

FACULTE DES SCIENCES DE DIJON



n° d'ordre : 17

Mémoire présenté pour l'obtention

du titre de :

Docteur du 3ème cycle

Sciences de la Terre.

Sujet

DYNAMIQUE COMPAREE DE L'EAU ET DE L'AZOTE
DANS UN SOL BRUN ARGILO-LIMONEUX SUR MARNE
DE LA REGION DE DIJON

Soutenu le 17 janvier 1970

par Yves CLOUET

Jury

M. P. RAT Président

M. N. LENEUF

Mme S. MERIAUX

Directrice de la Station d'Agronomie
de l'I.N.R.A. à Dijon

M. A. FEODOROFF

Maître de Recherche au C.N.R.A.
Station Centrale d'Agronomie à
à Versailles

DYNAMIQUE COMPAREE DE L'EAU ET DE L'AZOTE

DANS UN SOL BRUN ARGILO-LIMONEUX SUR MARNE DE LA REGION

DE DIJON

Que chacun trouve en ces quelques mots trop modestes, l'expression de mes remerciements ainsi que de ma profonde gratitude pour l'aide efficace, les conseils judicieux, la compréhension et la sympathie qui m'ont été sans cesse apportés au cours de ce travail

Mme MERIAUX	Directeur de Recherches à l'I.N.R.A.
M. LIBOIS	Chargé de Recherches à l'I.N.R.A. et les membres de la Station de l'I.N.R.A.
M. RAT	Professeur à la Faculté de Sciences,
M. LENEUF	Professeur à la Faculté de Sciences et les membres du Département des Sciences de la Terre,
M. FEODOROFF	Maître de recherches au C.N.R.A.
M. TURC	Maître de recherches au C.N.R.A.
M. VIGNON	Chargé de cours de mathématiques à la Faculté des Sciences
M. RIES et Melle BOURGAUX.	

Table des matières (texte)

	Pages
Plan du travail	1
CHAPITRE I : Présentation du travail	2
CHAPITRE II : Conditions de milieu	6
I/ INTRODUCTION	7
II/ ETUDE DU CLIMAT	7
Les pluies	7
Les températures	7
L'évaporation	8
III/ ETUDE DU TERRAIN	8
1/ Aperçu géologique	8
2/ Description pédologique	8
A/ Etude du profil	8
a) Localisation	8
b) Description du profil	9
B/ Eau du sol	10
a) Etats de l'eau dans le sol	10
- L'eau hygroscopique	10
- L'eau capillaire non absorbable	10
- L'eau capillaire absorbable	10
- L'eau de gravité	10
b) Etude de la capacité au champ	11
- Choix et description d'une méthode de calcul	11
- Résultats obtenus	12
- Discussion	12
1) en surface	13
2) en profondeur	13
3) couche argileuse	13
4) Conclusion	13

CHAPITRE III : Présentation des données de départ	14
I/ INTRODUCTION	15
II/ PRESENTATION DES DONNEES	15
1/ Diagrammes d'évolution annuelle sur la totalité du profil	15
a) Répartition des précipitations au cours du temps	15
b) Variation de la quantité d'eau retenue dans le sol	16
c) Variation de la quantité totale d'azote dans le sol	16
d) Variation de la concentration des nitrates "	16
2/ Diagrammes d'évolution annuelle par niveau (année 1965)	16
3/ Etude des profils hydriques et des profils nitriques	17
- Profils hydriques	17
- Profils nitriques	18
4/ Etude des bilans hydriques et des bilans nitriques	18
- Bilans hydriques	18
- Bilans nitriques	18
III/ INTERPRETATION DES DONNEES	19
1) Interprétation proposée par LIBOIS	19
2) Remarques personnelles et conclusion	20
CHAPITRE IV : Analyse des données	21
I/ INTRODUCTION	24
II/ RECHERCHE DES FACTEURS D'EVOLUTION DE L'AZOTE ET DE L'EAU DANS LE SOL EN PLACE	24
A/ Démarche employée pour l'exploitation des données	24
B/ Description et analyse de certaines données	25
1/ Analyse des migrations en relation avec les gains et les pertes d'eau du sol	25
a) Régime de gain en eau dominant	25
- Description du régime pluvial	26
- Description de l'état hydrique initial du sol	26
- Evolution de la teneur en eau du sol au cours des périodes étudiées	26

.../...

	3
- Les déficits hydriques	26
- Les bilans hydriques	27
- Profils nitriques initiaux	27
- Evolution de la teneur en azote nitrique du sol au cours des périodes envisagées	27
1) 1 au 14 août 1963	27
2) 21 octobre au 4 novembre 1963	28
b) Régime de pertes en eau dominantes	28
1 ^{er} exemple : période du 24 mai au 7 juillet 1964	28
- Situation hydrique et nitrique initiale	28
- Evolution des quantités d'eau du sol	29
- Evolution des nitrates du sol	29
2 ^{ème} exemple : période du 14 juin au 29 juin 1965	30
- description du régime hydrique	30
- Situation hydrique et nitrique initiale	30
- Evolution des quantités d'eau dans le sol	30
- Evolution des nitrates dans le sol	30
2/ Analyse des migrations en relation avec l'état hydrique initial du sol	30
a) Différence entre sol sec et sol humide	31
- Conditions hydriques initiales et évolution	31
- Situation nitrique initiale et évolution	31
b) Description d'écoulement de l'eau dans le sol par les fentes de retrait	32
- Description de l'état hydrique initial du sol	32
- Evolution de l'état hydrique - migration des chlorures	32
3/ Influence des caractères physiques du sol	33
C/ Discussion	33
Introduction	33
1/ Facteurs extérieurs au milieu	34
- Influence de l'intensité	34
- Période de gains dominants	34
- Période de pertes dominantes	34

.../...

	4
- Evaporation rapide	34
- Evaporation lente	35
- Influence de la quantité	35
2/ Facteurs du milieu	36
- Influence de l'état hydrique initial du sol	36
- sol humide (proche (ou à) la capacité au champ)	36
- Réhumectation et infiltration sur sol sec	36
- Comparaison entre la circulation de l'eau en sol sec et en sol humide	37
- Pénétration de l'eau en sol très sec (fentes de retrait)	38
Propriétés physiques du sol	39
D/ Tableau récapitulatif des résultats obtenus	40
E/ Conclusion	42
a) Le rythme des pluies	42
b) L'importance des précipitations	42
e) Etat hydrique du sol	43
d) Propriétés physiques du sol	43
III/ ETUDE AU LABORATOIRE	44
A/ Introduction	44
B/ Proposition d'un schéma récapitulatif	45
1/ Etude bibliographique	45
- la diffusion	45
- la dispersion hydrodynamique	45
2/ Propositions	46
3/ Proposition d'un schéma interprétatif du déplacement avec mélange	47
a) Représentation d'un déplacement du traceur par effet piston théorique	47
b) Représentation d'un déplacement du traceur avec phénomène de diffusion	47

.../...

c) Représentation du déplacement du traceur avec phénomènes de diffusion et de dispersion hydrodynamique dans des gros pores	48
d) Représentation d'un écoulement dans des pores de différents diamètres	48
- cas d'une coexistence de 2 classes de pores	48
- cas d'un mélange faisant intervenir 3 classes de pores	49
e) Variation des vitesses	49
f) Cas du sol	50
g) Sol sec - sol humide	50
Conclusion	51
 C/ Technique d'étude	 52
1/ Technique choisie	52
- Principe	52
- Mode opératoire	53
a) Réactifs	53
b) Matériel utilisé	53
c) Préparation du matériau	54
d) Technique de dosage	55
2/ Expression des résultats	55
a) Cas où l'on recueille un éluat	56
b) Cas où l'on ne recueille pas d'éluat	56
 D/ Résultats obtenus	 56
1/ Etude d'un écoulement théoriquement sans mélange	56
a) Mise en évidence à partir d'un modèle expérimental	56
b) Différents modes d'expression	57
2/ Influence de la vitesse de pénétration de l'eau de percolation sur la migration	57
a) Cas de billes de verre monodimensionnelles	57
- Modèle expérimental	57
- Résultats	58

.../...

	6
b) Cas de billes de verre pluridimensionnelles	58
- Modèle expérimental	58
- Résultats obtenus	58
c) Cas du sol	
- Conditions expérimentales	59
- Faits observés	59
d) Conclusion	60
3/ Influence de l'état hydrique initial du sol sur la migration	60
a) Modèles expérimentaux	60
b) Faits observés	61
- Première série d'expériences	61
- Deuxième série d'expériences	61
- Troisième série d'expériences	62
c) Résumé des expériences - sol sec, sol humide	63
4/ Etude de la dispersion sur différents mélanges de billes	64
E/ Discussion des résultats	65
1/ Influence conjuguée de la vitesse d'apport de l'eau et de l'hétérogénéité des classes de pores	65
a) Cas d'un milieu poreux monodimensionnel	65
b) Cas d'un milieu poreux pluridimensionnel et cas d'un sol	66
b1) Faible vitesse d'apport de l'eau pure	66
b2) Forte vitesse d'apport	66
2/ Influence de l'état hydrique initial	66
a) Rôle de la concentration initiale - déplacement du traceur	66
b) Déplacement de l'eau marquée et importance du mélange	
b1) si le sol est initialement sec	
b2) si le sol est initialement humide	
b3) Déplacement du traceur et de l'eau marquée	69
b4) Schéma interprétatif	69
b5) Cas des sols très secs	69

.../...

IV/ RESUME ET CONCLUSION	70
1/ Influence de la répartition des précipitations dans le temps	71
2/ Influence de l'hétérogénéité des classes de pores	71
3/ Influence de l'état hydrique initial	
4/ Influence de la hauteur des précipitations	72

Bibliographie.

I/ INTRODUCTION

II/ CONDITIONS DE MILIEU

- 1/ Climat
- 2/ Terrain

III/ DONNEES DE DEPART

- 1/ Résultats de LIBOIS
- 2/ Interprétation
 - LIBOIS
 - remarques personnelles et conclusion

IV/ ANALYSE DES DONNEES

- 1/ Introduction générale
- 2/ Recherche des facteurs de distribution de l'azote et de l'eau dans le sol en place
 - introduction
 - description et analyse de certaines données
 - milieu extérieur
 - état hydrique du sol
 - caractéristiques physiques du sol
 - interprétation
 - conclusion
- 3/ Etude de laboratoire
 - introduction
 - proposition d'un schéma d'écoulement
 - technique d'étude
 - résultats
 - écoulement théoriquement sans mélange
 - influence de la vitesse de pénétration
 - influence de l'état hydrique initial
 - influence de la porosité
 - discussion
- 4/ Conclusion générale

Annexe I : Graphiques

Annexe II : Techniques expérimentales sur le terrain

Annexe III : Approche de la migration des nitrates par une courbe de Gauss ;
discussion des paramètres.

CHAPITRE I - PRESENTATION DU TRAVAIL

A la suite d'une expérimentation sur la dynamique de l'azote minéral conduite par A. LIBOIS (1968) dans un sol nu situé dans le domaine de la Station de l' I.N.R.A. de Dijon, sol soumis au climat semi-continental du Centre-Est, certains facteurs biochimiques et physiques susceptibles d'influencer l'évolution de l'azote minéral ont été mis en évidence ; toutefois, de nombreuses données accumulées au cours de ce travail concernant l'eau, n'avaient pas été exploitées par l'auteur.

Il paraissait intéressant de les mettre en valeur afin d'approfondir les relations existant entre l'azote minéral, l'eau et le sol. Ceci revenait à étudier les différents modes de circulation de l'eau en relation avec le transport des substances chimiques qui y sont dissoutes.

D'une façon générale, l'importance de ces phénomènes avait déjà été révélée au cours d'études sur le développement des sols (HENIN (1945), DUCHAUFOUR (1951), BLOOMFIELD (1952)), sur leur lessivage, sur leur pollution ou sur leur dessalinisation (en polder : VAN DER MOLEN (1956) ou en région désertique : BRESLER (1967)). Ces travaux ont fait ressortir de nombreuses relations entre la circulation de l'eau et les mouvements des ions alcalins (Na^+ , K^+), alcalino-terreux (Mg^{++} , Ca^{++}) et métalliques (Fe^{+++} , Al^{+++}).

Des constatations analogues avaient également pu être faites par différents agronomes en ce qui concerne l'action des pesticides (DAVIDSON (1968)) et des éléments fertilisants. En effet, la migration de ces substances incorporées artificiellement au sol conditionne leur action.

En ce qui concerne les nitrates, les premiers résultats de terrain avaient été obtenus sur case lysimétrique. Ainsi DEMOLON (1940) puis BASTISSE (1951) soulignaient que les pertes de nitrates du sol sont fonction des quantités présentes initialement et de l'importance des précipitations.

Dès cette époque, HALLAIRE (1953) mettait en évidence différents types de circulation de l'eau dans le sol ; il distinguait ainsi des mouvements de l'eau par gravité régis par la loi de DARCY en sol sec comme en sol humide et des mouvements ascendants capillaires pouvant éventuellement aboutir à la formation d'une couche protectrice séchée. KRANTZ (1944) puis COLLIER (1955) précisaient que dans certains cas, les nitrates du sol avaient tendance à remonter et à se regrouper en surface à la suite d'une période sèche et expliquaient ainsi leur élution et leur récupération massive dans les cases lysimétriques à la suite de pluies importantes (COLLIER et ROBELIN (1959)).

.../...

D'autre part, des travaux de MOOERS (1927) avaient déjà mentionné qu'en sol argileux les nitrates étaient récupérés dans les cases lysimétriques beaucoup plus difficilement qu'en sol limoneux ou sableux.

WETSELAAR (1961) avait remarqué le même phénomène d'accumulation des nitrates dans la couche superficielle de sols tropicaux nus après une longue période de sécheresse.

Cet auteur, après avoir pensé à la possibilité d'une minéralisation localisée de l'azote dans des couches de surface, éliminait ensuite cette hypothèse en raison de la température trop élevée de sol. Il rejetait également l'éventualité d'une oxydation photochimique en raison de la faible pénétration de la lumière et de la répartition même des nitrates : leur décroissance avec la profondeur était linéaire au lieu d'être logarithmique. Il a donc été conduit à envisager des phénomènes purement physiques, c'est-à-dire la possibilité d'une remontée de l'eau avec phénomène de rupture de lien capillaire en dessous de la couche fortement desséchée ; la zone d'accumulation correspond alors à la couche immédiatement sous-jacente.

Il devenait alors nécessaire de chercher à relier le lessivage et la remontée des nitrates aux mouvements de l'eau dans le sol.

Parallèlement à ces études de terrain, THOMAS (1957) au laboratoire constatait en reprenant les travaux de ROUSSEL (1913) l'influence de la circulation de l'eau sur le déplacement des nitrates. Dès cette époque il devenait toutefois difficile d'assimiler leur déplacement à un tout soumis aux lois de DARCY ; comme le faisait HALLAIRE (1953) suivant cette hypothèse on ne pouvait plus expliquer leur variation de concentration au cours du déplacement.

On a alors tenté d'expliquer cette variation de concentration par des différences de distances parcourues au cours de la migration. Arrivées à ce niveau, les hypothèses faisaient appel à deux notions distinctes : la diffusion pouvant se produire indépendamment du mouvement, l'hétérogénéité des vitesses de circulation liée essentiellement au déplacement. Nous aurons l'occasion de revenir sur ces notions que nous développerons plus en détail.

HARDY (1959) précisait que l'écoulement devait être suffisamment rapide pour que la diffusion soit négligeable. Au contraire, THOMAS et BERG (1959) pensaient à un rôle prépondérant de la diffusion. Grâce à leurs nombreuses expériences de laboratoire BIGGARD J. W. et NIELSON D. R. (1961, 1962, 1963, 1964) ainsi que CORREY R. J. et BIGGARD (1963, 1965)

.../...

discernaient de façon assez nette l'influence relative de la diffusion et de l'hétérogénéité des vitesses.

Toujours au laboratoire, FEODOROFF (1962, 1963, 1965) confirmait les remarques de MARSCHALL et GURR (1954) sur l'infiltration de l'eau en sol sec. Il analysait la cinétique du phénomène et étudiait la redistribution de l'eau dans le sol après la pluie. Il notait au cours de ce phénomène l'existence de deux stades différents :

Une période d'écoulement rapide qui s'atténue au fur et à mesure que la teneur en eau de chaque couche préalablement réhumectée baisse. Elle cesse pour une certaine valeur de la humidité appelée capacité au champ que nous définirons avec précision ultérieurement. Le second stade de la redistribution est caractérisé par un mouvement très lent.

FEODOROFF constatait en outre que la vitesse d'infiltration influait indirectement sur la rapidité de la redistribution de l'eau. M. COURAU (1966, 1967, 1969) reprenant les travaux de ce chercheur, précisait la notion d'infiltration.

Les études de FEODOROFF et de RAFI (1964) sur l'évaporation confirmaient au laboratoire les résultats obtenus par WESTELAAR (1961) sur le terrain.

C'est à cette époque que nous avons pris connaissance des travaux de A. LIBOIS (1968) et que nous nous sommes proposés d'étudier les problèmes soulevés par une dynamique comparée de l'eau et de l'azote dans un sol brun argileux sur marne de la région dijonnaise. Le travail entrepris nécessitait tout d'abord une reprise des données et un rappel des conclusions de l'auteur sur les résultats obtenus lors de ses essais en sol nu pendant quatre années.

Ce travail fait l'objet d'un chapitre spécial (Chapitre III : "Présentation des données") que nous avons fait précéder d'un rappel des conditions de milieu (Chapitre II).

Nous avons alors entrepris une analyse détaillée des données de terrain en vue de mettre en évidence certains mécanismes de l'écoulement de l'eau dans le sol, ces derniers demandant à être vérifiés et précisés par des études au laboratoire à partir de modèles aussi proches que possible des conditions de terrain (Chapitre III).

.../...

CHAPITRE II - CONDITIONS DE MILIEU

CHAPITRE II - CONDITIONS DE MILIEU

I/ INTRODUCTION

II/ ETUDE DU CLIMAT

1/ Les pluies

2/ Les températures

3/ L'évaporation

III/ ETUDE DU TERRAIN

1/ Description géologique

2/ Description pédologique

- Profil

- Eau et sol

I/ INTRODUCTION

Nous allons définir les conditions de climat et de terrain qui interviennent de façon importante sur la dynamique de l'eau et celle de l'azote dans les expériences conduites en plein champ. Au cours de cette étude, nous envisagerons également la détermination d'une valeur caractéristique de l'eau dans le sol : la capacité au champ.

II/ ETUDE DU CLIMAT

Le climat, de type continental, présente des écarts saisonniers importants observables sur les graphiques 1 - 2 - 3 où sont portées les valeurs de la température, des précipitations et de l'évaporation au cours des années 1963 - 1964 - 1965 obtenues lors de relevés journaliers effectués à la Station d'Agronomie de Dijon. L'étude suivante rappelle brièvement l'évolution de ces données météorologiques pour une période beaucoup plus importante.

Les pluies :

A la suite d'observations concernant 40 années, GUICHERD et JANNIN (1926), constatent que dans la région dijonnaise, les pluies sont abondantes une année sur deux et atteignent en moyenne 700 mm répartis en 160 jours/an. Toutefois, cette répartition au cours de l'année est inégale et irrégulière. L'été et l'automne sont en général les saisons pluvieuses, le printemps et l'hiver sont plus secs. Octobre, puis mai et juin sont les mois les plus humides. En saison estivale toutefois, ce sont les pluies d'orage qui donnent la majeure partie des précipitations.

Les températures :

La moyenne des températures de l'air relevées sous abri pendant 40 années dans la région dijonnaise est, d'après GUICHERD et JANNIN (1926), de + 10°C et les écarts annuels au-dessous ou au dessus de cette dernière ne dépassent pas un degré. Janvier est le mois le plus froid (+ 1,5°C) et juillet le mois le plus chaud (+ 19,4°C). La progression est régulière de l'hiver à l'été.

.../...

ROUX (1911) note comme températures extrêmes le minimum de $- 24^{\circ}$ en décembre et des maxima de $+ 40^{\circ}$ en juillet. Le thermomètre ne dépasse $+ 30^{\circ}$ qu'en moyenne 17 jours par an.

L'évaporation :

Elle est liée à la température, à l'ensoleillement, au degré hygrométrique et à la turbulence de l'air. On constate qu'elle est relativement élevée au printemps et en été, plus faible en automne. Elle peut atteindre 10 mm en juillet (GUICHERD et JANNIN (1926)) (l'appareil de mesure n'est pas précisé par l'auteur).

III/ ETUDE DU TERRAIN

Cette étude comporte deux aspects :

1/ Aperçu géologique :

Le substratum géologique est essentiellement constitué par l'Oligocène supérieur (M_{I-II}) appelé "conglomérat saumon" ; il comporte des calcaires marneux et des marnes qui affleurent sur quelques kilomètres en bordure de la cuvette bressanne, ces assises ayant été ultérieurement recouvertes de limon provenant vraisemblablement du plateau jurassique.

2/ Description pédologique :

La description pédologique a été effectuée par CHRETIEN (1969) qui a déterminé la texture, la structure, la couleur et les caractères biologiques observables sur les différents horizons du profil (paragraphe A). Nous avons par ailleurs déterminé la valeur de la capacité au champ sur chacun des niveaux correspondant aux prélèvements de LIBOIS par une méthode que nous préciserons dans le second paragraphe (paragraphe B).

A/ Etude du profil (CHRETIEN (1969))

"a) Localisation

- altitude : 269 m
- position géomorphologique : terrain disposé à plat non susceptible de recevoir des apports d'eau latéralement

.../...

- roche-mère : limon argileux sur marne sableuse de l'Oligocène supérieur
- Type de sol : sol brun calcique
- Végétation : terre labourable, entretenue sans végétation pendant la durée des expériences.

b) Description du profil :

- A_{1p} - 0-20 cm : brun jaune foncé (10 YR 4/4 sur sol en place), moyennement humifère - texture argilo-limoneuse et consistance assez forte - structure de type grumeleux avec une tendance polyédrique anguleuse vers le bas. quelques petits cailloux et graviers calcaires - quelques rares graviers de silice. Présence de petites racines très saines - terre fine, légèrement calcaire - Limite peu nette.
- A₁ - 20-33 cm : brun jaune foncé (10 YR 4/4) - moyennement humifère - texture argilo-limoneuse - moins compact et moins humide que l'horizon supérieur. Structure à tendance polyédrique un peu plus grossière - quelques cailloux et graviers - présence de petites racines très saines dans les galeries de vers - terre fine, légèrement calcaire.
- (B) 33-47 cm : Brun jaune foncé (10 YR 4/4) - peu humifère - moins humide et moins compact - texture argilo-limoneuse - structure polyédrique très nette tendant à s'orienter verticalement. Surface des agrégats légèrement luisante. Terre fine, légèrement calcaire mais surface des agrégats non calcaire. Quelques inclusions marneuses mais très peu de cailloux et graviers. Présence de grosses cavités et galeries de vers où circulent les racines très saines.
- (B)/C - 47-66 cm : marne altérée, brun fort (7,5 YR 5,8) - avec des infiltrations verticales de l'horizon sous-jacent jaune brun (10 YR 5/4) - moins frais, texture argileuse et structure assez massive. Réseau d'infiltrations limoneuses dans les galeries de vers où passent les racines très saines. Très calcaire - pas de cailloux ni de graviers.
- C₁ - 66-76 cm : marne altérée jaune (10 YR 7/8) qui renferme un petit lit assez irrégulier de cailloux blancs vraisemblablement calcaire de recristallisation - Texture limono-argileuse - structure fragile à tendance grossièrement prismatique. Très calcaire - Réseau

.../...

d'anciennes galeries de vers avec limon humifère et quelques petites racines saines.

C₂ - 76-125 cm : marne jaune (10 YR 7/8) très calcaire un peu graveleuse - Texture sablo-limoneuse - roche très friable non structurée et légèrement humide. Pas de litage très apparent et aucune trace d'hydromorphie. Galeries de vers et racines de plus en plus rares".

B/ Eau du sol

a) Etats de l'eau dans le sol (DUCHAUFOUR(1965))

- "L'eau hygroscopique : C'est l'eau du sol en équilibre avec l'humidité atmosphérique ; elle forme autour des particules du sol une mince pellicule, énergiquement retenue et n'est susceptible d'aucun mouvement.

- L'eau capillaire non absorbable : Elle remplit les pores capillaires les plus fins (0,2 microns, d'après RICHARD, 1953). Cette eau est susceptible de circuler par suite des variations de pression osmotique ou de tension superficielle.

- L'eau capillaire absorbable : C'est l'eau retenue par le sol ressuyé qui remplit les pores fins de 0,2 à 8 microns. La quantité maximum d'eau capillaire que peut retenir le sol augmentée de l'eau hygroscopique correspond sensiblement à la porosité capillaire ou microporosité.

- L'eau de gravité : Elle correspond à l'eau qui remplit, momentanément -après une pluie ou une irrigation- les pores les plus grossiers du sol. Elle obéit à la pesanteur et s'écoule d'autant plus vite que le volume des pores grossiers (porosité non capillaire) est plus élevé. Mais on peut diviser cette eau de gravité en deux fractions : 1) une fraction qui s'écoule très rapidement, correspondant à celle qui circule dans les pores les plus gros ; 2) une fraction qui s'écoule plus lentement et qui peut saturer les pores non capillaires les plus fins pendant plusieurs jours en période humide, avant d'être évacuée progressivement par gravité".

.../...

b) Etude de la capacité au champ

D'un point de vue statique, DUCHAUFOUR (1965) définit la capacité au champ comme la quantité maximum d'eau capillaire du sol augmentée de la plus grande partie de l'eau de gravité à écoulement lent. D'un point de vue dynamique FEODOROFF (1965) la définit comme étant la plus forte humidité du sol pour laquelle les transferts d'eau sont les plus lents. Pour notre étude, elle représente une valeur de référence permettant de juger l'état hydrique du sol au moment de l'observation. En effet, on peut vraisemblablement la considérer comme la limite supérieure de l'eau mise en réserve dans le sol. Notre premier souci a donc été de la calculer sur chacune des couches constituant le profil.

Choix et description d'une méthode de calcul :

Pendant longtemps, les mesures ont été effectuées au laboratoire pour des raisons de commodité et de simplicité en remplaçant la gravité par des forces plus importantes mais appliquées pendant un temps beaucoup plus court. La capacité au champ était alors identifiée à une valeur particulière de la succion appelée HUMIDITE EQUIVALENTE, unique pour tous les matériaux. Malheureusement, il est apparu à de nombreux auteurs (MARSHALL, 1949 - BONNEAU, 1961 - GRAS, 1962 - COMBEAU, 1965) qu'il n'existait pas de valeur unique du pF (1) caractérisant la capacité au champ. De ce fait, la notion d'humidité équivalente (ou humidité en équilibre avec la pression de 1000 g/cm², c'est-à-dire à pF = 3) perdait donc son intérêt pratique. D'autres méthodes de laboratoire ont alors été proposées. Nous aurions pu choisir une de ces méthodes. Toutefois, comme par définition la capacité au champ correspond à un comportement "in situ", c'est sur le sol en place que l'on peut réellement mesurer une valeur de référence. Nous avons donc choisi une méthode qui, préconisée par FEODOROFF (1969), consiste à effectuer des prélèvements sur le terrain échelonnés dans le temps pour chaque couche ou horizon étudié (2)

.../...

-
- (1) le pF est le logarithme de la pression généralement pneumatique exercée sur l'eau de façon à équilibrer la succion de l'eau résiduelle.
- (2) L'humidité du sol est déterminée en mesurant la perte de poids subie par l'échantillon entre le moment de son prélèvement et celui de son passage à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant.

On porte alors sur un graphique l'évolution des taux d'humidité d'une couche donnée (ordonnées) en fonction du temps (abscisses). On calcule ensuite la moyenne des taux d'humidité (% de terre séchée à l'étuve) concernant au moins quatre mesures effectuées pendant une ou plusieurs périodes hivernales d'au moins 20 jours et ne s'écartant que peu entre elles (l'écart entre les différents taux d'humidité étant de l'ordre de 1,5 % environ). Une valeur unique intra-annuelle est figurée par une droite représentant la capacité au champ (graphique 4).

A titre d'exemple, nous avons choisi de représenter la détermination de la capacité au champ dans trois couches de sol

0-10 cm	mesure des taux d'humidité effectuée en 1963 et 1964
10-20 cm	" " " "
0-20 cm	" " " 1965 et 1966.

Les valeurs obtenues sur deux tranches de sol épaisses de 10 cm d'une part et une seule tranche de 20 cm montrent une bonne concordance des résultats (graphique 4).

Résultats obtenus :

Les résultats obtenus pour deux découpages différents des couches du sol sont exprimés grâce aux profils hydriques (graphique (5)).

Profil (1) pour le découpage : 0-10-20-30-50-75-100-120 cm, années 1963-1964

Profil (2) " " : 0-20-40-60-80-100-120-140-160 cm, années 1965-1966.

Ces profils sont obtenus en portant en ordonnées les profondeurs et en abscisses les taux d'humidité.

On constate que la capacité de rétention varie avec la profondeur du profil ; nous pouvons ainsi distinguer trois zones principales :

- 1- Une zone de surface : 0-50 cm,
- 2- Une zone correspondant à la couche argileuse 50-80 cm
- 3- Une zone profonde 80-200 cm.

Discussion :

Les différences entre les valeurs de la capacité au champ observées pour chaque niveau du profil peuvent donner lieu à l'interprétation suivante :

.../...

1) En surface :

La décroissance régulière des valeurs observées sur les 30 premiers centimètres semble en relation avec le taux également décroissant de matière organique, dont l'effet se surajoute à celui des éléments fins existant dans ces niveaux (argile et limon fin). Ces éléments fins sont présents en quantité relativement importante, et constante (cf. figure 2 et figure 1).

2) En profondeur :

Les faibles valeurs obtenues sont dues à la présence de cailloux et également de limon grossier et de sable en proportion importante.

3) Couche argileuse :

Dans cette couche dont la profondeur fluctue légèrement suivant la localisation du prélèvement dans la parcelle, les éléments fins sont présents en quantité plus importante que dans les couches voisines ; de ce fait, la capacité au champ est plus élevée.

4) Conclusion :

Une humidité du sol correspondant à la valeur de la capacité au champ constitue toujours un état assez passager sauf pendant la période hivernale où l'évaporation est restreinte. Si l'on considère la dynamique de l'eau dans les couches superficielles du sol en dehors de cette saison, on constate que ces variations de l'état hydrique du sol sont très importantes, ces couches superficielles étant rapidement réhumectées et éventuellement saturées par les précipitations intervenant au cours de périodes pluvieuses. Elles sont de même très vite desséchées ensuite par l'évaporation. On conçoit ainsi toute l'importance que peuvent présenter les couches de surface sur la dynamique de l'eau dans l'ensemble du profil, car elles sont un lieu de passage nécessaire.

.../...

CHAPITRE III - PRESENTATION DES DONNEES DE DEPART

CHAPITRE III - PRESENTATION DES DONNEES DE DEPART

I/ INTRODUCTION

II/ PRESENTATION DES DONNEES

1/ Diagrammes d'évolution annuelle sur la totalité du profil prospecté

- Répartition des précipitations au cours du temps
- Variation des quantités d'eau retenues dans le sol
- Evolution de l'azote minéral dans le sol
- Variation de la concentration des nitrates dans l'eau du sol

2/ Diagrammes d'évolution annuelle dans chacun des niveaux prospectés

3/ Etude des profils hydriques et nitriques

- Profils hydriques
- Profils nitriques

4/ Etude des bilans hydriques et des bilans nitriques

- Bilans hydriques
- Bilans nitriques

III/ INTERPRETATION DES DONNEES

- LIBOIS
- Remarques personnelles et conclusion .

.../...

I/ INTRODUCTION

Durant quatre années, une étude sur la dynamique de l'azote minéral en sol nu à la Station d'Agronomie de Dijon, a été poursuivie par A. LIBOIS (1968). Cette étude a mis en comparaison des parcelles témoin sans apport et des parcelles recevant des quantités déterminées d'azote, selon le dispositif expérimental donné en annexe.

Les résultats obtenus à partir de ces essais ont été exprimés grâce à trois modes de représentation principaux :

1) des diagrammes d'évolution de l'azote nitrique et de l'eau en fonction du temps sur tout le profil et par niveaux ;

2) Des profils hydriques et nitriques qui permettent d'estimer les quantités d'eau et d'azote du profil à chaque prélèvement ;

3) des bilans hydriques et nitriques qui estiment les variations d'eau et de nitrates d'un prélèvement au suivant.

Ils ont permis à l'auteur de proposer une dynamique de l'azote apporté à différentes doses et sous différentes formes. Nous en rappellerons quelques points les plus intéressants pour notre étude. Nous y ajouterons également en conclusion certaines remarques personnelles de portée générale notées au cours de ce rappel.

II/ PRESENTATION DES DONNEES

1/ Diagrammes d'évolution annuelle sur la totalité du profil :

(graphiques 6 et 7)

Ces diagrammes comprennent quatre courbes que nous étudierons succinctement : (4) répartition des précipitations, variations d'eau (3), d'azote (1) et de la concentration d'azote dans l'eau (2).

a) Répartition des précipitations au cours du temps (4) :

Entre le 14 juin et le 18 novembre 1963, on observe trois pics correspondant à une pluviométrie importante : le 18 juin, le 28 août et le 18 novembre. Ils alternent avec des périodes sèches se situant aux environs du

.../...

2 août et du 21 octobre (graphique 6).

Pour la période du 31 mai au 18 octobre 1965, il est tombé 650 mm d'eau répartis en deux périodes très humides (31 mai au 14 juin et 23 août au 4 octobre) et une période relativement sèche (14 juin au 23 août) - (graphique 7).

b) Variation de la quantité d'eau retenue dans le sol (3) :

Les quantités d'eau exprimées en mm existant dans chaque niveau ont été cumulées puis représentées sur les graphiques 6 et 7 - courbe 3. La capacité au champ, obtenue de la même manière est représentée par la droite XY. On constate qu'en 1963, la quantité retenue dans le sol augmente pendant les périodes pluvieuses sans atteindre la capacité au champ. Pendant les périodes sèches, au contraire, le déficit varie entre 50 mm et 60 mm d'eau. En 1965, par contre, le déficit moyen est plus important et atteint 70 mm d'eau ; d'autre part, durant les deux périodes humides, les quantités d'eau atteignent et dépassent même de beaucoup la capacité au champ (graphique 7).

c) Variation de la quantité totale d'azote dans le sol (1) :

On peut constater que pour un apport initial de 100 kg/ha en 1963, la courbe passe par un minimum (100) entre le 16 juillet et le 2 août et par un maximum (430) entre le 9 et le 25 septembre. Par contre, en 1965, pour un apport initial de 250 kg/ha le minimum (290) se situe entre le 14 et le 29 juin et le maximum entre le 20 septembre et le 4 octobre.

d) Variation de la concentration des nitrates dans le sol (2) :

Cette concentration est obtenue en divisant la quantité d'azote par hectare (kg) par la quantité d'eau par hectare (kg). Elle est exprimée en ppm d'azote par rapport à l'eau et évolue irrégulièrement dans le temps. On peut en effet observer des variations du simple au double au cours de la période estivale : 50 ppm à 110 ppm entre le 31 mai et le 18 octobre 1963 et 70 ppm à 160 ppm dans la période du 15 juin au 18 novembre 1965. On peut remarquer que les maxima sont en général obtenus en périodes sèches.

2/ Diagrammes d'évolution annuelle par niveau (année 1965) :

(graphiques 8, 9 et 10)

Les diagrammes font intervenir trois modes d'expression :

.../...

1) Les diagrammes d'évolution de l'azote nitrique soit pour les parcelles témoin (courbe 1), soit pour les parcelles traitées (courbe 2) ;

2) des diagrammes d'évolution annuelle de l'eau par niveau (4) obtenus en portant les variations des quantités d'eau (ordonnées) en fonction du temps (abscisses) ;

3) Des diagrammes d'évolution de la concentration des nitrates dans l'eau du sol (ordonnées) en fonction du temps (abscisses) (3).

L'étude de ces diagrammes nous permet de constater :

- Une décroissance progressive des quantités d'azote dans les horizons de surface s'accompagnant d'un gain dans les horizons plus profonds. En outre, si l'on peut constater que cette migration semble se stabiliser au niveau de la couche argileuse, on observe toutefois qu'elle est beaucoup plus rapide dans la marne. Le graphique récapitulatif (11) met bien en évidence ce phénomène.

- que les variations relatives des quantités de nitrates présentes dans le sol étant beaucoup plus importantes que celles de l'eau, il s'ensuit que la courbe des variations des concentrations tend à suivre les variations des quantités de nitrates présentes dans le sol beaucoup plus que celles de l'eau.

- des fluctuations d'humidité du sol dont l'amplitude diminue avec la profondeur et tend à se stabiliser autour de la capacité au champ.

3/ Etude des profils hydriques et des profils nitriques :

Ces profils sont obtenus en portant en ordonnées négatives les profondeurs et en abscisses les quantités d'azote (profils nitriques) ou les taux actuels d'humidité (profils hydriques).

- Sur chacun des profils hydriques, nous avons tracé la capacité au champ ; grâce à ce repère, nous pouvons schématiser l'évolution hydrique annuelle de la façon suivante en considérant la succession des profils : en saison estivale, au cours des périodes très sèches, le profil hydrique est déficitaire sur toute sa profondeur. Ce déficit est relativement important en surface (25 à 50 % de la capacité au champ) et en profondeur (10 à 25 % de la capacité au champ), alors qu'il demeure assez faible au niveau de la couche argileuse (5 à 10 %). En saison humide, c'est à dire essentiellement en hiver,

.../...

le profil hydrique est voisin de la capacité au champ. Il peut même la dépasser à la suite de pluies importantes (graphique 12).

- Sur les profils nitriques, on constate que l'onde nitrique tend à se répartir dans le profil sous la forme d'une courbe de Gauss dont l'acuité diminue progressivement avec la profondeur ; parallèlement, la dispersion augmente. De ce fait, au cours de la migration le profil tend à se rapprocher de l'axe des ordonnées (graphique 13 et figure 3).

4/ Etude des bilans hydriques et des bilans nitriques :

Les bilans sont obtenus en portant de part et d'autre de l'origine les pertes et les gains d'azote nitrique (B. nitriques) ou d'eau (B. hydriques) observés d'un prélèvement à un autre pour chacun des niveaux prospectés dont la profondeur est portée en ordonnées. Différents types de bilans peuvent alors être distingués :

- Quand les bilans hydriques évoluent sur le coté positif de l'axe des abscisses sur toute la profondeur du profil prospecté, ils expriment une augmentation de la teneur en eau du sol ; il y a réhumectation. Dans le cas inverse, le tracé de la courbe se dessine sur la partie négative de l'axe des abscisses, il exprime alors une perte en eau du sol ; il y a dessiccation. Dans certains cas, la courbe chevauche l'axe des ordonnées et l'on n'enregistre que de faibles pertes ou gains ; nous considérerons alors que le bilan n'a subi aucune modification (figure 4 et graphique 14).

- Sur les bilans nitriques, quand on observe un gain ou une perte entre deux observations sur l'ensemble du profil, ces variations ne peuvent être que la conséquence d'une minéralisation ou d'une réorganisation. Au contraire si l'on observe un déficit d'azote nitrique dans une couche donnée, celui-ci est la conséquence d'un lessivage, s'il s'accompagne d'un enrichissement dans les couches de niveau inférieur ou d'une remontée s'il s'accompagne d'un gain dans un niveau supérieur. La profondeur à laquelle les pertes compensent les gains est appelé point zéro (ou point neutre). Si les pertes ne compensent pas exactement les gains, des phénomènes biochimiques accompagnent les phénomènes physiques responsables de la migration (figures 5 et 6, graphique 15).

.../...

Remarque : déficits hydriques (graphiques 16, 23 et 24).

En vue de simplifier la lecture et l'interprétation des déficits hydriques, nous les avons portés directement en abscisses en prenant comme origine de cet axe la capacité au champ et en ordonnées les profondeurs.

En résumé, les données exprimées ci-dessus et accumulées par A. LIBOIS, concernent les variations d'eau et d'azote affectant l'ensemble du profil prospecté, les fluctuations locales du profil (dessiccation, réhumectation qui atteint ou dépasse la capacité au champ) et finalement des migrations, c'est-à-dire des phénomènes de remontées ou de lessivage. Elles ont permis à l'auteur d'en donner l'interprétation suivante :

III/ INTERPRETATION DES DONNEES

1/ Proposée par A. LIBOIS (1968) :

Les phénomènes susceptibles d'expliquer les fluctuations des quantités d'azote minéral dans les parcelles sont de deux ordres : biochimiques ou physiques.

Les phénomènes physiques, liés à l'importance des précipitations abaisseraient en moyenne, compte-tenu de l'évaporation, le sommet de l'onde nitrique de 1 cm pour 6 mm de pluie dans le sol étudié.

Les phénomènes biochimiques liés à l'humidité et à la température du sol observables dans les parcelles témoin entraînent la minéralisation et éventuellement des phénomènes de réorganisation des réserves minérales du sol ; les fluctuations brutales et de grande amplitude ne se présentant qu'exceptionnellement en l'espèce. Ils peuvent affecter également les nitrates apportés dans les parcelles traitées ; toutefois, l'azote nitrique primitivement apporté au début du printemps en surface est pratiquement retrouvé à tout moment dans l'ensemble du profil, pendant une période pouvant se prolonger jusqu'à la fin de l'hiver suivant.

Les variations annuelles de l'azote minéral pour les années 1963, 1964 et 1965 dans les parcelles ne recevant aucun apport d'azote minéral peuvent alors être schématisées ainsi : elles présentent une phase de minéralisation progressive d'avril à septembre suivie d'un palier se prolongeant au cours de l'automne et éventuellement de l'hiver, jusqu'à ce que les précipi-

.../...

tations hivernales ramènent par lessivage ou par réorganisation le taux d'azote minéral présent dans le sol à son point le plus bas au début de l'année suivante. L'azote provenant des apports s'ajoute à celui qui provient de la minéralisation des réserves et suit une évolution parallèle.

2/ Remarques personnelles et conclusion :

Au cours de ce rappel, il nous a été possible de faire quelques remarques d'ordre général. Nous les exprimerons ainsi :

La corrélation est très bonne entre les précipitations et les quantités d'eau retenues dans le sol sur une profondeur de profil donnée ; rappelons deux exemples pour illustrer ce fait : 1°) la période du 4 juin au 18 novembre 1963 et 2°) celle du 31 mai au 18 octobre 1965 (graphiques 6 et 7, courbes 1 et 2) ; on peut y observer que la capacité au champ est atteinte et même dépassée en 1965 alors qu'elle ne l'est pas en 1963. Cela est dû à des précipitations plus importantes (650 mm au lieu de 534 mm) mais surtout à une répartition plus groupée en 1965. La réserve d'eau étant ainsi constituée, il suffira de pluies relativement faibles pour compenser l'évaporation des couches superficielles et maintenir la quantité d'eau du sol proche de la capacité au champ. Les fortes pluies, au contraire, entraînent d'importants déplacements d'azote nitrique ainsi qu'une saturation du profil.

L'étude des variations de concentration des nitrates dissout dans l'eau du sol, nous permet de mettre en évidence l'existence d'un transport irrégulier des quantités d'azote nitrique. Une étude au laboratoire nous permet d'en estimer l'importance, notamment lors du déplacement des masses d'eau en relation avec l'état hydrique du sol.

Finalement dans le cadre de la dynamique comparée de l'eau et de l'azote que nous allons entreprendre, nous pouvons nous demander si l'azote nitrique peut être considéré comme un traceur. Dans ce cas, il nous permettrait de suivre le déplacement de l'eau du sol sous l'influence de l'apport d'eau pure que constituent les précipitations.

CHAPITRE IV - ANALYSE DES DONNEES

2/ Influence de la vitesse de pénétration de l'eau de percolation sur la migration

- a) Cas de billes de verre monodimensionnelles
- b) Cas de billes de verre pluridimensionnelles
- c) Cas d'un sol
- d) Conclusion

3/ Influence de l'état hydrique initial du sol sur la migration

- a) Présentation des expériences (3 expériences)
- b) Faits observés
- c) Récapitulation

4/ Influence de la porosité sur la dispersion

E/ Discussion

1/ Influence conjuguée de la vitesse de pénétration et du contraste de la porosité

- a) Cas d'un milieu poreux monodimensionnel
- b) Cas d'un milieu poreux pluridimensionnel

2/ Influence de l'état hydrique initial

- a) Rôle de la concentration initiale
- b) Déplacement du traceur, de l'eau marquée et importance du mélange.

IV / RESUME ET CONCLUSION GENERALE

.../...

I/ INTRODUCTION GENERALE

L'étude et l'interprétation de A. LIBOIS nous ont permis de constater globalement l'importance du rôle de l'eau dans les phénomènes biochimiques et physiques régissant les variations et les déplacements de la fraction nitrique de l'azote minéral du sol ainsi que ceux concernant l'azote apporté. Toutefois, les objectifs de l'auteur restaient essentiellement tournés vers une mise en évidence et une meilleure compréhension de la dynamique de l'azote dans le sol. De ce fait, un grand nombre de données concernant l'eau n'ont pas été exploitées. (Le nombre de ces données est effectivement important puisqu'à chaque détermination d'azote a toujours correspondu une détermination de l'humidité de la couche prospectée).

Il paraissait alors intéressant de les mettre en valeur et ensuite de les analyser en relation avec les mouvements de l'azote minéral par ailleurs bien mis en évidence par l'auteur dans le but d'apporter une contribution à la connaissance des modalités de la circulation et du déplacement des masses d'eau dans le sol en place.

Dans l'étude systématique des données de terrain qui suit, les résultats obtenus nous conduisent à formuler des hypothèses qui sont ensuite reprises comme bases d'une étude au laboratoire réalisée grâce à des modèles expérimentaux aussi proches que possible des conditions naturelles.

II/ RECHERCHE DES FACTEURS D'EVOLUTION DE L'AZOTE ET DE L'EAU DANS LE SOL EN PLACE

A/ Démarche employée pour l'exploitation des données

L'étude des mécanismes régissant le déplacement des masses d'eau dans le sol que nous nous proposons d'aborder peut être réalisée en cherchant une relation cohérente entre les précipitations et l'état hydrique dans chacune des couches du profil. Cette étude gagne d'autre part en précision et en intérêt en considérant l'azote nitrique comme traceur, ainsi que nous l'avons déjà suggéré. Une première analyse nous en révèle la difficulté du fait que l'azote du sol est soumis à des phénomènes biochimiques qui se traduisent par des fluctuations indépendantes des facteurs purement physiques. Toutefois, l'examen des courbes d'évolution globale de l'azote minéral dans le sol montre clairement que certains de ces phénomènes biochimiques (organisation, reminé-

.../...

ralisation, surminéralisation) n'interviennent avec une amplitude notable qu'au cours de périodes relativement limitées, et qu'elles sont de faible importance (écarts non significatifs) en dehors de ces périodes. Par ailleurs, si l'on considère uniquement l'évolution de l'azote provenant des apports (représentés par la différence par rapport au témoin), les courbes d'évolution globale prennent une allure très stable, c'est-à-dire parallèle à celle du témoin.

Si on élimine alors de nos observations les bilans nitriques fortement déséquilibrés du fait de la superposition de phénomènes biochimiques aux phénomènes purement physiques, nous pouvons considérer que l'azote nitrique constitue un traceur acceptable pour l'eau dans le type de sol et sous le type climatique considéré. Une confirmation à posteriori de cette optique nous est donnée par le fait que nous avons pu vérifier au laboratoire les hypothèses qui avaient pu être formulées grâce aux données de terrain.

En outre, deux façons de représenter cette analyse s'offraient à nous : ou bien s'attacher à faire ressortir des tendances globales, ou au contraire se limiter à quelques exemples précis et typiques. Par souci de clarté, nous avons choisi cette seconde voie.

B/ Description et analyse de certaines données

Dans ce paragraphe, nous décrirons succinctement les conditions hydriques et nitriques initiales et l'évolution de ces deux éléments au cours des périodes envisagées. Cette présentation des faits donnera ensuite lieu à une discussion où nous essayerons d'en donner une interprétation.

1/ Analyse des migrations en relation avec les gains et les pertes d'eau du sol :

a) Régime de gain en eau dominant :

Dans les deux exemples que nous nous proposons d'étudier, des précipitations d'égale importance mais de répartition très différente au cours du temps sont intervenues sur un sol présentant des humidités initiales très voisines. Ces pluies entraînent une réhumectation du sol et un déplacement différents des masses d'eau et d'azote qui s'y trouvent. Nous allons constater en effet que les pluies groupées entraînent l'azote en quantité moins importante, mais plus profondément que des pluies espacées, la réhumectation étant plus faible d'autre part dans ce dernier cas.

.../...

- Description du régime pluvial -

En examinant la répartition des précipitations au cours de deux périodes de l'année 1963, périodes d'une durée de 14 jours durant lesquels il est tombé une quantité d'eau identique, on constate que :

du 1 au 14 août 1963, le sol a reçu 56 mm d'eau. Les précipitations sont réparties en deux fois trois jours et une fois un jour, et espacées par des périodes de un à deux jours sans pluie.

Du 21 octobre au 4 novembre 1963, il est tombé 57 mm d'eau pendant les quatre derniers jours précédant le prélèvement (graphique (16), diagramme (2)).

- Description de l'état hydrique initial du sol -

Les déficits hydriques initiaux pour les périodes envisagées présentent des caractères très voisins que nous pouvons résumer ainsi : (graphique n°(16), courbes (3) et (4)).

ils sont positifs sur toute la profondeur du profil prospecté, présentent un minimum pour la couche 30 - 50 cm, et augmentent d'autant plus que l'on se rapproche de la surface. Par contre, dans la zone profonde, ils sont constamment inférieurs à 5 % d'humidité.

- Evolution de la teneur en eau du sol au cours des périodes étudiées -

L'évolution de l'humidité du sol à la suite de ces différents modes de répartition peut être caractérisée par :

- les déficits hydriques : Ces derniers s'annulent ou deviennent momentanément négatifs dans la tranche de sol comprise entre la surface et 50 cm. Plus profondément, le déficit hydrique reste important dans les deux cas. Toutefois, on peut noter suivant les périodes envisagées quelques différences :

- période du 1 au 14 août 1963, l'humidité du sol est égale à la capacité au champ dans la couche de sol comprise entre 20 et 50 cm, alors qu'elle est nettement déficitaire en surface.

- période du 21 octobre au 4 novembre 1963, dans les 10 premiers centimètres de profondeur, le déficit est nul, puis entre 10 et 50 cm, dépasse la capacité au champ de façon croissante avec la profondeur.

.../...

- les bilans hydriques : Dans les deux périodes étudiées, les bilans hydriques (graphique(17), courbes (1) et (2)) montrent une réhumectation importante depuis la surface jusqu'à une profondeur commune (75 cm). On constate en outre un gain d'humidité progressivement décroissant à partir de la surface.

Dans le cadre de ce schéma général, la réhumectation est moins prononcée pour la période du 1 au 14 aout que dans celle du 21 octobre au 4 novembre.

- Profils nitriques initiaux - (graphique 18, courbes (1) et (2))

Les profils nitriques initiaux présentent de nombreux points communs : ils ont la forme d'une courbe de Gauss présentant un léger renflement en surface et le sommet se situe entre 30 et 50 cm. Remarquons toutefois quelques différences notamment lors du prélèvement du 1 aout où les couches situées à une profondeur supérieure à 50 cm contiennent moins de nitrates que lors du prélèvement du 21 octobre : 15 kg au lieu de 35 pour la couche située entre 50 et 75 cm, et 7,5 kg au lieu de 15 entre 75 et 100 cm.

Compte-tenu de ces situations nitriques initiales, nous allons suivre l'évolution de ces dernières.

- Evolution de la teneur en azote nitrique du sol au cours des périodes envisagées :

On constate que dans les deux cas, le déficit nitrique enregistré dans les couches superficielles s'accompagne d'un enrichissement dans les couches profondes, nous sommes donc en présence d'un phénomène de lessivage. Ce dernier présente toutefois des modalités différentes pour l'une et l'autre périodes.

1°) du 1 au 14 aout 1963, le déplacement du sommet de l'onde affecte 15 cm (de 25 cm à 40 cm), et les couches touchées par le lessivage se situent entre la surface et 60 cm (graphique(18), courbe (3)) ;

2°) du 21 octobre au 4 novembre 1963, le lessivage est plus prononcé, le sommet se déplace de 25 cm au lieu de 15 cm, et les couches affectées au lessivage se situent entre la surface et 90 cm (graphique (18), courbe (4)).

Les profondeurs des couches touchées par le lessivage correspondent aux points où ces bilans s'annulent.

.../...

- Les profils nitriques que nous venons de décrire dans l'étude précédente présentent une répartition des nitrates où l'on distingue mal la profondeur et la valeur du sommet.

- D'autre part, les bilans nitriques (graphique 19) qui schématisent l'évolution de cet élément au cours des périodes envisagées ne sont pas équilibrés ; en effet, dans l'un et l'autre cas, les gains ne compensent pas exactement les pertes. Cela dénote l'existence de phénomènes biochimiques qui perturbent les déplacements d'ordre purement physique.

- C'est pour pallier en partie cet inconvénient que nous avons effectué la différence entre les quantités d'azote trouvées sur les parcelles traitées et les parcelles témoins. Les nouveaux profils et bilans nitriques obtenus nous permettent alors de conclure aux mêmes résultats que précédemment (graphiques 20 et 21). Toutefois, le lessivage est observé avec plus de précision car nous avons éliminé par ce procédé une grande partie de l'effet des phénomènes biochimiques qui interférerait.

b) Régime de pertes en eau dominantes :

Au cours de l'étude précédente, nous venons de voir que les précipitations réhumectent le sol et entraînent un lessivage de l'azote qui s'y trouve. Dans les paragraphes qui suivent nous allons étudier les phénomènes qui se produisent non plus quand le sol emmagasine de l'eau, mais au contraire quand il se dessèche sous l'influence de l'évaporation. Nous distinguerons deux cas possibles au cours de cette étude :

1°) le cas d'une forte perte qui se manifeste pendant une période d'évaporation assez longue ;

2°) le cas d'une évaporation moins continue et moins longue.

1er exemple : cas d'une dessiccation prononcée et durable :
période du 24 mai au 7 juillet 1964

- Situation hydrique et nitrique initiale

Les mesures faites lors du prélèvement du 25 mai 1964 montrent que la quantité d'eau retenue dans le sol atteint la capacité au champ dans tous les niveaux du profil. Cet état hydrique du sol est figuré par un déficit nul sur le graphique 23 courbe 1 (mode de représentation déficit hydrique).

A cette même date, l'onde nitrique est dissymétrique par rapport à son sommet situé entre 20 et 30 cm (graphique 22, courbe 1).

.../...

Les différentes masses d'eau du sol existant à chaque niveau sont donc définies par leur concentration en traceur. Nous allons suivre leur évolution au cours des périodes à venir.

- Evolution des quantités d'eau du sol (graphique 23)

Le prélèvement du 9 juin nous révèle une répartition différente de l'eau du sol par rapport à celle observée le 25 mai :

1°) entre la surface et 50 cm, le déficit est d'autant plus prononcé que l'on se rapproche de la surface ; il est de 60 mm d'eau.

2°) En dessous de cette profondeur, il est resté nul ; il n'a donc pas varié.

Sur les profils hydriques obtenus 15 jours plus tard (22 juin 1964) et un mois plus tard (7 juillet 1964) on observe des caractéristiques très proches de celles décrites précédemment ; seules quelques divergences minimes dénotent une légère évolution :

1°) dans la première quinzaine suivant le prélèvement, le profil continue à se dessécher sur les 75 premiers centimètres.

2°) dans la seconde quinzaine le dessèchement atteint 100 cm.

Ce dessèchement est donc relativement faible pour tous les horizons après la première quinzaine.

- Evolution des nitrates du sol -

L'évolution des nitrates présente entre le 25 mai et le 7 juillet 1964 des analogies avec celles de l'eau :

1°) dans un premier temps correspondant à la phase de fort dessèchement superficiel (25 mai - 9 juin), on peut observer une onde nitrique - graphique 22, courbe (2)) - correspondant au prélèvement du 9 juin et caractérisée par :

- un sommet situé à la même profondeur que celui obtenu lors du prélèvement du 25 mai 1964, mais moins important,

- une dissymétrie par rapport à ce sommet,

La répartition des nitrates a donc évolué de la façon suivante : graphique 23, courbe (5).

- en profondeur, on n'observe aucune variation,

- sur les 50 premiers centimètres, on observe une remontée caractérisée par un point zéro situé à 15 cm de profondeur.

.../...

2°) Dans un second temps correspondant à la phase de relative stabilité de l'humidité du sol, on peut toujours observer une constance des nitrates en profondeur ; par contre, en surface, le bilan nitrique enregistre des gains qui traduisent une minéralisation active en surface (graphique 22, courbes 3, 4 et 5) et graphique 23, courbes 6 et 7).

Régime de pertes dominantes : deuxième exemple du 14 juin au 29 juin 1965

- Description du régime hydrique -

Une estimation de l'évaporation qui s'est produite durant cette période est donnée par l'évaporomètre Piche (données brutes) ; il s'est évaporé durant cette période de 15 jours 60 mm d'eau, Cette quantité est la plus grande qui soit enregistrée durant l'année 1965 (graphique 24, courbe 1).

- Situation hydrique et nitrique initiale -

Comme dans l'exemple précédent le déficit hydrique initial est nul sur toute la profondeur de profil prospecté.

Le sommet de l'onde nitrique ne se trouve plus entre 20 et 30 cm de profondeur, mais aux environs de 60 cm (graphique 24, courbe 3).

- Evolution des quantités d'eau dans le sol -

Lors du prélèvement du 29 juin, on note un déficit sur tout le profil ; ce dernier présente un maximum en surface (7 %) et au niveau de la couche argileuse (5 %), il diminue en profondeur ; il a été évalué à 75 mm d'eau sur la totalité du profil (graphique 24, courbe 2).

- Evolution des nitrates dans le sol -

On observe encore une remontée dont le point zéro se situe vers 50 cm (graphique 24, courbes 3 et 4).

2/ Analyse des migrations en relation avec l'état hydrique initial du sol

Comme nous venons de le voir, la répartition des pluies influence la nature des migrations. Toutefois, ces dernières ne sont pas les seules à intervenir. En effet, comme nous allons le constater dans le paragraphe suivant, l'état hydrique du sol est un facteur important influençant le déplacement de l'eau et de l'azote.

.../...

Les exemples qui vont suivre devraient nous permettre de dégager clairement cette influence.

a) Différence entre sol sec et sol humide

- Conditions hydriques initiales et évolution :

Le 4 novembre 1963, le sol présente un déficit hydrique de 55 mm réparti dans les couches comprises entre 50 et 130 cm de profondeur, c'est-à-dire dans celles où se trouve la plus grande quantité de nitrates à cette époque, en surface par contre, le sol est à la capacité au champ (graphique 25, courbe 1). Le 18 novembre, à la suite de pluies atteignant 70 mm, le profil est réhumecté sur toute sa profondeur jusqu'à la capacité au champ (graphique 25, courbe 2) ; les couches initialement les plus sèches ont alors emmagasiné la plus grande quantité de cette eau (graphique 26 bis, courbe 1).

Le 23 août 1965, le profil hydrique est à la capacité au champ (graphique 25, courbe 2 et 25 bis, courbe 3). A la suite de pluies de même importance et de même répartition que celles observées pendant la période précédemment envisagée en 1963, on constate à la date du 6 septembre que le profil dépasse la capacité au champ d'une façon presque uniforme sur l'ensemble du profil (graphique 25, courbe 4 et 26 bis, courbe 2).

- Situation nitrique initiale et évolution -

En 1963, (graphique 26, courbes 1 et 3) les nitrates sont répartis dans le profil suivant une courbe de Gauss dont le sommet se situe à 60 cm ; elle est pratiquement symétrique. Quinze jours plus tard, le 18 novembre, le sommet se situe à 80 cm de profondeur. Sur le bilan nitrique (graphique 26 bis, courbe 3) nous constatons que la migration affecte des tranches de sol comprises entre 10 et 110 cm, le point neutre se situe vers 70 cm, la quantité d'azote déplacée étant alors de 80 kg/ha.

En 1965, le sommet des courbes représentant la répartition des nitrates, (graphique 26, courbes 2 et 4) s'est déplacé de 65 à 90 cm. Le bilan nitrique (graphique 26 bis, courbe 4) présente un point neutre à 90 cm. La quantité d'azote déplacée est de 50 kg/ha, mais la totalité de la migration affecte des couches comprises entre la surface et 160 cm.

En résumé, les migrations sont très distinctes dans l'un et l'autre cas :

.../...

En 1963, elles sont massives (80 kg/ha de pertes) et affectent des tranches de sol comprises entre 10 et 110 cm ; les sommets des courbes se sont déplacés de 20 cm.

En 1965, au contraire, le sommet s'est déplacé de 35 cm, les migrations sont moins importantes (50 kg) et affectent des couches comprises entre la surface et 160 cm.

b) Description d'écoulement de l'eau dans le sol par les fentes de retrait

L'étude des migrations de l'azote nitrique en relation avec l'évolution de l'eau nous a permis de constater certaines anomalies se manifestant en sol très sec sur les bilans hydriques : à la suite de précipitations importantes et groupées, les couches superficielles et profondes sont réhumectées alors que la zone intermédiaire ne l'est que très peu. Ceci se traduit sur les bilans hydriques par une migration d'une fraction de l'azote minéral superficiel du sol sur une distance beaucoup plus importante que ne le laisserait prévoir la pluviométrie. En effet, on distingue bien une zone de bilan nitrique nul au niveau de la couche intermédiaire peu réhumectée. Ceci nous a conduit à formuler l'hypothèse que dans ce cas une partie des pluies s'infiltrerait directement vers les couches profondes par les fentes de retrait.

Nous avons vérifié cette hypothèse au cours de l'été 1969 à la suite d'une longue période sèche ayant provoqué la formation de nombreuses fentes de retrait, en épandant un chlorure (1000 kg Cl/ha) sur deux parcelles afin d'étudier sa migration dans ces conditions particulières.

- Description de l'état hydrique initial du sol (graphique 27)

Le prélèvement effectué au moment de l'épandage du chlorure nous révèle un profil hydrique présentant un déficit important sur toute la profondeur du profil prospecté ; en effet, l'humidité du sol (courbe 1) oscille entre 10 et 15 % d'humidité alors que la capacité au champ se situe entre 20 et 25 %.

- Evolution de l'état hydrique - Migration des chlorures -

Des prélèvements ont été effectués à la suite de précipitations très groupées totalisant 50 mm, mais seulement après un certain délai correspondant à une période très sèche, de sorte que le sol avait subi à nouveau

.../...

une dessiccation telle que le profil hydrique final a très peu varié par rapport au profil initial. La répartition du chlore dans le profil final montre par contre que celui-ci se trouve distribué suivant deux fractions dont l'une -la plus importante- est localisée dans les couches superficielles où elle a subi une migration que l'on peut estimer normale, tandis que l'autre se situe beaucoup plus bas entre 90 et 130 cm et présente un maximum à 110 cm. L'examen d'une fosse a montré que le niveau 130cm correspondait à la base des fentes de retrait les plus importantes. Cette expérience vérifie bien l'hypothèse suivant laquelle l'eau est susceptible de s'infiltrer partiellement en sol très sec directement dans les couches profondes par l'intermédiaire des fentes de retrait, à condition bien entendu que les précipitations soient suffisamment importantes et groupées pour permettre un écoulement.

3/ Influence des caractères physiques du sol (graphique 28) :

Au cours de la migration des nitrates dans le sol, nous avons remarqué (chapitre III : Expression des Résultats) leur tendance à se répartir suivant une courbe de Gauss dont l'acuité diminue avec la profondeur. Cette observation globale présente toutefois de nombreuses exceptions. En effet, en 1965 par exemple, on constate que l'acuité de la courbe diminue dans la zone limoneuse de surface (courbes 1 et 2), augmente dans la couche argileuse (courbes 2 et 3) puis diminue à nouveau en profondeur (courbes 3 et 4) mais cette fois avec un rythme différent du précédent ; il est intéressant cependant de remarquer que ces variations sont homologues de celles observables pour la capacité au champ et la perméabilité, correspondant à des changements de texture et de structure dans les différents horizons sur profil.

C/ Interprétation

La description et l'analyse des exemples précédemment cités nous permettent de dégager certains facteurs influençant les modalités des mouvements de l'eau et des nitrates dans le sol. Ces facteurs sont de deux ordres :

- le milieu extérieur, caractérisé par les précipitations et l'évaporation, qui extrait l'eau du sol ou en apporte à ce dernier ;
- les caractéristiques du milieu, c'est-à-dire les propriétés physiques du sol et sa teneur initiale en eau.

1/ Influence du milieu extérieur :

Le rythme et l'importance des précipitations et de l'évaporation, caractéristiques du milieu extérieur, influencent de façon prédominante l'évolution et le mouvement des masses d'eau du sol. Nous étudierons donc successivement l'influence du rythme et du volume des précipitations.

Le rythme des précipitations : période de gains dominants (graphiques 16, 17, 18, 19, 20, 21)

Le fait que des pluies d'égale importance mais de rythme différent déplacent l'azote sur des distances inégales est attribuable à des vitesses de pénétration et de circulation plus ou moins rapides de l'eau dans le sol.

Nous citerons pour illustrer ce fait le cas des périodes du 1 au 14 août et du 21 octobre au 4 novembre 1953 au cours desquelles il est tombé la même quantité d'eau (56 et 57 mm) sur un sol présentant une même humidité initiale. Toutefois, durant la première période la vitesse atteint 2 cm/jour entraînant un déplacement du pic de 35 cm, tandis que durant la seconde période, le pic se déplace beaucoup moins (20 cm) pour une vitesse de pénétration et de circulation atteignant seulement 0,5 cm/jour.

Le rythme des précipitations : période de pertes dominantes

Sous l'influence de l'évaporation, l'humidité superficielle du sol décroît ; le pF augmente en surface par rapport à la profondeur qui reste plus humide, ce qui entraîne un courant ascendant capillaire. Tous les phénomènes observés sont très différents suivant que l'évaporation est lente ou rapide.

- Evaporation rapide (graphiques 22 et 23)

Elle se produit quand l'hygrométrie de l'air est faible au cours de journées chaudes, ensoleillées et ventées. Dans ce cas, le sol se dessèche peu à peu, mais plus rapidement en surface qu'en profondeur et à partir d'un certain seuil l'ascension capillaire de l'eau provenant des couches profondes s'arrête (HALLAIRE, 1953) : c'est ce que les auteurs appellent rupture du lien capillaire (RODE, 1956 - WESTELAAR, 1961) (1). L'évaporation continuant,

.../...

(1) Pour RODE, la rupture du lien capillaire correspond à une valeur caractéristique de l'humidité, intermédiaire entre la capacité au champ et le point de flétrissement. Ici nous observons une humidité variable, toutefois, le fait que les écarts soient peu importants en fin d'observation nous incite à situer la rupture dès la fin de la première quinzaine.

il se forme en surface une zone sèche qui forme écran et protège les horizons sous-jacents contre toute évaporation ultérieure. Cette couche sèche ou "Mulch" tend à stabiliser le profil hydrique dans les couches sous-jacentes. Ce phénomène de "Self mulching" peut être observé au cours des périodes du 25 mai au 7 juillet 1964.

Entre le 25 mai et le 9 juin, une dessiccation importante (50 mm d'eau perdus par le sol) affecte les 50 premiers centimètres où l'on observe une remontée de nitrates. TURC (1955) estime à 35 mm les pertes moyennes pour un sol limoneux. Aucune remontées hydriques et nitriques, par contre, ne sont observées au-delà de cette profondeur ; il y a "rupture" du lien capillaire à une profondeur voisine de 50 cm. Au cours de la période suivante (entre le 9 juin et le 7 juillet), malgré des conditions extérieures semblables (Piche brut = 100 mm, P = 20 mm), on ne dénote aucune modification sensible des profils hydriques et nitriques. En particulier, protégées par les couches superficielles partiellement desséchées, les couches de sol situées au-dessous de 50 cm conservent une humidité voisine de la capacité au champ.

- Evaporation lente (graphique 24)

En présence de masses d'air dont l'hygrométrie est plus importante que dans le cas précédemment étudié, les pertes d'eau du sol s'effectuent à un rythme moins rapide (4 mm/jour au lieu de 7 mm/jour environ) : nous n'observons pas de dessiccation superficielle prononcée protégeant le reste du profil ; au contraire, la dessiccation est profonde, il n'y a pas eu rupture du lien capillaire. Ainsi, pendant la période du 14 au 29 juin, les masses d'eau évaporées à la longue sur la totalité du profil sont supérieures à celles du cas précédent. Si le phénomène se poursuit, on aboutit à la formation de fentes de retrait assez profondes, en raison de la texture argilo-limoneuse, du terrain où ont été faites ces expériences.

La hauteur des précipitations

Nous avons déjà remarqué dans le chapitre "Présentation des données" la très bonne corrélation existant entre les quantités d'eau apportées au sol par les précipitations et celles de l'eau emmagasinées par ce dernier sur la totalité du profil prospecté (Cf. graphiques 6 et 7, courbes 3 et 4) ; nous avons pu remarquer d'autre part que pendant les périodes sans pluie, le sol se dessèche parfois de façon très importante, même dans les couches profondes.

.../...

La profondeur de réhumectation atteinte par les pluies dépend de la quantité tombée, mais aussi de l'état hydrique initial du sol. Nous nous proposons d'approfondir ce facteur dans le paragraphe "Réhumectation et infiltration en sol sec" à cause de l'importance toute spéciale que nous avons donnée à l'humidité initiale du sol au cours de cette étude.

2/ Influence des conditions de sol :

En plus du rythme et du volume des précipitations et de l'évaporation, caractérisant le milieu extérieur, l'état hydrique initial et les propriétés physiques du sol influencent la nature des migrations. Nous étudierons donc l'influence de ces deux facteurs propres au sol.

Etat hydrique initial du sol

L'état hydrique initial du sol est exprimé en fonction de la capacité au champ ; c'est en effet par rapport à cette dernière que nous avons distingué différents états hydriques du sol nous permettant de cerner les problèmes concernant les déplacements de l'eau et de l'azote.

Sol humide (proche (ou à) la capacité au champ) (graphique 25)

Quand l'eau de pluie tombe sur un sol à la capacité au champ, elle s'écoule préférentiellement dans les pores de diamètres les plus élevés ; une fraction toutefois circule dans les capillaires du sol en déplaçant l'eau qui s'y trouve initialement - phénomène qui correspondrait à la filtration (COURAU, 1969).

Parmi les nombreux exemples possibles, nous mentionnerons seulement le cas de la période du 23 août au 6 septembre 1965 où une pluie de 70 mm déplace le sommet de l'onde nitrique de 35 cm et lessive 50 kg/ha.

Réhumectation et infiltration sur sol sec (graphique 16, courbes 4,5)

Les gouttes de pluie qui tombent sur le sol sec pénètrent en priorité dans les vides qui offrent le moins de résistance c'est-à-dire les pores les plus gros. Il se développe alors des forces capillaires (déterminées à la fois par la dimension des espaces séparant les particules, leur géométrie et la mouillabilité du milieu) entraînant un déplacement de l'eau des pores les plus gros vers les plus petits. L'importance de ce phénomène dit de "succion ou d'absorption latérale" (FEODOROFF, 1965 et COUREAU 1967, 1969)

.../...

est fonction de l'amplitude des forces capillaires, elles mêmes dépendant de l'état hydrique du sol. Ainsi quand le sol est très sec, la succion est très importante et l'eau est immobilisée. Cet effet diminue progressivement quand la teneur en eau augmente et s'annule à la capacité au champ. Dans ce cas, l'eau apportée au sol par les précipitations peut pénétrer dans des couches plus profondes pour les réhumecter progressivement suivant le même processus.

On peut expliquer ainsi la physionomie du déficit hydrique du 4 novembre 1963 où les précipitations intervenues en fin de période sont en train de combler ce déficit hydrique initial en réhumectant progressivement le profil.

On peut constater en outre (graphique 16, courbe 5) qu'au cours de cette réhumectation, les masses d'eau situées initialement dans les capillaires du sol et contenant le traceur, se mélangent partiellement à l'eau de pluie qui les déplace. C'est l'ensemble qui constitue le front de réhumectation.

La profondeur atteinte par ce front est fonction de la quantité de pluie tombée et aussi de l'humidité initiale du sol. Ainsi dans l'exemple étudié où le déficit moyen initial est de 25 % de la capacité au champ sur l'ensemble du profil prospecté, on peut dire que la pluie humecte 15 fois sa hauteur et que quatre millimètres d'eau de pluie déplacent d'un centimètre le sommet de l'onde nitrique.

Dans d'autres cas où le déficit moyen est plus faible, par exemple dans le cas des périodes du 4 au 18 septembre 1964 et 17 au 31 mai 1965, où le déficit moyen atteint seulement 15 % de la capacité au champ, sur une profondeur de profil de 100 cm, la pluie réhumecte 7 fois sa hauteur et il faut environ 2,5 à 3 mm d'eau de pluie pour déplacer le sommet de l'onde nitrique de 1 cm.

Comparaison entre la circulation de l'eau en sol sec et en sol humide (graphiques 25, 26 bis, 26)

La circulation de l'eau de pluie en sol humide (capacité au champ) compte-tenu des remarques précédentes apparaît comme un transit. Au contraire, en sol sec, elle contribue à reconstituer la réserve du sol en eau jusqu'à ce que le dernier atteigne la capacité au champ.

En conséquence, cela entraîne un déplacement inégal du traceur. En effet, rappelons qu'à la suite de pluies également réparties et de même importance (4 au 18 novembre 1963) et (23 août au 6 septembre 1965) intervenues sur des sols présentant des états hydriques différents, le sommet de

.../...

l'onde nitrique est déplacé de façon plus importante en sol humide, mais que cet important déplacement s'accompagne d'un lessivage d'une plus faible quantité d'azote qu'en sol sec. Ce résultat partiel est confirmé par ceux obtenus lors de l'étude plus générale du rapport "Ef" entre la diminution de concentration ΔNI de l'azote nitrique dans l'eau du sol et les pertes d'azote (DN) dans la même couche ($Ef = (N) / (DN)$). On constate, comme on peut l'observer sur le tableau suivant, que ce rapport dit "d'efficacité de l'eau vis-à-vis des nitrates" est plus grand en sol sec qu'en sol humide ; c'est-à-dire qu'une même quantité d'eau déplace plus d'azote en sol sec qu'en sol humide.

	Couches de départ de l'azote	Couches d'arrivée de l'azote
Humidité < C.C.	$Ef = 1,93$	$Ef = 2,09$
Humidité > C.C.	$Ef = 1,54$	$Ef = 1,54$

Il semble alors que l'importance du lessivage du traceur en sol sec soit en relation avec la circulation capillaire qui s'y réalise sous l'influence de la succion ; le faible déplacement du sommet de l'onde nitrique étant dû alors à la faible profondeur de sol réhumecté. Au contraire, en sol humide, le traceur peu concentré est déplacé en profondeur dans les gros pores à la suite d'une circulation gravitaire, mais en faible quantité. Il semble donc qu'il y ait complémentarité entre la quantité de traceur déplacé et la profondeur du déplacement, la quantité correspondant plus particulièrement à une circulation capillaire et la profondeur à une circulation gravitaire compte-tenu des différences de concentration.

Pénétration de l'eau en sol très sec (fentes de retrait)

(graphiques 27 et 27 bis).

La présence de fentes de retrait formées sous l'influence de la sécheresse est à l'origine d'un mode particulier de réhumectation du sol qui se répercute sur la migration des sels mobiles et par voie de conséquence sur la forme et l'évolution des profils nitriques.

Les fentes de retrait constituent en effet des voies de passage préférentielles pour l'eau dès que les précipitations sont suffisamment importantes pour permettre la formation d'une lame d'eau susceptible de

.../...

s'écouler. Dans ce cas, l'eau pénètre directement dans les fissures jusqu'à leur base en réhumectant les couches correspondant à ce niveau, alors qu'elles ne font pratiquement que transiter dans les niveaux moyens. La réhumectation de surface se développe en même temps d'une manière plus ou moins prononcée suivant l'allure des précipitations.

Ces phénomènes sont particulièrement bien visibles dans une expérience réalisée en été 1969 au cours de laquelle un chlorure a été épandu en surface sur un sol desséché profondément et très fissuré. L'intervention de pluies très groupées a réalisé les conditions de ces entraînements en profondeur par les fentes de retrait. Le graphique (27) met en évidence un gain d'humidité ainsi que la présence d'une onde de Cl située dans la couche de sol correspondant à la base des fentes, très au-dessus de l'onde principale de migration de Cl développée en surface.

Ce phénomène n'apparaît plus dans un prélèvement effectué au même moment dans une région éloignée des fentes de retrait (graphique (27 bis)).

Propriétés physiques du sol (graphique 28)

Les propriétés physiques du sol, essentiellement caractérisées par la texture et la structure, déterminent l'importance de la porosité totale ainsi que la répartition de cette dernière en porosité capillaire et en porosité non capillaire. De ce fait, elles conditionnent la perméabilité, c'est-à-dire la quantité maximum d'eau gravitaire pouvant s'écouler dans le sol en un temps donné ; elles conditionnent également la capacité au champ ou quantité maximum d'eau capillaire susceptible d'être stockée dans le sol.

Ces propriétés physiques sont également susceptibles d'entraîner des variations de dispersion et d'acuité de la courbe représentative de la répartition des nitrates au cours de la migration.

Le tableau ci-dessous permet d'estimer l'influence de la texture et de la structure sur la porosité, la capacité au champ et la perméabilité ; son influence sur la répartition des nitrates étant observable sur le graphique 28.

.../...

Profondeur cm	Texture 0-20 μ	Structure	Porosité totale (% volume)	C.C. volumi- que/porosité totale	Perméabi- lité (mm/heure)
0-20	60 %	grumeleuse	48 %	58 %	40
20-60	60 %	polyédrique	51 %	57 %	90
60-80	70 %	massive	47 %	69 %	20
80 et +	30 %	sans	43 %	42 %	150

D/ Tableau récapitulatif

Le tableau récapitulatif suivant permet de résumer les observations effectuées au cours de cette étude. On remarque notamment que la migration du traceur peut être caractérisée (1) par l'importance des quantités lessivées et (2) par la distance dont a été déplacé le sommet de l'onde. Ces deux composantes semblent être complémentaires ; une augmentation de la quantité de traceur s'accompagne d'une diminution de déplacement du sommet. Si le déplacement s'effectue sur une grande distance, l'eau a circulé essentiellement dans les pores les plus gros, en déplaçant uniquement une faible partie du traceur ; nous considérons qu'il caractérise une circulation dite "gravitaire". Dans le cas contraire, le traceur est déplacé en quantités importantes sur une faible distance, la circulation affecte une plus grande quantité de petits pores, nous l'appellerons "circulation capillaire".

.../...

Tableau récapitulatif des résultats obtenus

1°) Influence des conditions initiales du sol (précipitations égales en hauteur et en répartition)

- Propriétés physiques :	La texture et la structure du sol conditionnent l'importance de la <u>porosité totale</u> et sa répartition en <u>poros capillaires</u> et <u>poros non capillaires</u>	
- Etat hydrique : localisation de l'eau localisation du traceur concentration du traceur	Sol sec (1)	
	poros capillaires " " forte	Sol humide poros capillaires et non capillaires " " faible
- Quantité d'eau retenue par le sol	forte du fait de la réhumectation	faible car transit gravitaire
- Migration du traceur quantité déplacée déplacement du sommet	(circulation capillaire) forte (forte concentration) faible : faible profondeur, réhumecté	faible - circulation gravitaire forte - pénétration profonde de l'eau

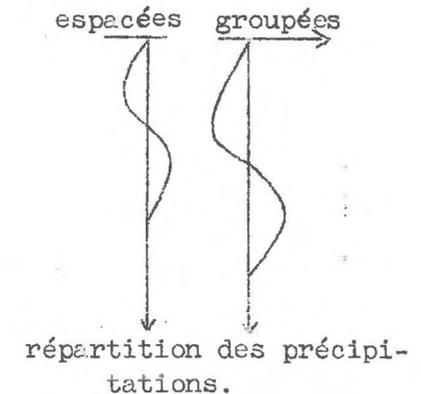
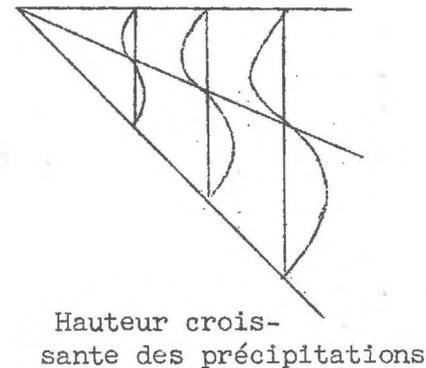
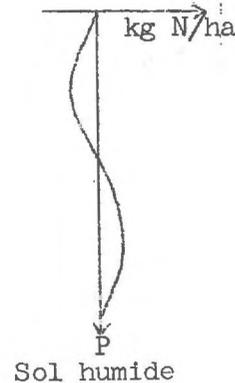
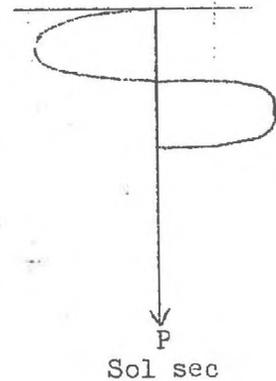
(1) Fentes de retrait exclues

2°) Influence de la hauteur et de la répartition des précipitations

(les conditions initiales du sol étant identiques).

- Apports d'eau : Hauteur Répartition	Quand ils augmentent en hauteur, le traceur est déplacé en quantité plus importante et sur des distances également croissantes Plus les apports sont groupés, plus la migration est profonde.
- Perte d'eau (évaporation)	Une évaporation rapide peut entraîner une rupture du lien capillaire ; si elle est plus lente et plus réduite, elle est moins superficielle et peut entraîner une dessiccation plus importante du sol - remontée du traceur dans tous les cas

3°) Schémas récapitulatifs des bilans nitriques



E/ Conclusion

Les grandes lignes qui se dégagent des observations de terrain peuvent se résumer ainsi :

Les masses d'eau apportées lors des précipitations déplacent l'eau du sol marquée par les nitrates suivant deux modalités. La première qui correspond à une circulation "gravitaire" s'effectue dans les pores de diamètres les plus gros, sous l'effet des forces de pesanteur, la seconde, traduisant une circulation des pores les plus gros vers les plus petits s'effectue soit sous l'effet des forces de capillarité (suction), soit sous l'effet de la pression de l'eau gravitaire (pression). Ces deux composantes du mouvement sont complémentaires l'une de l'autre ; en effet, on observe, comme nous l'avons remarqué précédemment, que l'augmentation de la circulation "gravitaire" s'accompagne d'une diminution de la circulation "capillaire" et réciproquement. En outre, on a toutes les raisons de penser que l'importance relative de ces deux composantes est fonction d'une part de facteurs extérieurs au sol comme l'importance et le rythme des précipitations et d'autre part des caractéristiques du sol lui-même, notamment son état hydrique et ses propriétés physiques. Rappelons succinctement l'influence de chacun de ces facteurs :

a) Le rythme des pluies :

Il conditionne la vitesse de pénétration de l'eau dans le sol et par voie de conséquence les modalités de la circulation qui s'y établit. Ainsi dans le cas d'un rythme pluvial rapide, la vitesse de pénétration est importante et la circulation s'effectue surtout dans les pores de gros diamètres. De ce fait, l'eau existant initialement dans le sol est déplacée essentiellement en profondeur sous l'effet de la gravité. Par contre, au fur et à mesure que le rythme diminue, la circulation s'établit dans des pores de diamètre de plus en plus faible (pression) entraînant une diminution du déplacement en profondeur.

b) L'importance des précipitations :

Elles conditionnent le volume d'eau pénétrant, puis circulant dans le sol. Ainsi, dans le cas d'un rythme pluvial et d'une humidité initiale constants, on observe au cours de l'apport d'eau par les précipitations une amplitude croissante des composantes gravitaire et capillaire du déplacement de l'eau dans le sol sans modification de leur rapport de proportionnalité.

.../...

c) Etat hydrique du sol :

Il détermine l'énergie de rétention de l'eau dans le sol ; celle-ci diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche de la capacité au champ où elle s'annule. De ce fait, en sol sec la circulation est surtout capillaire alors qu'elle est gravitaire en sol humide. Ces modalités entraînent un lessivage des nitrates dont l'importance est une fonction décroissante de l'humidité initiale. Il est toutefois difficile d'en conclure à un déplacement correspondant de l'eau du sol. En effet, il faut remarquer que la concentration des nitrates varie également avec l'état hydrique. Nous vérifierons et approfondirons ce problème grâce à des expériences de laboratoire.

d) Propriétés physiques du sol

Les propriétés physiques du sol essentiellement caractérisées par la texture et la structure des différents horizons interviennent sur l'importance de la porosité totale ainsi que sur la répartition de cette dernière en pores capillaires et non capillaires. De ce fait, elles conditionnent à chaque niveau du profil d'une part la quantité d'eau circulant dans les pores capillaires et d'autre part celle qui y est stable dès que cessent les apports d'eau par les précipitations. Ces propriétés physiques sont également responsables en partie des variations d'acuité et de dispersion de la courbe représentative de la répartition des nitrates au cours de la migration.

Enfin, nous sommes donc amenés à vérifier et à approfondir ces modalités de déplacement de l'eau du sol contenant le traceur au cours de circulation capillaire et gravitaire s'effectuant grâce à des apports d'eau pure extérieurs (précipitations),

.../...

III/ ETUDE AU LABORATOIRE

A/ Introduction -

L'analyse des données de terrain nous a permis de mettre en évidence le déplacement de l'eau marquée du sol par celle provenant des précipitations. D'autre part, pendant cette migration, nous avons constaté une diminution de la concentration nitrique. Cette remarque nous permet donc d'envisager un mélange entre ces deux masses d'eau.

Ces conclusions comportent toutefois de nombreuses limites inhérentes aux expériences elles-mêmes ; en effet, ces dernières ont été réalisées en plein champ, c'est-à-dire dans un milieu naturel dont il est difficile de définir tous les paramètres. Nous avons donc entrepris des expériences au laboratoire afin de vérifier l'exactitude de ces premiers résultats et également pour approfondir l'hypothèse d'un "déplacement avec mélange": celui-ci intervient au cours d'une circulation "capillaire" (s'effectuant dans les pores les plus petits) et "gravitaire" (s'effectuant dans les pores les plus gros) dont l'importance relative est régie par quatre facteurs principaux : le rythme (1), l'importance des précipitations (2), l'état hydrique du sol (3), les propriétés physiques de ce dernier (4).

Nous avons donc conçu nos modèles expérimentaux de façon à approcher le plus possible ces conditions naturelles et également de façon à préciser l'influence (relative) de chacun de ces facteurs, toutes autres conditions étant égales par ailleurs.

Avant d'aborder les expériences de laboratoire, nous présentons un schéma sur la foi d'informations bibliographiques (réduites généralement au milieu saturé) et d'hypothèses liées à leur transposition au milieu non saturé.

Les expériences de laboratoire nous servent alors à appuyer, vérifier ou infirmer ces schémas. Dans une conclusion générale, nous essayerons de regrouper l'ensemble des résultats de laboratoire et de les utiliser pour expliquer les comportements observés "in situ".

.../...

B/ Proposition d'un schéma interprétatif du déplacement avec mélange -

Une étude bibliographique nous permettra de rassembler différentes propositions que nous essayerons de traduire sur un schéma interprétatif par des représentations géométriques simples.

1/ Etude bibliographique :

Une étude bibliographique permet de suggérer deux types de phénomènes susceptibles d'intervenir lors du déplacement de l'eau marquée du sol par l'eau d'apport ; ce sont la diffusion et la dispersion hydrodynamique.

La diffusion est le passage d'ions se trouvant à une concentration donnée dans une solution, vers une autre solution moins concentrée en contact avec elle. Ce phénomène se produit lorsque les solutions sont immobiles. Il diminuerait lorsque ces solutions se déplacent et cela d'autant plus que leurs vitesses s'accroissent.

La dispersion hydrodynamique, au contraire, est essentiellement liée aux mouvements des fluides. Elle résulte d'une part de différences de vitesses de circulation des fluides à l'intérieur de gros pores, suivant que les lames de liquide sont situées au centre du pore ou proches de sa paroi. Elle résulte également de différences de vitesses de la circulation du fluide entre les pores de diamètres différents, ou éventuellement entre les différentes parties d'un même pore de diamètre variable.

Plusieurs auteurs ont entrepris des recherches sur ces phénomènes, notamment SLICHTER (1904) qui pense que la dispersion observée serait due uniquement à des variations de vitesse ; HANDY (1959) aboutit à la même conclusion, mais précise que l'écoulement doit être alors suffisamment rapide pour pouvoir négliger la diffusion. Par contre, THOMAS et BERG (1959) pensent que la diffusion intervient de façon prépondérante dans le phénomène de dispersion. Finalement, BIGGAR J. W. et NIELSON D. R. (1960, 1961, 1962, 1963, 1964) et CORREY R. J. et BIGGAR (1963, 1965) et récemment ELRICK (1969), discernent de façon assez nette l'influence relative de la dispersion hydrodynamique et de la diffusion.

Nous résumerons leurs conclusions par les propositions suivantes :

.../...

2/ Propositions :

Les quatre premières propositions s'appliquent à un milieu saturé

Proposition 1 : A vitesse d'apport très faible, dans un milieu contenant des pores uniformes et de très petits diamètres, le traceur diffuserait en quantité égale dans l'eau du sol et dans l'eau introduite au cours du déplacement. Il en résulterait un passage très faible du traceur de l'eau marquée vers l'eau pure.

Proposition 2 : Dans des pores monodimensionnels plus gros, l'eau marquée se mélangerait à l'eau pure (a) et cela d'autant plus que le diamètre des pores augmente (b).

Proposition 3 : Dans des pores pluridimensionnels, ce mélange affecterait davantage l'eau introduite que l'eau existant initialement dans le sol (a) et cela d'autant plus que le diamètre moyen des pores est plus élevé (b).

Proposition 4 : Si la vitesse de pénétration croît, le traceur est recueilli de plus en plus rapidement par rapport à l'effet piston.

Nous supposons vraies ces quatre premières propositions en sol non saturé (4 hypothèses). Nous formulerons une cinquième proposition que nous considérerons également comme une hypothèse.

Proposition 5 : En milieu non saturé, le mélange s'effectue dans une partie seulement de la porosité, variable avec l'état hydrique initial : gros pores ainsi que pores plus petits en milieu initialement sec (humidité inférieure à la capacité au champ) et uniquement gros pores en milieu humide (humidité supérieure ou égale à la capacité au champ).

.../...

3/ Proposition d'un schéma interprétatif du déplacement avec mélange :

Ce schéma fait intervenir une répartition spatiale du traceur en mouvement dans une colonne de porosité totale P où le traceur a été initialement introduit en surface. Ce schéma sera élaboré progressivement en essayant de traduire par des représentations géométriques simples, les propositions précédentes (1).

a) Représentation d'un déplacement du traceur par effet piston théorique (schéma 1, figure 8).

Nous portons en ordonnées les quantités d'éluat cumulées au cours de la percolation, en abscisses une grandeur égale à la porosité totale " p " de la colonne et supposons un déplacement du traceur par effet piston. L'aire $OPE_1 Ep_1$ représente alors le déplacement de l'eau pure existant initialement dans le sol, l'aire $Ep_1 Ep_2 Ep'_2 Ep'_1$ celui de l'eau marquée ; $YEp_2 Ep'_2 P$ correspond à l'éluat de l'eau introduite. Comme il n'y a aucun mélange entre ces différentes masses d'eau, leur séparation est horizontale.

b) Représentation d'un déplacement du traceur avec phénomène de diffusion (schéma interprétatif 2, figure 8)

Si il y a diffusion, le traceur se mélange en quantité égale et assez faible avec l'eau du sol et l'eau d'apport (proposition 1) au cours de son déplacement dans des pores de petit diamètre. Nous traduirons ce phénomène par une rotation de la droite $Ep_2 Ep'_1$ autour du point Ep_m d'un angle " α " proportionnel à l'importance de la diffusion. L'aire $Ep_1 Ep_2 Ep'_2 Ep'_1$ figure alors la répartition du traceur au cours de son déplacement.

(1) Un tel travail a déjà été tenté par de nombreux physiciens qui ont essayé d'établir des schémas mathématiques ou géométriques à l'aide d'hypothèses de base puis de les vérifier expérimentalement en résolvant les équations mathématiques initialement proposées. Ces schémas sont toutefois assez complexes et aucun d'eux ne semble être vraiment représentatif de l'écoulement réel. Parmi ces derniers, le plus complet, semble être celui de PFANNKUCH (1963) qui met en évidence cinq régimes d'écoulement en fonction de la vitesse de circulation : quand la vitesse augmente progressivement, on observe une diminution de la diffusion et une augmentation de la dispersion hydrodynamique. Cette conclusion est confirmée par FRIED (1968).

c) Représentation du déplacement du traceur avec phénomènes de diffusion et de dispersion hydrodynamique dans des gros pores (schémas 3 et 4, figure 8).

Si la circulation s'effectue dans des pores de diamètre suffisamment important pour qu'il apparaisse des différences de vitesse entre la paroi (\vec{v}_1) et le centre du pore (\vec{v}_2), il apparaît un mélange (proposition 2a) entre l'eau marquée et l'eau pure, qui serait d'autant plus prononcé que le diamètre des pores augmente (proposition 2b).

Ce mélange dû à la dispersion hydrodynamique se traduit par le passage d'une partie du traceur dans l'eau pure comme dans le cas de la diffusion. C'est pourquoi nous l'avons encore représenté par une rotation de la droite $Ep_2 Ep'_1$. Toutefois, dans le cas présent, le passage du traceur est beaucoup plus important ; c'est pourquoi nous avons fortement augmenté la valeur de l'angle de rotation (b) et cela d'autant plus que le diamètre des pores augmente (c). Une fois la droite $Ep_2 Ep'_1$ tracée, il nous est possible, comme précédemment, de distinguer trois phases d'écoulement :

- l'élution du traceur est figurée par l'aire $Ep_1 Ep_2 Ep'_2 Ep'_1$
- l'élution de l'eau pure du sol est figurée par l'aire

$Ep_1 Ep_m Ep'_1 P_0$

- l'élution de l'eau pure introduite est figurée par l'aire

$Y Ep_2 Ep'_2 P'$

d) Représentation d'un écoulement dans des pores de différents diamètres

Sur le schéma interprétatif proposé (5), la porosité totale "P" est divisée en fractions proportionnelles à l'importance relative (exprimée en pourcentage de "P") des différentes classes de pores de la colonne (proposition 4). Les fractions correspondant aux pores de diamètres croissant sont disposées dans le sens de l'axe.

+ Cas d'une coexistence de deux classes de pores (schéma 5)

Si par exemple ce mélange de billes fait intervenir 50 % de pores de diamètre $\varnothing 3$ et 50 % de diamètre $\varnothing 2$, nous diviserons la porosité totale "P" en deux parties égales OP_1 et $P_1 P_2$ ($OP_1 + P_1 P_2 = P$). Nous les porterons sur l'axe OP en les classant en fonction du diamètre des pores : la fraction de la porosité correspondant aux pores les plus gros se situera sur la partie gauche du schéma, c'est-à-dire dans le sens positif de l'axe OP (schéma 5, figure 9).

.../...

- Des phénomènes identiques de diffusion et de dispersion hydrodynamique se produisent dans chaque classe de pores mais en plus de ces phénomènes interviennent des hétérogénéités de vitesse dues à la différence de diamètre entre les pores où l'eau circule. Ces hétérogénéités de vitesse sont une nouvelle source de dispersion hydrodynamique. Nous exprimerons ce nouveau phénomène sur le schéma (5) en portant dans la porosité $P_1 P_2$ correspondant aux pores de diamètre $\varnothing 2$ une dispersion égale à "c" et dans OP_1 une dispersion égale à "b". Nous considérerons toutefois que l'écoulement se fait d'abord dans les pores les plus gros et ensuite dans les plus petits (FEODOROFF, 1965 - COURAU, 1969). Nous obtiendrons alors un écoulement figuré par le diagramme (5) (proposition 3a). La phase d'élution du traceur est donc représentée par l'aire $Ep_1, Ep_2, A, Ep'_m, Ep'_2, Ep'_1, Ep'_m, Ep_1$.

+ Cas d'un mélange faisant intervenir 3 classes de pores (schéma 6)

Soit $\varnothing 1 \varnothing 2 \varnothing 3$ les diamètres de ces pores dont la proportion relative est égale à 50 % pour le diamètre $\varnothing 3$, 25 % pour le diamètre $\varnothing 2$, 25 % pour le diamètre $\varnothing 1$.

La nouvelle fraction ajoutée par rapport à l'expérience précédente concerne des pores de petit diamètre ($\varnothing 1$), nous la situerons donc dans la partie gauche du schéma (6). La pente de la droite figurant le mélange des fluides de cette classe de pores, sera très faible. Si l'on considère maintenant une circulation des fluides dans les trois classes de pores envisagées, la dispersion hydrodynamique résultant de ce déplacement sera figurée par la ligne brisée : $Ep_2 B A Ep'_m Ep'_1$. Cette ligne s'incurve donc de plus en plus : le mélange décroît à mesure que diminue le diamètre moyen des classes de pores (et qu'augmente leur nombre) (proposition 3b).

e) Variation des vitesses

Pour les vitesses élevées d'écoulement, les phénomènes de dispersion hydrodynamique sont accrus dans des proportions notables. Cet accroissement peut être attribué à une hétérogénéité accrue de vitesse entre les lames proches de la paroi et celles du centre des gros pores, et également à une différence de vitesse d'écoulement accrue entre les gros et les petits pores.

Si la vitesse d'apport augmente, dans des pores monodimensionnels de diamètre $\varnothing 2$ par exemple, la pente de la droite représentative de la dispersion est de plus en plus grande, (schéma 7). Le traceur est recueilli de plus en plus rapidement par rapport à l'effet piston (proposition 4).

.../...

Dans le cas d'un écoulement à des vitesses croissantes, dans des pores pluridimensionnels de diamètre $\emptyset 1 \emptyset 2 \emptyset 3$ par exemple, dont les proportions sont identiques à celles de l'expérience précédente, les pentes des différents segments représentatifs de la dispersion dans chaque classe de pores sont plus prononcées. La dispersion affectant l'ensemble de la colonne est alors figurée par une ligne brisée : (schéma 8) $Ep_2 B A Ep'_m Ep'_1$ pour les petites vitesses, $Ep_3 Ep'_m B' A' Ep'_3$ pour les grandes vitesses.

On constate notamment qu'un accroissement de vitesse entraîne une apparition plus rapide et plus intense du traceur par rapport à l'effet piston (proposition 4).

f) Cas du sol (schéma 9, figure 10)

Comme le propose FEODOROFF (1965), si "P" est la porosité du sol supposée inchangée au contact de l'eau (ce qui exclut les phénomènes de gonflement), on peut dire que :

- 1) cette porosité "P" est constituée de pores de différents diamètres,
- 2) ces pores peuvent être regroupés dans des classes définies par leurs dimensions extrêmes,
- 3) Chaque classe de pores représente une portion plus ou moins importante de la porosité.

Il nous est alors possible d'élargir le schéma d'écoulement proposé en portant en abscisses la porosité attribuée à chaque classe de pores disposée par ordre croissant sur l'axe et en ordonnées les quantités d'éluat cumulées.

La dispersion du traceur dans l'eau existant initialement dans le sol et dans l'eau introduite à vitesse donnée V_1 constante est alors figurée par la courbe continue $Ep_1 Ep_2$ de rayon de courbure variable et passant par le point Ep'_m (schéma 9).

g) Sol sec, sol humide

Si le milieu n'est pas saturé, une partie seulement de la porosité contient initialement de l'eau. En sol humide, cette partie correspond à la capacité au champ (figurée par la droite $X_2 Y_2$) et en sol sec une fraction encore plus faible contient de l'eau (droite $X_1 Y_1$). Pour une même quantité d'eau introduite, l'effet piston est différent suivant l'humidité du sol : il atteint un niveau plus profond en sol humide, l'écoulement

.../...

s'effectuant avec une hétérogénéité des vitesses plus prononcée qu'en sol sec (proposition 5). De ce fait, les aires $Y_1 Ep_1 Ep'_2 P'_1$ et $Y_2 Ep_1 Ep'_2 P'_1$ sont égales mais la pente des courbes $Ep_2 Ep'_m Ep_1$ est plus prononcée en sol sec qu'en sol humide (schéma 11).

Conclusion :

Le schéma interprétatif ainsi élaboré à l'avantage de traduire par des représentations géométriques simples les caractéristiques propres à chaque type d'écoulement en sol saturé. Nous les résumerons ainsi :

1°) Une droite traduit la diffusion et la dispersion hydrodynamique dans des pores monodimensionnels ;

2°) Une ligne brisée traduit ces phénomènes dans le cas de pores pluridimensionnels. Par l'accroissement du nombre de classes de pores, on tend vers une courbe (cas d'un sol).

3°) La pente de la droite (ou le rayon de courbure de la courbe) varie avec l'importance de la diffusion et de la dispersion hydrodynamique.

- elle est nulle dans le cas d'un effet piston théorique, soit $Ep_1 Ep_2$ cette droite et Ep_m son milieu.
- elle est faible dans le cas d'une diffusion.
- elle est importante dans le cas d'une dispersion hydrodynamique.
- elle croît avec la vitesse de circulation et avec le diamètre moyen des pores.

4°) Soit Ep'_m le point d'intersection de cette droite (ou de cette courbe) avec la droite $Ep_1 Ep'_2$. La distance $Ep_m Ep'_m$ permet d'estimer l'importance relative et la localisation du mélange entre le traceur, l'eau existant initialement dans la colonne et l'eau introduite.

.../....

C/ Techniques d'étude -

Plusieurs auteurs ont étudié les migrations dans le sol par des dispositifs expérimentaux de différents types. TSCHAPEK M. (1961) a abordé l'on étude par la voie des phénomènes de remontée dans le but de mettre l'accent sur la diffusion. Mais la plupart des auteurs (BIGGAR et NIELSEN, 1960, 1961, 1962, 1963, 1964 ainsi que COREY et BIGGAR, 1963, 1965) ont employé des méthodes faisant intervenir le lessivage, estimant qu'ainsi, ils sont plus proches des conditions naturelles.

Nous avons choisi la méthode du lessivage du sol en colonnes de percolation pour ces mêmes raisons et également parce que le matériel du laboratoire était plus adapté au travail que nous avons entrepris.

L'emploi de plusieurs traceurs s'offrait à nous. Pour nos premières expériences de laboratoire, nous avons choisi les nitrates qui étaient l'élément fertilisant choisi par A. LILOIS sur le terrain. Nous avons dû ensuite préférer le chlore (1) qui n'est pas susceptible d'entrer dans un cycle particulièrement actif à la température du laboratoire. En effet,

COREY (1967) lors d'une étude comparative de la migration des nitrates et des chlorures sur colonne estime qu'à vitesse de 0,11 cm/heure, 21 % des nitrates peuvent être immobilisés ou réorganisés. En outre, il faut remarquer que le chlore est beaucoup plus rapide à doser et que sa migration est plus rapide dans la colonne en raison de son rayon ionique plus faible que celui de l'ion nitrique.

1/ Techniques choisies :

Principe -

Les manipulations entreprises consistent essentiellement à faire percoler de l'eau pure sur des billes de verre ou sur du sol dont l'humidité initiale est connue de façon précise, après y avoir introduit un traceur soit en surface, soit dans la masse. A la suite de la migration qui en résulte, on dose la quantité du traceur retrouvée dans l'éluat. Lors de certaines manipulations, la percolation a été menée de telle sorte que le front de percolation ne dépasse pas l'extrémité de la colonne, il n'y a pas d'éluat, et le traceur est dosé dans le sol.

.../...

(1) Il faut remarquer que la quantité de chlore existant initialement dans le sol est insignifiante 0,01 mg/100 g de sol et de ce fait perturbe peu les résultats obtenus.

Mode opératoire -a) Réactifs

- Réactif 1 : Chlorure de sodium (Prolabo R.P.)

1 a : solution de NaCl 0,0141 M/l soit 1 mg de Cl^- par cc de solution ;

1 b : solution de NaCl 0,0282 M/l soit 2 mg de Cl^- par cc de solution ;

1 c : solution de NaCl 0,0564 M/l soit 4 mg de Cl^- par cc de solution.

- Réactif 2 : Nitrate d'argent (Prolabo R.P.)

2 a : solution de AgNO_3 0,0033 M/l

2 b : solution de AgNO_3 0,005 M/l

2 c : solution de AgNO_3 0,01 M/l.

- Réactif 3 : Chromate de potassium (Prolabo R.P.)

Solution à 30 % dans de l'eau distillée.

b) Matériel utilisé

Le matériel utilisé est représenté sur la figure (7). Il est constitué par :

- des colonnes de percolation en verre

de 2,5 cm. de diamètre intérieur et de 30 cm de longueur (ou éventuellement dans certains cas que nous préciserons des colonnes de 60 cm de longueur et de 2 cm de diamètre intérieur). L'extrémité inférieure des colonnes utilisées présente toujours un étranglement, ce qui est un léger inconvénient du fait de l'augmentation de la quantité de liquide nécessaire pour l'amorçage de la percolation. Une fois remplies de terre, leur ouverture supérieure a été recouverte de coton hydrophile et de billes de verre de 5 mm de diamètre, afin d'obtenir une répartition aussi homogène que possible de l'eau introduite et d'éviter les effets d'affouillements.

- Un système d'arrivée d'eau

L'eau permutée servant à déplacer le traceur est introduite grâce à une allonge graduée dont l'extrémité se situe au-dessus de la partie supérieure de la colonne.

- Un système de récupération du traceur dans le percolat ou dans le sol

Si la quantité d'eau introduite est suffisamment importante pour

.../...

obtenir un percolat, ce dernier est recueilli à la sortie de la colonne par un siphon de 2 cc couplé à un collecteur de fraction dont les tubes à essais sont calibrés. On dose alors le traceur contenu dans chaque fraction ainsi recueillie.

Si la quantité d'eau introduite est peu importante, l'on ne recueille pas de percolat et le sol partiellement réhumecté est chassé de la colonne par un jet d'air comprimé. On le découpe alors en fractions de 5 g sur lesquelles on dose le traceur suivant le protocole exposé ultérieurement.

c) Préparation du matériau

Ce matériau est constitué de sol et de billes de verre que nous avons préparés de la façon suivante en vue de les mettre dans les colonnes à percolation.

- Billes de verre

La quantité de billes introduite est calculée de façon que ces dernières retiennent 25 g d'eau par analogie au sol choisi dont la capacité au champ est de 25 % d'humidité (soit 25 g d'eau pour 100 g de sol). Une première fraction des billes correspondant aux $\frac{7}{8}$ de la quantité ainsi déterminée, est placée dans la colonne où elle est humectée par les $\frac{7}{8}$ de l'eau totale que doit recevoir la colonne. La fraction restante des billes ($\frac{1}{8}$) est disposée au-dessus, de façon à former une couche superficielle qui reçoit l'eau complémentaire ($\frac{1}{8}$) contenant le traceur.

- Sol

Les terres utilisées proviennent de l'horizon de surface des parcelles choisies lors de l'étude de la migration de l'azote en sol nu. Après avoir laissé les terres se dessécher, leur humidité étant alors de 5 %, nous les avons passées au tamis de 2 mm, et nous en avons prélevé des fractions de 100 g. Ces dernières ont été réhumectées à un taux d'humidité déterminé suivant la nature de l'expérience (5 - 15 - 25 %). C'est au cours de cette opération que nous avons introduit le traceur dissous dans l'eau, en le malaxant au sol de façon à obtenir un ensemble aussi homogène et uniformément humide que possible. Dans certains cas, le traceur n'a été introduit qu'en surface suivant des techniques identiques à celles utilisées pour les billes de verre.

L'obtention de colonnes de sol à profil hydrique uniforme et non saturé a nécessité une manipulation délicate de notre part; en effet, sans

.../...

faire intervenir d'appareillage aussi compliqué que celui de YARON (1966) ou que celui déjà plus simple de FEODOROFF (1967) dans lequel, le sol est introduit à l'état de saturation, puis ensuite ramené à l'état hydrique désiré, nous avons procédé en introduisant le sol sous forme d'agrégats calibrés possédant l'humidité voulue (méthode proche de celle proposée par BALIF (1966)).

d) Technique de dosage

Dosage du traceur dans le percolat -

Nous évaluons la teneur en traceur (chlore) dans chaque fraction (2 cc) d'éluat recueilli en tubes à essais calibrés.

Le principe du dosage repose sur une réaction de précipitation de l'ion chlorure par le nitrate d'argent. Nous ajoutons, dans chaque tube contenant l'éluat, trois gouttes environ de chromate de potassium (réactif 3), indicateur coloré du dosage, qui vire du jaune d'or à l'orange quand tout le chlore contenu dans l'échantillon a été précipité.

Nous dosons les premiers tubes d'éluat recueilli, avec une solution de nitrate d'argent de faible concentration (réactif 2 a) ; nous poursuivons le dosage des tubes suivants avec des solutions de nitrate d'argent de concentrations croissantes (réactifs 2 b, 2c) ou décroissantes (réactif 2 a) selon les variations du taux du traceur dans le percolat.

Dosage du traceur dans le sol -

Nous extrayons le sol de la colonne par de l'air comprimé. Le sol ainsi dégagé se présente sous forme d'un cylindre que l'on fractionne très progressivement à la spatule de façon à obtenir des portions de 5 g, déterminées avec exactitude à la balance. Ces fractions sont ensuite disposées sur un papier filtre, puis lavées à l'eau distillée, afin de recueillir le traceur dans le filtrat. Il est dosé suivant la technique précédemment décrite.

2/ Expression des résultats :

Après dosage, les résultats sont représentés selon différents types d'expression graphique auxquels nous avons donné un nom de code afin de pouvoir les mentionner de façon rapide au cours de la présentation des résultats qui va suivre. Suivant le mode opératoire utilisé lors des expériences nous avons distingué deux type principaux d'expression graphique.

.../...

a) On recueille un éluat

Nous nous intéresserons tout d'abord aux quantités de traceur recueillies dans chaque fraction de percolat, puis nous envisagerons ensuite d'autres modes d'expression faisant intervenir les valeurs cumulées du traceur au cours de la percolation.

- quantités de traceur existant dans chaque fraction :

On porte en abscisses les quantités de percolat-cumulées et en ordonnées les quantités de traceur recueillies dans chaque fraction. (traceur en fraction - quantités de percolat cumulées).

- Quantités de traceur cumulées :

On porte en abscisses les quantités de percolat cumulées et en ordonnées les quantités de traceur cumulées (quantités de traceur cumulées - quantités de percolat cumulées).

b) On ne recueille pas de percolat :

Comme précédemment nous avons utilisé deux modes principaux de représentation graphique faisant intervenir les quantités de traceur cumulées et non cumulées ; toutefois, les quantités de percolat cumulées au cours de la percolation sont remplacées par des profondeurs.

Nous obtenons alors deux modes de représentation : traceur en fraction - profondeurs et traceur cumulé - profondeurs.

Remarque : Les quantités de chlore sont obtenues en sachant que :

1 cc d'AgNO ₃	0,01 M	correspond à	0,355 mg	de Cl
1 "	0,005	"	0,1775	"
1 "	0,0033	"	0,118.	

D/ Résultats obtenus -

1/ Etude d'un écoulement théoriquement sans mélange (effet piston)

a) Mise en évidence à partir d'un modèle expérimental

Sur une colonne de percolation remplie de billes de verre de 60 microns de diamètre contenant le traceur dans la couche superficielle et 25 g d'eau sur sa totalité, on introduit de l'eau à la vitesse de 5 gouttes par minute suivant la technique expérimentale précédemment décrite. L'éluat recueilli est dosé et les résultats sont donnés sur les graphiques (29-30)

.../...

où l'on observe trois phases : la première correspond à la sortie de l'eau pure existant initialement dans le sol, la seconde correspond à la sortie du traceur déplacé par l'eau pure que l'on introduit au fur et à mesure, la troisième est constituée exclusivement par l'eau pure introduite.

Suivant le mode de représentation utilisé : traceur en fraction - éluat cumulé, il apparaît au cours de la migration un mélange relativement faible et d'égale importance entre le traceur, l'eau existant initialement dans la colonne et d'autre part le traceur et l'eau introduite (graphique 30). Dans le cas où le mélange serait nul, nous avons un effet que certains auteurs ont appelé "Effet piston".

b) Différents modes de représentation de l'effet piston

L'effet piston est matérialisé par une droite si l'on fait intervenir les quantités de traceur cumulées. Cette droite passe par l'origine quand le traceur est réparti dans toute la colonne (graphique 37) et elle n'y passe pas quand il est introduit en surface (graphiques 29, 31, 34, 35, 46 et 47). Par contre, l'effet piston est matérialisé par un histogramme si l'on fait intervenir les quantités de traceur dans chaque fraction de percolat. Dans ce cas, le traceur est introduit en surface, l'ordonnée de l'histogramme est égale à la quantité d'eau pure existant initialement dans le sol (graphiques 30, 32, 33, 40).

Cet effet piston approché par le modèle expérimental ci-dessus nous servira de repère ; il sera donc d'une grande utilité pour décrire et interpréter la migration du traceur dans les expériences de laboratoire.

2/ Influence de la vitesse de pénétration de l'eau sur la migration

L'analyse des données de terrain nous révèle l'influence de la vitesse de pénétration des pluies dans le sol sur le lessivage des nitrates. Mais comme nous l'avons signalé, de nombreux paramètres difficiles à contrôler perturbent l'étude de ce facteur dans le milieu naturel qu'est le sol ; aussi, nous allons reprendre cette observation au laboratoire. Après avoir défini le modèle expérimental, nous ferons varier la vitesse de pénétration de l'eau dans des billes de verre et dans le sol, toutes autres conditions étant égales par ailleurs.

a) Cas de billes de verre monodimensionnelles (graphiques 33 et 34)

- Modèle expérimental :

Le dispositif expérimental permet d'obtenir l'éluat du traceur introduit à la surface (1/8) d'une colonne remplie de billes de verre monodimensionnelles de 300 μ de diamètre (105g) amenée à la capacité de rétention

.../...

(25 g d'eau). Nous avons réalisé trois expériences où la vitesse d'apport de l'eau a été de 20 - 4 et 0,85 cm/heure.

- Résultats :

On constate (graphique 34) que les courbes représentatives passent par le point E_{pm} ou en sont très proches, et que leurs pentes diminuent lorsque la vitesse d'apport croît. Le mode de représentation traceur en fraction - éluat cumulé (graphique 33), nous permet d'estimer l'importance de la dispersion dans chaque cas. Le maximum de l'onde décroît avec la vitesse tandis que sa dispersion augmente. Aux fortes vitesses la courbe dénote un retard par rapport à celles obtenues à vitesse plus faible.

b) Cas de billes de verre pluridimensionnelles (graphique 35)

- Modèle expérimental :

Il est réalisé de la même façon que le précédent et possède la même porosité totale ; toutefois, cette dernière se répartit en des pores de différents diamètres. En effet, nous avons réalisé un mélange faisant intervenir différentes classes de billes de verre : 16 % de billes de 50 microns, 34 % de billes de 300 microns, 50 % de billes de 1200 microns (poids total 110 g) de façon à obtenir un milieu de porosité hétérogène. Deux expériences successives ont été réalisées avec des vitesses respectives de 20 et 4 cm par heure.

- Résultats obtenus - (Mode d'expression traceur cumulé - éluat cumulé) (graphique 35).

L'élution du traceur peut se caractériser par une courbe coupant l'axe $E_{p_1} E_{p_2}$ (effet piston) en un point variable, qui, comme sa pente et ses différents rayons de courbure sont fonction de la vitesse d'apport de l'eau.

- 4 cm par heure (20 gouttes par mn) :

La courbe coupe pratiquement l'axe en son milieu et son rayon de courbure ou début de la percolation est plus grand qu'à la fin de l'élution entre ces deux extrémités la pente est pratiquement constante. La courbe coupe l'axe $E_{p_1} E_{p_2}$ en un point proche de E_{pm} .

- 20 cm par heure (100 gouttes par mn) :

La courbe représentative de l'élution coupe $E_{p_1} E_{p_2}$ en un point

situé bien au-dessus de E_{pm} et elle peut se déduire de la précédente à la suite d'une translation vers la gauche et d'une légère rotation dans le sens négatif. La partie sensiblement rectiligne est beaucoup plus importante et prend naissance dès le début de l'élution.

c) Cas d'un sol

- Conditions expérimentales :

Dans une colonne de verre de 30 cm de longueur et de 2,5 cm de diamètre, contenant 100 g de terre amenée à la capacité au champ et dont le quart supérieur contient 10 mg de chlore dissout dans l'eau, on fait percoler de l'eau pure à la vitesse de 20 cm et 0,85 cm par heure. On recueille par fractions de 2 cc le percolat puis on le dose.

- Faits observés :

Les résultats obtenus sont portés sur les graphiques 31 et 32 où l'effet piston précédemment décrit est représenté, soit par la droite E_{p_1} , E_{p_m} , E_{p_2} , soit par l'histogramme E_{p_1} , E_{p_2} , $E_{p'_2}$, $E_{p'_1}$. Nous commenterons ces graphiques de la façon suivante en fonction de la vitesse de percolation de l'eau apportée :

- 0,85 cm par heure (en vitesse de lame d'eau)

On constate (graphique 31, courbe 1) qu'au début de l'écoulement, le traceur apparaît avant ce qu'il serait logique d'attendre dans le cas de l'effet piston (point E_{p_1}) ; et qu'en fin de percolation, au contraire, le traceur subsiste après ce que laisserait prévoir un effet piston (E_{p_2}). La courbe obtenue est donc symétrique par rapport au point E_{p_m} d'intersection de la droite représentative de l'effet piston, mais sa pente est moins forte.

Sur le graphique 32, courbe 1, on remarque la dispersion du traceur par rapport à l'effet piston ; sa répartition s'effectuant suivant une courbe de Gauss.

- 20 cm par heure

Sur le graphique 31, on note que la courbe 2 n'est pas symétrique par rapport à son point d'intersection avec la droite représentative de l'effet piston. Elle a subi par rapport à cette dernière une translation et une diminution de pente encore plus importante que dans le cas précédent.

Sur le graphique 32, l'allure de la courbe 2 diffère fortement de celle(1) obtenue à faible vitesse ; on constate notamment que la presque totalité du traceur est sortie bien plus rapidement que dans le cas d'une

.../...

vitesse de percolation faible et à fortiori que dans celui d'un effet piston. On constate en outre que le maximum de concentration est plus faible à forte vitesse qu'à faible vitesse.

d) Conclusion

Les expériences précédentes font ressortir une apparition du traceur d'autant plus intense et plus rapide dans le percolat que la vitesse d'apport est plus grande. Une analyse des courbes d'élution permet en outre de remarquer que :

- La pente des droites (ou des courbes) augmente avec la vitesse d'apport ;

- Le point d'intersection E_{pm} entre la courbe d'élution et la droite représentative de l'effet piston est fixe et correspond au milieu de la "droite effet piston" aux faibles vitesses d'apport ;

- Si les vitesses d'apport augmentent les droites d'élution coupent la "droite effet piston" toujours au point E_{pm} et E_{p_2} dans des milieux faisant intervenir plusieurs classes de pores (billes ou sol). Cette translation du point E_{pm} s'accompagne d'une part d'une translation des droites d'élution d'autant plus grande, et d'autre part d'une augmentation des parties courbes que le milieu contient davantage de classes de pores. On voit assez bien de ce point de vue la transition entre milieu poreux constitué de billes et milieu poreux constitué de sol (graphique récapitulatif 45, 47).

3/ Influence de l'état hydrique initial du sol sur la migration

L'étude au laboratoire s'est poursuivie en vue de tester l'influence de l'état hydrique initial du sol sur le lessivage du chlore. Suivant un dispositif expérimental très voisin du précédent, nous avons entrepris trois types d'expériences :

a) Modèles expérimentaux :

1°) Dans deux groupes d'échantillons de 100 g de sol, on incorpore de façon homogène la même quantité de marqueur (10 mg de chlore) dissout dans une quantité d'eau telle que le premier lot soit amené à la capacité au champ et le second à 50 % de cette capacité. La concentration initiale en

.../...

traceur de l'eau du sol est évidemment fonction de son état hydrique et en l'espèce, cette concentration dans le cas du 2ème lot est double de celle du premier. On fait ensuite percoler de l'eau pure sur les deux colonnes avec des vitesses d'apport uniformes, pendant la durée de l'expérience. Nous avons choisi deux vitesses : 20 cm et 0,85 cm par heure.

2°) On introduit le traceur uniquement dans le quart supérieur de la colonne et la vitesse choisie d'apport de l'eau est de 20 cm par heure ; différents états hydriques sont réalisés : 5 - 10 - 15 % d'humidité initiale. On recueille l'éluat et on dose le traceur.

3°) Le traceur est disposé en surface (1/3 supérieur) et subit un déplacement à l'intérieur de la colonne (1), la vitesse d'apport de l'eau est de 4 cm par heure. Après introduction d'une quantité d'eau donnée, l'expérience est arrêtée quand le front de pénétration de l'eau ajoutée se stabilise. Le chlore est dosé dans des fractions de sol identiques, extraites de la colonne par de l'air comprimé.

b) Faits observés :

- Première série d'expériences -

Sur le graphique 37, il nous est possible de constater que le traceur est récupéré plus rapidement en sol sec (courbe 2) qu'en sol humide (courbe 1) ; la différence entre les valeurs de traceur déplacé est représentée sur le même graphique par la courbe (3). Cette différence augmente depuis l'origine jusqu'à un maximum atteint pour une élution totale de 10 cc, puis diminue jusqu'à la fin de l'élution.

Sur les graphiques 38 et 39, on constate que le percolat recueilli est deux fois plus concentré en traceur en sol sec qu'en sol humide et que la vitesse d'apport tend à étaler l'élution du traceur. On constate en outre que la concentration du traceur dans les premières fractions de percolat recueillies est supérieure à la concentration du sol. Nous avons appelé cet effet : "surconcentration". C'est pour l'éviter que nous avons entrepris une seconde série de manipulations où l'on a épandu le traceur dans le quart supérieur de la colonne de percolation.

- Deuxième série d'expériences -

Les humidités initiales des colonnes de percolation sont de 5 % - 15 % et 25 %.

.../...

(1) Les colonnes ont 60 cm de longueur et un diamètre intérieur de 2 cm.

Sur le graphique 40 (traceur en fraction - éluat cumulé), on constate que le traceur initialement introduit à la surface du sol de la colonne apparaît dans les toutes premières fractions d'éluat recueillies avec une concentration d'autant plus importante que le sol est initialement plus sec. On peut constater que l'élution du traceur est alors très différente d'une élution théorique faisant intervenir trois phases distinctes. L'eau marquée du sol s'est donc énormément mélangée à l'eau pure introduite et à celle existant initialement dans la colonne. En sol très sec (3) nous observons une inversion du phénomène : le traceur est recueilli très progressivement au cours de l'élution.

Sur le graphique 41, les courbes obtenues grâce au mode d'expression (traceur cumulé - éluat cumulé) font ressortir qu'en sol moyennement sec (15 %), le traceur est recueilli plus intensément qu'en sol humide (25 %) et même qu'en sol très sec (5 %). Nous avons représenté sur le graphique 42 l'élution du traceur en fonction du temps, on constate que plus le sol est initialement sec, plus l'élution est lente et plus le temps de latence avant l'apparition du traceur augmente.

- Troisième série d'expériences (mais sans percolation) -

Cette série d'expériences comprend une mesure de la vitesse de pénétration du front et une étude de la répartition du traceur dans le sol après cette pénétration.

- Mesure de la pénétration du front

Au cours des différentes expériences réalisées précédemment, nous avons pu remarquer une vitesse de pénétration différente du front d'écoulement en sol sec et en sol humide ; aussi nous l'avons mesurée. Les résultats obtenus sont portés sur le graphique 43. On distingue clairement sur ce dernier que les profondeurs atteintes sont proportionnelles au temps après une courte période de stabilisation et que la vitesse de progression du front est beaucoup plus faible en sol sec qu'en sol humide.

- Etude de la répartition du traceur dans le sol (4 expériences)

Nous avons ensuite extrait le sol initialement sec (15 %) ou humide (25 %) ainsi humecté par la pluie de 8 cc dans un cas (B) et de 11,3 cc dans un autre cas (C). Les profils hydriques après arrosage sont représentés sur le graphique 44 ; la partie hachurée (A) correspond à l'eau marquée initialement introduite en surface, les aires (B) et (C) correspon-

.../...

dent à la répartition de cette dernière après les arrosages successifs.

Les faits suivants apparaissent au vue de ces résultats :

1°) La teneur en eau du sol ainsi que la profondeur de sol humecté en fin d'expérience dépend de l'état hydrique initial ;

2°) L'eau apportée est retenue d'une part dans la partie supérieure du profil où elle a remplacé l'eau marquée existant initialement dans le sol et d'autre part dans l'ensemble du profil où elle se confond avec l'eau pure du sol.

3°) L'eau marquée existant initialement en surface est déplacée différemment en sol sec et en sol humide : en sol sec la migration est groupée et le maximum de l'onde se situe près du front de réhumectation (B) ; cette tendance disparaît toutefois peu à peu au cours de la migration (C). En sol humide l'onde présente une grande dispersion ; dans tous les cas, le maximum est loin du front de pénétration.

4°) Une même quantité d'eau apportée a déplacé de 5 cm le sommet de l'onde en sol^{sec}/et de 10 cm en sol humide.

L'évolution des masses de traceur en fonction de l'état hydrique initial est représentée sur le graphique 45.

c) Résumé des expériences - sol sec, sol humide :

Les résultats obtenus au cours des expériences sur sol sec et sur sol humide peuvent être résumés ainsi :

1°) Une première série d'expériences nous a permis de saisir :

- une concentration plus élevée du traceur dans la première fraction de l'éluat en sol sec ;
- des phénomènes de surconcentration du traceur ;
- une récupération du traceur plus intense en sol sec qu'en sol humide.

2°) La seconde série permet de mettre en évidence différentes formes et positions des courbes en fonction de l'écoulement ; et en outre d'estimer l'importance de la réhumectation, à la suite de quoi, il nous est possible d'affirmer que la même quantité d'eau a déplacé plus de traceur et plus d'eau marquée en sol sec qu'en sol humide (sauf dans le cas d'un sol très sec).

.../...

3°) La dernière série d'expériences réalisée sans qu'on recueille d'éluat de manière à extraire le sol avant que le front de pénétration ait atteint l'extrémité de la colonne, nous permet de constater une rétention importante de l'eau apportée en sol sec ayant pour conséquence un déplacement massif de l'eau marquée du sol. Au cours de ce déplacement, le mélange est plus faible qu'en sol humide et le sommet de l'onde se situe près du front de pénétration qui atteint les couches peu profondes, sa vitesse de déplacement étant faible par rapport au sol humide.

4/ Etude de la dispersion sur différents mélanges de billes (graphique 47)

Les expériences suivantes font intervenir des percolations d'eau pure sur des colonnes remplies de billes de verre de même porosité (25 % du volume des billes) mais de perméabilité différente nous permettant d'étudier l'influence de ^{la} perméabilité sur la circulation de l'eau et par voie de conséquence sur la migration du traceur et de l'eau marquée, initialement introduits en surface (vitesse de percolation : 4 cm/h).

Nous avons réalisé trois mélanges :

mélange 1 : 16 % de billes de 50 microns, le complément ayant été réalisé par des billes de 300 microns,

mélange 2 : 16 % de 50 microns, 34 % de 300 microns et 50 % de 1200 microns,

mélange 3 : billes de 300 microns.

Les courbes obtenues (graphique 47) peuvent se diviser en trois parties :

- une droite qui coupe l'axe $Ep_1 Ep_2$ au point Ep_m et deux extrémités de courbure variable (cette courbure étant plus prononcée sur l'extrémité supérieure).

On constate en outre que l'aire formée par les segments $Ep_m Ep_1$ et les courbes (2) et (3) confondues est inférieure à celle comprise entre le segment $Ep_m Ep_1$ et la courbe (4). Par contre, les aires formées par les courbes (2), (3), (4) et le segment $Ep_m Ep_2$ croissent avec le diamètre moyen des pores.

.../...

E/ Discussion des résultats -

Les résultats accumulés au laboratoire nous permettent d'analyser l'influence de la vitesse d'apport de l'eau pure; de l'hétérogénéité des classes de pores du milieu envisagé et finalement de l'état hydrique sur le "déplacement avec mélange" des masses d'eau dans le sol : eau pure apportée, eau marquée et eau pure du sol en milieu non saturé (1). Nous discuterons les modalités de ce phénomène en référence avec le schéma interprétatif que nous avons initialement proposé.

1/ Influence conjuguée de la vitesse d'apport de l'eau pure et de l'hétérogénéité des classes de pores

D'une façon générale, toute augmentation de vitesse ainsi que toute accentuation du contraste de la porosité (nombre de classe de pores ainsi que diamètre moyen des pores) entraîne une augmentation de ses effets préférentiels et par voie de conséquence de la dispersion hydrodynamique.

a) Cas d'un milieu poreux monodimensionnel

Les résultats obtenus (graphiques 33 et 34) sont en accord avec ceux initialement prévus (schémas 3 et 4, figure 8) : l'évolution du traceur est proportionnelle aux quantités d'éluat recueillies (droite d'éluion). On peut donc lire comme nous l'avons envisagé que le mélange entre l'eau pure introduite et l'eau marquée se réalise en sol non saturé comme en sol saturé, c'est-à-dire par suite d'une différence de vitesse entre l'eau voisine des parois et celle circulant au centre des pores.

.../...

(1) Un mécanisme de la circulation au niveau du front de pénétration dans un milieu non saturé a été proposé par FEODOROFF et YARON (1967). Il fait intervenir une répartition de l'eau initiale sous forme de "manchons" se raccordant aux minces films qui adhèrent aux particules solides ; l'équilibre de ces manchons étant maintenu par les pressions capillaires existant de part et d'autre des ménisques. Un apport d'eau entraînerait alors une rupture d'équilibre des pressions capillaires et un déplacement de l'eau pré-existante. Les manchons les plus gros seraient alors affectés les premiers.

b) Cas d'un milieu poreux pluridimensionnel et cas d'un sol

b1) Faible vitesse d'apport de l'eau pure

Le fait qu'en milieu pluridimensionnel, (billes ou sol) les courbes d'élution (graphiques 35 et 47) coupent la droite "effet piston" $E_{p1} E_{p2}$ en son milieu E_{pm} pour de faibles vitesses d'apport d'eau pure est en contradiction avec les hypothèses émises (schéma 5 et 6, figure 8 et schéma 8 et 10, figure 10) ; en effet ce résultat traduit une circulation et une élution du traceur assez proche de celle obtenue en milieu monodimensionnel ; c'est-à-dire essentiellement liée aux effets de paroi et non à une différence de vitesse entre les gros et les petits pores.

Toutefois dans le cas envisagé, la diminution des parties rectilignes et des pentes des droites d'élution en fonction du nombre et du diamètre moyen des classes de pores (perméabilité) (graphique 47) traduit une variation des effets^{de} paroi suivant le diamètre des pores.

b2) Forte vitesse d'apport :

Aux fortes vitesses d'apport d'eau pure, le fait que le traceur apparaisse dans l'éluat d'autant plus rapidement que le nombre et le diamètre moyen des classes de pores augmente (graphiques 35 et 46) est attribuable d'une part aux grandes vitesses de circulation de l'eau pure dans les gros pores (progression rapide) où il se produit un mélange intense entre l'eau marquée et l'eau pure ; et d'autre part à un déplacement rapide de l'eau marquée des petits pores vers les gros pores par suite d'une pénétration directe de l'eau pure dans cette catégorie de pores. De ce fait, la dispersion hydrodynamique est très intense ; elle résulte d'effets de paroi et surtout d'une augmentation de l'hétérogénéité des vitesses entre petits pores et gros pores. L'ensemble de ces phénomènes explique ainsi la translation des courbes d'élution vers la gauche.

Nous sommes donc amenés à proposer de nouveaux schémas interprétatifs de l'écoulement que nous avons représentés sur la figure 12 : leur différence essentielle avec ceux proposés comme hypothèse de départ (figure 10) consiste en une translation des courbes d'élution.

2/ Influence de l'état hydrique initial

a) Rôle de la concentration initiale - déplacement du traceur

Comme nous avons conçu nos modèles expérimentaux de façon à

.../...

introduire une même quantité de traceur en sol sec et en sol humide, la concentration initiale du traceur dans l'eau varie en fonction de l'état hydrique du sol. Cela entraîne en sol sec une migration du traceur plus groupée et donc sa récupération plus rapide dans l'éluat quelque soit la répartition initiale du traceur : en surface ou dans toute la colonne (graphiques 37, 38, 39, 40, 41).

Par la suite afin d'éliminer un décalage entre transfert de traceur et l'eau marquée du sol du fait de concentrations initiales du traceur dans l'eau du sol, variables suivant l'état hydrique initial, nous avons établi une correspondance entre la quantité de traceur et la quantité d'eau marquée. Nous supposons donc que la diffusion du traceur reste assez faible au cours de la migration pour qu'on puisse assimiler les mouvements du traceur aux mouvements de l'eau marquée.

Remarques : phénomènes de "surconcentration" (graphiques 38, 39)

Lors d'expériences faisant intervenir une répartition uniforme du traceur dans toute la colonne, on observe que les premières fractions d'éluat recueillies ont une teneur en traceur supérieure à celle qu'il serait normale d'obtenir par simple déplacement de l'eau initiale.

Il est difficile d'interpréter ce phénomène ; toutefois, on peut le rapprocher des observations effectuées lors de certaines expériences menées en cases lysimétriques (TURC, 1969). Cet auteur a en effet observé que les solutions salines tendent à être beaucoup plus concentrées à la base du profil que dans les couches sus-jacentes. C'est pour éviter ce phénomène de "surconcentration" que nous avons par la suite introduit le traceur uniquement dans la partie superficielle de la colonne.

b) Circulation de l'eau d'apport - déplacement de l'eau marquée et importance du mélange

L'état hydrique initial conditionne la localisation de l'eau du sol, le volume de pores disponible pour une entrée et une accumulation de l'eau d'apport. De ce fait il influence la nature de la circulation ainsi que l'importance du balayage de l'eau initiale du sol (marquée en surface et pure en profondeur) - graphique 44.

bl) Sol initialement sec :

- Dans ce cas, l'eau marquée initiale est essentiellement localisée dans les pores les plus fins, les gros pores n'en contenant que très peu (aire A).

- Dès que commence la percolation, la majeure partie de l'eau d'apport pénètre directement dans les pores les plus gros où elle s'accumule jusqu'à ce que la charge soit suffisamment importante pour pouvoir entraîner un déplacement par gravité ; une petite quantité d'eau pure apportée pénètre néanmoins dans les pores les plus fins.

- Au cours de ce processus, une partie de l'eau d'apport ayant pénétré directement dans les gros pores circule vers ceux de diamètre plus petit (suction - pression). Cette eau pure s'ajoute à celle qui a pénétré directement dans ces petits pores, ce qui entraîne une circulation capillaire importante. De ce fait, l'eau marquée du sol est déplacée massivement et ceci dans une zone proche du front de réhumectation (écoulement voisin d'un effet piston - (Aire B)).

- Si l'apport d'eau pure continue, la dispersion de l'eau marquée augmente fortement. Cette dernière se mélange intensément à l'eau pure d'apport ainsi qu'à l'eau pure du sol (aire C). L'écart par rapport à l'effet piston est beaucoup plus important que précédemment (dispersion hydrodynamique forte) : l'élution du traceur se réalise pratiquement en régime de percolation. Au cours de ce processus, il est vraisemblable qu'un mélange entre l'eau pure d'apport et l'eau pure du sol puisse se réaliser.

.../...

b2) Sol initialement humide (25 % d'eau correspondant à la capacité au champ) - (graphique 44)

Dans ce cas, la quantité d'eau initiale est plus importante que précédemment et elle occupe en plus des classes de pores précédemment intéressées, des classes de diamètre plus important. De ce fait, le volume de pores disponible pour l'accumulation de l'eau d'apport et par voie de conséquence, le développement des forces de succion est très réduit, ce qui entraîne des mécanismes de circulation et de déplacement très différents des précédents.

Nous avons en effet toutes les raisons de penser que si l'eau d'apport pénètre, ici encore, essentiellement dans les vides du sol offrant le moins de résistance, c'est-à-dire dans les pores les plus gros, nous sommes conduits néanmoins à penser qu'elle ne s'y accumule pas, mais s'y déplace en profondeur avec une vitesse de circulation importante (graphique 43). En outre, les forces de succion étant faibles, la circulation des gros pores vers les plus petits est beaucoup moins intense.

Parallèlement à ce processus, une faible partie de l'eau pure d'apport pénètre directement dans les pores de plus faible diamètre où se trouve l'eau marquée qui est ainsi déplacée. A la suite de^{ce} déplacement qui s'effectue dans le sens des petits pores vers les plus gros, l'eau marquée se mélange intensément à l'eau pure et migre vers les couches profondes. L'intensité de ce mélange résulte à la fois de l'effet de paroi et des différences de vitesses de circulation entre les petits et les gros pores (dispersion hydrodynamique élevée).

.../...

b3) Déplacement du traceur et de l'eau marquée

L'étude précédente de l'écoulement en sol sec et en sol humide explique alors les différences de déplacement :

- de l'eau marquée : en sol sec la migration est massive et peu profonde tandis qu'en sol humide elle est faible et profonde (graphique 44) ;
- du traceur : dont les caractéristiques de la migration sont encore accentuées par la différence de concentration initiale plus importante en sol sec qu'en sol humide (graphique 45).

b4) Schéma interprétatif

Nous avons résumé ces différents types d'écoulement en sol sec et en sol humide par les schémas de la figure 12. Ils diffèrent notablement de celui proposé comme hypothèse sur la figure 11 ; signalons notamment le niveau correspondant à un déplacement de l'eau marquée par l'effet piston plus profond en sol sec du fait d'une quantité d'eau à balayer moins importante qu'en sol humide.

b5) Cas des sols très secs

Lors de nos expériences de laboratoire, un cas particulier nous est apparu : si le sol est excessivement sec (5 %) (graphique 41, courbe 3) le traceur apparaît en quantité importante dans les premières fractions de percolat puis en quantités beaucoup plus faibles au cours de l'élution. Dans ce cas, en outre, la migration est excessivement lente (graphique 42).

Une partie du traceur s'est donc déplacée de façon proche du front comme dans le cas d'un sol sec (15 %) (proche d'un effet piston comme précédemment) et une autre partie du traceur situé initialement dans les pores les plus petits a été difficilement déplacée au cours de la migration. Il se produit alors un effet de traine encore accentué par le régime de percolation en milieu presque saturé une fois l'élution amorcée.

Il faut remarquer que ce processus n'est pas clairement observé sur le terrain car dans ce cas l'apparition de fentes de retrait perturbe la pénétration de l'eau.

.../...

IV/ RESUME ET CONCLUSION GENERALE

Il est intéressant pour l'agronome de pouvoir apprécier après arrosage naturel (pluies) ou artificiel (irrigation), la distribution de l'eau d'apport et son influence sur la solution de sol pré-existante. En ce qui concerne les nitrates, par exemple, on conçoit que la connaissance du phénomène de migration des sels solubles et de leur répartition après arrosage revêt une certaine importance pour le perfectionnement des techniques d'épandage.

Cette étude d'une dynamique comparée de l'eau et de l'azote dans un sol de la région de Dijon est un élément de réponse à ces diverses questions. En effet, à la suite de ce travail, il nous est possible de mieux comprendre les modalités de déplacement des nitrates du sol, les mouvements de l'eau marquée et par voie de conséquence certains mécanismes de la circulation.

C'est grâce à une analyse des données de terrain au cours de laquelle l'azote du sol a été considéré ^{un} comme traceur progressivement élué par les précipitations, que nous avons pu mettre en évidence un déplacement de l'eau marquée du sol. Il se réalise à la suite de circulations "capillaire" (dans les pores les plus petits) et "gravitaire" (dans les pores les plus gros) dont l'importance relative est régie par quatre facteurs principaux : (1) la répartition dans le temps et (2) la hauteur des précipitations ainsi que (3) l'état hydrique initial du sol et (4) les propriétés physiques de ce dernier.

Les modalités exactes du déplacement et notamment le mélange entre l'eau marquée et l'eau pure apportée demandaient alors à être approfondies. C'est en utilisant des modèles aussi proches que possible des conditions naturelles mais nous permettant toutefois de contrôler les différents paramètres de l'écoulement que nous avons pu aborder ce problème au laboratoire. L'analyse et l'interprétation des courbes d'éluion d'un traceur nous ont alors permis de préciser les notions de diffusion et de dispersion hydrodynamique intervenant au cours d'un "déplacement avec mélange" et d'en préciser l'importance en fonction de la vitesse de percolation, de l'état hydrique initial et de l'hétérogénéité des classes de pores. Les résultats obtenus peuvent alors se résumer de la façon suivante :

.../...

1/ Influence de la répartition des précipitations dans le temps

Le modèle de répartition des précipitations conditionne la vitesse de pénétration et de circulation de l'eau dans le sol et par voie de conséquence la profondeur de pénétration du front, l'élution des nitrates et finalement l'intensité du mélange entre l'eau pure et la solution du sol. Ainsi dans le cas de pluies groupées, les vitesses de pénétration et de circulation sont élevées : l'eau d'apport migre profondément dans le sol en déplaçant le traceur. Ce déplacement s'accompagne d'un mélange très intense entre l'eau pure d'apport et l'eau marquée ; il en résulte un déplacement du traceur beaucoup plus rapide que ce que laisserait prévoir un déplacement intégral de la solution du sol par l'eau d'apport (effet piston). Au fur et à mesure que le rythme des pluies diminue la circulation s'établit dans des pores plus petits ; l'eau d'apport migre moins profondément et déplace l'eau du sol plus massivement : la dispersion hydrodynamique diminue et l'on se rapproche d'un effet piston.

2/ Influence de l'hétérogénéité des classes de pores (propriétés physiques du sol)

En régime d'eau circulante, l'accroissement de l'hétérogénéité de la porosité (augmentation du nombre et du diamètre moyen des classes de pores) entraîne une accentuation de la circulation dans les gros pores beaucoup plus importante que dans les petits. De ce fait, pour une vitesse d'apport donnée, l'élution d'une partie du traceur est plus rapide par rapport à l'effet piston, il en résulte un mélange entre l'eau pure d'apport et l'eau marquée du sol dans les gros pores. L'élution de l'autre partie du traceur est plus lente par rapport à l'effet piston car elle correspond à une circulation dans les pores plus petits où l'énergie de rétention est élevée.

Sur le terrain, la proportion relative de chacune des classes de pores est déterminée par les propriétés physiques de la couche envisagée (texture et structure) ; Rappelons à cet effet l'importance dans le profil étudié de la couche argileuse caractérisée par sa faible porosité totale et la prédominance de pores capillaires (Annexe III).

.../...

3/ Influence de l'état hydrique initial

L'état hydrique initial conditionne la concentration du traceur dans l'eau du sol ainsi que le volume de pores disponible pour une entrée et une accumulation éventuelle de l'eau d'apport. Ainsi dans le cas d'un sol initialement sec, l'eau du sol, fortement concentrée en traceur est essentiellement localisée dans les pores les plus fins ; on pourrait prévoir un faible déplacement du traceur du fait de la localisation difficilement accessible à une circulation d'eau pure apportée, cette solution de sol est déplacée de façon plus massive et plus proche du front de pénétration (déplacement par effet piston) qu'en sol humide. Cette caractéristique de la migration est liée à l'énergie de rétention des pores fins initialement secs. Cette énergie se manifeste par une succion importante, qui entraîne un déplacement marqué de l'eau d'apport des pores les plus gros vers les plus petits. Du fait de cette circulation "capillaire", le traceur est déplacé massivement, d'autre part, le front de réhumectation pénètre très lentement dans le sol en relation avec la forte quantité d'eau introduite retenue dans le profil.

Si les apports d'eau se prolongent, la dispersion hydrodynamique devient beaucoup plus importante et l'on se rapproche, dans la partie du profil déjà réhumecté, d'une circulation existant en sol humide.

Dans ce cas, l'eau initiale occupe un volume de pores important et l'eau d'apport pénètre en priorité dans les pores les plus gros. De ce fait, la circulation dans le sol est intense et la pénétration en profondeur rapide. En outre, comme la succion latérale diminue, le déplacement de l'eau marquée par l'eau d'apport ne se fait que dans le sens des petits pores vers les gros pores et l'eau marquée migre en profondeur mais en faible quantité (dispersion hydrodynamique intense).

4/ La hauteur des précipitations

Cette dernière, qui n'est responsable d'aucune action directe particulière conditionne uniquement le développement complet des mécanismes précédemment étudiés.

A la suite de cette étude analytique des différents facteurs, il serait intéressant d'approfondir l'influence relative de chacun d'eux ; c'est-à-dire l'interaction entre la nature du sol, le taux d'humidité initiale et finalement le débit d'arrosage sur l'allure des phénomènes de transfert. Le rôle de la diffusion gagnerait également en intérêt et en précision à être étudié grâce à un traceur radioactif.

Bibliographie

- Bibliographie -

BALLIF J. L. et coll.

- 1966 - Sur les modalités de la circulation en phase liquide de l'eau non saturante dans le cas de dessèchement d'un sol.
C.R. Acad. Sc. 262, I866-I868.

BATES T. E. et TISDALE S. L.

- 1957 - The movement of nitrate nitrogen through columns of coarse-textured soil materials.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. (21) 525-528.

BATISSE E. M.

- 1951 - 18 années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie
Ann. Agro. p. 727-781.

BIGGAR J. W. and NIELSEN D. R.

- 1960 - Diffusion effects in miscible displacement occurring in saturated and insaturated porous materials.
Journal of geophysical Research - Vol. 65(9) p.2887-2895.
- 1960 - Miscible displacement in saturated and unsaturated soil.
7th congress of soil science, Madison Wisc., U.S.A.
- 1961 - Miscible displacement in soil :
1) Experimental information
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25 (1) 1-25.
- 1962 - Miscible displacement in soil :
2) Behavior in tracer
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26, 125-128.
3) Theoretical considerations
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26, 216-221.
- 1963 - Miscible displacement :
4) Mixing in glass beads
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27 (1) 10-13.
- 1964 - Chloride 36 diffusion during stable and unstable flow through glass beads.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28, 591-595.

BLOOMFIELD

- 1952 - Translocation of ion in podzol formation.
Nature Land 170.

BONNEAU M.

- 1961 - Evaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture.
Bull. A.F.E.S. n° 8, p. 16-24.

BRESLER E.

- 1967 - A model for tracing salt distribution in the soil profile and estimating the efficient combination of water quality and quantity under varying field conditions.
Soil Sci. Vol. 104 (4) p. 227.

.../...

- CHRETIEN J.
1969 - Communication interne à l'I.N.R.A.
- COLLIER D. et ROBELIN M.
1959 - Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des solutions chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne - Résultats de 4 années d'observations lysimétriques -
Ann. Agro. (4) p. 415-453.
- COMBEAU A. et QUANTIN P.
1963 - Observation sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. Rapprochement avec les courbes pF/humidité. Sciences du sol n° 1, p. 5-13.
- COREY J. C., NIELSEN D.R. et KIRKHAM D.
1967 - Miscible displacement of nitrate through soil column. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 31 (4) 497-501.
- COREY J. C., NIELSEN D. R. et BIGGAR J. W.
1963 - Miscible displacement in saturated and unsaturated sandstone. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21 (3) 258-262.
- COURAU M.
1966 - Modalité de l'infiltration de l'eau dans les milieux de granulométrie variée et de porosité constante. C. R. Acad. Sci. 265, Série D, 641-644.
1967 - Modalité de l'infiltration de l'eau dans un milieu poreux : effet de la force de succion. C.R. Acad. Sci. 265, Série D, 862-865.
1969 - Etude expérimentale de la circulation de l'eau saturante dans les milieux poreux artificiels. Ann. Agro. 20 (1) 5-14.
- DAY P. R. et FORSYTHE W. M.
1957 - Hydrodynamic dispersion of solutes in the soil moisture stream. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21 (5) 477-480.
- DAVIDSON J. M., RIECK C. E. et SANTELMANN D. W.
1968 - Influence of water flux and porous material on the movement of selected herbicides. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 29, p. 629.
- DEMOLON A. et BATISSE E. M.
1940 - Observations lysimétriques sur l'évolution d'un sol de limon Ann. Agro. P. 215-230.
- DUCHAUFOR Ph.
1965 - Précis de pédologie Masson et cie.
- ELRICK
1969 - La diffusion et la dispersion en régime non saturé . Communication au Congrès de la Commission "Eau", Orléans.

.../...

- FEODOROFF A. et RAFI M.
1962 - Evaporation de l'eau à partir d'un sol nu - Les trois stades de l'évaporation.
C. R. Acad. Sci. 255, 5468-5470.
- FEODOROFF A. et RAFI M.
1963 - Evaporation de l'eau à partir d'un sol nu.
Ann. Agro. 14 (4) 601-613.
- FEODOROFF 1964 - Remarques sur le mécanisme de l'infiltration de l'eau non saturante dans un sol initialement sec.
C.R. Acad. Sci. 259, 4320-4322.
- 1965 - Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau dans le sol.
Thèse Paris P. 127-175.
- 1969 - Communication orale.
- FEODOROFF A. et YORON
1967 - Expériences sur l'infiltration de l'eau non saturante dans un sol préalablement humide.
Ann. Agro. p. 4.
- FRIED J. J.
1968 - Les phénomènes de dispersion dans les milieux poreux - Application pratique des formules de dispersion - Bureau d'études permanent - Action concertée "Eau".
- GARTNER W. H.
1965 - In soil nitrogen - chp 15 - p. 550-564
Published by the American Society of Agronomy.
- GUICHERD J. et JANNIN G.
1926 - L'Agriculture de la Côte d'Or - Office régional agricole de l'est central et Office départemental agricole de la Côte d'Or, p. 42-48.
- GRAS R.
1962 - Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône entre Vienne et Valence -
Ann. Agro. 13 (2) 141-174.
- HALLAIRE
1953 - Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur -
Thèse Paris.
- HANDY L. L.
1959 - An evaluation of diffusion effects in miscible displacement -
Petro. Eng. Tech. Note 2030.
- HENIN S. et AUBERT G.
1945 - Relations entre le drainage, la température et l'évolution des sols.
C. R. Acad. Sci. 220, p. 330.

.../...

- KRANTZ B. A. and al.
1944 - Movement of nitrogen in soil.
Soil Sc. Soc. Amer. Proc. (8) 189-195.
- LIBOIS A.
1968 - Dynamique de l'azote minéral en sol nu -
Ann. Agro. (19), 2, 103-128.
- LINNIK Y.
1963 - Méthode des moindres carrés.
- MARSHALL T.J. and STIRK G. B.
1949 - Pressure potentiel of water moving downward in soil -
Soil Sci. 68, p. 359-370.
- MARSHALL T.J. and GURR C. G.
1954 - Movement of water and chlorides in relatively dry soil.
Soil Sci. 77, 147-152.
- MOOERS C. A. and al.
1927 - The recovery of soil nitrogen under various conditions as
measured by lysimeters of different depths -
Tennessee Agr. Exp. Sta. Bul. 138.
- PFANNKUCK H.
1963 - Contribution à l'étude des déplacements de glucides
miscibles dans un milieu poreux, Thèse Paris -
Revue I. F. P. (17), 2.
- RODE A. A.
1956 - Catégories et formes de l'eau du sol et les propriétés
hydrologiques des sols -
VIe Congrès intern. Sc. du Sol, Paris, I, 20, vol. B,
135-147.
- ROUSELLE V.
1913 - Le mouvement des nitrates dans le sol et les conséquences
relatives à l'emploi du nitrate de soude -
Ann. Agro. (1), 97-113.
- ROUX
1911 - Climat de Dijon et de la Côte d'Or - Dijon et la Côte d'Or.
- SCHEIDDEGER A. E.
1954 - Statistical hydrodynamics in porous media
J. Appl. Phys. (25), 997-1001.
- SLICHTER C. S.
1904 - The rate of movement of underground waters - Water supply
and irrigation -
Raper no. 140, séries O, USDI, U.S. Géol. Survey,
Washington D. C.

.../...

SOERIRO F.

- 1964 - Contribution à l'étude du mouvement de l'humidité dans les milieux poreux isothermes - Cahiers de la Recherche théorique et expérimentale sur les matériaux et les structures.

TSCHAPEK M.

- 1961 - "El desalojo del agua en el suelo" de "révista de investigaciones agrícolas" - T. (15), 3. Buenos Aires (Argentine).

THOMAS G. W. and BERG W. A.

- 1959 - Anion elution patterns from soils and soil clays - Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23, 348-350.

TURC L.

- 1955 - Bilan d'eau des sols - Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement - Ann. Agro. 5-131.
1969 - Communication orale.

VAN DER MOLEN V. H.

- 1956 - Desalinization of saline soil as a column process. Soil Sci., n° 81, p. 19.

WETSELAAR R.

- 1961 - Nitrate distribution in tropical soils - II extent of capillary accumulation of nitrate during a long dry period. Plant and Soil 15, 121-133.
1962 - Nitrate distribution in tropical soils - III Downward movement and accumulation of nitrate in the subsoil. Plant and Soil 16, 19-31.

YARON B., BRESLER E. et SHALHEVET J.

- 1966 - A method for uniform packing of soil columns. Soil Sci. 101, 3, 205-209.