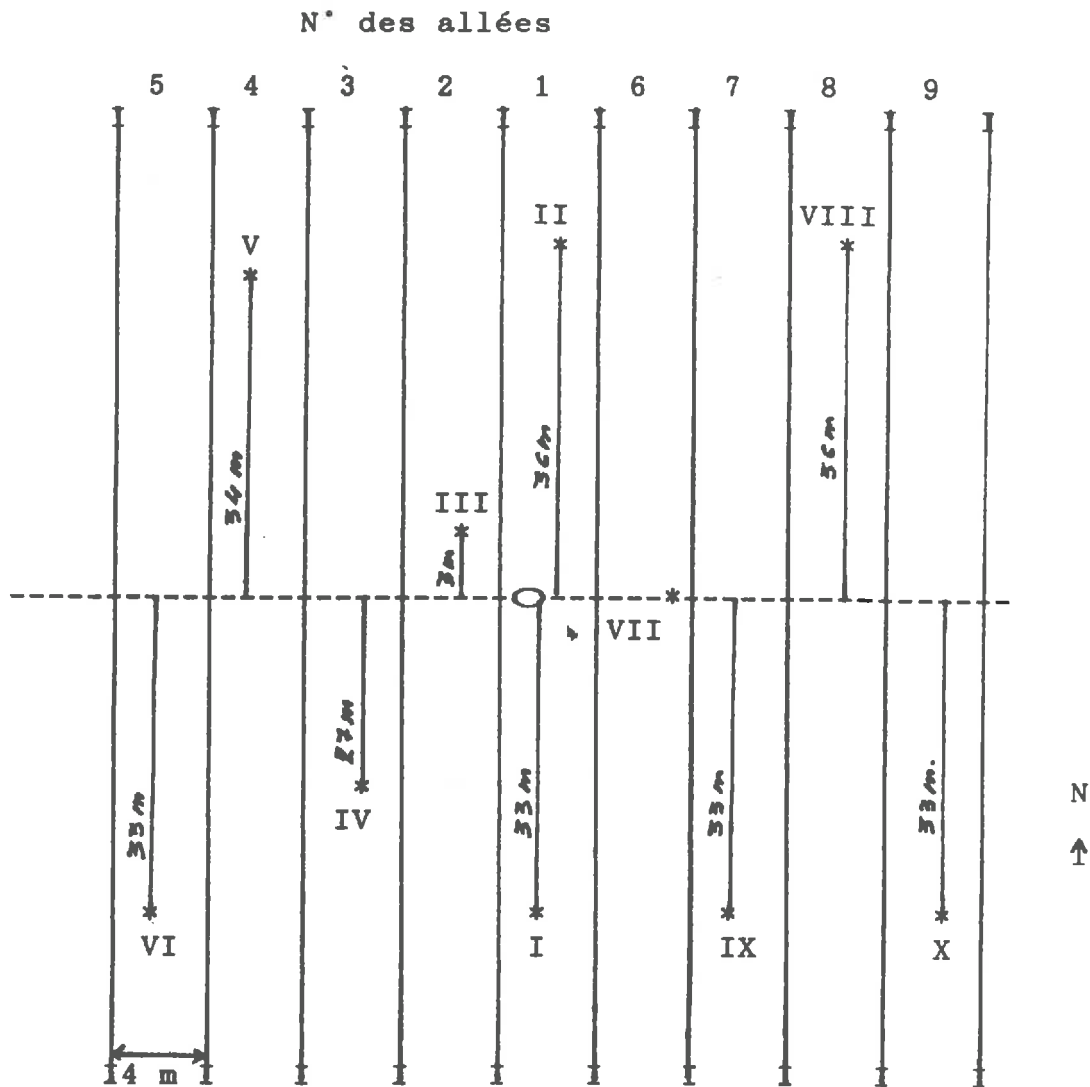
-Par l'I.N.R.A., au niveau des arbres, des fluxmètres, au nombre de 10, à raison de 1 par arbre, afin de suivre les quantités d'eau prélevées par l'arbre dans le sol sous l'effet d'une contrainte climatique. Les mesures de flux sont effectuées par voie thermique (GRANIER, 1985; DO, 1986). Les paramètres mesurés globalement au niveau du tronc de l'arbre concernent l'estimation de la fonction puits racinaire pour l'eau et de sa cinétique dans le temps (CABIBEL, 1987; CABIBEL et DO, 1987; DO, 1987) en fonction de l'état hydrique du sol, de la contrainte climatique et de leurs variations.

-Par l'U.S.T.L. des piézomètres pour suivre l'hydrodynamique souterraine et l'hydrochimie des zones saturées.

#### III<sub>2</sub>-) Suivi des nitrates au niveau de la parcelle.

Le calendrier des fertilisations a été le suivant :

DATE	FORME	Unité N/ha
16/02/88	phosphate d'ammoniaque	80
25/05/88	ammonitrate	30
4/07/88	ammonitrate	30



Parcelle expérimentale 44x130 m

○ : piézomètre central

\* : prélèvements de sol pour la mesure de  $N-NO_3^-$

Figure 3. Plan de prélèvement de sol pour la détermination de la teneur en nitrate avant fertilisation (3/02/88).

-Mesures avant la première fertilisation (3/02/88).

Dans ce cas le périmètre expérimental a été réduit à 0,5 ha positionné dans l'environnement du piézomètre central (figure 3), ce qui englobe 10 rangs de pommiers. Nous avons réalisé 10 prélèvements de sol suivant un pas de 20 cm jusqu'à 1m de profondeur, puis suivant un pas de 30 cm jusqu'à 1,90 m. A partir de ces 10 prélèvements un échantillon moyen a été constitué par niveau, à l'exception de la tranche 40-60 cm, où les 10 prélèvements ont été analysés individuellement pour la teneur en nitrate, l'objectif étant d'évaluer l'ordre de grandeur de la variabilité de répartition de cet ion. Par ailleurs, sur l'échantillon moyen du niveau 20-40 cm nous avons contrôlé l'homogénéité de notre mélange. Pour ce faire, après homogénéisation des 10 prélèvements nous avons récupéré 8 échantillons sur lesquels a été mesurée la teneur en nitrate. La valeur moyenne obtenue, exprimée en mg de  $\text{NO}_3^-$  par litre de la solution du sol, a été de  $103 \pm 10$  avec un coefficient de variation de 9,7 %. Cette valeur peut-être considérée comme satisfaisante compte tenu de la texture limono-argileux du sol et de son humidité élevée (capacité de rétention et au delà).

Sur les échantillons de sol, outre la teneur en nitrate et l'humidité pondérale, ont été déterminés : l'azote kjeldahl, le pH, le calcaire actif et total, la capacité d'échange, les éléments échangeables et la composition granulométrique. L'ensemble de ces résultats est donné au tableau 1.

-Mesures après fertilisation.

En ce qui concerne la fertilisation du 16/02/88, une mini-parcelle de 12x12 m, positionnée autour du piézomètre central, a reçu 320 kg N/ha sous forme d'ammonitrate et une irrigation de 700 mm apportés par aspersion. Le but de cet apport massif d'eau et de nitrate, était de vérifier une apparition éventuelle du pulse nitrate dans la nappe villafranchienne (QUASH, 1988).

Quinze jours après cet épandage nous avons contrôlé, le déplacement du front de nitrate. Pour les prélèvements nous avons procédé de la même manière qu'avant fertilisation, la différence s'est située dans le nombre de prélèvements qui dans le cas présent a été de 4.

Par la suite, ont été faits le 22/06/88 et le 30/08/88 des profils de concentration nitrate. Ces prélèvements ont été effectués au voisinage des sites 1 et 2 (à une distance d'environ 50 cm), où se trouvent implantés des capteurs de solution par l'E.N.G.R.E.F. (figure 2). Il est à signaler, qu'aux deux sites ne sont pas associés les mêmes couples de variétés/porte-greffes. Pour le site 1 nous avons SMOOTHEN/M 9, pour le site 2 il s'agit de STARKRIMSON/MM 109.

Dans le même temps nous avons en collaboration avec l'U.S.T.L. tenté d'explorer la zone de sol entre 2 et 8 m. de profondeur. L'objectif était de vérifier s'il n'y avait pas une accumulation de nitrates dans cette zone.

Dans tous les cas la teneur en nitrate a été déterminée à l'électrode spécifique nitrate (de COCKBORNE, 1987).

profond. cm	A	B	C	D	E	F	G	H
GRANULOMETRIE SANS DECALCIFICATION EN %								
argile	31,4	31,2	29,7	29,6	35,1	44,7	40,4	29,2
limon fin	47,4	47,0	45,5	49,0	47,2	47,9	35,6	30,5
limon gros.	18,1	18,8	21,4	19,4	15,6	5,2	13,5	13,6
sable fin	2,3	2,4	3,1	1,7	1,7	1,3	5,3	9,2
sable gros.	0,8	0,6	0,3	0,3	0,4	0,9	5,2	17,5
GRANULOMETRIE AVEC DECALCIFICATION EN %								
argile	28,9	26,0	25,4	25,8	31,3	41,6	47,0	36,0
limon fin	20,8	20,6	20,1	20,8	19,8	21,2	20,4	15,5
limon gros.	7,4	9,4	9,4	8,1	6,2	1,8	11,6	11,3
sable fin	0,9	0,9	1,1	0,7	0,7	0,1	4,0	5,8
sable gros.	0,3	0,4	0,2	0,0	0,3	0,1	3,0	3,7
C orga. %	1,16	0,96	0,70	0,52	0,53	0,72	0,89	0,59
M.O. %	1,99	1,65	1,20	0,89	0,91	1,23	1,53	1,01
N kjeldahl ‰	1,21	1,04	0,79	0,58	0,63	0,89	1,06	0,70
<u>C orga.</u>	9,58	9,23	8,86	8,96	8,41	8,08	8,39	8,42
<u>N kjeldahl</u>								
pH eau	8,3	8,3	8,4	8,4	8,3	8,2	8,2	8,2
pH KCl 0,1 N	7,4	7,4	7,5	7,5	7,5	7,4	7,3	7,4
pH KCl 1,0 N	7,4	7,3	7,4	7,4	7,4	7,3	7,2	7,3
CaCO <sub>3</sub> total %	41,7	42,7	43,8	44,6	41,7	35,2	14,0	27,7
CaCO <sub>3</sub> actif %	11,0	12,5	12,0	12,0	13,5	13,5	5,5	6,0
C.E. méq/100 g	13,5	13,1	11,9	11,2	12,5	16,4	21,9	15,7
ELEMENTS ECHANGEABLES méq/100 g								
	A	B	C	D	E	F	G	H
Ca <sup>++</sup>	40,10	41,00	41,40	41,00	43,00	48,50	48,50	43,20
Mg <sup>++</sup>	2,70	1,96	1,98	2,45	2,88	3,39	3,40	2,36
K <sup>+</sup>	0,72	0,42	0,33	0,30	0,29	0,35	0,59	0,58
Na <sup>+</sup>	0,08	0,11	0,13	0,19	0,25	0,35	0,42	0,30
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

profondeurs de prélèvement.

A = 0-20 cm

D = 60-80 cm

G = 130-160 cm

B = 20-40 cm

E = 80-100 cm

H = 160-190 cm

C = 40-60 cm

F = 100-130 cm

Tableau 1. Caractéristiques du sol de la parcelle expérimentale de MARSILLARGUES.

profond. cm	A	B	C	D	E	F
GRANULOMETRIE SANS DECALCIFICATION EN %						
argile	33,9	33,8	34,5	32,5	29,9	41,1
limon fin	47,6	47,9	47,5	50,1	43,5	47,1
limon gros.	15,5	15,2	15,0	15,7	20,0	9,1
sable fin	2,5	2,4	2,5	1,6	5,9	1,9
sable gros.	0,5	0,7	0,5	0,1	0,5	0,8
GRANULOMETRIE APRES DECALCIFICATION EN %						
argile	30,7	30,9	28,0	26,8	25,1	33,2
limon fin	20,8	20,6	24,0	22,3	18,2	19,5
limon gros.	7,0	6,8	6,7	7,9	11,3	5,9
sable fin	0,9	1,0	0,9	0,6	2,7	0,6
sable gros.	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1
C orga. %	1,02	1,11	0,98	0,55	0,50	0,63
M.O. %	1,75	1,90	1,68	0,94	0,86	1,08
N kjeldahl %	1,11	1,16	1,11	0,65	0,58	0,77
<u>C orga.</u> N kjeldahl	9,18	9,56	8,82	8,46	8,62	8,18
pH eau	8,3	8,3	8,4	8,3	8,4	8,3
pH KCl 0,1 N	7,5	7,4	7,5	7,5	7,5	7,4
pH KCl 1,0 N	7,4	7,4	7,4	7,4	7,5	7,4
CaCO <sub>3</sub> total %	40,4	40,4	40,4	42,4	42,7	40,7
CaCO <sub>3</sub> actif %	12,5	11,0	11,5	12,0	10,5	14,0
C.E. méq/100 g	14,7	14,9	14,7	12,1	11,5	14,5
ELEMENTS ECHANGEABLES méq/100 g						
Ca <sup>++</sup>	42,90	42,80	43,00	41,10	40,60	46,50
Mg <sup>++</sup>	2,22	2,19	2,41	2,86	2,78	3,34
K <sup>+</sup>	0,48	0,57	0,44	0,29	0,28	0,32
Na <sup>+</sup>	0,11	0,12	0,12	0,22	0,25	0,31
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
profondeurs de prélèvement.						
A = 0-20 cm	D = 60-80 cm					
B = 20-40 cm	E = 80-100 cm					
C = 40-60 cm	F = 100-130 cm					

Tableau 2. Caractéristiques du sol de la parcelle où ont été prélevés les monolithes.



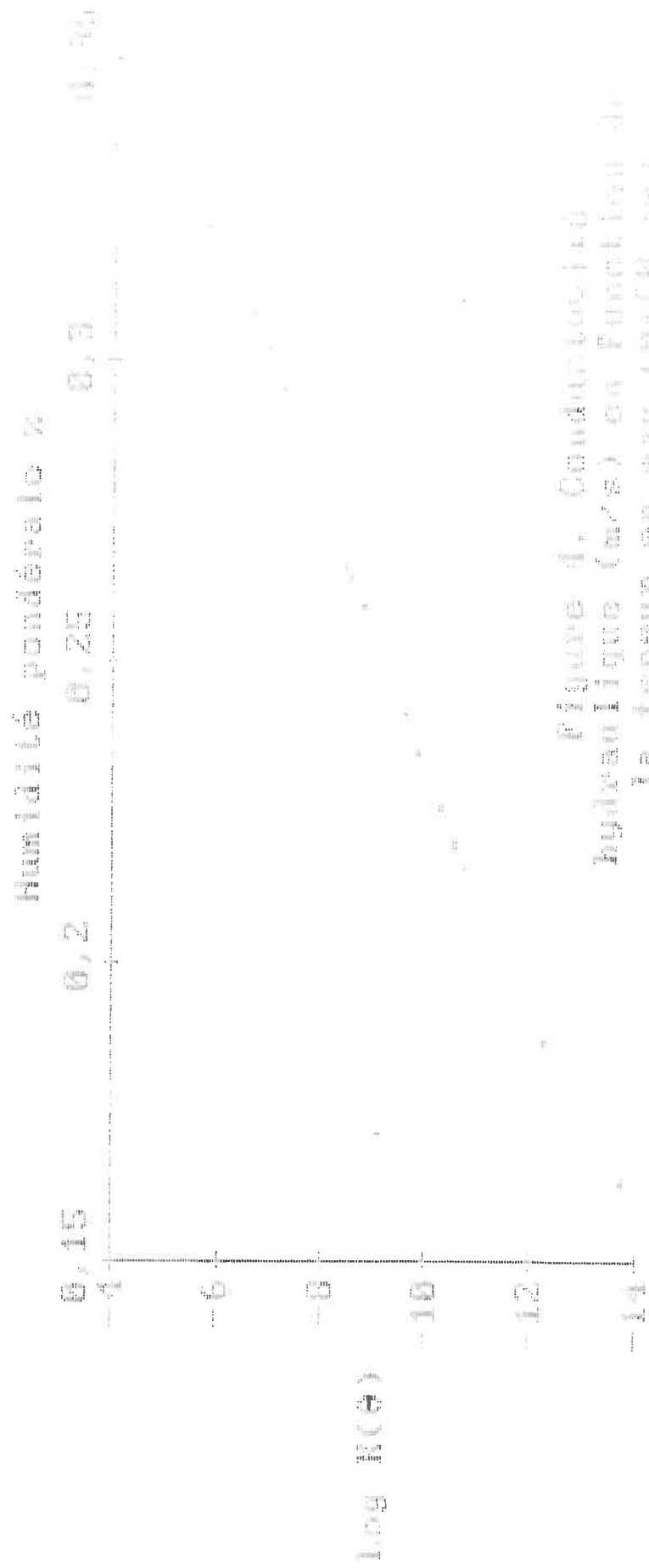


Figure 4. Conductivité  
hydraulique ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) en fonction de  
la teneur en eau ( $w$ ) en  $\%$

#### IV-) ETUDE AU LABORATOIRE.

Afin de caler et de valider le modèle rendant compte des transferts de solutés dans un milieu poreux fissuré, il est nécessaire d'acquérir un certain nombre de paramètres physiques et de transferts du sol. Pour leur détermination nous devons disposer d'échantillons de sol non remaniés. Devant l'impossibilité de neutraliser un secteur d'environ 20 m<sup>2</sup> dans le verger, sur une période allant de Mars à fin Septembre, nous avons effectué des prélèvements dans une parcelle voisine après avoir vérifié que la composition granulométrique du sol entre 0 et 2 m n'était pas très différente de celle de la parcelle expérimentale (tableau 2). Cette analyse nous a conduit à considérer 3 couches de sol d'épaisseur 60 cm, soit :

Niveau 1	0-60 cm
Niveau 2	60-120 cm
Niveau 3	120-190 cm

Pour chaque niveau les paramètres suivants doivent être déterminés :

##### IV<sub>1</sub>-) Les paramètres physiques.

La densité de solide du matériau.

La densité texturale à différentes humidités. Les phénomènes de gonflement et de retrait résultent de l'hydratation et du dessèchement des argiles. Cette variation de volume que l'on peut mesurer affecte la densité texturale du matériau, on réalise ainsi une courbe de retrait (STENGEL, 1982).

##### IV<sub>2</sub>-) Les paramètres de transferts hydriques.

La conductivité hydraulique, en fonction de l'humidité du sol (Figure 4).

La relation potentiel matriciel, teneur en eau.

##### IV<sub>3</sub>-) Les paramètres de transferts pour le soluté.

Le coefficient de diffusion moléculaire de l'ion nitrate, qui varie en fonction de la compacité, de l'humidité, de la température et de la texture du sol (de COCKBORNE et GUENNELON, 1987; de COCKBORNE et al., 1988). Le principe de la mesure est simple. On met en contact au temps  $T_0$ , pour une surface plane d'aire  $S$  connue, un sol contenant l'ion nitrate de concentration connue (cellule A), avec le même sol de même géométrie et exempt de l'ion nitrate avant diffusion (cellule B). Au bout d'un temps  $T$ , mesuré exactement on

dissocie les deux cellules et on détermine la teneur en nitrate de la cellule B.



Le coefficient de dispersion hydrodynamique de l'ion nitrate, qui dépend du débit pour une structure donnée de sol. Ce paramètre se détermine sur des monolithes de sol non remanié et l'on procède de la façon suivante :

Le monolithe de sol ramené à la capacité de rétention, reçoit à sa surface une solution à 620 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l. Le débit est imposé à l'aide d'une pompe péristaltique. En sortie du dispositif la solution est récupérée suivant un pas de temps donné et la teneur en nitrate de ces solutions est déterminée à l'électrode spécifique. L'apport est de type échelon, lorsque la concentration de la solution en sortie du dispositif égale celle en entrée, nous remplaçons la solution nitrate par de l'eau distillée. Ce lessivage se fait au même débit que précédemment et dure le même temps. Par la suite deux autres lessivages sont réalisés espacés d'une période de redistributions de 24 heures.

Pour l'analyse du profil nitrate dans le monolithe, on effectue, après apport d'une solution de nitrate, le découpage de ce dernier dans le sens de la hauteur, suivant un pas de 3 cm. Après extraction de la solution du sol, la teneur en nitrate est déterminée à l'électrode spécifique.

A l'heure actuelle pour les niveaux :

- 0-60 cm l'ensemble des paramètres sont connus à l'exception de la variation du potentiel matriciel en fonctions de la teneur en eau.

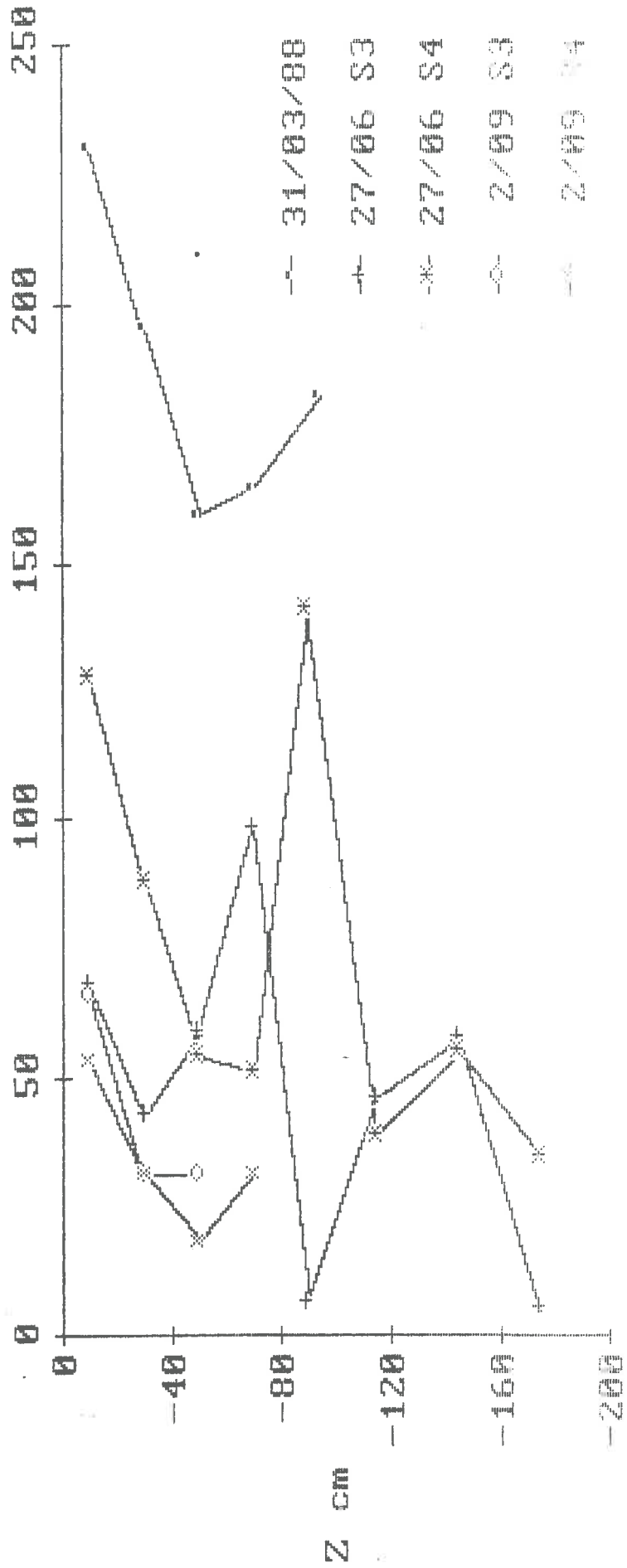
- 60-120 cm, nous disposons des paramètres physiques et du coefficient de diffusion de l'ion nitrate  $D = f(\Gamma_d, W, T)$ . Le monolithe de sol, en vue de la détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique est prélevé.

- 120-190 cm, seuls sont disponibles les paramètres physiques. De par la profondeur, où doit être effectué le prélèvement du monolithe et le niveau de la nappe perchée, la réalisation s'avère difficile, mais devrait se faire courant de l'année 1989.

#### V-) PERIMETRE EXPERIMENTAL DE FREJORGUES.

Il s'agit d'un verger d'une superficie de 2 ha, planté de pêchers précoces, adultes. L'irrigation se fait par submersion.

Figure 5. Profil nitrate (Fréjorgue). NO<sub>3</sub>-  
mg/l de solution du sol.



Le profil pédologique indique la présence de 3 horizons (GLEMAREC, 1988). On distingue :

- à la surface un dépôt d'alluvions limono-sableux dont l'épaisseur varie entre 0,4 et 1,0 m;
- en suivant, une accumulation calcaire d'environ 30 cm d'épaisseur;
- et en profondeur, un substratum limono-marneux.

L'aquifère villafranchien est libre et son niveau varie suivant la saison de 1 à 3 m environ, la teneur en nitrate est en moyenne de 55 mg/l (QUASH, 1988).

L'équipement de cette parcelle au niveau de la zone non saturée et l'expérimentation ont été réalisés principalement par l'E.N.G.R.E.F.. Notre intervention s'est limitée au suivi nitrate par prélèvements de sol aux dates : 31/03/88 (avant fertilisation), 27/06/88 et 2/09/88, au voisinage des sites 3 et 4 des capteurs de solutions. Les résultats obtenus sont donnés à la figure 5; pour plus de détails on se reportera au mémoire de Y. GLEMAREC (1988).

ESSAIS	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/kg de sol sec	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l solution du sol
I.1	2,99	2,65
C.V. %	29,00	26,82
I.2	4,06	4,00
C.V. %	38,77	38,8
I.3	4,09	3,64
C.V. %	33,56	32,55
I.4	11,31	11,05
C.V. %	60,36	57,32
I.5	5,26	3,38
C.V. %	29,11	30,59
I.6	2,12	2,85
C.V. %	18,40	20,17

Tableau 3. Coefficient de variation des diverses distributions (Y. LINDEMAN, 1986).

## PRESENTATION DES RESULTATS.

La variabilité de répartition de l'azote nitrique du sol est un problème important auxquels se heurtent les agronomes. Dès 1951, LEFEVRE et DROUINEAU signalent l'importance de ce problème et en 1986 LINDEMAN y consacre une partie de sa thèse.

Ce dernier a entre autre montré, qu'après épandage d'engrais nitrique sur des parcelles de 1 m<sup>2</sup>, le coefficient de variation de la teneur en nitrate du sol, pour 36 carottages dans la couche 0-20 cm n'est jamais inférieur à 25 % et croit avec l'intervalle de temps par rapport à la date d'épandage, et peut ainsi atteindre 60 % (tableau 3). M. GARCIA (1986), V. BOUSQUET (1987) et M. PROUST (1987), lors d'une étude de la nutrition azotée de jeunes pêcheurs en conditions contrôlées, trouvent pour le coefficient de variation des valeurs du même ordre de grandeur et indiquent que celui-ci croit avec la profondeur, et peut dépasser 100 %.

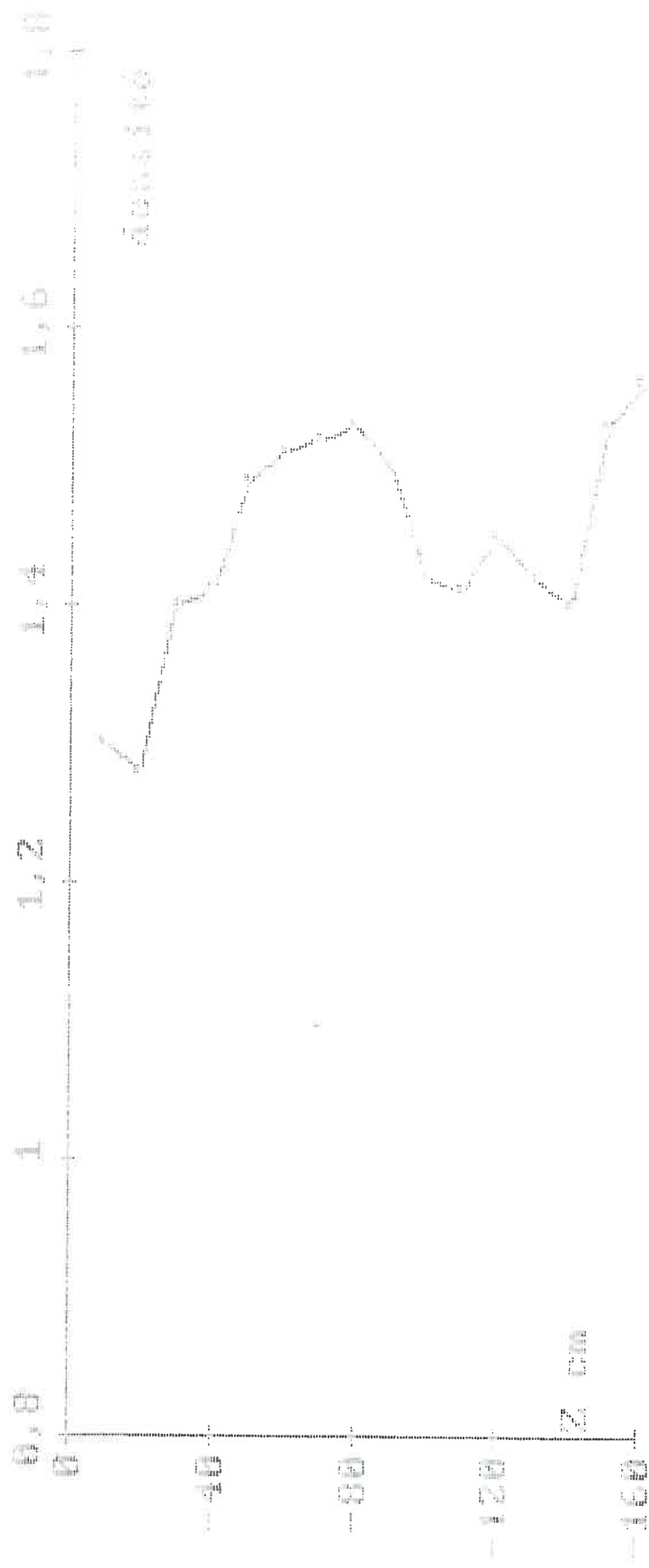
En fait quelle que soit la situation considérée la variabilité de répartition de l'azote nitrique du sol est importante, et pose le problème de la signification d'un bilan azoté au niveau d'une parcelle, et en particulier lorsqu'il s'agit de verger, où il est difficile d'appréhender la consommation d'un arbre adulte. Quant à l'origine de cette variabilité elle peut-être du :

- aux transferts hétérogènes suite à des zones d'écoulements préférentiels
- à l'influence de l'activité biologique qui englobe l'absorption racinaire et le rôle des microorganismes.

A titre indicatif, nous avons étudié avant épandage la variabilité de répartition de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans la couche 40-60 cm. Nous obtenons une valeur moyenne de 107±18 mg. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l de la solution du sol, soit un coefficient de variation de 16,8 %. Compte tenu des valeurs rencontrées dans la littérature, le résultat est satisfaisant, mais en aucun cas cette valeur ne peut être extrapolée aux autres niveaux et encore moins aux prélèvements effectués par la suite.

Cette étude de la variabilité de répartition des nitrates dans le sol n'a pas été étendue aux autres niveaux et périodes de prélèvements car cela nécessite une mise en oeuvre importante, tant au niveau du personnel d'expérimentation que du matériel, moyens dont on ne dispose pas. Actuellement les

Figure 8. Profil de densité





Profondeur cm	Dates des différents prélèvements de sol					
	3/02/88	4/03/88	22/06/88		30/09/88	
			S 1	S 2	S 1	S 2
10	0,222	0,222	0,212	0,212	0,253	0,253
20	0,234	0,234	0,224	0,224	0,264	0,264
30	0,162	0,152	0,200	0,152	0,195	0,195
40	0,156	0,142	0,190	0,146	0,190	0,190
50	0,097	0,051	0,144	0,108	0,138	0,138
60	0,085	0,038	0,085	0,096	0,132	0,132
70	0,079	0,019	0,079	0,101	0,121	0,122
80	0,073	0,013	0,073	0,095	0,116	0,116
90	0,091	0,032	0,063	0,091	0,091	0,091
100	0,139	0,084	0,113	0,139	0,139	0,139
110	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090
120	0,105	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
130	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090
140	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103
150	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tableau 4. Profils de porosité structurale à différentes époques se l'année (S 1 = site 1, S 2 = site 2)

Figure 7A. Profil d'humidité.

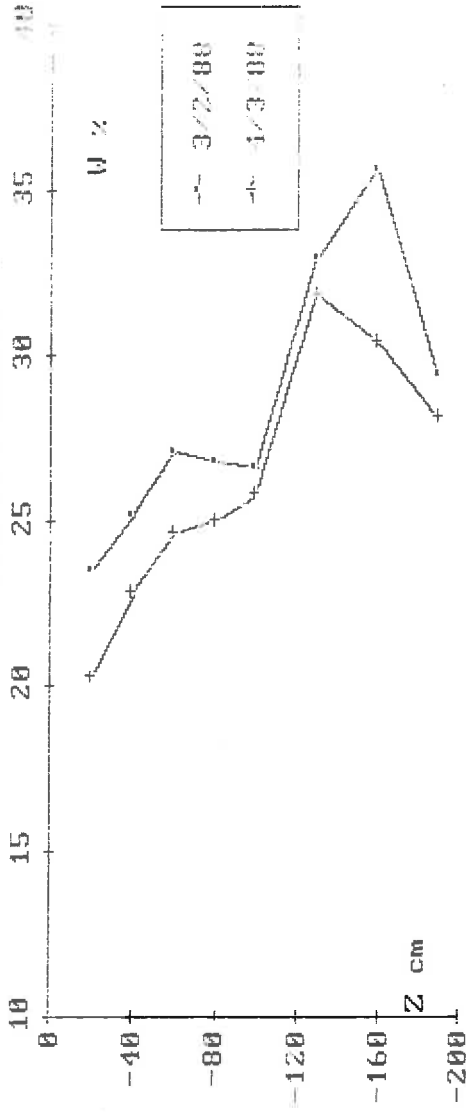
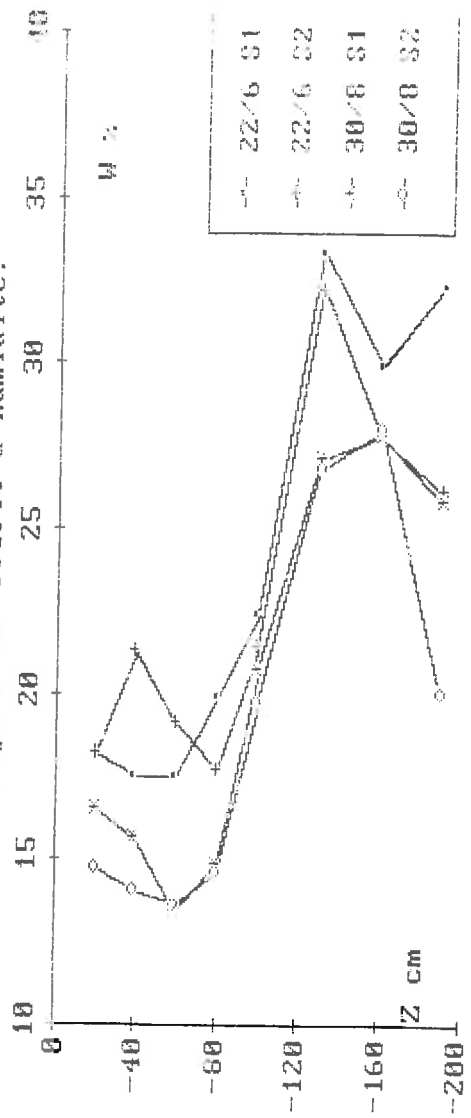


Figure 7B. Profil d'humidité.



chercheurs se tournent davantage vers la modélisation et c'est cette approche que nous avons privilégiée.

## I-) EXPERIMENTATION AU TERRAIN.

Aux figures 6 et 7 est donné l'ensemble des profils nitrates et des profils de teneur en eau massique entre 0 et 2 m de profondeur pour une période allant de Février à fin Août 1988.

### I<sub>1</sub>-) Profil de densité

Nous avons effectué les mesures de densité du sol en place entre 0 et 1,6 m (figure 8) suivant un pas de 10 cm. De la connaissance de cette densité, de l'humidité du sol et de la densité texturale correspondante, nous avons pour chaque date de prélèvement calculé le pourcentage de porosité structurale. Rappelons que c'est cette porosité, ou du moins une partie de celle-ci qui joue le rôle de chemins de transferts préférentiels lors de fortes pluies ou d'irrigations importantes. Les résultats obtenus (tableau 4) montrent que le pourcentage de porosité structurale varie dans le temps, principalement dans la tranche 0-1 m; au delà il reste constant car la teneur en eau, toujours élevée, (sol au voisinage de la capacité de rétention ou saturé) correspond à des valeurs peu différentes en densité texturale.

### I<sub>2</sub>-) Profils de teneur en eau massique

Pour la période de Février-Mars la teneur en eau du sol est élevée, en Février elle n'est jamais inférieure à 25 %, en Mars à 20 %. Au delà de 1 m de profondeur le milieu est saturé (figure 7a).

Les irrigations ont débuté au 15 Juin, le calendrier pour les sites 1 et 2 est le suivant :

Date	Quantité mm	
	Site 1	Site 2
15/06/88	31	
16/06/88		39
8/07/88		39
11/07/88	31	
20/07/88		48
21/07/88	39	
3/08/88	50	50
20/08/88	50	50

Aux dates du 22/06/88 et 30/08/88, les profils de teneur en eau des sites 1 et 2 (figure 7b) montrent une influence de l'absorption racinaire dans la tranche 0-120 cm, avec toutefois, une intensité plus importante dans la tranche 0-80 cm. On note également à la date du 22/06/88, pour le site 2, un résidu de l'irrigation du 16/06/88.

Profondeur m	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l de la solution du sol.	Cl <sup>-</sup> mg/l
4,80-4,90	75,0	162
5,00-5,10	48,7	116
5,20-5,30	48,7	103
5,30-5,50	48,7	80
5,50-5,60	70,9	98
5,60-5,80	79,7	125
5,80-5,90	88,6	130
5,90-6,00	110,7	145
6,00-6,10	93,0	133
6,10-6,15	115,1	151
6,15-6,25	119,6	172

Tableau 5. Teneurs en NITRATE et CHLORURE du sol entre 4,80 et 6,30 m de profondeur.

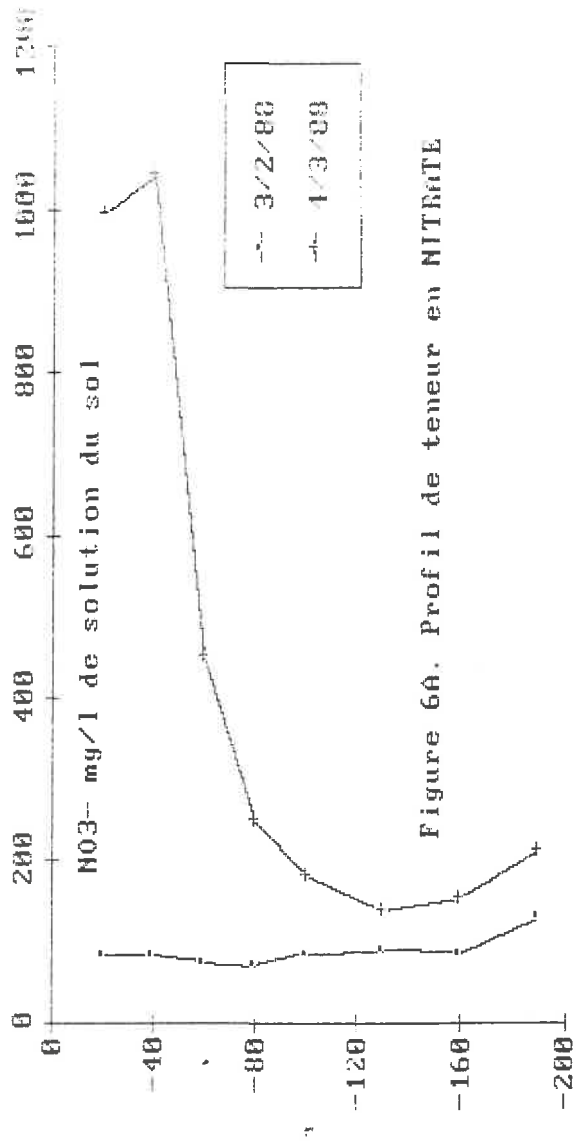


Figure 6A. Profil de teneur en NITRATE

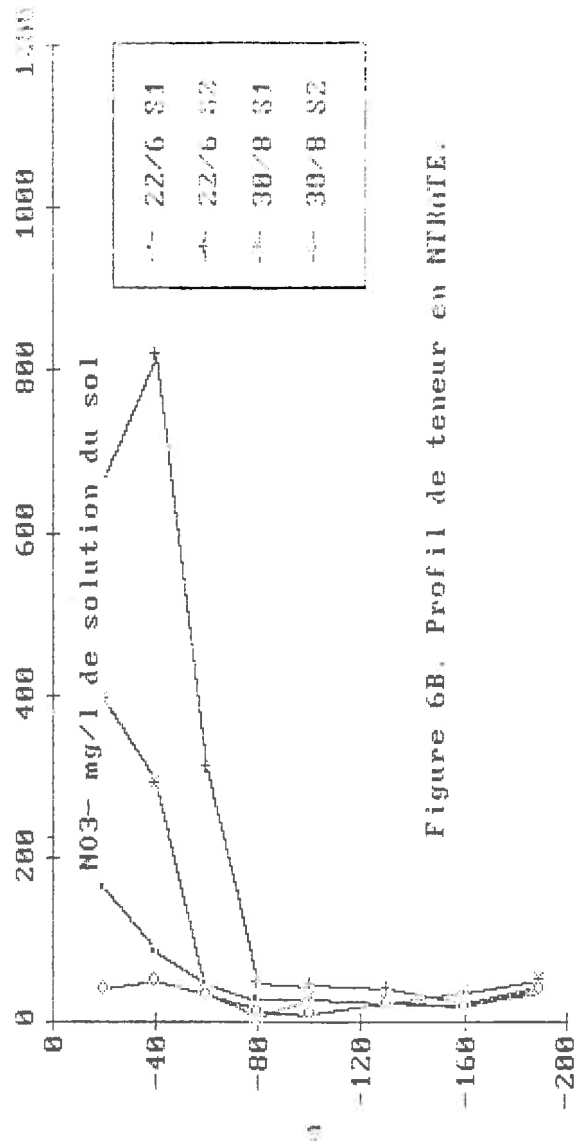


Figure 6B. Profil de teneur en NITRATE.

Pour un même site, lorsqu'on considère l'évolution des profils hydriques dans le temps, on constate que l'influence de l'absorption racinaire apparait jusqu'à 1,60 m de profondeur. La participation des couches profondes peut se faire par recharge des tranches supérieures lors de remontés capillaire, ou par extension du système racinaire dans cette zone lorsque le niveau de la nappe perchée descend.

*Remarque* : A la profondeur 160-190 cm bien que nous soyons en zone saturée, on note dans tous les cas une chute de la valeur de l'humidité pondérale, ceci est un artéfact lié au mode de prélèvement.

### I<sub>3</sub>-) Profils nitrate du sol

#### Avant fertilisation.

Avant fertilisation (3/02/88) le profil nitrate reste homogène entre 0 et 160 cm de profondeur. Nous obtenons sur cette tranche une valeur moyenne de  $83 \pm 6$  mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l de la solution du sol, soit un coefficient de variation de 7,3 %, alors qu'au niveau 160-190 cm la teneur est pratiquement multipliée par 2 (figure 6a).

#### Après fertilisation.

Quinze jours après fertilisation (320 unités N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ha) et une irrigation de 700 mm, le pulse nitrate résultant se trouve entre 0 et 80 cm de profondeur (figure 6a). Au delà l'allure du profil est comparable à celle du profil obtenu avant épandage, à savoir une augmentation de la teneur en nitrate de la couche 160-190 cm.

Etant donné la concentration nitrate relativement constante de la nappe villafranchienne ( $\approx 27$  mg/l) et la teneur nitrate élevée du niveau 160-190 cm, nous avons émis l'hypothèse que nous nous trouvons en présence d'une accumulation de cet élément dans le sous sol entre 2 et 8 m de profondeur environ. Ce nitrate pourrait provenir du lessivage de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> présent dans le sol, entraîné en profondeur lors des fortes pluies d'automne 1987 et du début de l'hiver 1988, et/ou d'un écoulement latéral d'eau le long du paléosol. Cette accumulation nitrique dans la microporosité du sous sol peut se rattacher à un modèle à deux phases, une phase mobile correspondant à l'eau libre qui circule dans le milieu poreux et une phase immobile se trouvant dans la microporosité de celui-ci, l'échange entre les deux phases occasionnant une pollution diffuse.

#### Présence de nitrates dans le sous-sol.

Nous avons donc tenté l'exploration de la couche profonde, les difficultés techniques rencontrées au niveau du prélèvement de sol ayant été très importantes, nous n'avons pu réaliser qu'un seul sondage dans l'intervalle 5 à 6 m. Les premiers résultats (tableau 5) semblent indiquer que l'hypothèse émise n'est pas dénuée de sens. L'étude sera reprise en 1989, lorsque les difficultés expérimentales auront été résolues, ce qui devrait nous permettre de confirmer ou infirmer l'hypothèse avancée.

Suivi de la teneur nitrate dans le sol de Juin à fin

Aout.

Quant aux deux autres dates de prélèvement au voisinage des sites 1 et 2 on observe que (figue 6b) :

A la date du 22/06/88, les sites présentent des profils nitrate très différents tant par leur allure que par leur teneurs dans la couche 0-80 cm.

-Le profil du site 1, essentiellement caractérisé par un appauvrissement en surface par rapport au site 2 probablement lié à l'absorption racinaire et/ou au lessivage, suggère cependant l'existence d'un reliquat de fertilisation-minéralisation.

-Un profil fertilisation-minéralisation très marqué pour le site 2.

Au delà de 80 cm. les profils nitrate sont semblables.

A la date du 30/08/88, le site 1 donne un profil nitrate d'allure comparable à celui du 22/06/88, mais avec des teneurs plus élevées entre 0 et 60 cm de profondeur. Le site 2 a considérablement évolué et présente dès lors un profil d'absorption racinaire et de lessivage, avec des teneurs généralement 10 fois plus faibles que lors du prélèvement précédent.

Lorsqu'on compare les profils nitrate des deux dates de prélèvements, on note, une disparition non négligeable du nitrate sur tout le profil et principalement dans le cas du site 2. Cette baisse de la concentration en Nitrate dans les couches profondes peut-être liée au cycle azoté (dénitrification, organisation), à l'absorption racinaire, en effet nous avons observé lors du transfert hydrique une influence du prélèvement racinaire jusqu'à 160 cm de profondeur, quant au lessivage il doit se trouver limité en cette période par l'activité racinaire dans les couches de surface .

Les résultats de ces deux périodes de prélèvement illustrent clairement le problème d'hétérogénéité de répartition évoqué en préambule à cette discussion.

A titre d'information, nous donnons les résultats de teneurs en nitrate de la solution du sol extraite par les capteurs de solution aux profondeurs 1,5 m pour le site 1 et 1,6 m pour le site 2 (GLEMAREC, 1988) et ceux obtenus par prélèvements de sol aux mêmes profondeurs et périodes.

DATE	TENEUR EN NITRATE DE LA SOLUTION DU SOL.			
	mg NO <sub>3</sub> - / l			
	capteur de solution		prélèvement sol	
	site 1	site 2	site 1	site 2
22/06/88			88,6	97,5
23/06/88	70,9	26,6		
28/08/88	194,9	53,1		
30/08/88			35,4	17,7

Pour la 1<sup>ère</sup> date de prélèvement :

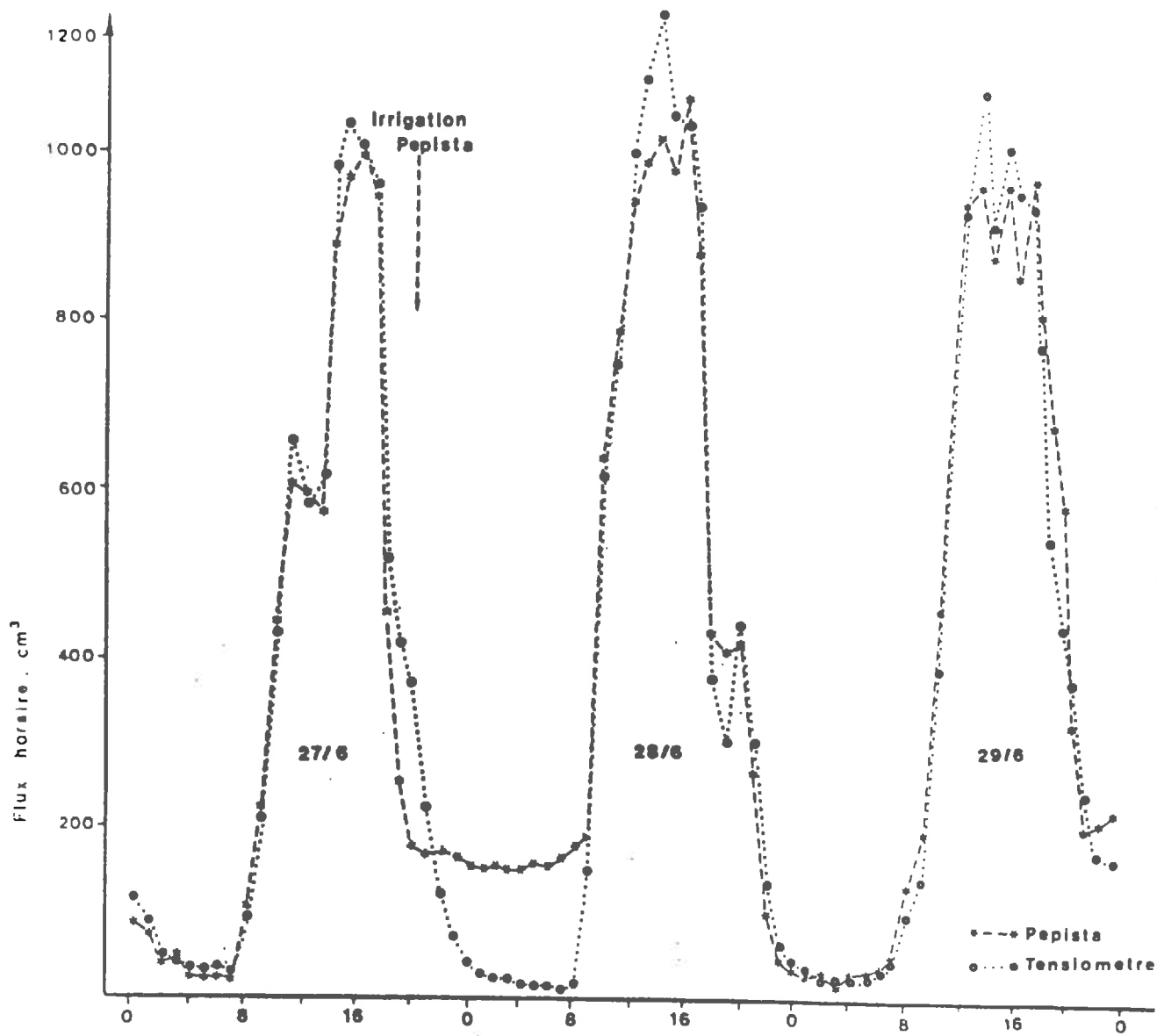


Fig 9: INFLUENCE DE L'IRRIGATION SUR LA CINETIQUE DES FLUX



\*au site 1 les deux modes de prélèvements de la solution du sol donnent des résultats semblables;

\*au site 2, celui obtenu par carottage est 3,5 fois plus élevé.

Pour la 2<sup>ème</sup> date de prélèvement, les 2 sites donnent des teneurs en  $\text{NO}_3^-$  plus élevées pour le prélèvement à l'aide de capteurs de solution.

Les différences rencontrées peuvent être imputées :

-aux méthodes de prélèvements, en effet, il y a une incertitude sur la représentativité de la solution prélevée par le capteur;

-à la variabilité de répartition des nitrates dans le sol. Les prélèvements à la tarière ont été réalisés dans l'environnement des sites.

#### I4-) La fluxmètrie.

Lors d'étude des transferts d'eau et de nitrate dans un sol, en présence de prélèvement racinaire (arbres fruitiers), il est nécessaire de pouvoir disposer d'un bilan hydrique si l'on veut connaître les flux de nitrate. Pour ce faire, il faut avoir accès à la consommation hydrique du végétal, ce qui nous est donné par la fluxmètrie.

Les mesures de flux sont effectuées en continu, avec un pas de 1 heure, du 23 Juin au 3 octobre 1988, dans le tronc des arbres dont l'irrigation est pilotée soit par Pépista soit par tensiométrie. Elles ont permis d'appréhender, dans chaque arbre ou en moyenne dans chaque traitement, les transferts de sève en fonction de l'équilibre local instantané entre la disponibilité en eau du sol et la contrainte climatique sur le verger, et/ou sa variation dans le temps sous l'effet soit du dessèchement du sol soit de sa réhumectation par irrigation. Elles sont donc :

- une mesure des cinétiques d'extraction racinaire globale de l'eau du sol ( échelle horaire ),

- une évaluation des " Evapotranspiration Réelle " des arbres du verger ( échelle journalière ou de n jours ).

Les résultats font globalement apparaître:

+ une bonne adéquation entre les flux mesurés et leurs variations et la contrainte climatique existante,

+ des cinétiques de flux homogènes dans le temps et des flux quantitativement peu différents pour un ensemble d'arbres appartenant à un même traitement d'irrigation, le traitement " Pépista " apparaissant comme plus hétérogène,

+ des flux moyens peu différents entre traitements, hors période d'irrigation (figure 9),

+ un effet limité, dans le temps, des irrigations quel que soit le traitement considéré et quelle que soit la dose appliquée, donc une faible efficacité de l'eau apportée.

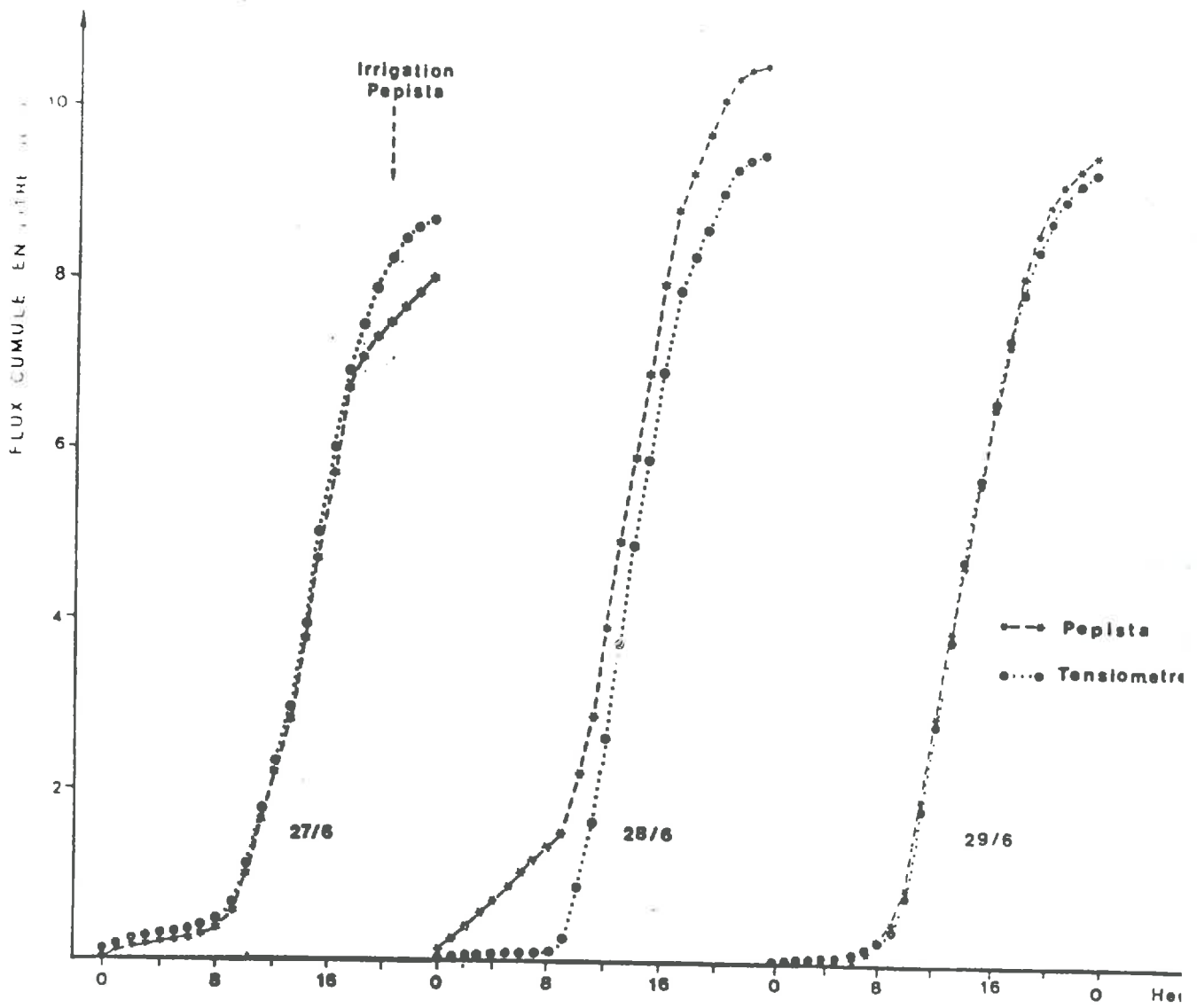


Fig 10: EFFET DE L'IRRIGATION SUR LE FLUX CUMULE

Tout accroissement global des flux, après un apport d'eau, n'a été décelable que pendant 48 heures au maximum. Cet accroissement est essentiellement le fait d'une plus importante absorption racinaire d'eau nocturne traduisant une meilleure reconstitution des réserves en eau propres de l'arbre préalablement mobilisées par le courant d'évapotranspiration,

+ des consommations journalières qui, si l'on considère que chaque arbre occupe au sol 6 m<sup>2</sup>, sont toujours inférieures à 2,5 mm.J<sup>-1</sup>, consommation maximale trouvée aux plus fortes demandes climatiques (figure 10).

Il apparaît donc que dans ce sol l'alimentation en eau des arbres puisse être assurée presque exclusivement à partir des réserves en eau propres au sol. Les irrigations de complément ne s'avèreraient nécessaires qu'en présence de déséquilibres momentanément importants pour la physiologie de l'arbre. Pour être efficaces, elles devraient donc en toute logique au vu des mesures de flux et de leurs variations être conduites à fréquence élevée et à doses d'eau faibles. Ce mode de conduite de l'irrigation permettrait de plus d'éviter des pertes en eau probables dans ce sol par drainage hors de la zone d'extraction par les racines des arbres fruitiers.

## II-) APPROCHE MODELISATION.

### II<sub>1</sub>-) Théorie du modèle.

Le modèle de *transferts de solutés en milieu poreux hétérogène* (LAFOLIE, 1988) est de type déterministe et considère que la partie aqueuse se décompose en 2 phases, une phase mobile et une phase immobile.

Dans la phase mobile les transferts de solutés peuvent se traduire par l'équation suivante :

$$\epsilon_f \frac{\delta C}{\delta t} = \epsilon_f D_h \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - \epsilon_f v \frac{\delta C}{\delta x} + \Gamma(x) - A \quad (1)$$

La partie droite de l'équation représente :

- Le 1<sup>er</sup> terme traduit la dispersion hydrodynamique;
- Le 2<sup>ème</sup> est un terme de convection;
- Le 3<sup>ème</sup> quantifie l'échange de soluté entre la phase mobile et la matière poreuse;
- Le 4<sup>ème</sup> est un terme de fonction puits ou source, pouvant prendre en compte, l'activité biologique (absorption racinaire, cycle azoté), les réactions chimiques.

Les paramètres signifient :

$v$  : vitesse moyenne dans les pores,  $v = \frac{q}{\epsilon_f}$

$\epsilon_f$  : porosité utilisée par le transfert, elle peut-être au plus égale à la porosité structurale.

$C$  : concentration du soluté dans la phase mobile.

$D_h$  : coefficient de dispersion hydrodynamique,  $D_h = \lambda v + D_0$ .

$\lambda$  : coefficient de dispersivité, élevé pour les milieux structurés.

$D_0$  : coefficient de diffusion moléculaire du soluté dans l'eau.

Dans la phase immobile seul le phénomène de diffusion intervient, ce qui peut se traduire par l'équation :

$$\frac{\delta C_{im}}{\delta t} \epsilon_{im} = \epsilon_{im} D_{im} \Delta C_{im} \quad (3)$$

$\epsilon_{im}$  : porosité texturale locale des blocs poreux;

$C_{im}$  : concentration locale à l'intérieur du bloc poreux;

$D_{im}$  : coefficient de diffusion du soluté dans la porosité  $\epsilon_{im}$ .

Le modèle ainsi élaboré nécessite des paramètres d'entrée pour être opérationnel. Ces paramètres sont :

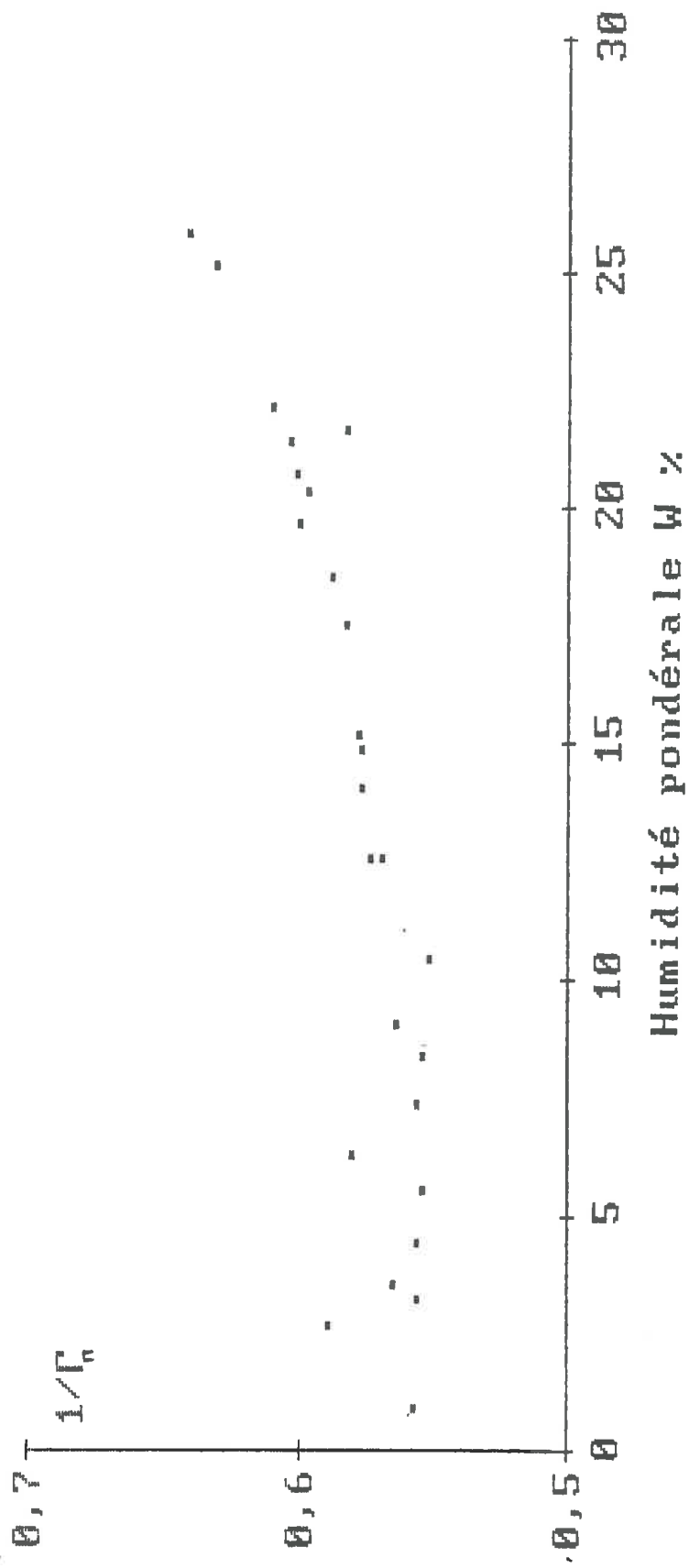
- Le coefficient de diffusion moléculaire dans l'eau et le milieu poreux continu, de l'ion étudié;
- Le coefficient de dispersivité;
- Les caractéristiques du monolithe, densité apparente, surface, longueur, porosités totale et structurale  $\epsilon_f$ ;
- les caractéristiques de l'expérimentation, débit à l'entrée du dispositif, durée de l'expérimentation;
- Les paramètres indiquant la forme des agrégats et la surface d'échange par unité de volume.

Parmi ces paramètres, 4 seront ajustés afin de caler le modèle pour le site expérimental qui nous intéresse. Ces paramètres sont les suivants :

- La porosité de transfert, par l'expérimentation nous avons accès uniquement à la porosité structurale. Or le volume des pores de grande dimension ne fonctionne pas obligatoirement dans la totalité.
- Le coefficient de dispersivité qui entraîne la modification du coefficient de dispersion hydrodynamique et contrôle l'aplatissement de la courbe d'élution.
- Le paramètre indiquant la forme de l'agrégat, connu pour des géométries simples et la surface d'échange par unité de volume qui se déduit du paramètre précédent.

Après calage du modèle les sorties de celui-ci sont :

Figure 11. Courbe de retrait, Horizon 0-60 cm.



- Les courbes d'élu­tion, variation de la concentration de la solution en fonction du temps au sortie du milieu poreux.
- Les profils de concentration de soluté dans le milieu poreux;
- Les bilans par combinaison des deux premières sorties.

## II<sub>2</sub>-) Acquisition des paramètres.

### *La porosité.*

La porosité totale est souvent utilisée pour caractériser de façon globale et approximative l'état physique du sol. Ce dernier peut néanmoins être précisé par l'utilisation de l'analyse du système de porosité qui conduit suivant l'origine des pores à distinguer (STENGEL, 1979) :

- une porosité texturale ou microporosité, liée à la granulométrie et résultant de l'assemblage des particules élémentaires;

- une porosité structurale ou macroporosité, découlant de l'histoire du matériau.

Leur valeur se calcule à partir des densités solide, texturale en fonction de l'humidité (figure 11) et apparente du massif étudié. L'ensemble des résultats est porté au tableau 6.

### *Variation du coefficient de diffusion de l'ion NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans le sol.*

La valeur du coefficient de diffusion de l'ion nitrate, pour un matériau et une température donné croit avec l'humidité massique, la densité pour respectivement une densité et une teneur en eau constante ( de COCKBORNE et GUENNELON, 1987). Cette variation s'exprime par la relation (de COCKBORNE et al, 1988) :

$$D = D_0 \frac{D_{1s}}{D_0} \left[ 1 - \frac{W_0}{W} \right]^{\beta} \left[ 1 - \frac{n_s}{n_{s0}} \right]^{\alpha}$$

D : coefficient de diffusion de l'ion nitrate dans le sol;

D<sub>0</sub> : coefficient de diffusion de l'ion nitrate dans l'eau;

D<sub>1s</sub> : coefficient de diffusion de l'ion nitrate dans la porosité texturale saturée;

W : teneur en eau massique;

W<sub>0</sub> : valeur de teneur en eau massique en deçà de laquelle la diffusion est négligeable;

n<sub>s</sub> : porosité structurale;

n<sub>s0</sub> : valeur de porosité n<sub>s</sub> en deçà de laquelle la diffusion n'a plus lieu;

β, α : paramètres d'ajustement.

Pour les niveaux 1 et 2 les expressions numériques sont les suivantes :

NIVEAUX	0-60 cm	60-120 cm	120-190 cm
<b>densité solide</b>	2,82	2,89	2,66
<b>densité texturale</b>	1,59	1,57	1,55
<b>densité apparente</b>			
monolithe 1	1,28	1,55	
monolithe 2	1,34		
<b>porosité totale</b>			
monolithe 1	0,4894	0,5633	
monolithe 2	0,5638		
<b>porosité texturale</b>			
monolithe 1	0,3511	0,5507	
monolithe 2	0,3676		
<b>porosité structur.</b>			
monolithe 1	0,1950	0,0127	
monolithe 2	0,1572		

Tableau 6. Les paramètres de densité et les valeurs de porosité des monolithes.  
La valeur de densité texturale est donnée pour le sol à la capacité de rétention.

Niveau 1. (0-60 cm) (HERBERT, 1988).

$$D = 16,2 \cdot 10^{-6} \left[ 1 - \frac{0,04}{W} \right]^{3,1} \left[ 1 - \frac{n_s}{0,6} \right]^{0,5}$$

avec une variance expliquée de 84,9 %.

Niveau 2. (60-120 cm) (JACOB, 1988).

$$D = 16,0 \cdot 10^{-6} \left[ 1 - \frac{0,08}{W} \right]^{1,5} \left[ 1 - \frac{n_s}{0,6} \right]^{0,9}$$

avec une variance expliquée de 91,5 %.

Niveau 3. (120-190 cm)

$$D = 8,0 \cdot 10^{-6} \left[ 1 - \frac{0,02}{W} \right]^7 \left[ 1 - \frac{n_s}{0,64} \right]^{0,7}$$

avec une variance expliquée de 78,0 %.

La température est un facteur qui influence le phénomène de diffusion et par la même les transferts. En conséquence pour des valeurs de densités et des humidités pondérales voisines de celles rencontrées généralement au terrain, nous étudions l'amplitude de variation du coefficient de diffusion entre 4°C et 40°C. On note que le coefficient a même sens de variation que le paramètre température, et cette variation s'exprime par la relation :

$$D = A \exp \left[ - \frac{E}{T} \right] \quad (\text{JOST, 1960})$$

Le paramètre A est lié à la structure du sol, alors que le paramètre E dépend de la nature de l'ion. T est la température exprimée en degré Kelvin.

-Pour le niveau 0-60 cm, l'étude a été faite aux caractéristiques suivantes :

- une humidité pondérale de 17,3 % ;
- une densité de 1,3 ;
- températures : 15, 20, 44°C.

L'expression numérique est :

$$D = 0,0115 \exp \left[ - \frac{2280}{T} \right]$$



Côté cm	27,0
Hauteur cm	30,0
Surface cm <sup>2</sup>	729,0
Volume cm <sup>3</sup>	19693,0
Densité apparente	1,284
Porosité totale	0,4894
Porosité texturale	0,3511
Porosité structurale	0,1950
Volume poral cm <sup>3</sup>	
total	9637,8
textural	6914,8
structural	3840,1

Tableau 7. Caractéristiques physiques du monolithe 1, du niveau 0-60 cm.

Expérimentations	1	2	3
Débit l h <sup>-1</sup>	7,2	8,7	11,1
vitesse de Darcy cm h <sup>-1</sup>	9,8	11,8	15,2
Durée de l'apport (mn)			
de nitrate	147	114	94
d'eau L <sub>1</sub>	140	120	95
d'eau L <sub>2</sub>	141	110	90
d'eau L <sub>3</sub>	140	110	90

Tableau 8. Conditions expérimentales pour le monolithe 1.

-Pour le niveau 60-120 cm, l'humidité pondérale a pris successivement les valeurs 14,8 23,7 et 28,3 %. Les autres paramètres (densité, température) ont conservés les mêmes valeurs que précédemment.

$$W = 14,8 \%$$

$$D = 0,045 \exp \left[ - \frac{2819}{T} \right] \quad \text{variance expliquée : } 89,0 \%$$

$$W = 23,7 \%$$

$$D = 0,007 \exp \left[ - \frac{2049}{T} \right] \quad \text{variance expliquée : } 96,0 \%$$

$$W = 28,3 \%$$

$$D = 0,008 \exp \left[ - \frac{2109}{T} \right] \quad \text{variance expliquée : } 99,0 \%$$

-Pour le niveau 120-190 cm l'humidité retenue a été de 38,5 %, la densité de 1,1 et la température a variée de 8°C à 40°C.

$$D = 0,0021 \exp \left[ - \frac{1823}{T} \right] \quad \text{variance expliquée : } 99,4 \%$$

### *Dispersion hydrodynamique.*

Les caractéristiques physiques des monolithes sont données au tableau 7. Présentement, seuls sont disponibles les résultats du monolithe 1, niveau 0-60 cm pour qui les conditions expérimentales sont données au tableau 8.

Pour les courbes d'éluion deux types de représentation graphique peuvent-être adoptés :

-concentration relative en fonction du temps d'éluion  $C/C_0 = f(t)$ . Cette représentation permet de mettre en évidence l'importance du temps de passage du soluté dans les pores. Ainsi, à l'analyse des résultats nous notons que, pour un volume de  $17,6 \pm 0,9$  l de solution de  $\text{NO}_3^-$ , le temps de passage du soluté est inversement proportionnel au débit.

-concentration relative en fonction du volume élué  $C/C_0 = f(V_e)$ . Cette représentation permet de mettre en évidence le rôle de la dimension des pores.

Le schéma théorique d'une courbe d'éluion pour une alimentation en échelon se caractérise par une concentration relative  $C/C_0 = 0,5$  lorsque le volume élué égale le volume poral total et une symétrie de la courbe de part et d'autre de

Figure 12. Courbes d'éluion nitrate (3 vitesses  $U_{n_3}$  en m/h).

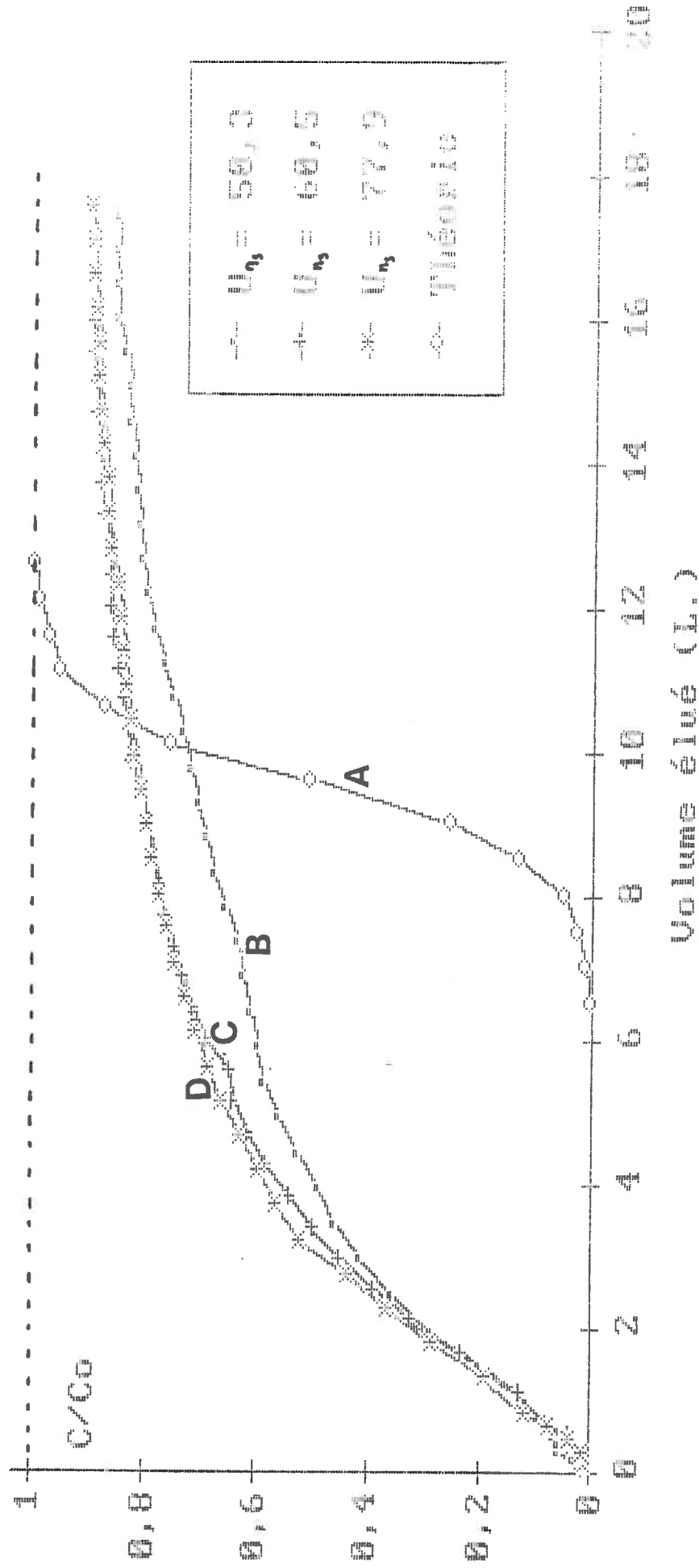
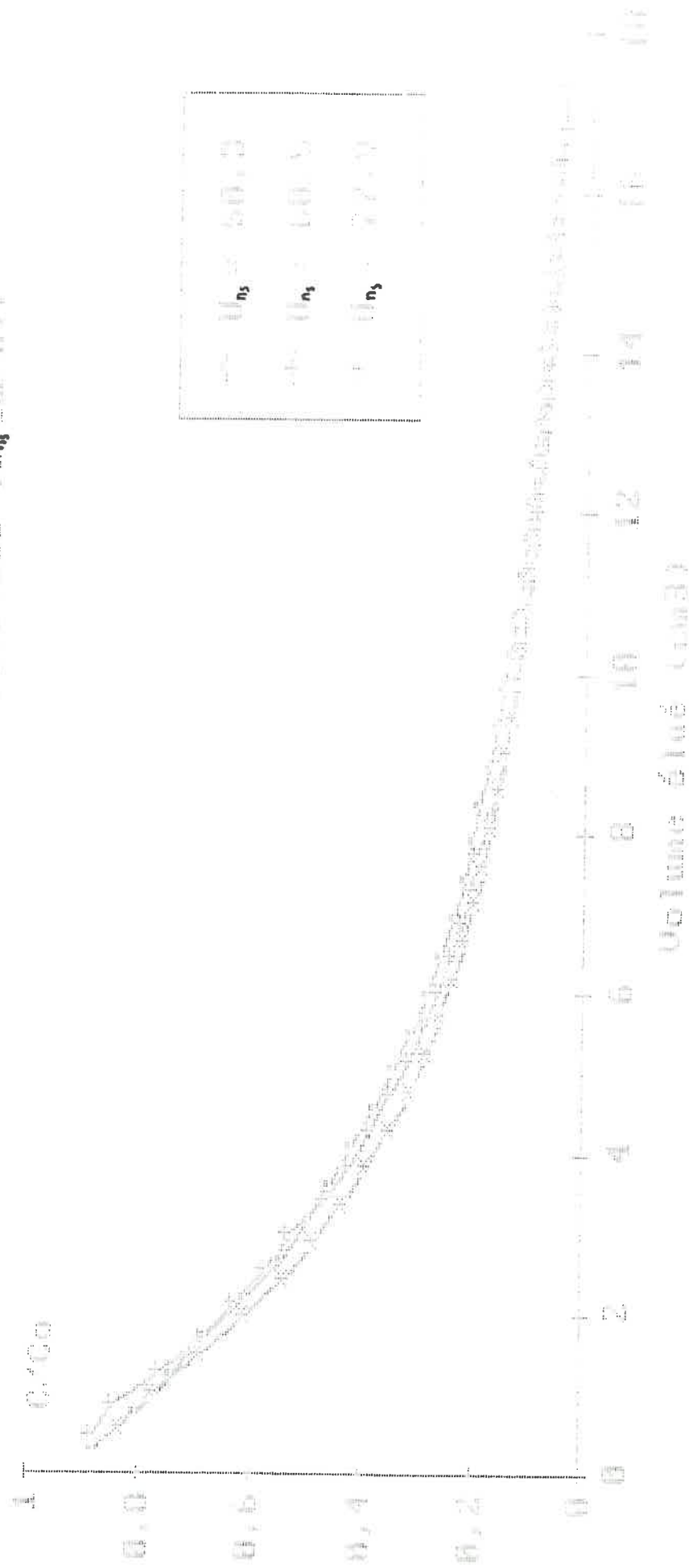


Figure 13. Courbes de lessivage (L1) pour le nitrate à différentes vitesses ( $U_{ns}$  en cm/h).



Expérimentations	1	2	3
<b>Volume drainé (l) de solution après :</b>			
apport N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	290,0	245,0	341,0
apport EAU (L <sub>1</sub> )	678,0	635,0	635,0
apport EAU (L <sub>2</sub> )	661,0	587,0	577,0
apport EAU (L <sub>3</sub> )	678,0	588,0	550,0
<b>*N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> resté dans sol %</b>	<b>37,4</b>	<b>33,6</b>	<b>31,2</b>
<b>**N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> restitué %</b>			
lessivage 1	67,8	79,4	73,5
lessivage 2	5,5	6,7	7,1
lessivage 3	1,6	1,6	1,7
<b>*N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> resté dans sol % après 3<sup>ème</sup> lessivage</b>	<b>9,4</b>	<b>4,2</b>	<b>5,5</b>

\* : % N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> resté dans le sol par rapport à la quantité apportée

\*\* : % N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> restitué par rapport à la quantité initialement présente dans le sol

Tableau 9. Ensemble des résultats obtenus pour le monolithe 1 (niveau 0-60 cm).

ce point (figure 12, courbe A). De plus, ce point singulier signale que toute la phase aqueuse présente dans le milieu participe aux transferts dynamiques.

Les courbes d'élution obtenues expérimentalement (figure 12, courbes B, C, D) présentent des différences notables par rapport au schéma théorique. Suivant que l'on considère le volume poral total ou structural, on observe, une sortie précoce ou un retard de l'élution du nitrate. Ces différences indiquent que nous avons une circulation de la solution dans des chemins préférentiels (pour  $V_e = V_{poral\ total}$  on a  $C/C_0 > 0,5$ ) et une perte en soluté (pour  $V_e = V_{poral\ structural}$  on a  $C/C_0 < 0,5$ ) qui compte tenue de l'élément étudié et de la durée de l'expérience (tableau 8) ne peut-être attribué qu'au phénomène de diffusion. Cette analyse est également vraie pour les courbes d'élution obtenues lors des 3 lessivages successifs (figure 13).

Les quantités de nitrate retenues par le sol, après apport

vont de 37,4 à 31,2 % pour des débits variant de 7,2 à 11,1  $l\ h^{-1}$  (tableau 9).

Les quantités totales de nitrate restituées au cours des 3 expériences, exprimées en pourcentage de la masse de nitrate initialement présente dans le sol, sont dans l'ordre croissant des débits, égaux à 74,9 %, 87,7 % et 82,4%.

La quantité de nitrate restituée, pour une expérience donnée, décroît en fonction du nombre de lessivage de façon exponentielle. Quel que soit le débit, le pourcentage de  $N-NO_3^-$  restitué par rapport à celui présent dans le sol reste pour le premier lessivage toujours supérieur à 65,0 %, alors que pour le second cette valeur est en moyenne divisée par 10 et pour le troisième n'excède pas 2,0 % (tableau 9).

Durant la phase de redistribution (24 heures), entre deux périodes d'apport le volume drainé de solution se situe au environ de 620  $cm^3$  (tableau 9), lors du remplacement de la solution nitrate par l'eau, le dispositif d'apport est arrêté au plus 4 mn et le volume drainé de solution représente environ 50 % du précédent (tableau 9). En conséquence, le nitrate collecté lors du premier lessivage provient d'une part de celui présent dans l'eau libre circulant dans les fissures et d'autre part de celui ressorti de la microporosité sous l'action du phénomène de diffusion, alors que pour les deux autres lessivages la restitution de nitrate est uniquement due au phénomène de diffusion. Nous avons chiffré cette quantité de nitrate en provenance de la solution circulant dans la macroporosité, elle représente pour les 3 expérimentations dans l'ordre croissant des débits, 4,85 %, 5,32 % et 3,93 % de la quantité restée dans le sol après apport, ce qui n'est pas très élevé au regard de ce qui a été restituée.

De fait, l'importante quantité de nitrate ressortie lors du 1<sup>er</sup> lessivage est liée à l'absence de phase de redistribution, cela à pour conséquence qu'au voisinage de la paroi des fissures, la concentration du sol dans la microporosité est égale ou du moins très voisine de la concentration initiale du soluté. Lors des deux autres lessivages, nous avons d'une part un appauvrissement en nitrate de la paroi des fissures et nous observons d'autre

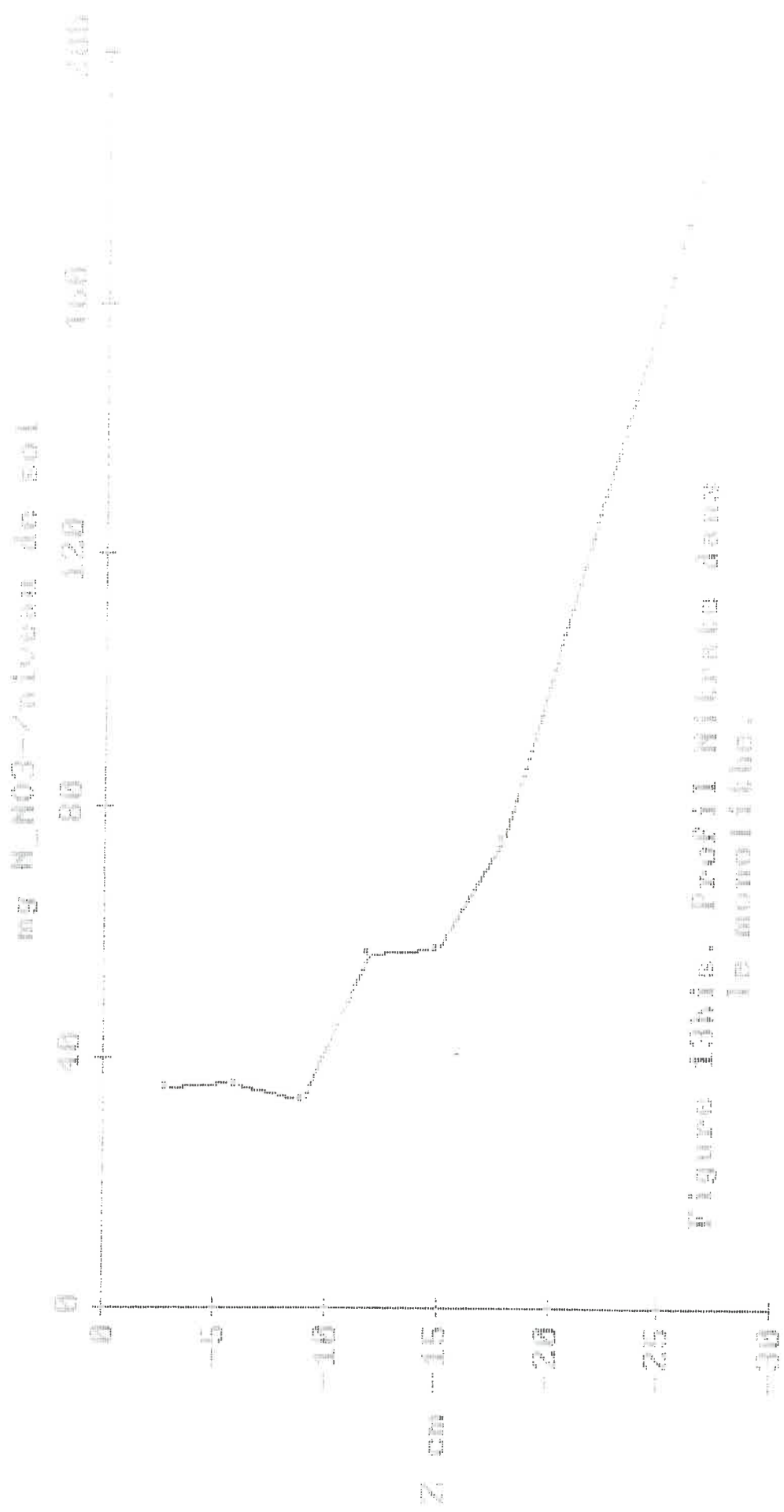


Figure 11111. Profil Nitrates dans le mois de Juin.

part 24 heures de redistribution qui permet une dilution du soluté dans l'ensemble du milieu, d'où une baisse non négligeable de la quantité restituée.

Ces résultats confirment les observations faites au terrain (PAUL, 1984), lors d'irrigation localisée fertilisante. La solution de fertilisation doit être apportée en fin d'irrigation, afin de limiter les pertes par lessivage et de par la même minimiser la pollution de l'aquifère.

#### Le profil de nitrate du monolithe.

Nous avons apporté en surface du dispositif 5,75 l d'une solution à 140,4 mg de  $N-NO_3^-/l$ , soit 807,3 mg de  $N-NO_3^-$ . En fin d'expérimentation nous en avons collecté 41,2 %. Après découpage du monolithe et détermination des nitrates dans la solution du sol, suivant le protocole donné à la page 6, nous décrivons en fonction de la profondeur le profil nitrate (figure 13bis). La quantité totale mesurée dans le sol représente 58,1 % de celle apportée, ce qui conduit, si l'on somme les quantités ressortie au cours de l'apport et retrouvée dans le sol, à un bilan total de 99,3 %.

#### II<sub>3</sub>-) Analyse des expérimentations en laboratoire à l'aide du modèle.

Nous présentons ci-après des exemples de simulations des courbes d'élutions présentées à la figure 12. Comme indiqué dans les paragraphes précédents, le modèle requiert une phase de calage de certains de ses paramètres. Un premier paramètre est la fraction de la porosité structurale participant au transfert convectif. Nous avons estimé ce paramètre de façon indépendante, à partir des quantités de solution drainées par gravité après arrêt des apports, durant une période 24 heures. Nous n'avons donc pas ajusté ce paramètre. Une valeur moyenne d'environ 800  $cm^3$  a été utilisée alors que la porosité structurale réelle de l'échantillon représentait environ 3500  $cm^3$ .

En ce qui concerne la dispersivité, c'est à dire le coefficient multiplicateur de la vitesse dans le calcul de la dispersion hydrodynamique, les valeurs calées ont été de 2,0, 1,8 et 1,5 cm pour les trois débits considérés. Ces valeurs sont tout à fait cohérentes pour un matériau non remanié, c'est à dire présentant une large gamme de variation des débits locaux dans une section du profil de sol. Elles concordent parfaitement avec les dispersivités habituellement relevées dans la littérature pour les expérimentations conduites in-situ. Il est à noter qu'elles diminuent avec la vitesse, ce qui conduit à des coefficients de dispersion hydrodynamiques relativement proches pour les trois débits. En fait le poids de ce coefficient sur les courbes d'élutions est limité aux temps courts et influence peu ou pas le restant de la courbe et en particulier la valeur du plateau qui indique la quantité de soluté diffusant dans les films liquides, les agrégats ou plus généralement la porosité texturale du sol. En ce qui concerne la forme des agrégats, nous avons choisi de travailler avec des agrégats sphériques. C'est à dire en fait que dans le modèle a été utilisé avec la fonction de forme correspondant à cette géométrie de blocs



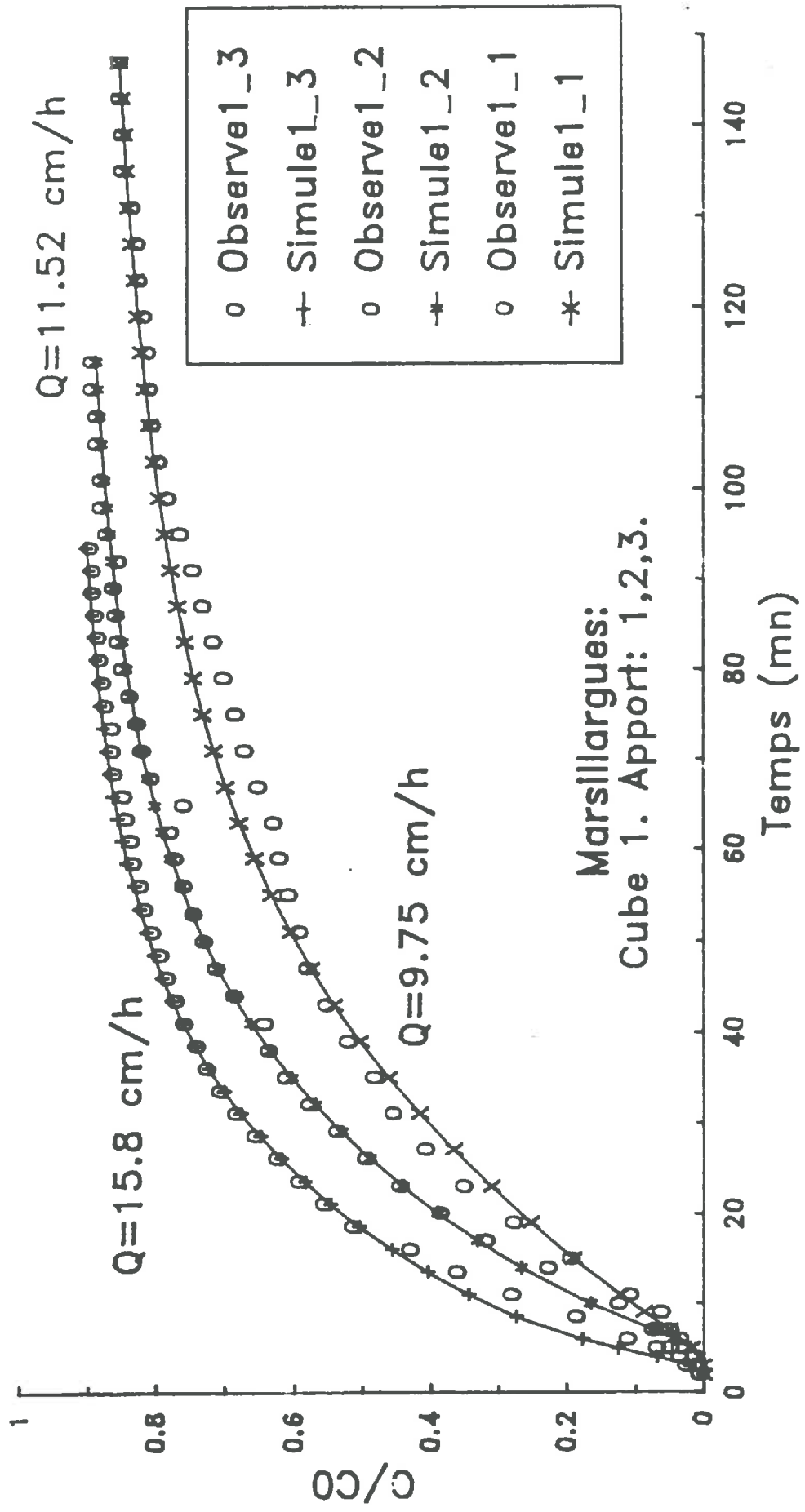


Fig. 14 – Comparaison des courbes d'élevation mesurées et simulées pour trois débits différents.

poreux. Il est de plus largement reconnu, et cela a été observé lors de l'expérimentation, (découpage de l'échantillon), que les blocs poreux sont entourés de films d'eau. Par ailleurs, des zones d'eau immobiles, en contact avec la phase mobile existent aussi dans le milieu. Le modèle tient donc compte de ces caractéristiques du milieu en simulant la présence d'un film d'eau qui, d'une part retient une certaine quantité de Nitrate et d'autre part constitue une impédance à la diffusion du soluté de la phase mobile vers l'intérieur de la porosité texturale. Dans notre cas nous avons supposé que l'échange entre la phase mobile et ces zones d'eau obéissait à un processus du premier ordre. Un coefficient de transfert a donc été choisi de façon à assurer un échange rapide entre ces deux phases et on a calé la surface d'échange de ces blocs et l'épaisseur du film d'eau. Cette épaisseur du film d'eau a été calée sur la première courbe d'élution à 3/100 de mm et par la suite utilisée pour les deux autres simulations. Ce paramètre qui joue surtout le rôle d'un stockage rapide de Nitrate, retarde l'arrivée du soluté à une cote donnée, mais influence peu le niveau du plateau de la courbe d'élution.

La surface d'échange des agrégats par unité de volume a été calée pour les trois débits. C'est elle qui conditionne pour une très grande part la quantité de soluté retenue dans la porosité texturale. En fait des valeurs assez proches ont été obtenues pour les trois débits (en moyenne  $35 \pm 2 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ ). On a donc en définitive calé 3 paramètres: la dispersivité, l'épaisseur des films d'eau (calée pour un seul débit), et la surface d'échange par unité de volume. Toutes les autres caractéristiques du milieu requises par le modèle, coefficient de diffusion dans les agrégats par exemple, ont été mesurées et utilisées telles quelles dans le modèle.

La figure 14 présente la comparaison des simulations avec l'expérimentation. On pourra constater l'agrément quasi parfait entre les données et les résultats restitués par le modèle. Des modèles moins déterministes et mécanistes que celui-ci auraient pu être calés sur ces expérimentations avec d'aussi bons résultats. Leur inconvénient majeur est le calage de paramètres dont les liens avec les caractéristiques du milieu sont difficiles voire impossibles à établir. Ce qu'il faut souligner avec le modèle développé ici, c'est le faible nombre de paramètres utilisés, le fait que ce sont des paramètres ayant un sens physique, même s'ils ne sont pas accessibles par la mesure, et enfin le fait qu'il n'y a presque pas de corrélation entre ces paramètres.

Outre les courbes d'élutions, le modèle restitue les différents termes du bilan en Nitrate. Toutefois, en l'état actuel, le modèle ne permet pas de prendre en compte des variations de structure du sol et donc des variations de la surface d'échange entre phases avec la profondeur. Cette partie est en cours de développement. Il semble donc que l'on dispose d'un outil puissant, qui dans le futur devrait permettre de simuler avec une précision acceptable la circulation des Nitrates dans la zone non-saturée pour des milieux structurés tels que ceux présents sur les sites expérimentaux.

## CONCLUSION

De l'ensemble des résultats obtenus au terrain il ressort que :

-L'humidité du sol pour la profondeur explorée (0-2 m) reste élevée en début de saison. La nappe perchée ne descend pas au-dessous de 1 m jusqu'à fin Mai.

-L'influence de l'absorption racinaire durant la période d'irrigation se perçoit jusqu'à 1,6 m de profondeur, mais la diminution de la teneur en eau du sol n'est pas suffisante pour entraîner une modification de son état structural.

-La teneur en nitrate du sol avant fertilisation présente un profil uniforme jusqu'à 1 m de profondeur, avec une valeur moyenne de 60 kg de nitrate/ha par tranche de 20 cm d'épaisseur. Cette quantité se trouve multipliée par 3 dans la couche 160-190 cm.

-Quinze jours après épandage et une irrigation de 700 mm, le pulse de nitrate se trouve dans la tranche 0-80 cm, alors que la couche 160-190 cm conserve une teneur élevée en nitrate.

-Le sondage réalisé dans le sous sol indique la présence d'une quantité non négligeable de nitrate qui pourrait-être à l'origine d'une pollution diffuse de l'aquifère.

-Le suivi nitrate des 2 sites durant la période d'irrigation met en évidence le problème de la variabilité de répartition de cet élément, ce qui limite l'interprétation quantitative de résultats donnés à l'échelle locale.

-les mesures de flux permettent d'évaluer directement dans le temps la fonction puits racinaire des arbres vis à vis de l'extraction de l'eau du sol en fonction des variables qui régissent et sa disponibilité et sa demande tant au niveau instantané que cumulé. Elles apparaissent de plus être un moyen d'appréciation de l'efficacité de l'eau d'irrigation appliquée à la culture et un outil de décision concernant une modification éventuelle du mode d'apport de l'eau au verger.

En ce qui concerne la modélisation de la circulation du Nitrate, on dispose d'un modèle déjà très élaboré mais encore

en cours d'amélioration. Les résultats obtenus montrent que l'on peut raisonnablement espérer prédire avec une bonne précision la circulation du soluté dans le milieu, et donc les quantités de Nitrate retenues dans la matrice poreuse ou atteignant la nappe. Il faut toutefois souligner que la prévision de la pollution de l'aquifère est un problème qui a une composante spatiale. C'est à dire que le modèle essentiellement local qui est développé devra être utilisé avec paramètres, conditions aux limites et conditions initiales variables dans l'espace. C'est à cette condition que l'on pourra estimer les probabilités qu'arrive au niveau de la nappe une certaine quantité de Nitrate. Malgré cet aspect stochastique, l'utilisation et la mise au point d'un modèle déterministe et mécaniste reste essentiel pour, être capable de comprendre "ce qui se passe", analyser l'importance des différents paramètres et garder une capacité de prédiction que perdrait un modèle avec des paramètres sans sens physique ou difficilement reliés à la physique du phénomène.

## PERSPECTIVES

Outre les travaux en cours, il devrait-être entrepris pour l'année 1989 en liaison avec l'E.N.G.R.E.F. et l'U.T.L.

-Au niveau de l'aquifère, la détermination du  $\delta^{15}\text{N}$  de l'azote nitrique afin de tenter de préciser l'origine des nitrates.

-Au niveau du sous sol, l'étude abordée en 1988 devrait-être reprise pour déterminer si la quantité de nitrate présente dans le milieu poreux est importante.

-Au niveau de la parcelle du C.E.H.M., une tentative de validation du modèle. Le site expérimental d'une superficie d'environ 12x6 m, positionné autour du puits central devrait être équipé en deux points. Sur chacun sera implanté 5 tubes pour la mesure de l'humidité et de la densité à la sonde neutrons-gamma, 10 tensiomètres pour le pilotage de l'irrigation, 3 capteurs de solution pour le suivi des nitrates, l'information de ces derniers étant complétée par des prélèvements de sol à la tarière et des fluxmètres à raison de 1 par arbre. Parallèlement à cela un suivi de l'aquifère sera assuré.

## BIBLIOGRAPHIE

- BOURLET M., 1980** - Etude complémentaire des sols du mas de Carrière Marsillargues (34).
- BOUSQUET V., 1987** - Transferts d'eau et de nitrate dans un sol en présence d'une fonction puits racinaire. Etude expérimentale  
Mémoire de fin d'étude E.N.I.T.H. d'ANGERS.
- CABIBEL B., 1987** - Estimation des comportements hydriques et des flux de sève dans des pommiers en irrigation localisée sur sol fissuré.  
3. Journées Helléniques de l'Hydraulique, Journées Nationales de l'Hydrotechnique, Thessalonique (GRC), 1987/10/07-09. EYE Société Hydrotechnique Hellénique, Thessalonique (GRC). Hydrotechnica, 113-126.
- CABIBEL B, DO F., 1987** - Mesure des flux de sève brute dans les racines et les troncs de pommiers en phase de préirrigation.  
Colloque franco-israélien, Bordeaux(FRA), 1987/10/19-23.
- de COCKBORNE A.M., GUENNELON R., 1986** - La diffusion de l'ion  $\text{NO}_3^-$  influencée par la structure et l'humidité du sol.  
Zeszyty Problemowe Postepw Nauk Polniczych 1986, z.32.
- de COCKBORNE A.M., 1987** - L'électrode spécifique de l'ion nitrate.  
Note interne, I.N.R.A. Science du Sol Avignon.
- de COCKBORNE A.M., JAUZEIN M., STENGEL P., GUENNELON R., 1988**  
Variation du coefficient de diffusion de  $\text{NO}_3^-$  dans les sols : Influence de la teneur en eau et de la porosité.  
Agronomie 8 (10), 905-914.
- DO F., 1986** - Estimation des flux racinaires et du comportement hydrique de pommiers sous irrigation localisée en sol fissuré.  
Mémoire de fin d'études, ENITA, Bordeaux.
- DO F., 1987** - Caractérisation spatiale de l'extraction racinaire par la mesure des flux de sève brute en conditions initiales d'humectation homogène du sol. D.E.A. option Science du sol.  
ENSA Montpellier - USTL Montpellier.
- GARCIA M., 1986** - Transferts d'eau et de nitrates dans un sol en présence d'une fonction puits racinaire. Etude expérimentale  
Mémoire de fin d'étude, E.N.I.T.A BORDEAUX.

- GLEMAREC Y., 1988 - Essai de quantification de l'incidence des pratiques culturales sur le transfert des substances azotées en arboriculture.  
D.E.A. option hydraulique agricole, E.N.G.R.E.F. MONTPELLIER.
- GRANIER A., 1985 - Une nouvelle méthode pour la mesure des flux de sève brute dans le tronc des arbres.  
Ann. Sci. For., 42(2), 193-200.
- HERBET M., 1988 - Etude du transfert de l'ion nitrate dans le sol.  
Rapport de fin d'étude, I.U.T. MARSEILLE.
- JACOG M., 1988 - Etude de la variation du coefficient de diffusion de l'ion nitrate dans un sol non saturé.  
Rapport de fin d'étude, I.U.T. MONTPELLIER.
- JOST W., 1960 - Diffusion in solids, liquids, gases.  
Academic Press inc. New-York.
- LAFOLIE F., 1988 - Modélisation des transferts de solutés en milieu poreux hétérogène.  
Note interne, I.N.R.A. Science du Sol AVIGNON.
- LINDEMAN Y., 1986 - Contribution à l'étude statistique des répartitions et de la modélisation de la dynamique de l'azote nitrique dans le sol.  
Thèse docteur es science, Université de Paris-Sud centre d'ORSAY.
- LEFEVRE G., DROUINNEAU G., 1951 - Variations saisonnières de la teneur en azote minéral dans un sol calcaire soumis au climat méditerranéen.  
Ann. Agron., 1-12.
- PAUL P., 1984 - Etude de la migration des ions phosphate et nitrate en irrigation localisée fertilisante sur sol fissuré.  
Licence de gestionnaire de l'eau en milieu agricole méditerranéen. Faculté des sciences d'AVIGNON.
- PROUST M., 1987 - Transferts d'eau et de nitrate dans un sol en présence d'une fonction puits racinaire.  
Rapport de fin d'étude, BTS.
- QUASH S., 1988 - Hydrodynamique souterraine et hydrochimie des zones saturées sur 2 sites expérimentaux.  
D.E.A., option hydrogéologie, U.S.T.L. MONTPELLIER.
- STENGEL P., 1979 - Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ.  
Ann. Agro. vol. 30(1) 27-49.
- STENGEL P., 1982 - Swelling potentiel of soil as a criterium of permanent drilling stability.  
9. Conférence ISTRO, OSIJEK (yug.) ISTRO Wageningen 131-136.