

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE MONTPELLIER II
--- SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC ---

THESE

présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT
Spécialité : Physiologie Biologie des Organismes et Populations
Science du Sol

INFLUENCE DE LA VARIABILITE SPATIALE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS SUR LE BILAN HYDROLOGIQUE

**L'exemple d'un système de sols sur barre pré littorale
(Guyane française)**

par

Patrick ANDRIEUX

Soutenue le 11 juillet 1990 devant le jury composé de :

MM.	E. SERVAT	ENSAM	Président
	C. BOCQUILLON	USTL	Rapporteur
	R. GUENNELON	INRA	Rapporteur
	Y.M. CABIDOCHÉ	INRA	
	A. DURBEC	CEMAGREF	
	G. GIRARD	ORSTOM	
	M. VOLTZ	INRA	

Institut National de la Recherche Agronomique
Laboratoire de Science du Sol
Montpellier

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE - CADRE REGIONAL ET VARIABILITE SPATIALE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SITE EXPERIMENTAL

CHAPITRE 1 - La plaine côtière ancienne : données bibliographiques

Introduction

1. Climatologie
2. Géomorphologie et géologie
3. Hydrologie
4. Pédologie
5. Conclusion

CHAPITRE 2 - Le site expérimental : choix du site et représentativité

Introduction

1. Choix du site et représentativité
2. Le relief
3. Les matériaux en place
4. La différenciation pédologique
5. Conclusion

CHAPITRE 3 - Caractérisation hydrologique et hydrique

Introduction

1. Méthodes expérimentales et dispositif de mesure
2. Résultats
3. Conclusion

DEUXIEME PARTIE - MISE EN EVIDENCE DES RELATIONS SOL-PAYSAGE-DYNAMIQUE HYDRIQUE : IDENTIFICATION NUMERIQUE DES ALIMENTATIONS DE LA NAPPE

CHAPITRE 4 - Principes du modèle utilisé et acquisition des paramètres

Introduction

1. Présentation du modèle de transferts hydriques utilisé
2. Mise en oeuvre du modèle : acquisition des paramètres

CHAPITRE 5 - Résultats de la modélisation

1. Principes de l'identification
2. Estimation des flux en régime permanent
3. Estimation des flux en régime transitoire

CHAPITRE 6 - Synthèse et discussion

1. Considérations méthodologiques
2. Considérations sur les résultats
3. Estimation du ruissellement

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

Table des matières

Liste des tableaux et figures

Annexes

REMERCIEMENTS

Avant d'exposer les résultats et les conclusions de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué par leurs conseils ou leur collaboration à la réalisation de cette thèse.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur le Professeur Emmanuel SERVAT, du Laboratoire de Science du Sol de l'ENSA de Montpellier, qui a assuré ma formation pédologique et a suivi mon travail tout au long de ma thèse. Il m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury et je lui en suis très reconnaissant.

Monsieur le Professeur Claude BOCQUILLON, directeur du Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'USTL de Montpellier, a accepté d'être l'un des rapporteurs de ce travail et je l'en remercie vivement.

Je suis extrêmement reconnaissant à Monsieur Roger GUENNELON, directeur de recherche à l'INRA, pour ses remarques et critiques constructives tout au long de ce travail, et plus particulièrement lors de la rédaction de ce mémoire. Qu'il soit également remercié pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse.

Monsieur Georges GIRARD, directeur de recherche à l'ORSTOM, a accepté de faire partie des personnalités qui ont jugé ce travail. Je l'en remercie. Je suis particulièrement sensible à l'accueil qu'il a toujours su me réserver, alors même qu'il devait surmonter une altération passagère de sa santé. Les conseils et remarques dont il m'a fait profiter, m'ont permis d'améliorer ce mémoire.

Yves Marie CABIDOCHÉ, chargé de recherche à l'INRA en Guadeloupe, mérite une attention toute particulière. Mon activité scientifique a été soumise à son appréciation durant les sept années que j'ai passé à l'INRA en Guyane. Il m'a constamment encouragé et soutenu dans mon travail, et m'a, d'autre part, fait largement bénéficier de ses connaissances et de son approche du terrain. Je souhaite donc lui manifester ici toute mon amitié et mes remerciements.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à André DURBEC, ingénieur des travaux ruraux à la division Hydrologie-Hydraulique du CEMAGREF de Lyon, qui a su mettre à mon service toute ses connaissances et sa pédagogie dans le domaine de l'hydrologie et de la modélisation, en m'initiant notamment à l'emploi de WATASI. Il a largement contribué à ce travail, pourtant éloigné de ses centres d'intérêts naturels, en y consacrant une bonne partie de son temps, par ailleurs bien chargé. A travers lui, je tiens à remercier toute l'équipe de cette division du CEMAGREF, et en particulier Bernard CHASTAN et Christian LEDUC.

Parmi toutes les personnes qui doivent trouver ici l'expression de ma gratitude, il en est une qui mérite plus que de simples remerciements, il s'agit de Marc VOLTZ, chargé de recherche à l'INRA de Montpellier, qui, grâce à ses compétences m'a aidé à préciser et à définir le sujet de cette thèse. J'ai grandement bénéficié de sa rigueur et de sa disponibilité, dont j'ai parfois abusé. Qu'il trouve ici l'expression de toute mon amitié.

Après avoir remercié les membres du jury, je tiens à manifester toute ma gratitude et ma sympathie à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Jean-Claude FAVROT, directeur du Laboratoire de Science du Sol INRA de Montpellier, en m'accueillant dans son équipe et en m'accordant toute sa confiance m'a permis de rédiger cette thèse dans les meilleures conditions possibles. Ses nombreuses remarques et conseils ont été particulièrement constructifs. Il a d'autre part grandement facilité ce travail en proposant, et en participant, à l'étude du Secteur de Référence de la plaine côtière ancienne de Guyane française. Ce travail m'a permis d'avoir une approche globale de l'organisation des sols et de leur fonctionnement à l'échelle régionale.

Je tiens, à cette occasion, à remercier également l'ensemble de l'équipe des "draineurs", sans laquelle mon travail n'aurait probablement pas vu le jour; je veux parler de Robert BOUZIGUES et de Philippe LAGACHERIE qui m'ont continuellement conseillé et encouragé, et qui ont bien souvent subi l'étalage de tous mes états d'âme,...n'est-ce pas Philippe !

Je n'oublie pas non plus Bernard VINCENT et l'équipe Drainage-Assainissement du CEMAGREF Antony, pour leur aide précieuse et efficace.

L'équipe de Pédologie de l'ORSTOM de Cayenne mérite également toute ma reconnaissance et toute mon amitié. En particulier, René BOULET qui m'a initié à l'analyse structurale et m'a fait partager sa connaissance du milieu pédologique guyanais; Michel GRIMALDI qui a consacré une part non négligeable de son temps à m'aider et me conseiller, et Bernard BARTHES pour son aide sur le terrain.

Comment pourrais-je oublier mes amis guyanais et mes collègues de l'INRA en Guyane, notamment tous les membres de l'équipe SAD, qui m'ont supporté, encouragé, conseillé et aidé: Renée et Yann, Dany, Pierre et Agnès, Claude et Marie-Françoise, Jean-Paul et Jacqueline, Moïse, Alice, Paul, Patricia, Stéphane, Armand, Bernard, Dumaine, et les nombreux VAT...

Merci aussi à Michèle et Philippe qui m'ont toujours exprimé leur profonde amitié, en particulier à un moment où je ne tenais plus que sur une seule rotule !

J'exprime enfin toute ma gratitude à l'ensemble de l'équipe du Laboratoire de Science du Sol de Montpellier pour son aide et son amitié.

Je tiens à remercier en particulier toutes les personnes qui ont mis en forme ce mémoire avec tant de soin et d'enthousiasme : Annie JOURDAN pour le traitement de texte et la sympathique et efficace équipe formée par Jean CORNET, pour la mise en page et les dessins, et François MAZZELLA pour les dessins et les reproductions photographiques.

A vous tous je dédie tout ce qu'il y a de meilleur dans ce mémoire, quant à ce qui est moins bon, j'en assume seul la responsabilité.

INTRODUCTION GENERALE

L'étude du fonctionnement hydrique des sols à l'échelle d'un bassin versant ou d'une parcelle constitue depuis plusieurs années un domaine essentiel de la science du sol. Deux voies d'étude ont été privilégiées à ce jour :

- **Papproche des naturalistes** (S.E.S., 1972; KILIAN, 1974; HUMBEL, 1978; TRICART et KILIAN, 1979; BOULET et al, 1982a; 1982b). Il s'agit d'une *approche indirecte* : l'analyse de la couverture pédologique et de sa représentation spatiale, qui peut être conduite à différentes échelles, a pour but, entre autres, de mettre en évidence le fonctionnement des sols et en particulier le fonctionnement hydrique. Ce dernier est mis en évidence de manière qualitative, après avoir identifié des critères morphologiques révélateurs de ce fonctionnement.

Cette approche repose sur un présupposé de base, à savoir que la délimitation des unités cartographiques conduit à admettre que chacune d'entre elles possède un fonctionnement hydrique différent. Ce présupposé est cependant rarement validé. Elle peut fournir, en revanche, des critères d'extrapolation d'accès relativement aisé.

- **Papproche des physiciens du sol** (NIELSEN et al, 1973; VACHAUD, 1982; VACHAUD et al, 1982; VAUCLIN et al, 1983). Il s'agit d'une *approche directe* : sa spécificité majeure est de faire abstraction de toute caractérisation morphologique. L'identification du fonctionnement hydrique repose sur des mesures locales réparties sur toute l'aire d'étude.

Elle repose sur l'utilisation de critères d'interpolation de paramètres, permettant d'apprécier la variabilité spatiale, à l'intérieur de la parcelle, des propriétés hydriques des matériaux étudiés. L'extrapolation de ces propriétés à d'autres sites est, en revanche, impossible.

Depuis quelques années, une troisième approche intermédiaire est développée (BOUMA, 1983; 1986; HALL, 1983; WILDING et DREES, 1983; GASCUEL-ODOUX, 1984; VOLTZ et al, 1989). C'est dans cet esprit que nous avons souhaité développer notre travail. L'intérêt du couplage entre les deux approches présentées ci-dessus, apparaît clairement dès lors que l'on cherche à quantifier les propriétés hydriques sur un site d'une part et à les extrapoler sur des sites voisins d'autre part.

L'intérêt d'appliquer cette démarche sur une unité de modelé élémentaire de Guyane française repose sur deux points essentiels :

- **une motivation d'ordre agronomique**. La mise en place du plan de développement de l'agriculture guyanaise (1977) dans un milieu complexe et fragile, en l'absence de références régionales, a nécessité la mise en place d'un dispositif de recherche prenant en compte la variabilité des milieux et les observations in situ. Une première phase cartographique de caractérisation des sols a permis de mettre en évidence une série de contraintes pédologiques. Parmi celles-ci, la contrainte excès d'eau apparaît essentielle (CABIDOUCHE, 1985). Une seconde phase portant sur la méthodologie d'étude et l'identification des fonctionnements des

sols a été initiée sur quelques sites représentatifs (ANDRIEUX et CABIDOUCHE, 1987), parmi lesquels se trouve notre site d'étude.

- **une motivation d'ordre pédologique.** La conjugaison de facteurs hydro-climatiques d'une part: présence d'une nappe à fluctuations rapides affleurante durant toute la saison des pluies, et géomorphologiques et pédologiques d'autre part: unités de modelé supportant des systèmes de sols marqués par une forte variabilité latérale, permet de supposer l'existence de régimes hydriques très différenciés. Les flux superficiels et souterrains sont probablement très importants. La réalisation de plans et de cartes d'aménagement nécessite de prendre en compte les différences de fonctionnement. Dans cette perspective, il est intéressant de chercher à relier les caractères géomorphologiques ou pédologiques à des fonctionnements hydriques spécifiques.

Aussi l'objectif principal de ce travail est de mettre en évidence et d'analyser les relations éventuelles existant entre les sols, la géomorphologie et la dynamique hydrique de la zone saturée d'une unité de modelé élémentaire (un interfluve) de la plaine côtière de Guyane française. Trois étapes essentielles peuvent être distinguées :

- mise en évidence de la variabilité spatiale physique (topographie, sols, hydrologie) du système étudié;
- estimation des flux d'infiltration assurant la recharge de la nappe;
- analyse des relations existant entre la variabilité des transferts hydriques et la variabilité des organisations de la couverture pédologique et des caractéristiques géomorphologiques du site.

Dans la première partie du mémoire: nous présentons une synthèse bibliographique des principales connaissances sur la plaine côtière ancienne guyanaise (Chapitre 1); nous décrivons le site expérimental choisi en abordant dans un premier temps les caractéristiques topographiques et pédologiques (Chapitre 2), puis dans un second temps la caractérisation hydrologique et hydrique (Chapitre 3). A la fin de ce dernier chapitre, un certain nombre d'hypothèses de fonctionnement sont présentées; elles sont testées et discutées par la suite.

La deuxième partie est consacrée à l'identification des alimentations de la nappe. Elle est effectuée à l'aide d'un modèle numérique de simulation des flux en milieu saturé, et nous permet de mettre en évidence les principaux déterminants de la forme et la dynamique de la nappe. Les principes du modèle utilisé (modèle développé par le CEMAGREF) et l'acquisition des paramètres du modèle sont présentés en premier lieu (Chapitre 4). Puis les résultats des différentes simulations, effectuées en régime permanent et en régime transitoire, sont décrits et analysés. Une analyse de sensibilité du modèle aux principaux paramètres est réalisée afin de tester le poids des différents déterminants identifiés (Chapitre 5).

Une discussion générale aborde de façon critique les aspects méthodologiques et les principaux résultats de ce travail (Chapitre 6). Une analyse portant sur l'incertitude des différents termes de l'équation du bilan hydrique, nous permet d'apprécier la cohérence des valeurs de recharge identifiées d'une part, et d'estimer de façon approchée les flux superficiels. Une analyse globale et spatiale de la relation existant entre la pluviométrie et le ruissellement est présentée à cette occasion.

Première partie

Cadre régional et variabilité spatiale des caractéristiques physiques du site expérimental

Chapitre 1

La plaine côtière ancienne : données bibliographiques

Figure 1-1 - La Guyane française.

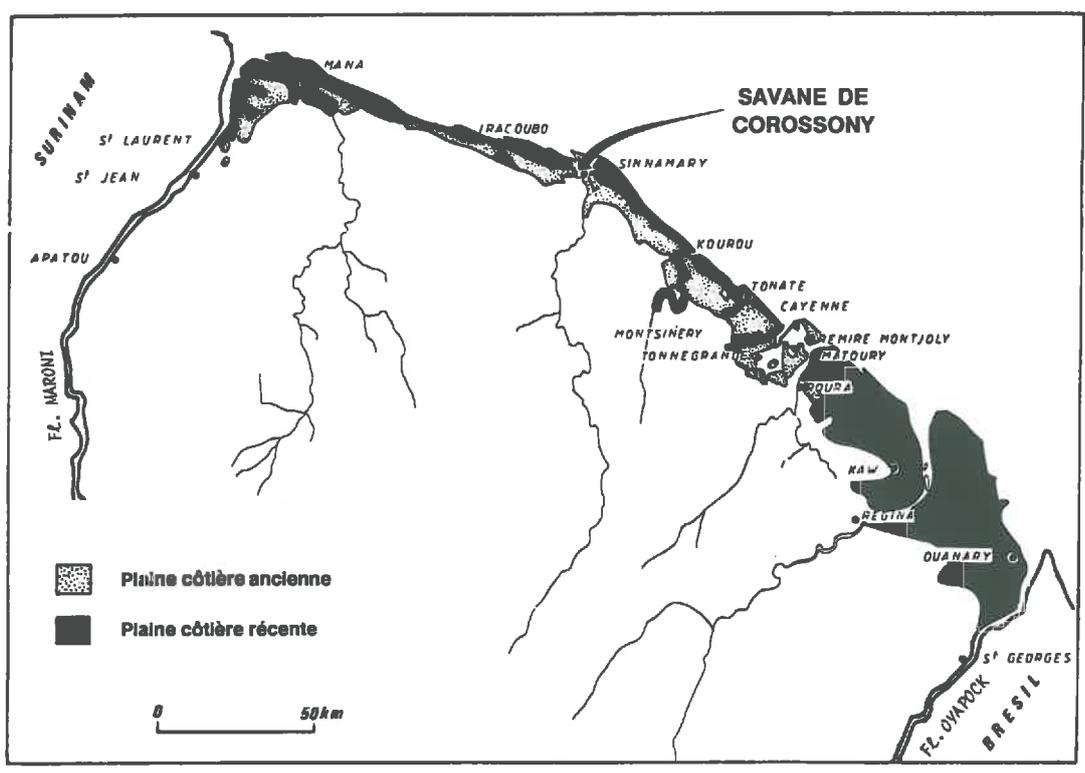
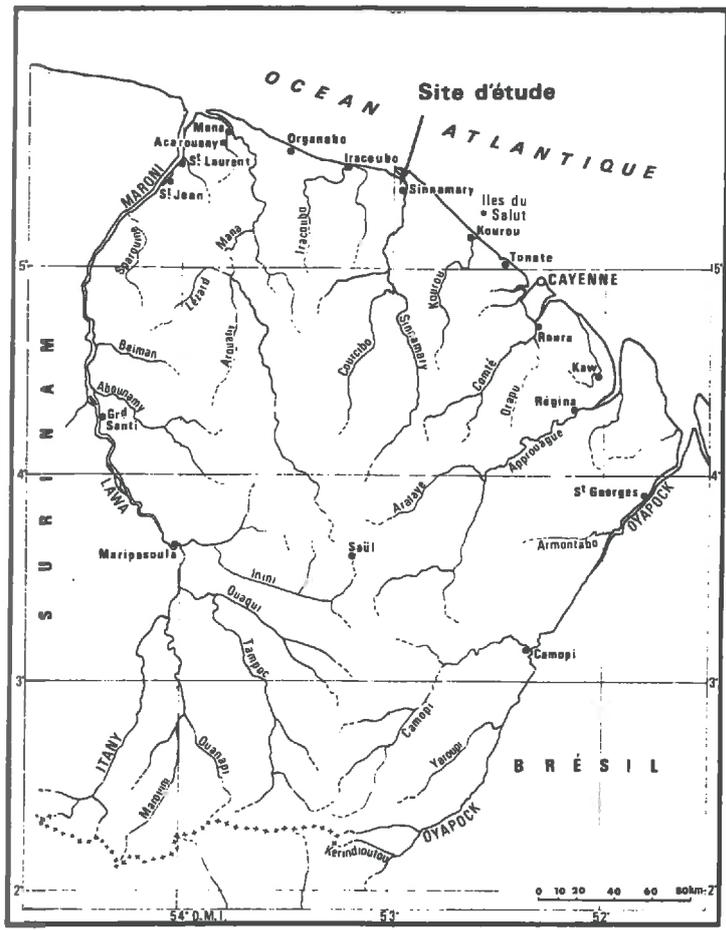


Figure 1-2 - Cadre géomorphologique et localisation du site d'étude (d'après l'esquisse physiographique au 1/500.000 de GUILLOBEZ, 1979).

LA PLAINE COTIERE ANCIENNE : DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

INTRODUCTION

On distingue en Guyane française (Fig. 1-1), du nord au sud, deux ensembles géomorphologiques très contrastés: la plaine côtière subdivisée en **plaine côtière récente** (environ 370.000 ha) et **plaine côtière ancienne** (environ 50.000 ha) (Fig. 1-2), et le socle précambrien, qui occupe 95 % du territoire. La plaine côtière ancienne est encadrée au sud par le socle, recouvert de forêt, et au nord par la plaine côtière récente dont le paysage végétal est caractérisé par des marécages côtiers et de la mangrove. Son altitude est comprise entre 2 m et 15 m. C'est le domaine des marécages subcôtiers et essentiellement des savanes séparées et parsemées d'îlots forestiers.

L'objectif essentiel de ce premier chapitre est de **préciser le contexte pédo-climatique** de la plaine côtière ancienne au sein de laquelle est localisé notre site d'étude. Celui-ci se trouve sur une barre pré littorale de la savane de Corossony (commune de Sinnamary). Le choix de ce site est justifié dans le chapitre suivant.

Afin d'établir le cadre de ce travail, il nous semble important de rassembler les principales connaissances concernant l'environnement climatique et physique de la plaine côtière ancienne, sur lesquelles repose notre étude. Nous précisons à cette occasion les données que nous pouvons considérer comme acquises et celles qui restent inconnues ou demandent à être démontrées. Les synthèses spécifiques du milieu naturel sont peu nombreuses. Deux ouvrages ont retenu notre attention : l'Atlas de la Guyane (1979) et une étude récente conduite sur la savane de Corossony dans le cadre du Secteur de Référence de la savane guyanaise (FAVROT et al., 1987). Mais malgré de nombreux travaux plus ponctuels, conduits entre autres dans les domaines de la climatologie et de la pédologie, le milieu reste encore dans son ensemble mal connu. Il nous a été ainsi très difficile d'obtenir des valeurs d'ETP représentatives de notre site; de plus, dans le domaine de l'hydrologie des eaux souterraines les travaux sont pratiquement inexistantes.

1. CLIMATOLOGIE

Le climat de la Guyane est de type équatorial humide. Elle subit alternativement l'influence des alizés du nord-est (anticyclone des Açores) de décembre à juillet, et les alizés du sud-est (anticyclone de Ste Hélène), qui surviennent entre août et novembre, après avoir traversé le nord du Brésil. Aussi distingue-t-on deux saisons climatiques principales suivant la localisation de la zone de contact (Zone Intertropicale de Convergence) des deux alizés: la **saison des pluies**, de décembre à juillet, et la **saison sèche**, d'août à novembre.

1.1. Pluviosité

La pluviosité de la plaine côtière ancienne est forte et marquée par une **variabilité inter et intra-annuelle importante** (Tab. 1-1).

Période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
moyenne 1956-1985	291	222	251	342	487	377	193	76	42	63	111	275	2730 mm
1984	531	31	323	244	1066	356	208	76	132	110	271	339	3687 mm
1985	84	68	141	131	342	474	95	103	18	110	78	348	1992 mm
1986	279	191	129	51	360	264	186	127	20	105	147	348	2207 mm
	saison des pluies					saison sèche				s.p.			

Tableau 1-1 : Pluviométrie (mm) de la plaine côtière ancienne. Station de Sinnamary (moyenne 1956-1985 et années 1984 à 1986).

La pluviosité moyenne annuelle (moyenne sur 29 années) enregistrée à Sinnamary, localité située à 5 km de notre site, est d'environ 2700 mm (Tab. 1-1). Les pluies viennent de la mer et sont souvent violentes et irrégulières dans leur répartition journalière. Le relief, notamment les premières collines du socle, suffit à provoquer des précipitations à partir de masses d'air instables (TURENNE, 1977). Ceci explique les différences, de l'ordre de 1000 mm en 1985 et 1986, observées entre la pluviométrie de Sinnamary et celle de notre site, implanté à 500 m des premières collines du socle.

La pluviosité peut varier dans de grandes proportions pour un lieu donné, d'une année ou d'un mois à l'autre. A Cayenne entre 1956 et 1985, le total annuel recueilli a varié de 1500 à 4200 mm. Pour un même mois, les variations sont encore plus considérables: par exemple, tou-jours à Cayenne, les valeurs extrêmes sont de 60 et 1385 mm pour le mois de mars, de 2 et 300 mm en octobre.

Stations de la plaine côtière	> 100 mm	30 à 100 mm	< 30 mm
Sinnamary	4 à 9	1 à 4	0 à 5
Iracoubo	4 à 10	0 à 7	0 à 3
Saut-Sabbat	6 à 11	1 à 5	0 à 2
Saint-Laurent	7 à 11	1 à 4	0 à 3

Tableau 1-2 : Nombre de mois aux seuils de 100 et 30 mm de pluies mensuelles. (période de 12 ans) - d'après TURENNE, 1977.

La répartition des pluies au cours de l'année révèle l'existence d'une saison écologiquement sèche, à déficit hydrique marqué et de durée variable. Elle serait de deux mois en

moyenne chaque année (HOOCK, 1971), mais peut-être plus longue ou plus courte selon le critère retenu pour définir un mois écologiquement sec (Tab. 1-2). Le nombre moyen de jours de pluie mensuel enregistré à Sinnamary (période 1956-1984) est de 20 jours, en excluant la saison sèche (Tab. 1-3). Sur cette même station on enregistre en moyenne par année 30 % de jours pluvieux ($P > 5 \text{ mm/j}$), 22 % de jours peu pluvieux ($P > 5 \text{ mm/j}$) et 48 % de jours non pluvieux (FAVROT et al., 1987).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
> 0 mm/j	21,1	17,3	16,6	19,4	24,3	23,3	17,1	9,9	6,2	7,3	13,1	20,2	196,1
Ecart-type	5,1	4,4	3,7	5,7	3,8	3,2	4,4	4,2	5,4	4,1	5,1	4,2	53,3
> 5 mm/j	12,3	8,4	8,9	11,6	17,9	15,7	9,6	4,3	2,5	3,2	6,1	11,5	111,4
Ecart-type	4,2	5,1	3,8	5,2	4,9	4,0	3,3	2,7	2,8	2,3	3,4	3,5	45,2
saison des pluies						saison sèche							

Tableau 1-3 : Nombre moyen de jours de pluie > 0 mm/j et > 5 mm/j. Station de Sinnamary (période 1956-1984) - d'après FAVROT et al., 1987.

Les précipitations mensuelles moyennes excèdent 300 mm pendant les mois les plus arrosés (avril, mai et juin); elles dépassent même 400 mm entre Kourou et St Georges. Pendant la saison sèche, on enregistre en moyenne à Sinnamary en septembre et octobre (Tab. 1-1), les mois les moins arrosés, respectivement 42 mm et 63 mm de pluie (moyenne 1956-1985).

On peut observer entre janvier et avril, un ralentissement, voire un arrêt des précipitations, pendant une durée qui peut être très variable: c'est le "petit été de mars". Ainsi à Sinnamary on a enregistré 31 mm en février 1984 (16 jours de pluie), 68 mm en février 1985 (18 jours de pluie) et 51 mm en avril 1986 (24 jours de pluie).

Le passage de la saison sèche à la saison des pluies peut être extrêmement brutal comme en 1982 ou 1983 ou très progressif comme en 1984.

1.2. Evapotranspiration

Les données sur ce paramètre sont peu nombreuses. A partir des données dont nous disposons (Tab. 1-4) nous pouvons toutefois, en utilisant les résultats fournis par la formule de Penman qui semble la plus adaptée aux conditions guyanaises (ROCHE, 1982), estimer l'ETP journalière moyenne mensuelle: 3 à 4,5 mm en saison des pluies et 3,5 à 5,5 mm en saison sèche.

Certaines années, la saison des pluies présente des périodes marquées par un déficit en eau pouvant perturber gravement les cycles culturaux. En saison sèche le déficit est assez systématique. FOUGEROUZE (1966) estime qu'en fin de saison sèche, les déficits en eau sont comblés en deux ou trois semaines, car les premières pluies sont souvent très importantes.

Tableau 1-4 : Evapotranspiration mensuelle (mm) à Kourou et Sinnamary - [valeurs arrondies]**a) Sinnamary (1955-1976) : 4 méthodes de calcul (d'après SOGREA, 1979)**

Méthodes	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Evaporomètre Piche (*)	58	64	77	63	50	40	50	62	75	78	61	52	730
Thorntwaite (*)	123	112	128	129	137	133	138	150	152	156	140	131	1629
Turc (**)	103	114	127	130	116	110	131	143	144	147	126	112	1503
Penmann (**)	122	132	154	148	126	116	141	156	168	172	145	127	1707

(*) Données fournies par la Météorologie Nationale.

(**) Calculs SOGREA.

b) Kourou (1965, 1970-1972) : ETP Penmann (d'après TURENNE, 1977).

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
1965	95	119	128	104	97	110	191	142	144	154	135	137	1556
1970	99	104	107	106	102	102	109	126	145	139	118	100	1357
1971	77	88	85	93	83	82	115	140	140	124	113	98	1238
1972	90	103	107	102	95	108	117	125	103	131	104	88	1273

c) Kourou (1956-1975) : P et ETP Penmann (GODON, 1981)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
P (mm)	299	231	186	321	423	315	172	42	19	28	114	257	2407
ETP (mm)	90	103	106	101	94	100	133	133	134	137	117	103	1351

1.3. Conclusion

Au-delà de l'existence, classiquement admise, de quatre saisons: petite saison des pluies (décembre à février), petite saison sèche (mars), grande saison des pluies (avril à juillet) et grande saison sèche (septembre à novembre), on peut définir en Guyane **deux périodes climatiques essentielles** : la saison sèche et la saison des pluies. Elles expriment très bien la présence ou l'absence d'eau disponible pour les plantes et nous verrons par la suite que cette distinction est vérifiée en termes de régime hydrique.

Les variations interannuelles tendent à exacerber les conséquences des changements saisonniers : ainsi, deux saisons sèches très marquées peuvent se succéder et entraîner un déficit prononcé du bilan hydrique (HOOCK, 1971).

2. GEOMORPHOLOGIE ET GEOLOGIE

2.1. Géomorphologie et stratigraphie.

Période géologique	Age	Surinam	Stratigraphie	Guyane française	Paysage
		-----	Formation série	-----	
Quaternaire	Holocène	Demerara	Coronie Mara	Demerara	Jeune plaine côtière Argiles marines récentes et cordons littoraux. Plaine côtière ancienne
	Pleistocène	Coropina	Coropina supérieur Coropina inférieur	Coswine sables fins fins triés argileux Coswine argiles bariolées (argile "Coropina")	
Tertiaire	Pliocène	Coesewijne	Coesewijne supérieur Coesewijne inférieur	Série détritique de base (SDB)	

Tableau 1-5 : Stratigraphie simplifiée de la plaine côtière (VEEN 1970, BOYE 1963, CHOUBERT 1957 - in TURENNE, 1977)

La plaine côtière ancienne se caractérise par des dépôts d'origine marine ou fluviomarine constituant la série sédimentaire transgressive "Coswine" datée du pléistocène (Tab. 1-5) (CHOUBERT, 1957). Elle est subdivisée en deux niveaux principaux:

- à la base, entre 2 et 4 m d'altitude absolue, des matériaux argileux ou argilo-sableux dénommés en Guyane "argile Coropina" et que nous appellerons **argile Coswine**, pour éviter toute confusion avec la dénomination surinamienne de cette série (Tab. 1-6);
- au sommet, entre 4 et 15 m d'altitude, des matériaux sableux et sablo-argileux: les **sa-bles Coswine**.

Dénomination		Texture	Caractères minéralogiques	
-----	-----		-----	-----
Guyane française	Surinam		Sables	Minéraux argileux
Coswine Faciès sableux	Upper Coropina Phase sableuse	Sableuse à sablo-argileuse	Quartz (80-90 μm)	Kaolinite
Coswine Faciès argileux (Argile "Coropina")	Upper Coropina Phase argileuse	Argileuse	Quartz Peu de muscovite	Kaolinite Un peu d'illite

Tableau 1-6 : Caractéristiques principales de la série Coswine (d'après LUCAS et al, 1986)

Les sables Coswine, fins et bien triés, sont disposés en un réseau de cordons parallèles à la mer présentant une morphologie de "barres pré littorales amoindries par érosion et colma-tage" (SOURDAT et DELAUNE, 1970). Les barres sont séparées par des axes d'écoulement plus ou moins marécageux, reliés à un réseau en forme de peigne, qui dans bien des cas n'est plus fonctionnel. Le colmatage des axes de drainage, par descente des éléments fins à partir du sommet et du flanc des barres, se traduit par un ralentissement puis par l'arrêt des écoulements (SOURDAT, 1965). La disparition du palmier *Mauritia flexuosa* ("palmier bâche") est la manifestation visible de cette cessation de fonctionnement (TURENNE, 1977). Signalons à cette occasion la présence d'une dizaine de palmiers bâche occupant les deux thalwegs qui ceignent la barre constituant notre site expérimental.

2.2. Sédimentologie et minéralogie

L'épaisseur de la série Coswine est comprise entre 10 et 20 m (13 m dans un sondage profond effectué par le BRGM à Sinnamary). Elle repose directement sur les matériaux d'altération du socle (Fig. 1-3), ou sur un niveau de 10 à 20 cm d'épaisseur à sables grossiers placé alors entre ces deux formations. Cette arène a été repérée dans plusieurs sondages profonds, au dessous de l'argile Coswine; d'après VEEN (1970), elle correspondrait à une phase de sédimentation fluviale.

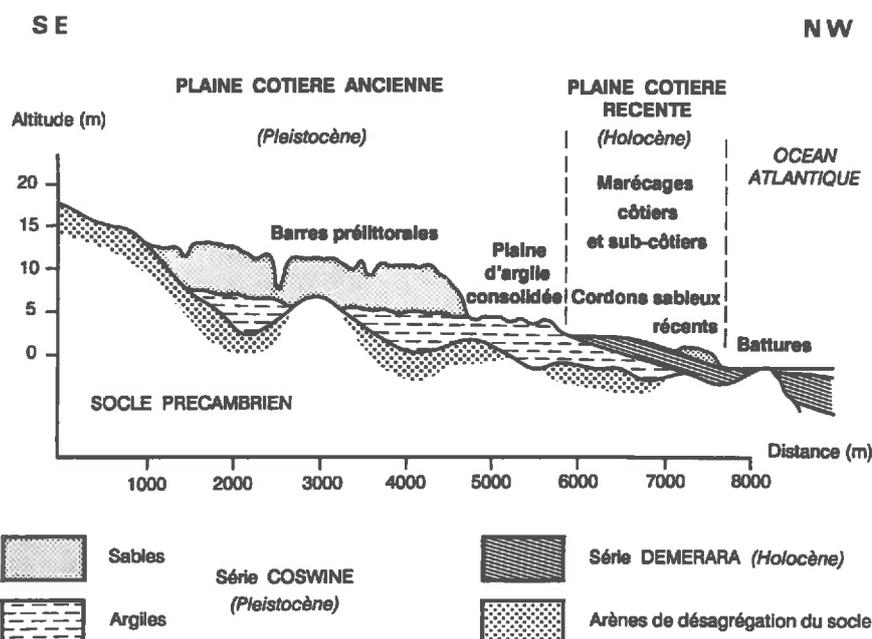


Figure 1-3 - Coupe schématique de la plaine côtière entre Kourou et Sinnamary (d'après TURENNE, 1979 b).

"La nature des matériaux de la plaine côtière, leur stratification et les formes superficielles des dépôts offrent des exemples typiques de sédimentologie littorale" (SOURDAT et DELAUNE, 1970). La superposition de sédiments mal triés sur des sédiments classés a conduit ces auteurs à envisager l'existence "d'oscillations" au sein de la transgression Coswine et de la régression qui a suivi.

2.2.1. *Les sables Coswine*

Les caractéristiques granulométriques (médianes voisines de 90 μm , hétérométrie et indice de Krumbein $Qd(\varphi)$, voisins de 0,25), et le "faciès" logarithmique (courbe granulométrique cumulative) des sables Coswine sont typiques d'une action marine et définissent un sédiment bien trié par transport et déposé en eau profonde au delà du rivage (SOURDAT et DELAUNE, 1970). Ce dépôt a pu être à l'origine constitué de fines strates d'argiles et de sables homogénéisées par les actions pédologiques et biologiques ultérieures (VEEN, 1970 in TURENNE, 1979b).

Leur morphologie, en rides parallèles suivant une direction dominante SE-NW, résulte de l'action des courants littoraux. Après la transgression Coswine, le soulèvement tectonique général de la Guyane (BOULET et al., 1979a) a provoqué l'exondation de ces sables fins marins. Pendant l'holocène, les barres pré littorales proches des cours d'eau ont été fortement disséquées, inversement, les barres les plus distantes ont été moins entaillées et les thalwegs et dépressions ont été progressivement colmatés (TURENNE, 1977).

Les données sur la minéralogie de la série Coswine sont peu nombreuses. Les sables, très pauvres en limons, sont essentiellement quartzeux. La fraction argileuse qui les accompagne ($\approx 20\%$) contient principalement de la kaolinite (Tab. 1-6). La cristallinité de la kaolinite, peu affirmée en surface, est plus nette dans les couches profondes qui sont moins affectées par les processus d'évolution. Aucun minéral gonflant n'est mis en évidence dans les sables Coswine.

2.2.2. *L'argile Coswine*

L'argile Coswine a été d'une façon générale peu étudiée, sauf lorsque le niveau supérieur sableux est absent. L'argile est alors affleurante et donne naissance aux savanes argileuses.

Ce faciès, souvent bariolé, est riche en argile ($\approx 60\%$): kaolinite et un peu d'illite, et en limons ($\approx 40\%$) (LUCAS et al., 1986). On y observe parfois des passées sableuses (quartz et un peu de muscovite) liées à des oscillations dans la transgression Coswine et/ou à l'influence fluviale. Ces argiles sont totalement dessalées, oxydées, à taches rouille et concrétions de fer (TURENNE, 1979b).

3. HYDROLOGIE

Le réseau hydrographique de la plaine côtière ancienne relève de deux ensembles principaux.

Le premier correspond aux fleuves et rivières (ou criques) à écoulement permanent et au tracé bien identifié. Le régime des fleuves est bien corrélé aux variations climatiques saisonnières; seul un léger décalage des débits dans le temps est constaté par rapport à la pluviométrie. L'hydrogramme moyen est assez simple avec de décembre à mai la montée des eaux (un palier plus ou moins marqué peut matérialiser le petit été de mars) et de juin à novembre la décrue. La période d'étiage se situe entre mi-octobre et fin décembre. Le débit

moyen du fleuve Sinnamary est d'environ $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ et celui du Maroni à 100 km de l'océan est de $2000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Le second ensemble est formé de petits cours d'eau et d'innombrables lignes d'écoulement plus ou moins permanentes, qui empruntent les gouttières et dépressions séparant les barres pré littorales. Ce réseau, dont le tracé est souvent mal connu et plus ou moins encombré de végétation et d'alluvions, débouche généralement à l'aval dans des marécages. Le parcours jusqu'à l'exutoire est très long et la pente hydraulique est faible. Cette carence des réseaux hydrographiques secondaires constitue vraisemblablement une des causes principales de l'excès d'eau constaté sur les sols de la plaine côtière.

Pour de nombreux auteurs cet excès d'eau est imputable à l'action d'une nappe reposant sur l'argile Cosvine, supposée imperméable. Mais cette interprétation a été rarement confirmée et nécessite donc des mesures complémentaires. L'étude hydrologique des eaux souterraines n'a été entreprise par le BRGM que depuis 1 an et de façon très ponctuelle. Deux études, à notre connaissance, font référence à la piézométrie sur les sols de la plaine côtière ancienne.

TURENNE (1977) tout d'abord qui, après avoir installé sur un transect de 400 m de longueur (Savane Bordelaise) quelques piézomètres et effectué des mesures de perméabilité, montre la présence d'une nappe reposant sur un niveau argileux imperméable situé à 7 m de profondeur. Il indique que "les formes successives de la nappe suggèrent que l'allure de sa surface dépend uniquement de la distance à l'axe de drainage ici matérialisé par la crique". Il montre ainsi par calcul, en appliquant une formule donnant l'écartement des drains, que "l'affleurement de la nappe au centre du cordon sableux étudié, sur podzol, est le résultat de la topographie". Puis, après avoir montré la présence de matériaux à faible perméabilité ($\approx 4 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$), situés entre 50 et 120 cm sur podzol et vers 180 cm de profondeur sur sol ferrallitique, il affirme qu'en début de saison des pluies "la nappe profonde alimentée par une percolation rapide à travers les horizons argiliques ou l'aliôs, par les macropores, butte en s'élevant sous le plancher de l'horizon d'accumulation". Ce qui entraîne "un écoulement accéléré sous cet horizon à l'aval et un retard à l'écoulement à l'amont, donc un gonflement à l'amont". Il conclut en signalant que l'horizon peu perméable "n'intervient que dans un rôle de barrière au cours de la dynamique saisonnière".

Par la suite, TURENNE (1977; 1979a), puis BOULET et al. (1979b; 1982b), à partir des observations et mesures précédentes, envisagent la présence d'une nappe perchée à circulation latérale installée au sommet de l'aliôs des podzols. Celui-ci est "induré sous l'influence de phases saisonnières d'assèchement et de saturation en eau".

ANDRIEUX et al. (1986) montrent enfin sur la ferme INRA de Combi (autre site voisin de Sinnamary), sur un transect de 150 m de longueur équipé de piézomètres, tensiomètres et tubes neutroniques, la présence d'une nappe dont les fluctuations sont étroitement liées aux épisodes pluvieux.

Ces quelques travaux restent toutefois insuffisants pour comprendre l'origine et le fonctionnement de la nappe à l'échelle des unités de paysage et des systèmes de sols. Un certain nombre de questions restent posées, dont une essentielle qui motive d'ailleurs en grande partie notre travail et qui est de mettre en évidence les principaux traits de la dynamique de la nappe.

4. PEDOLOGIE

4.1. Présentation générale

Deux grands domaines de pédogénèse peuvent être distingués en Guyane française. Ils se superposent aux trois ensembles géomorphologiques: "la jeune couverture pédologique" de la plaine côtière récente, "le manteau d'altération ferrallitique" de la plaine côtière ancienne et du socle (TURENNE, 1979a).

Le manteau d'altération ferrallitique recouvre en épaisseur variable les sédiments de la plaine côtière ancienne. Les sols développés directement sur l'argile Coswine, donnant naissance aux savanes argileuses, et localisés essentiellement dans la frange nord-ouest de la plaine côtière ancienne, ne seront pas décrits ici. Nous nous intéresserons aux sols des savanes dites sa-bleuses qui se développent sur les sables Coswine. C'est le cas de la savane de Corosony dont les principaux sols sont décrits dans le chapitre suivant.

Les sols sont marqués par une **pédogénèse ferrallitique ancienne** à laquelle se sont superposés des **processus pédogénétiques plus récents**. Pour TURENNE (1979a), "la diversité des régimes hydriques conditionne toute la pédogénèse de la plaine côtière ancienne et les nappes superficielles sont le facteur principal de la dégradation du paysage ferrallitique". Nous distinguerons trois processus essentiels (ferrallitisation, podzolisation et hydromorphie) qui interviennent séparément ou simultanément. Ils affectent différemment les sols suivant leur position topographique.

Les sols des barres pré littorales ont subi un processus général de *ferrallitisation*, comportant l'altération des minéraux feldspathiques, l'élimination de la majeure partie des cations alcalins et alcalinoterreux, la synthèse et la microstructuration d'argile (kaolinite), d'hydroxydes et oxydes de fer et d'alumine. En Guyane, cette ferrallitisation s'est accompagnée, du fait de la forte pluviométrie, d'une nette désaturation se traduisant par un pH acide (pH eau < 5,5), et un appauvrissement en argile des horizons de surface. Ce dernier se manifeste sur le terrain par un gradient croissant de teneur en argile avec la profondeur.

Ce caractère ferrallitique semble préservé lorsque le sol est soustrait, de par sa **position topographique**, à l'action de la nappe. Au contraire, sur les sols situés en position topographique mal drainée la morphologie ferrallitique initiale des profils est profondément transformée. Lors de la *podzolisation* une hydrolyse intense des silicates se développe. On observe alors la présence d'horizons spodiques caractéristiques des podzols. Ils sont marqués par une décoloration des horizons de surface (horizon A₂ blanchi), une dissociation de la matière organique, et une redistribution du fer et de l'argile illuviée entraînant la création de discontinuités texturales plus ou moins marquées et souvent soulignées par un horizon d'accumulation de matière organique et d'alumine.

Les sols des zones basses, situées entre les barres pré littorales, sont caractérisés par la faible profondeur de l'argile Coswine. Ils sont tous profondément marqués par l'*hydromorphie*, consécutive à la présence d'une nappe permanente qui les submerge pendant la saison humide. L'horizon de surface est alors souvent très humifère (de type anmoor) et les horizons sous-jacents sont marqués par des manifestations visuelles d'oxydo-réduction plus ou moins intenses.

On distingue trois grandes classes de sols (Fig. 1-4): les sols ferrallitiques, plus ou moins dégradés, les podzols de nappe et les sols hydromorphes dont le profil est fonction de leur situation au sein des zones basses. D'une façon générale, ces sols sont représentés à des degrés d'évolution variables, en fonction de leur position topographique.

4.2. Les sols dans le paysage

Les facteurs climatiques et édaphiques conditionnent de façon très nette les différents paysages végétaux de la plaine côtière ancienne, en liaison avec la distribution des sols. La couverture pédologique et le régime de nappe paraissent être à ce titre deux facteurs essentiels (LINDEMANN, 1953 et HEYLIGERS, 1963 in VEEN, 1970).

La forte corrélation existant entre les différentes associations végétales et les grands types de sols a été soulignée par de nombreux auteurs (MARIUS, 1965; SOURDAT, 1965; HOOK, 1971 et TURENNE, 1977). Deux facteurs essentiels permettant d'expliquer la nature des principales associations végétales (savane basse à *Paspalum* et *Rhynchospora* sur les podzols et savane haute herbeuse sur les sols ferrallitiques) sont mis en évidence : le taux de matière organique et la position topographique du sol.

Sur les prairies artificielles, le comportement des graminées fourragères est lui aussi bien corrélé avec le régime de nappe : dans les sols soumis à un engorgement important, le *Digitaria swazilandensis* disparaît, les *Brachiaria USDA* et *Br. decumbens* se maintiennent difficilement (ANDRIEUX et CABIDOUCHE, 1987).

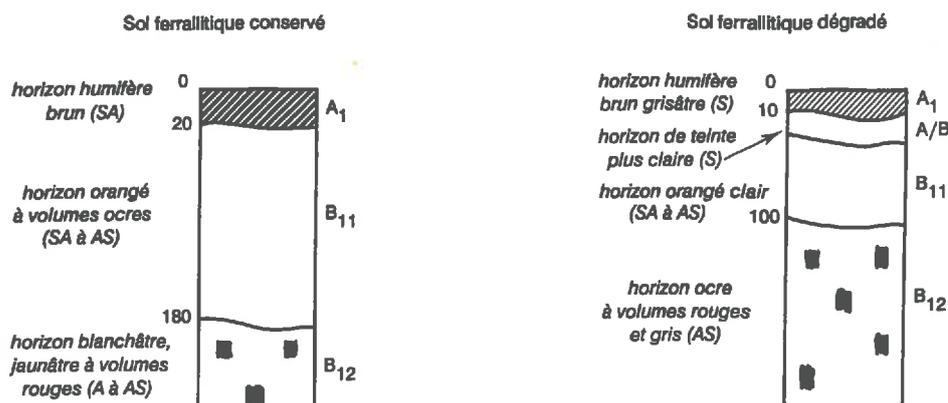
La répartition des sols ne se fait donc pas au hasard et le nivellement topographique permet de mettre en évidence un enchaînement des sols où les sols podzoliques et podzols se retrouvent au sommet des séquences, les sols ferrallitiques les moins différenciés à la rupture de pente et les sols hydromorphes à l'aval dans les zones basses. Cette disposition des sols, qui s'ordonne vers l'axe de drainage, se répète de façon régulière dans le paysage (TURENNE, 1979a). Aussi, la compréhension des variations latérales, observées entre ces types de sols à pédogénèse très contrastée, n'apparaît possible qu'à l'échelle de l'ensemble ordonné.

4.3. Les systèmes de transformation

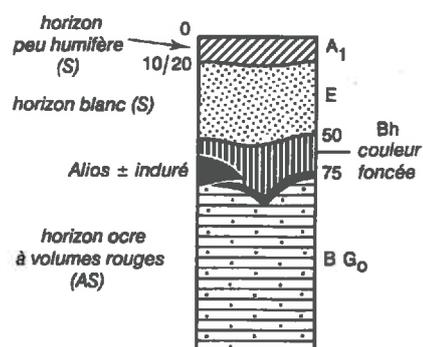
TURENNE (1977), en étudiant l'évolution des sols ferrallitiques vers les podzols sur les barres pré littorales, a permis, pour la première fois en Guyane française, de mettre en évidence la transformation qualitative de la couverture pédologique. Par la suite d'autres "systèmes de transformation" (BOULET et al., 1984) ont été mis en évidence, notamment sur le socle (BOULET, 1978; BOULET et al., 1979b).

Ces auteurs en ont déduit l'organisation générale des principaux systèmes de sols développés sur barres pré littorales. Les étapes de la transformation de "sols colorés (jaune-rouge), sablo-argileux, perméables, en sols sableux blancs (podzols), gorgés d'eau pendant les périodes pluvieuses" ont ainsi pu être reconstituées. Suivant la morphologie des barres on peut

a) Sols ferrallitiques



b) Podzol de nappe



c) Sols hydromorphes

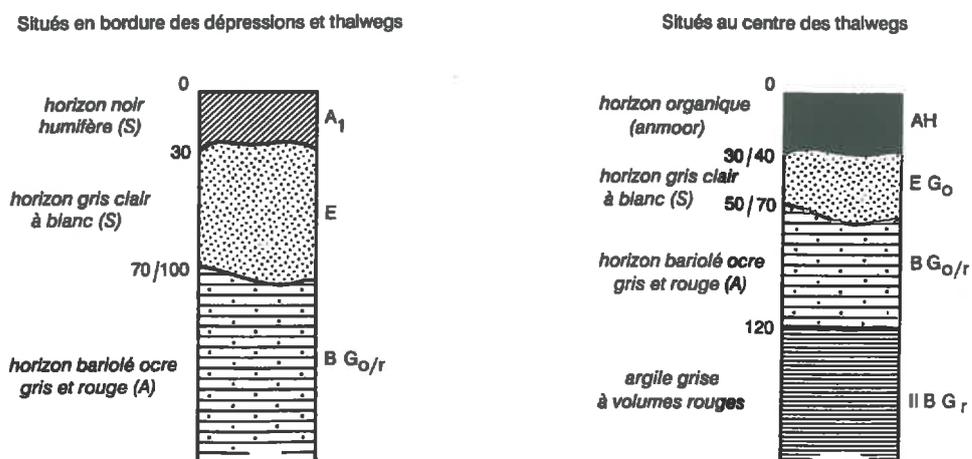


Figure 1-4 - Coupes schématiques des 3 grandes classes de sol de la plaine côtière ancienne.
(la texture est indiquée entre parenthèses)

a) Sols ferrallitiques. b) Podzol de nappe. c) Sols hydromorphes.

résumer en cinq stades les différentes étapes qui vont jaloner la transformation de la couverture ferrallitique initiale (Fig. 1-5). Sans entrer dans le détail des différentes transformations, signalons tout de même que dès le "stade II" ces auteurs suggèrent la présence, en saison des pluies, d'une **nappe perchée très fugace** au-dessus d'une discontinuité texturale proche de la surface. Celle-ci va s'accroître (en prenant la forme parfois d'une induration discontinue) et expliquerait alors la présence d'une nappe perchée plus durable, distincte de la nappe phréatique profonde. Dans un dernier stade, après un amollissement du relief, les pluies entraînent une remontée rapide de la nappe qui envahit tout le massif et va fluctuer au gré des épisodes pluvieux. Dans les derniers stades ces auteurs décrivent la présence sur les flancs des barres de sols ferrallitiques "reliques", alors qu'un podzol se développe en leur milieu.

5. CONCLUSION

Des données bibliographiques existantes, il ressort un certain nombre de points essentiels sur la plaine côtière ancienne que nous retiendrons dans le cadre de notre étude. Ainsi :

1- **une forte pluviosité annuelle moyenne** intègre une alternance d'excès et de déficits climatiques en eau. Des variations interannuelles, qui peuvent être particulièrement importantes, sont constatées;

2- la géomorphologie générale est caractérisée par des ondulations plus ou moins ordonnées du relief oscillant entre 7 et 15 m d'altitude absolue. Elles correspondent à une **formation sédimentaire sableuse** (sable Coswine) organisée en "barres pré littorales" reposant sur un dépôt argileux (argile Coswine). Des axes d'écoulement plus ou moins anastomosés et colmatés les séparent;

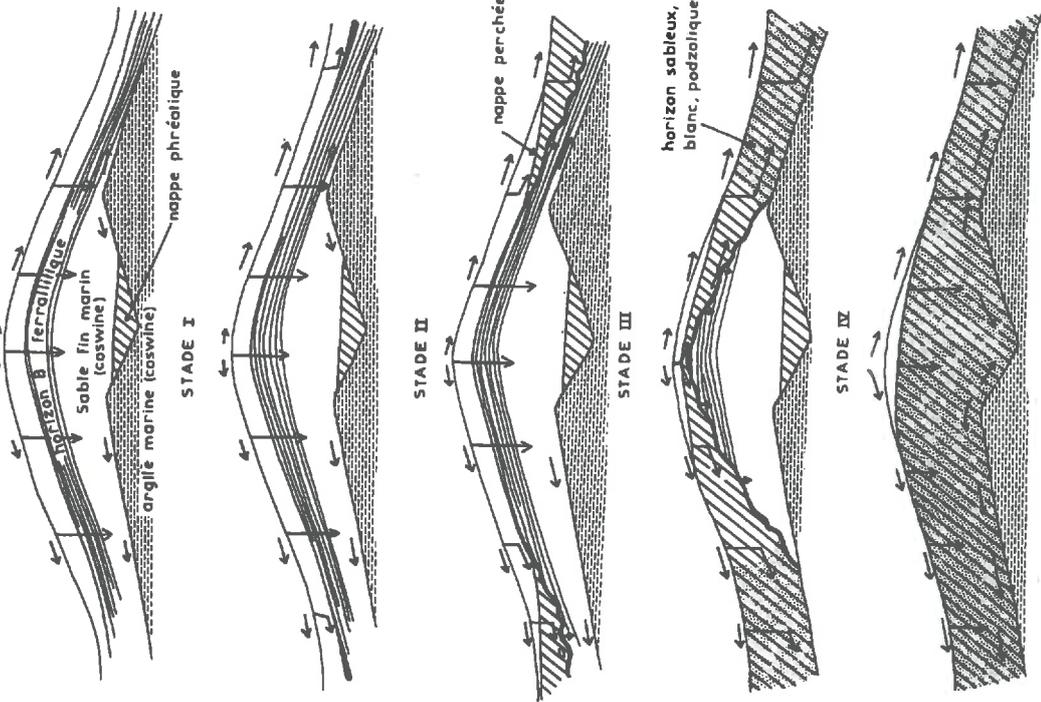
3- **à l'échelle des barres**, ou unités de modelé régionales, **il existe des séquences de sols**. Elles résultent de systèmes de transformation dans lesquels un matériau ferrallitique est transformé en podzol par appauvrissement. Trois grandes classes de sols sont identifiées par les différents auteurs: sols ferrallitiques, podzols et sols hydromorphes. Ces sols occupent une position qui est fortement corrélée à la topographie. Les sols ferrallitiques occupent les zones de rupture de pente, lorsque le relief est bien marqué, les podzols se situent au sommet, alors que les sols hydromorphes s'observent à l'aval;

4- **il existe une forte variabilité latérale de la couverture pédologique** (le passage d'une morphologie podzologique à la morphologie ferrallitique s'effectue sur des distances inférieures à 10 mètres). Elle s'accompagne, dans le premier mètre, d'une **variabilité verticale marquée** au sein des grands types de sols (variabilité d'épaisseur des horizons);

5- les sols montrent une **tendance évolutive généralisée vers le blocage du drainage vertical**, consécutif à la formation d'une discontinuité liée à un appauvrissement en argile des horizons de surface ou à une perte de microstructure (tassement) des horizons inférieurs (TURENNE, 1977; HUMBEL, 1978; BOULET et al., 1979a). Cette réalité pédologique a été caractérisée sur le terrain par un changement textural plus ou moins marqué entre les horizons (teneurs en argile < 5 % au sommet et environ 20 % en profondeur). La notion de blocage du drainage vertical doit cependant être tempérée par l'existence, notamment pour les podzols, d'une macroporosité importante (macropores et fentes).

SEQUENCE A

La dégradation progresse uniquement du bas vers le haut de la pente.



SEQUENCE B

La dégradation progresse à la fois du centre vers le rebord et du bas vers le haut de la pente.

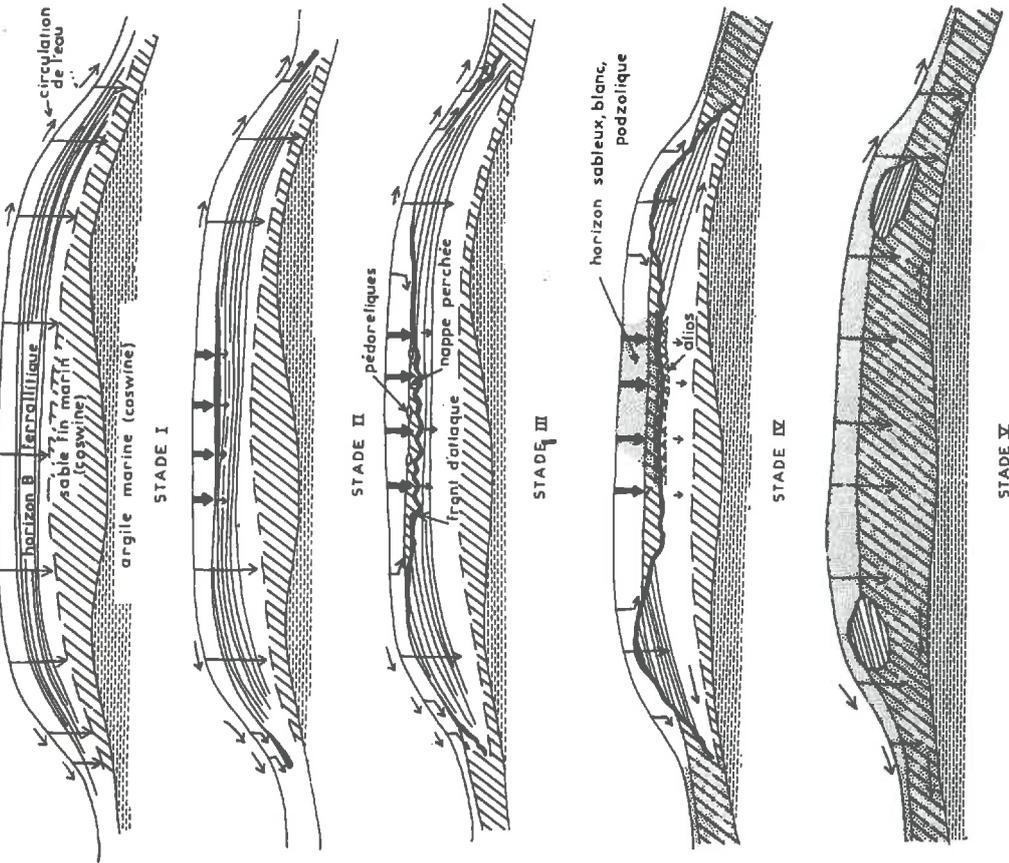


Figure 1-5 - Les systèmes de transformation de la plaine côtière ancienne. Stades d'évolution des barres pré littorales : (les flèches indiquent le sens des écoulements)

Séquence A : Barre pré littorale à sommet arrondi.

Séquence B : Barre large à sommet plat horizontal.

Coupes schématiques (BOULET et al, 1982)

6- il existe une nappe qui repose sur l'argile Coswine, considérée comme un niveau imperméable. Ses battements atteignent de façon plus ou moins prolongée les horizons de surface des podzols. Elle semble accompagnée d'une nappe perchée localisée sur une discontinuité texturale.

A la lumière de ce qui précède nous en déduisons que :

- il apparaît clairement que *le contexte pédoclimatique guyanais est marqué profondément par des excès d'eau climatiques*. Ceux-ci conditionnent largement la mise en valeur de sols caractérisés en outre par une fertilité chimique très faible. L'existence de systèmes de sols à forte différenciation latérale, implique l'existence de transferts latéraux de solides et de solutés et, par conséquent, d'importants transferts d'eau, vecteurs des transports de matériaux. La quantification des flux hydriques mis en jeu dans ces transferts, est un élément essentiel pour confirmer les différentes hypothèses émises sur l'existence des processus pédogénétiques à l'origine des systèmes de transformation.

- *les systèmes de sols du socle guyanais ont des propriétés hydrodynamiques très variables sur de courtes distances* (HUMBEL, 1978; GUEHL, 1984). Ces observations ont été confirmées par l'existence, sur quelques sites de la plaine côtière ancienne, de régimes hydriques bien différenciés (ANDRIEUX et al., 1986; ANDRIEUX et CABIDOUCHE, 1987).

- *le fonctionnement de la nappe est très mal connu*. L'existence fréquemment supposée de nappes perchées, ne repose que sur des hypothèses en l'absence de mesures fiables couvrant de longs épisodes.

Notre objectif général consiste dès lors à mettre en évidence les principaux traits du fonctionnement de la nappe sur une unité géomorphologique élémentaire, et représentative, de la plaine côtière ancienne.

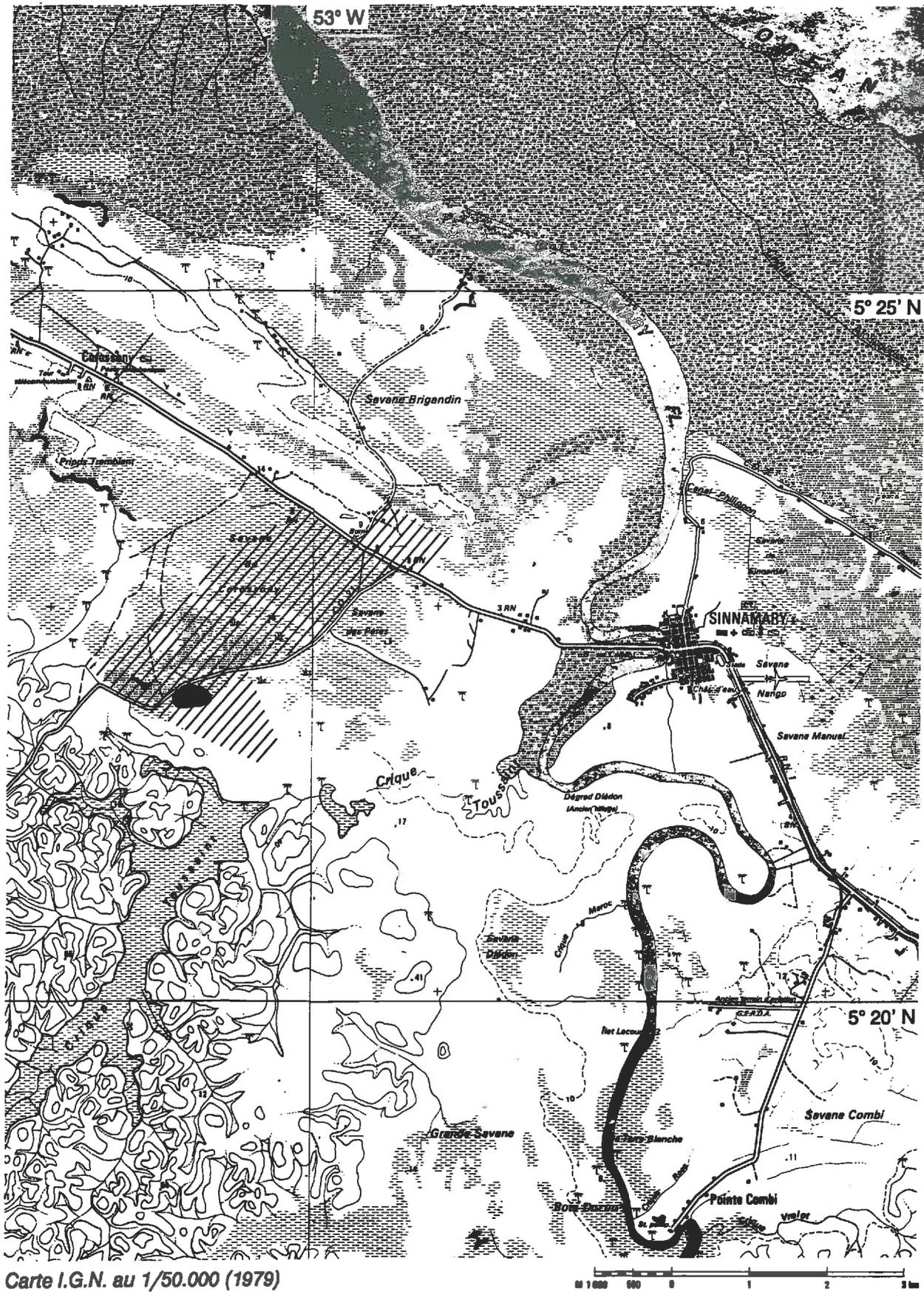
Aussi, après avoir choisi puis décrit l'organisation tridimensionnelle d'une barre pré-littorale, ce travail nous conduit d'une part à déterminer les principaux moteurs de la dynamique de la nappe et d'autre part à tenter d'expliquer l'origine de la forme de la nappe.

Nous chercherons ainsi à savoir si la dynamique de la nappe est uniquement attribuée à la forte pluviométrie ou si elle est dépendante de l'environnement immédiat de la barre étudiée. La quantification des flux d'alimentation en eau de la nappe est alors nécessaire. Aussi après avoir délimité avec précision l'aquifère, ce qui nécessite en particulier de localiser à l'aide de sondages profonds le substratum argileux imperméable, nous tenterons de relier les variations de volume de la nappe à la pluviométrie.

Nous chercherons enfin à savoir si la forme de la nappe doit être reliée au modelé topo-graphique et/ou aux différentes caractéristiques hydrodynamiques des sols. L'existence d'une forte macroporosité - traversant des horizons intrinsèquement susceptibles de ralentir les processus d'infiltration de l'eau météorique et de remontée de la nappe - nous conduit à nous interroger sur l'existence d'éventuelles nappes perchées.

Chapitre 2

**Le site expérimental :
choix du site et représentativité**



Zone étudiée dans le cadre de l'étude "Secteur de Référence".

Site expérimental.

Figure 2-1 - Plan de situation de la Savane de Corossony et localisation du site expérimental.

LE SITE EXPERIMENTAL : CHOIX DU SITE ET REPRESENTATIVITE

INTRODUCTION

Le site expérimental (lat. 5°22'N, long. 53°W) est localisé sur la bordure Ouest des terres de la ferme AMVA (Association de Mise en Valeur Agricole) de la piste de St Elie, à proximité de celle-ci (Fig. 2-1). Il appartient à "la savane de Corosony" (commune de Sinnamary). Cette savane est bordée au Nord par un ancien cordon littoral sableux, sur lequel est tracée la RN 1, au Sud par les premières collines du Socle et à l'Est par la savane des Pères et un cours d'eau, la crique Toussaint, qui constitue l'exutoire principal de notre site (Fig. 2-2).

On peut distinguer globalement dans la plaine côtière ancienne deux grands types de sols: les sols sans contraintes hydriques et les sols à contraintes hydriques. Les seconds sont susceptibles d'être assainis par des aménagements hydro-agricoles. Le site expérimental est représentatif de ce dernier ensemble; ceci est en accord avec notre objectif principal qui s'inscrit dans le cadre d'une thématique de recherche visant à lever la contrainte représentée par l'excès d'eau.

Dans un premier temps nous présentons rapidement les raisons précises qui nous ont conduit à choisir notre site. Pour bien analyser et interpréter les données hydrologiques recueillies (Chapitre 3), il est ensuite nécessaire de connaître dans le détail le contexte topographique de la barre étudiée, sa constitution géologique, et enfin l'organisation fine de sa couverture pédologique.

1. CHOIX DU SITE ET REPRESENTATIVITE

La barre pré-littorale a été choisie pour deux raisons majeures, l'une d'ordre pédologique, l'autre à caractère agronomique.

Sur le plan pédologique, la barre choisie est représentative des sols régionaux : tous les principaux sols y sont observés et ils occupent des positions topographiques typiques, identifiées précédemment. Par ailleurs, une étude pédologique conduite à grande échelle selon l'approche proposée par BOULET et al. (1982a; 1982b) sur une portion du site (4 ha), montre que la couverture pédologique étudiée fait partie d'un système de transformation classique (GRIMALDI et al., 1986; 1987).

Sur le plan agronomique, notre choix s'est porté sur un site localisé au sein d'une exploitation d'élevage expérimentale, où l'INRA participe à différents essais zootechniques et agronomiques. Trois grands types de paysages notés, A, B, C, ont été identifiés dans la savane de Corosony (Tab. 2-1), à l'occasion d'une étude pédologique, à laquelle nous avons participé, et qui a été effectuée dans le cadre de l'opération Secteur de Référence de la savane guyanaise (FAVROT et al., 1987). Ce découpage est par ailleurs conforme au classement réalisé par TURENNE (B1, B2 et B3) pour la carte des sols au 1/350.000 (ATLAS de la Guyane, 1979), et aux observations de CABIDOCHÉ (1981).

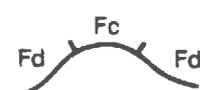
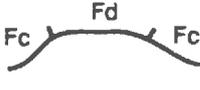
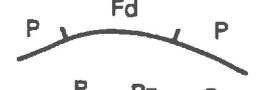
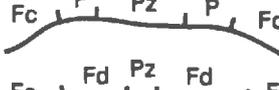
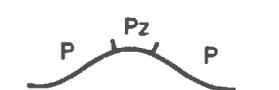
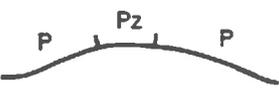
CARACTERISTIQUES	TYPE DE PAYSAGE A	TYPE DE PAYSAGE B	TYPE DE PAYSAGE C
Localisation	- Est ferme St-Elie	- Ouest ferme St-Elie	- Savane de Corossoy
GEOMORPHOLOGIE	 <p>Barres Barres convexes ou un peu aplanies étroites (120-200 m de large). Directions souvent influencées par un cours d'eau proche.</p>	 <p>Barres faiblement convexes ou très aplanies, plus larges (200-400 m)</p>	 <p>Barres convexes ou aplanies non systématiquement continues (parties plus arasées), longueur très variable (50-600 m). Orientation parallèle à la côte.</p>
	Thalwegs	Thalwegs profonds et nombreux, en général reliés à un thalweg principal et un cours d'eau proche.	Thalwegs profonds moins nombreux, en relation avec un cours d'eau proche.	Thalwegs très rares, peu profonds, débouchant dans de vastes dépressions (250 m).
Hydrographie	<ul style="list-style-type: none"> - Nombreux cours d'eau permanents ou semi-permanents occupant un réseau dense de thalwegs. - Proximité d'un axe de drainage principal (crique ou fleuve). 	<ul style="list-style-type: none"> - Réseau de thalwegs moins dense que dans l'unité A. - Axe de drainage principal en général plus éloigné que pour l'unité A. 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de cours d'eau permanents se perdant dans les dépressions argileuses. - Pas de relation directe avec l'axe de drainage principal, toujours très éloigné.
Drainage externe	Bon drainage externe des barres.	Emissaire de drainage fonctionnel mais la nappe n'est pas correctement rabattue au centre des barres (thalwegs trop écartés).	Très mauvais drainage externe général.
Unités pédologiques	Ferrallitique conservé (Fc) Ferrallitique dégradé (Fd)	Ferrallitique (Fc, Fd) Podzol (Pz) - Planosol (P).	Podzol (Pz) - Planosol (P)
Séquences typiques des sols sur les barres.	 	  	 

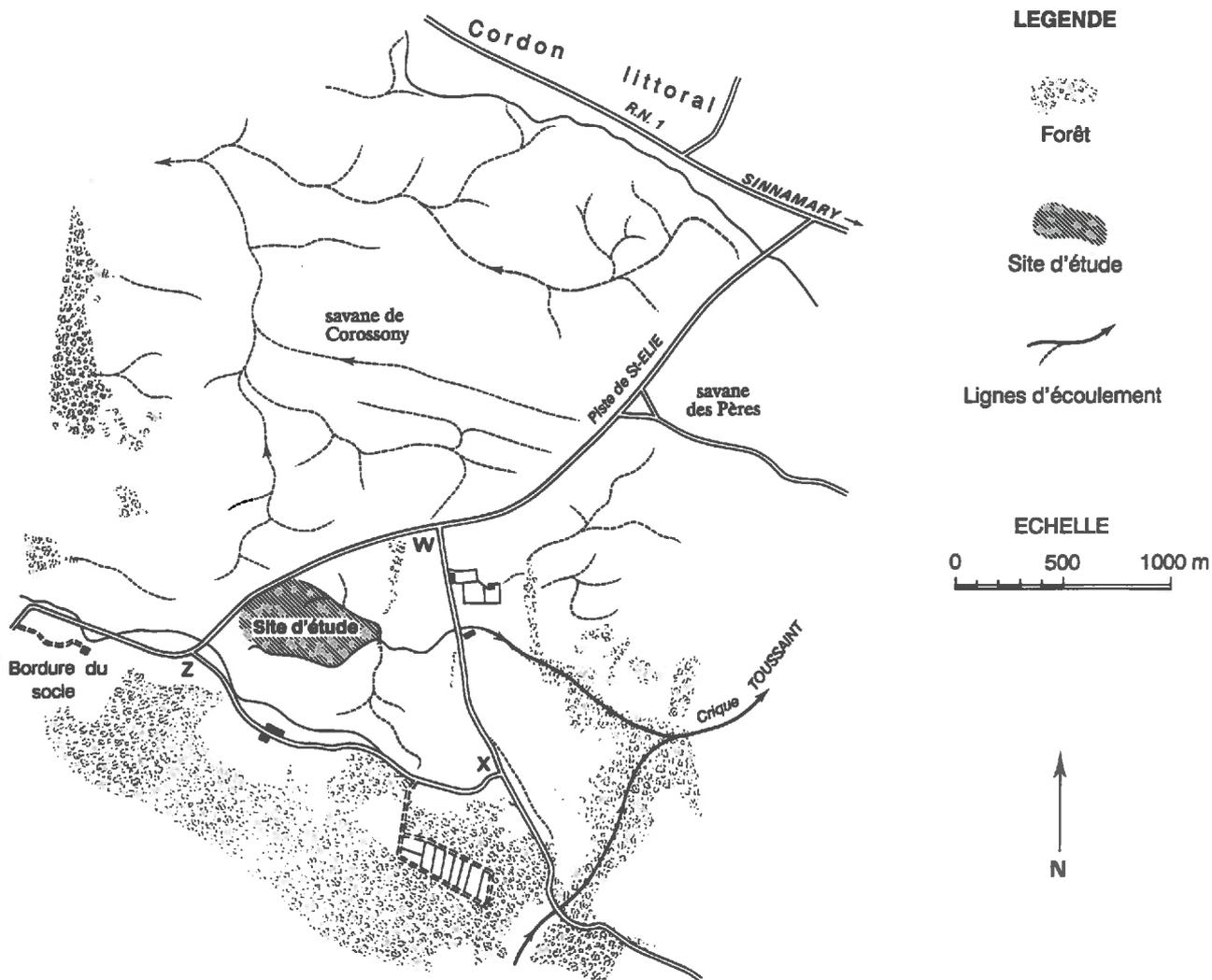
Tableau 2-1 : Types de paysages et unités hydro-géomorphologiques des barres pré littorales hautes de la savane de Corossoy et de la ferme de St-Elie (d'après FAVROT et al, 1987).

- *Le paysage de type A* est représenté par des barres convexes ou légèrement aplanies, étroites, délimitées par un réseau de thalwegs bien dessinés et reliés à un axe de drainage fonctionnel ("crique" ou cours d'eau). Ce type de paysage est représenté dans la savane de Corossoy par la partie Est de la ferme AMVA.

- *Le paysage de type B* est caractérisé par des systèmes de barres plus larges et planes, soulignés par un réseau de thalwegs moins dense et moins bien connecté aux grands axes hydrographiques que précédemment. Le drainage naturel est plus déficient au fur et à mesure que l'on s'éloigne du thalweg. Notre site expérimental appartient à ce type de paysage, ainsi que toute la partie Ouest de la ferme AMVA de St-Elie.

- *Le type C* correspond à des barres peu dessinées et arasées avec des rares thalwegs, colmatés, débouchant dans de vastes zones planes déconnectées des émissaires principaux. La majeure partie de la savane de Corossoy appartient à ce dernier type de paysage.

Parmi tous les sols des savanes sableuses de la plaine côtière ancienne, seuls les sols du second ensemble (paysage B) sont susceptibles d'être améliorés, sans moyens financiers excessifs, par des aménagements hydro-agricoles. Les sols du premier ensemble ne présentent pas de contraintes de type hydrique, et les sols des paysages de type C sont trop fortement marqués par cette contrainte pour que l'on puisse espérer la lever à moindre coût.



d'après photo aérienne REGNAM (14/01/86)

Figure 2-2 - Localisation du site d'étude au sein de la Savane de Corossoy.
Axes de drainage et lignes d'écoulement (W, X, Z, : périmètre de la ferme AMVA).

2. LE RELIEF

La barre étudiée est bordée par deux axes d'écoulement, l'un au nord-est et l'autre au sud-ouest. Ils convergent vers un exutoire naturel, lequel rejoint la crique Toussaint 1 km plus loin (Fig. 2-2).

L'absence de document topographique nous a conduit à établir une carte topographique au 1/1.000 (Fig. 2-3a et Annexe 1). La superficie totale du site est de 15,8 ha. Il se découpe en trois zones : le sommet, aplani, qui est à une altitude moyenne de 6,70 m, les versants plus ou moins irréguliers, et les deux bas-fonds dont la cote du point le plus bas, à l'aval, est à 2 m.

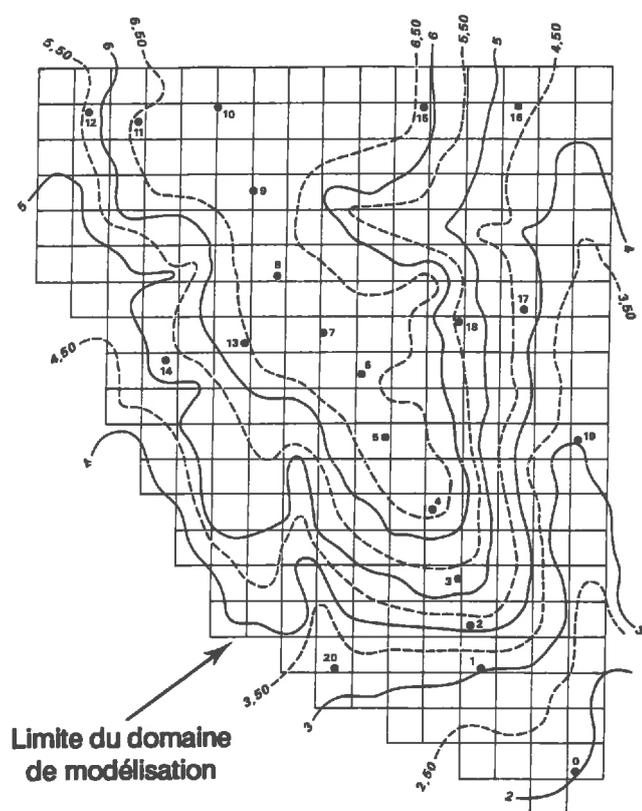


Figure 2-3a -
Courbes de niveau et limites
du domaine de modélisation
des transferts hydriques.

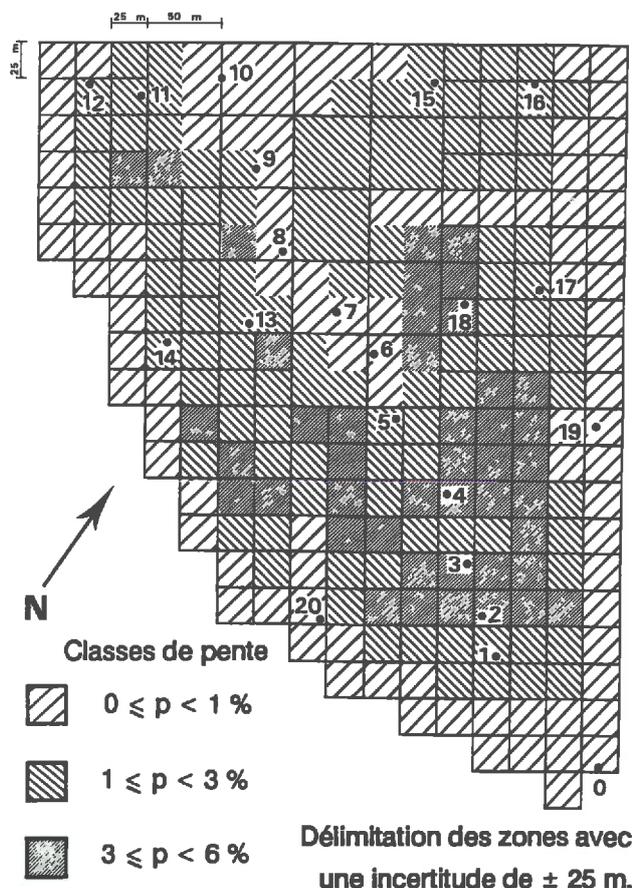


Figure 2-3b - Classe de pente : pentes calculées à partir des cotes déterminées au centre de chaque maille par interpolation linéaire des relevés topographiques.

Ces trois zones ressortent bien sur la carte des pentes (Fig. 2-3b), réalisée sur la base d'un maillage de 25x25 m de maille élémentaire (maillage utilisé par la suite (Chapitre 4) pour la modélisation des écoulements en milieu saturé). Ce document permet de distinguer les versants à pente faible (1 à 3 %) situés à l'amont, et ceux à pente plus accentuée (3 à 6 %) au sud-est, sur l'épaulement aval de la barre.

La détermination de la plus forte pente entre chaque maille et ses voisines permet d'établir une carte des chemins préférentiels d'écoulement de surface (Fig. 2-3c) soulignant bien la présence des principaux thalwegs.

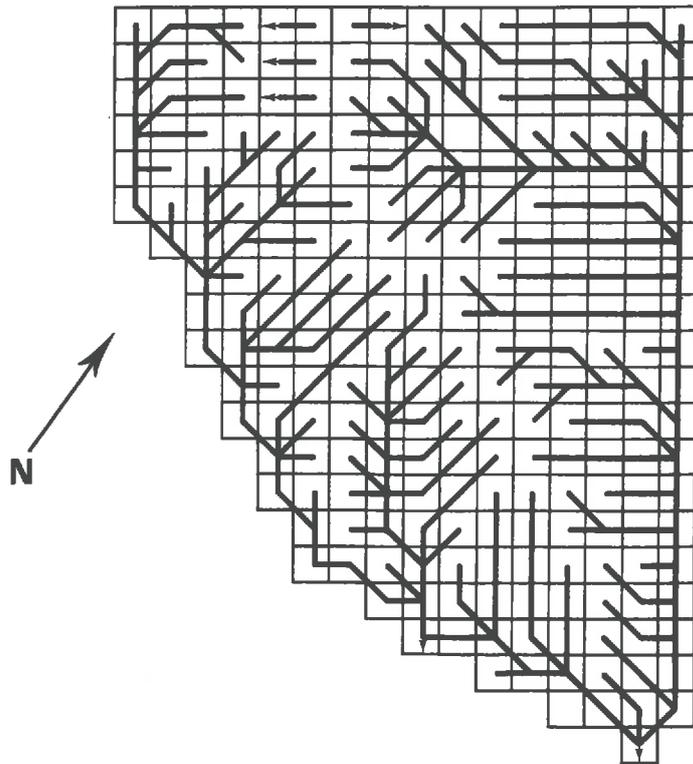


Figure 2-3c -
Chemins préférentiels des écoulements
de surface (déterminés suivant les lignes
de plus forte pente).

3. LES MATERIAUX EN PLACE

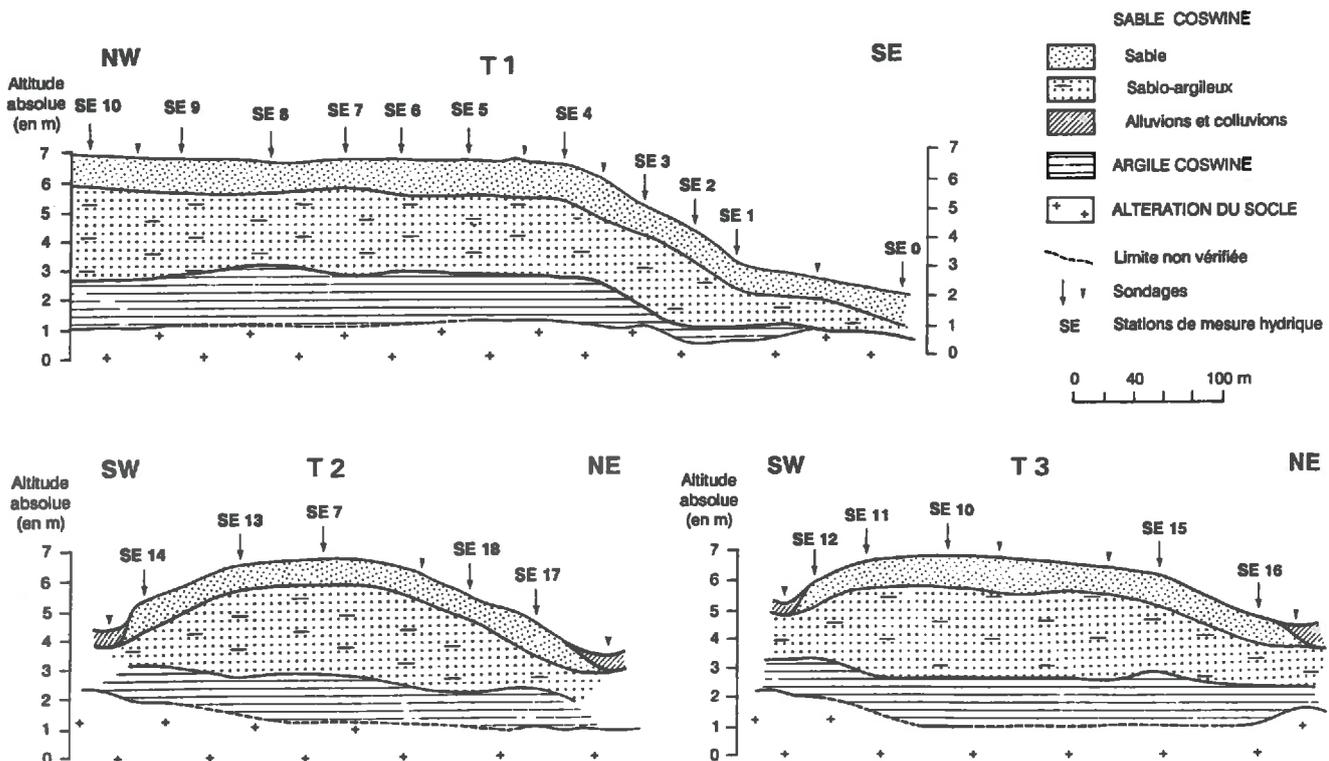


Figure 2-4 - Coupes schématiques des principaux matériaux sur trois transects.
T 1 : transect axial, T 2 et T 3 : transects secondaires perpendiculaires.

Pour identifier la succession des matériaux formant la barre 32 sondages, de 3 à 6 mètres de profondeur, ont été réalisés à la tarière à main et un a été effectué par le BRGM avec une foreuse (Annexe 1). Des analyses granulométriques (Annexe 2), réalisées jusqu'à 3 ou 4 mètres de profondeur, complètent les observations morphologiques de terrain. Tous les matériaux, décrits précédemment, observés sur la plaine côtière ancienne sont identifiés sur notre site.

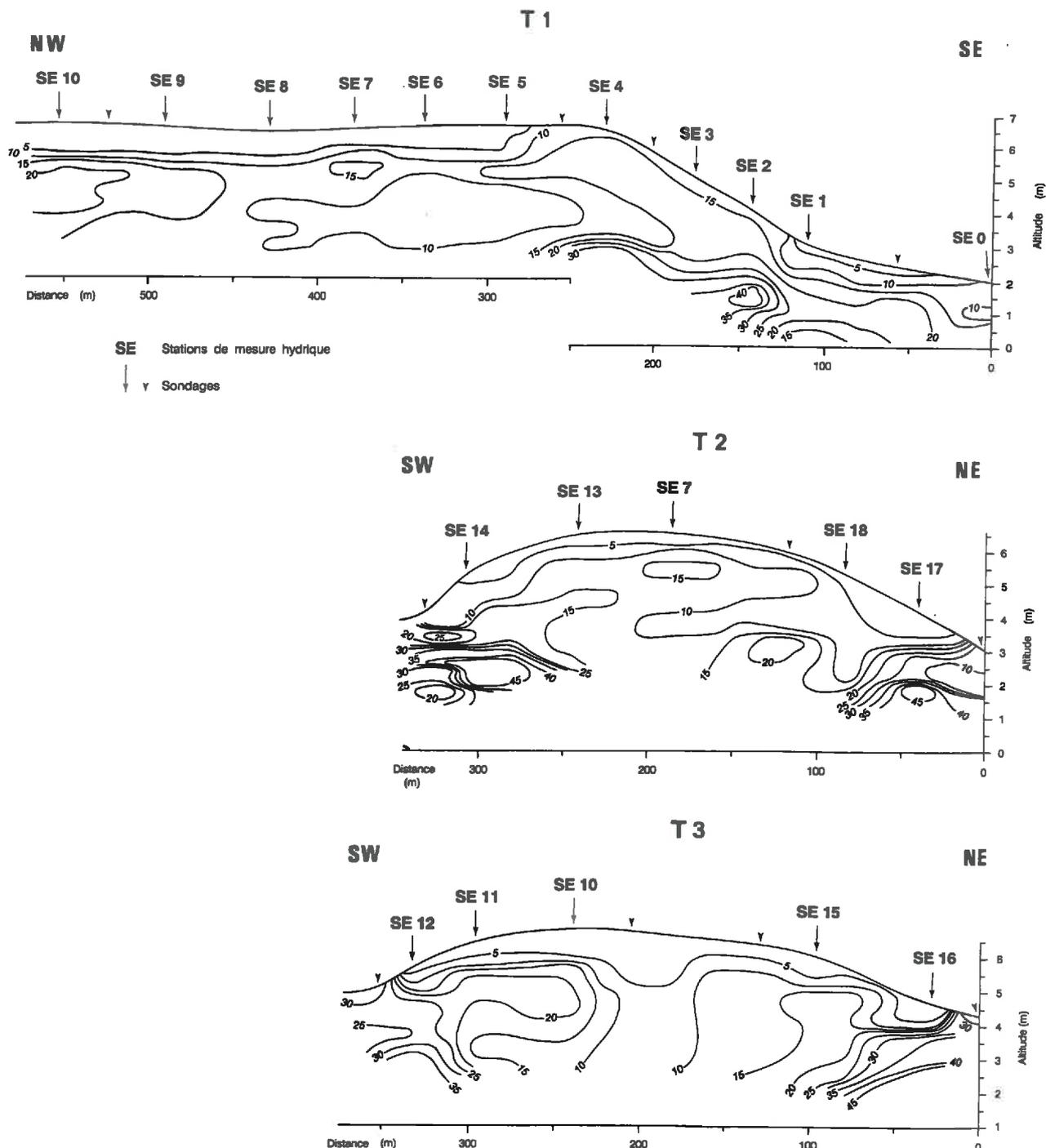


Figure 2-5 - Courbes d'isovaleurs de la fraction argile ($\% < 2 \mu\text{m}$). Coupes transversales T 1, T 2, T 3.

(Mesures effectuées sur chaque sondage, tous les 20 cm)

Deux séries de coupes illustrent la succession des matériaux rencontrés (Fig. 2-4) et les granulométries (Fig. 2-5). On rencontre trois ensembles principaux, de la profondeur vers la surface :

- entre 0 et 2 m d'altitude absolue apparaissent les matériaux d'altération du socle. Il s'agit de sables grossiers très quartzeux (1 à 3 cm de diamètre), blanchâtres, montrant à la loupe binoculaire de larges facettes à angles vifs. Ce matériau a été rencontré lors de nombreux forages dans la plaine côtière, notamment lors de sondages récents (agrandissement du port de Kourou en 1987). Il caractérise la zone de transition entre le socle granitique précambrien, localisé entre Kourou et Sinnamary vers 0 m en cote absolue (TURENNE, 1979b) et les dépôts sédimentaires Coswine. Il s'agit probablement d'arènes de désagrégation du socle.

- entre 2 et 3 m d'altitude absolue se rencontre l'argile Coswine. Ce matériau argileux (environ 50% d'argile et 30% de sable fin) gris-bleuté est souvent compact et très peu perméable. Son acidité est très marquée ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 3,8$) et il apparaît riche en $\text{Al}_{\text{écl}}$ et en fer. Des mesures de conductivité, effectuées sur quelques échantillons à l'aide d'un perméamètre de laboratoire, nous permettent de confirmer la faible perméabilité de ce matériau ($5 \text{ à } 9.10^{-8} \text{ ms}^{-1}$). La courbe granulométrique cumulée de ce matériau (Fig. 2-6) est semblable à celles présentées par SOURDAT et DELAUNE (1970) pour caractériser le niveau argileux Coswine. L'origine sédimentaire du dépôt est confirmée par la présence de débris de fossiles cylindriques centimétriques, mis à jour sur notre site.

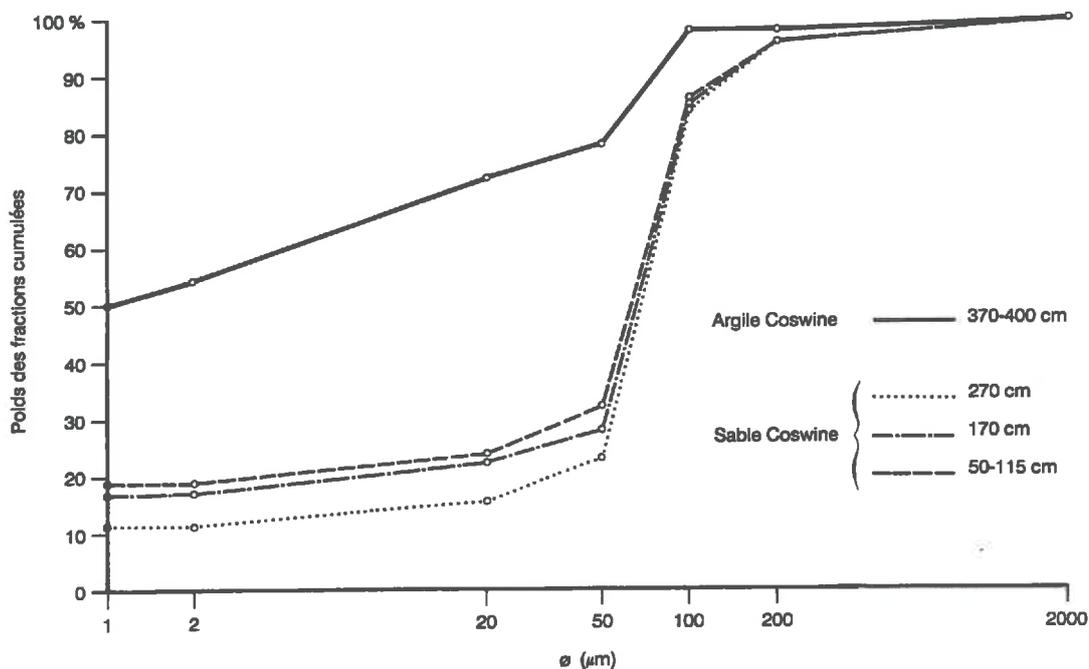


Figure 2-6 - Courbes granulométriques cumulées d'échantillons prélevés sur la station SE 4 entre 50 et 400 cm de profondeur.

L'argile est quelquefois surmontée par un mince lit (2 à 3 cm d'épaisseur) argilo-sableux, gris à volumes rouges, contenant de petits graviers millimétriques plats. Ceci semble indiquer que ce niveau argileux et les matériaux supérieurs résultent de deux dépôts différents.

Dans la savane de Corossony, une couche sableuse (60 à 80% de sable et 9 à 15% d'argile), d'épaisseur moyenne 0.80 m, gorgée d'eau en saison sèche, assure dans bien des cas la transition entre l'argile et les sables Coswine (FAVROT et al., 1987). Cette couche semble révélatrice de la présence d'une nappe relativement profonde et permanente. La moitié des sondages réalisés sur la barre a confirmé l'existence de ce niveau sableux, qui semble par conséquent apparaître sous la forme de lentilles ou de bancs discontinus.

- **au-dessus de 3 m d'altitude est observé le faciès sableux Coswine.** Il se compose d'une couche supérieure globalement sableuse, d'épaisseur moyenne 1 m, où s'exprime une très forte différenciation latérale et verticale des matériaux. En dessous apparaît un ensemble de matériaux de 1 à 3 m d'épaisseur, sablo-argileux à argilo-sableux, jaune-ocre à larges volumes rouges et quelques nodules violacés plus ou moins indurés. Cet ensemble est parsemé de nombreuses lentilles sableuses ou argileuses. Le gradient d'argile est croissant dans les deux premiers mètres de sol, puis décroissant au fur et à mesure que l'on se rapproche du niveau argileux profond. Les courbes granulométriques cumulées (Fig. 2-6), confirment le rattachement de cet ensemble au faciès sableux Coswine, caractérisé par SOURDAT et DELAUNE (1970).

En conclusion, le domaine étudié est formé de la superposition de **deux niveaux principaux distincts**. Le niveau argileux, profond, imperméable (argile Coswine), repose sur l'altération du socle mais il peut être proche de la surface dans les exutoires. Au sommet se rencontre un ensemble de matériaux sableux en surface et sablo-argileux à argilo-sableux à moyenne profondeur (sables Coswine). L'imbrication de passées sableuses et argileuses, constatée sur le site comme sur la savane de Corossony (FAVROT et al., 1987), rend cependant parfois délicate l'identification sur le terrain des deux dépôts caractéristiques de la série Coswine. La transition entre ces deux niveaux est souvent assurée par une couche sableuse discontinue, gorgée d'eau en saison sèche.

4. LA DIFFERENCIATION PEDOLOGIQUE

L'étude pédologique conduite sur 700 ha de la savane de Corossony dans le cadre de l'opération Secteur de référence, a révélé la présence de quatre grands types de sols (Fig. 2-7) occupant des positions topographiques bien précises au sein des trois ensembles de paysages (A, B et C) définis précédemment. Nous avons en effet été conduits, à la suite de CABIDOCHÉ et SERVANT (1980), CABIDOCHÉ (1984), à rajouter un quatrième type de sol (planosol) à la liste des sols identifiés généralement dans la plaine côtière ancienne (sol ferrallitique, podzol et sol hydromorphe). L'existence de sols caractérisés par :

- **une forte différenciation texturale** entre des horizons supérieurs sableux et les horizons plus profonds à dominante argileuse,
- **un engorgement intense** plus ou moins temporaire,
- **une acidité très importante**, nous incite à les rattacher aux planosols (BAIZE, 1988). On pourrait également ranger ces sols dans la classe des sols hydromorphes. C'est cette solution qui a été retenue jusqu'à présent par les pédologues de l'ORSTOM. Il nous a paru essentiel, pour notre part, de souligner l'existence d'un changement textural marqué (2% d'argile entre 0 et 90 cm et 20% d'argile vers 110 cm). L'influence de ce changement textural sur la dynamique hydrique de la nappe sera tout particulièrement étudiée dans cette étude. Nous aurions pu tout

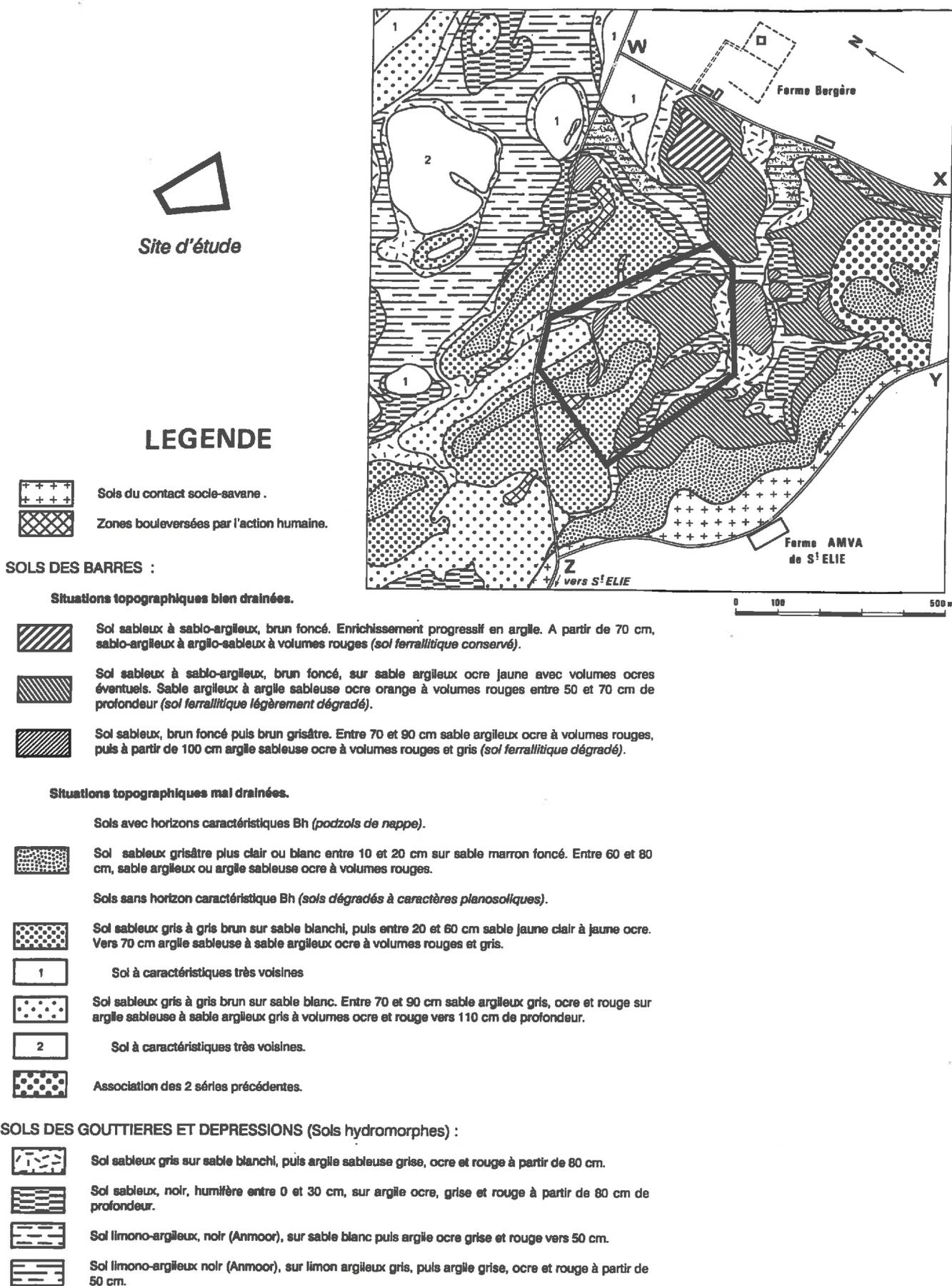
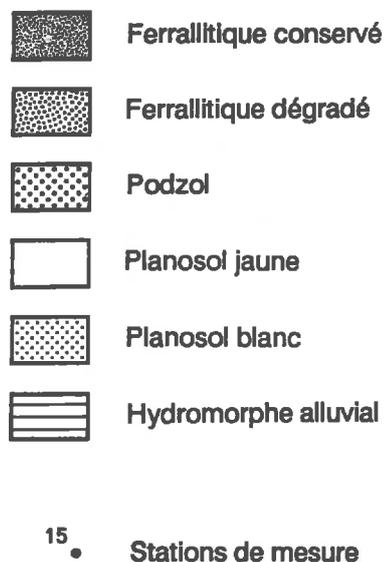


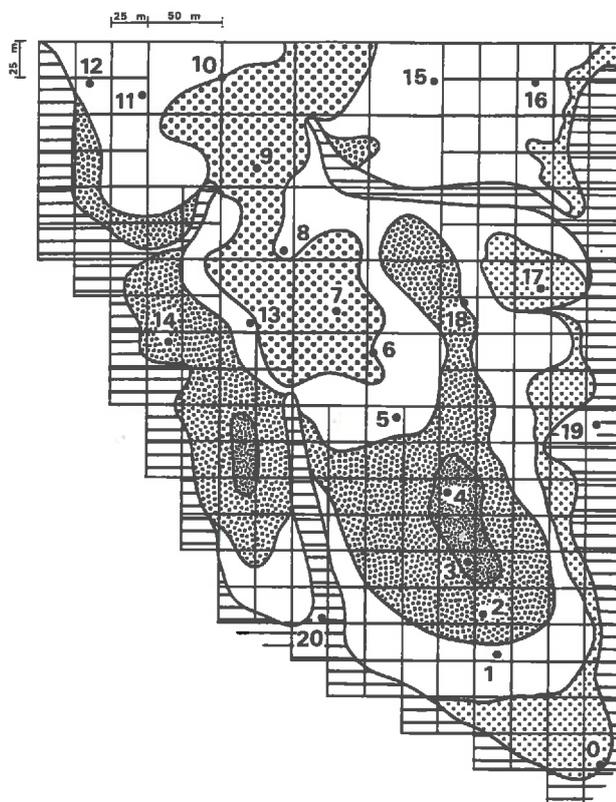
Figure 2-7 - Extrait de la carte des sols au 1/5.000ème de la savane de Corossony et de la ferme AMVA de St Elie, délimitée par le polygone WXYZ (d'après FAVROT et AL., 1987).

aussi bien ranger ces sols dans une hypothétique classe des sols hydromorphes à caractères planosoliques. Même s'il apparaît que, suivant les situations, les caractères planosoliques sont plus ou moins prononcés, nous appellerons ces sols des *planosols*.

a. Les sols



maillage utilisé pour la modélisation
(chapitre V)



b. Localisation des sols au sein du relief

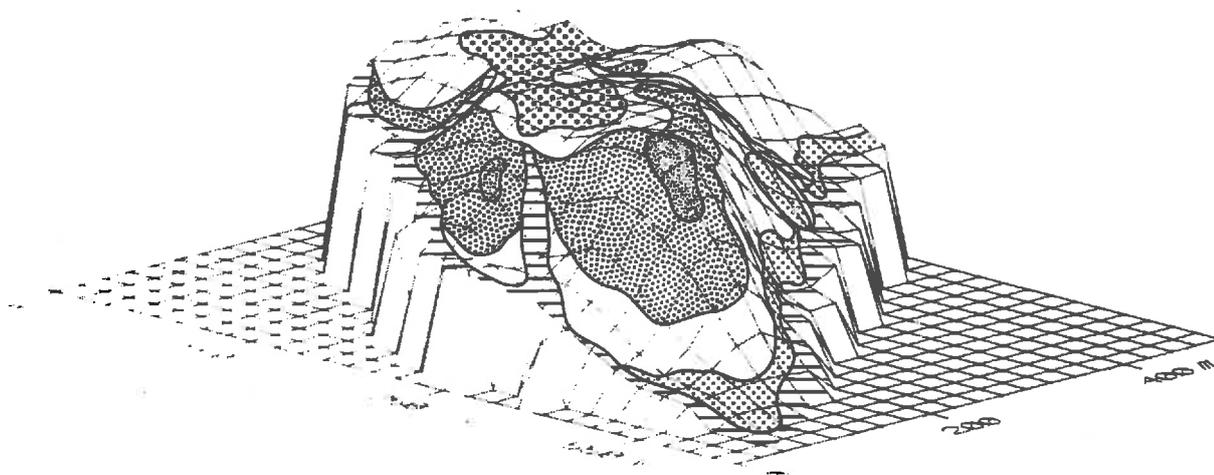


Figure 2-8 - Carte des sols et surface topographique.

Les sols identifiés sur le site, se caractérisent, à l'image de toute la plaine côtière ancienne, par une grande variabilité de faciès. Dans tous les cas, les 120 ou 150 premiers cm révèlent une forte différenciation latérale et verticale des sols, marquée par des changements rapides de couleur et de texture. Les sondages et profils (localisation en Annexe 1), soulignent cependant les variations continues des organisations pédologiques. Le passage d'un sol à l'autre est certes rapide, mais il n'est pas brutal. Les quatre grandes unités de sols identifiées (Fig. 2-8a) occupent, comme partout dans la savane, des positions bien précises au sein du relief (Fig. 2-8b) :

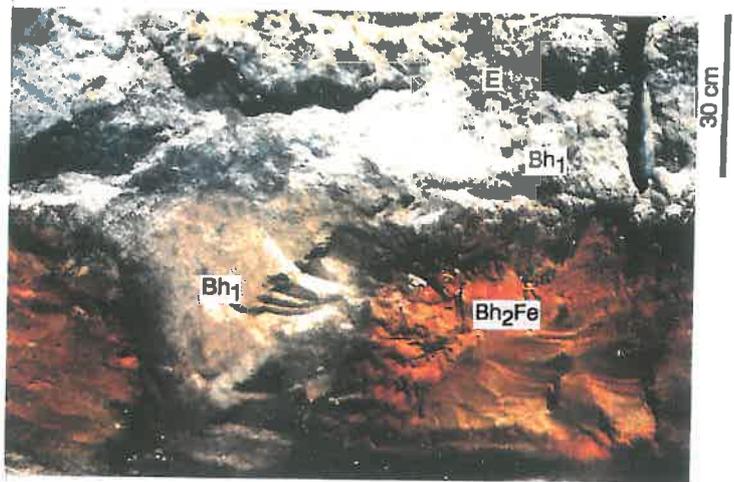
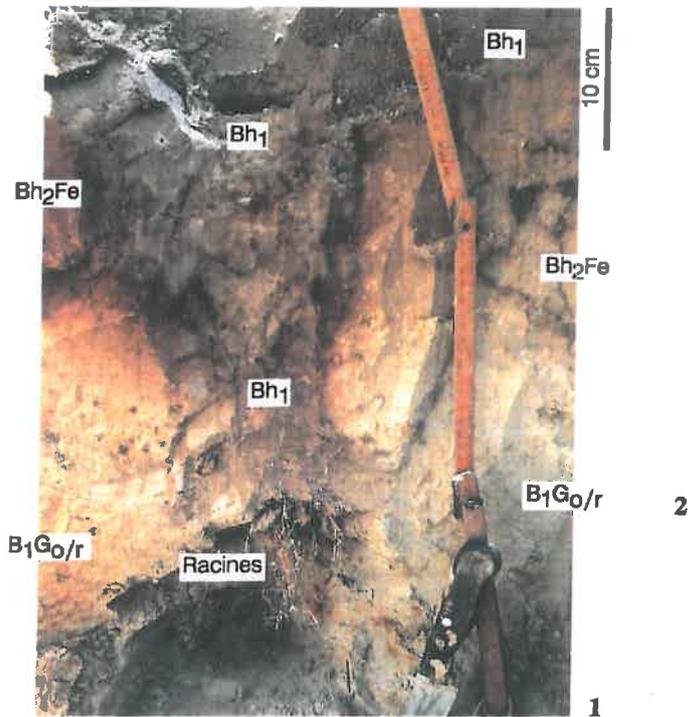
- les *podzols* s'observent sur le sommet, dans l'axe de la barre;
- les *sols ferrallitiques* occupent les épaulements convexes;
- les *planosols* sont localisés sur les versants où la pente est faible;
- les *sols hydromorphes alluviaux* se rencontrent dans les thalwegs.

Dix fosses (SE1, SE2,...,SE9 et SE10), ouvertes au cours de la saison sèche 1987 (fin des relevés hydrologiques), sur l'emplacement des stations de mesure du transect axial de la barre, permettent de caractériser finement les différents sols. Les descriptions morphologiques sont complétées par des mesures de densité réelle et de densité apparente. Les descriptions et mesures détaillées sont rassemblées en Annexe 2; seuls les principaux résultats sont analysés ci-dessous. La caractérisation de la porosité et des changements texturaux apparaît déterminante, dès lors que l'on souhaite étudier l'importance des transferts hydriques.

4.1. Texture et porosité

Au sommet, les matériaux sont pour la plupart sableux (<5% d'argile et prépondérance des fractions 50-100 μm et 100-200 μm). L'un des traits majeur de ces sols est la présence d'une **discontinuité texturale** - correspondant au passage des horizons sableux de surface à des horizons plus argileux - est mise en évidence sur une grande partie de la barre. Elle est plus ou moins marquée suivant les sols (on passe par exemple, de 6% d'argile à 80 cm à 13% à 110 cm sur SE6, de 6% à 80 cm à 22% à 110 cm sur SE5), mais elle n'est jamais brutale; sa profondeur d'apparition moyenne est de 90 cm (60 à 120 cm suivant les sites). Sur les sols ferrallitiques le gradient d'argile très progressif ne laisse pas apparaître de discontinuité marquée, elle est, par contre, nette sur les planosols et correspond à la transition entre les horizons de surface sableux et les horizons sablo-argileux à argilo-sableux. Elle est associée aux horizons spodiques sur les podzols et se caractérise alors par une irrégularité plus ou moins marquée: le Bh et l'aliol induit peuvent être, comme nos observations le soulignent sur la station SE7, interrompus par des gloses sableuses.

Concernant la porosité, les observations macroscopiques et microscopiques (planche 1) soulignent son importance, qui est à rattacher pour les horizons sableux à la structure particulière des sables, alors qu'elle est essentiellement associée aux passages racinaires, anciens ou actuels, au sein des horizons sablo-argileux (ou AS) de moyenne profondeur. Ces pores tubulaires verticaux semblent continus sur l'ensemble du profil; ils se singularisent par une gaine bleutée (planche 1). Dans certains horizons, souvent les plus argileux, subsistent les cortex des anciennes racines qui forment de véritables "conduits". Une porosité fissurale se développe en outre, délimitant des unités structurales prismatiques (0.5 à 1.0 m) qui apparaissent sous la forme de vastes plans, striés par les empreintes racinaires.



Photos 1 et 2 : Podzol (station SE 7). Vues de détail des horizons spodiques. Horizon induré (Alios, Bh₂ Fe) percé par des descentes de l'horizon Bh₁ parfois occupées par un chevelu racinaire très dense.



Photo 3 : Planosol (station SE 10). Coupe horizontale vers 100 cm de profondeur dans l'horizon B₂₁ G_{0/r} sablo-argileux à argilo-sableux. Section d'une glosse sableuse blanche, liée probablement à d'anciens passages racinaires, et devant constituer un chemin préférentiel d'écoulement.

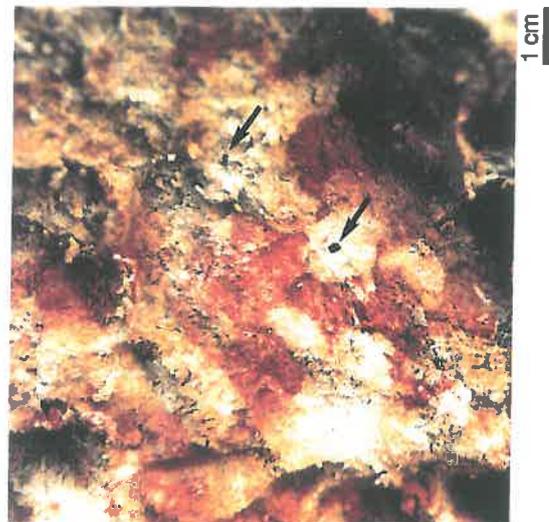


Photo 4 : Podzol (station SE 9). Coupe horizontale vers 120 cm de profondeur (horizon B₁ G_{0/r}) montrant deux pores verticaux d'origine racinaire, entourés par un matériau sableux gris blanchâtre.



Photo 5 : Planosol (savane de Corossony). Coupe verticale entre 140 et 170 cm de profondeur. Vue de détail de pores tubulaires verticaux d'origine racinaire à gaine bleutée traversant l'horizon sablo-argileux rougeâtre BG_{0/r}.

De nombreuses formes sableuses décolorées (planche 1), verticales, sont d'autre part observées dans les horizons argilo-sableux des planosols qu'elles traversent de part en part. Elles sont de taille importante, de quelques cm à plusieurs dizaines de cm, et s'apparentent à des glosses ou à des entonnoirs. Leur génèse, compte tenu de leur tracé, ne paraît pas attribuable à la seule action de l'hydromorphie; parallèlement à l'élimination du fer, il semble se surimposer une dégradation des minéraux argileux. Des processus évolutifs agressifs, en liaison probable avec d'anciens passages racinaires, pourraient être à l'origine de ces trainées blanches; elles semblent d'autre part constituer des **chemins préférentiels d'écoulement**.

Les valeurs de porosité mesurées (mesures sur blocs paraffinés et sur cylindres de 100 cm^3) sur les sols du site oscillent entre 40 et 50%, avec notamment dans les horizons spodiques (poches sableuses) des valeurs plus faibles de l'ordre de 30% (les densités apparentes sèches sont comprises entre 1.3 et 1.7 suivant les matériaux). Il est difficile de relier directement ces valeurs de porosité totale aux propriétés hydriques des sols. Les observations morphologiques réalisées n'ont permis de déceler une continuité porale qu'au niveau des macropores d'origine racinaire.

Une analyse des spectres de porosité (porosimétrie au mercure) et des courbes de désorption d'eau à l'échelle de mottes et de cylindres de 100 cm^3 , souligne la continuité du passage des sols ferrallitiques aux podzols (GRIMALDI et al., 1989). Le spectre de porosité des matériaux ferrallitiques a une allure bimodale, soulignant l'existence de deux niveaux d'organisation distincts (particules d'argile et particules de sable enrobées d'argile), puis il devient unimodal par atténuation et disparition du mode associé aux particules d'argile. Cette variation devient plus brutale au sein des horizons sableux du podzol: le spectre de porosité est alors très étalé. La variation continue des organisations entre les sols ferrallitiques et les podzols est ainsi précisée. Les spectres de porosité, comme les courbes de désorption d'eau, apparaissent moins variables pour les matériaux ferrallitiques que pour les horizons spodiques du podzol.

L'importante variabilité des organisations pédologiques du podzol, constatée sur le **plan morphologique** est également confirmée sur le **plan poral**. Il reste à connaître son incidence sur les transferts hydriques. On peut s'attendre en particulier, à constater une perturbation (ralentissement?...) de l'infiltration de l'eau au niveau des horizons spodiques du podzol.

4.2. Expression morphologique de l'hydromorphie

L'observation des profils, complétée ponctuellement par les sondages, signale l'existence de signes morphologiques probablement révélateurs d'hydromorphie. Ces observations, et les hypothèses qu'elles sous-tendent sur l'action de la nappe, ne peuvent être confirmées qu'après avoir analysé avec précision les relevés piézométriques (Chapitre 3).

Les nombreuses études pédologiques préalables au drainage, réalisées en métropole, ont montré cependant qu'il existe souvent une bonne corrélation entre la profondeur d'apparition, le contraste des signes morphologiques d'hydromorphie et le comportement hydrique du sol (FAVROT et al., 1976). Le fer, avec ses changements d'état, et la matière organique, suivant sa forme et son abondance, sont les éléments qui apportent le plus d'informations sur les manifestations d'engorgement. Toutefois, en ce qui concerne le fer, et lorsque des processus pédogénétiques agressifs (podzolisation) s'associent ou se surimposent à l'hydromorphie, les critères morphologiques visibles traduisent alors beaucoup plus des conditions de mobilisation

ou d'immobilisation du fer, que la seule permanence de l'excès d'eau (VIZIER, 1984). Cet auteur (VIZIER, 1974) insiste sur le fait que ces caractères morphologiques peuvent être considérés comme des indicateurs des régimes hydriques, à condition de pouvoir faire la part des caractères résultant de l'évolution actuelle de ceux découlant d'une évolution antérieure.

Nous n'avons pas, pour notre part, procédé à une étude fine de la matière organique et des différents états du fer. Nos observations font essentiellement référence aux travaux de TURENNE (1977).

Les formes de l'hydromorphie varient selon la texture des horizons. On peut d'autre part identifier sur notre site trois groupes de situations suivant le type d'engorgement.

a) En premier lieu, se distinguent les horizons rarement ou jamais affectés par un engorgement; le sol présente des teintes uniformes ocre ou jaunâtre qui ne dénotent probablement pas de ségrégation particulière du fer. Il s'agit des horizons supérieurs des sols ferrallitiques.

b) Les horizons situés dans la zone de battement de la nappe (engorgement temporaire) sont largement représentés sur le site. Pour les matériaux sableux des parties supérieures des podzols et planosols, le fer est certainement mobilisé puis entraîné avec les mouvements de la nappe. Il en résulte un blanchiment plus ou moins net et épais selon le type de sol. Signalons cependant que ce blanchiment ne peut être uniquement imputable à l'excès d'eau, d'autres processus pédogénétiques peuvent jouer un rôle sur les mécanismes d'appauvrissement en fer. Sur les podzols, le fer entraîné précipite partiellement en profondeur et doit participer à la cimentation de l'aliol. Pour les matériaux argileux ou argilo-sableux, des podzols, des planosols et des sols hydromorphes, on observe un bariolage (gley oxydé) caractéristique gris, ocre et rougeâtre, ponctué généralement de nodules ferrugineux rouge violacé plus ou moins indurés. Sur les sols ferrallitiques, ces matériaux sont marqués par des taches jaune ocre.

c) L'engorgement persistant avec submersions prolongées se marque, sur les sols hydromorphes, par une superposition de gley réduit et gley oxydé pour les matériaux de texture fine, un blanchiment des horizons sableux et par une accumulation plus ou moins importante de matière organique (anmoor). Ces horizons humifères sont d'autant plus épais et riches en matière organique que l'excès d'eau semble prolongé: plus on se rapproche du centre des thalwegs et plus l'épaisseur des horizons humifères augmente.

4.3. Caractéristiques spécifiques des principaux sols

Un certain nombre de caractéristiques, propres à chacun des quatre principaux types de sols, sont décrites ci-dessous. Pour chacun de ces sols, un exemple de profil, correspondant à une des stations de mesure hydrique, nous permet de détailler leurs principaux traits morphologiques. Une fiche de sol illustre cette description. La totalité des fiches de sol est rassemblée en Annexe 2.

4.3.1. Les sols ferrallitiques (station SE4)

La texture est sablo-argileuse dès la surface (15 à 20% d'argile dans les horizons A₁₁, A₁₂, B₁₁, B₁₂, B₁₃) et jusqu'à l'argile imperméable (60% d'argile: horizon IIC) qui apparaît vers 370 cm de profondeur (à partir de la surface). Entre 250 cm et 320 cm (horizons C₁₁ et C₁₂), on note cependant une diminution sensible de la teneur en argile, qui est comprise entre 10 et 12% (cf profil granulométrique en annexe).

Du point de vue morphologique la couleur d'ensemble est brun à jaune-ocre (planche 2). On note dès 50 cm de profondeur la présence de ponctuations millimétriques rouges qui augmentent en taille et en nombre avec la profondeur. Elles s'organisent parfois en trainées bordées d'une zone plus claire où les racines semblent plus nombreuses. Le profil est marqué par la présence de racines, particulièrement nombreuses dans les 120 premiers cm. La porosité est importante; de nombreux pores fins traversent les agrégats. La structure est polyédrique. Lors de l'ouverture du profil, en pleine saison sèche 1987, le premier mètre de sol est apparu particulièrement sec et affecté de nombreuses fissures verticales.

Du point de vue chimique les teneurs en fer sont importantes: 3 à 5 % sur l'ensemble du profil, avec un maximum de 6,4 % qui est atteint vers 200 cm dans un matériau sablo-argileux à nodules (horizons B₁₂ et B₁₃). Le rapport fer libre/fer total oscille entre 60 % dans l'argile profonde (horizon IIC) et 90 % dans l'horizon à nodules.

Fiche de sol : Station SE4 - sol ferrallitique conservé (Fig. 2-9).

Topographie: épaulement de la barre; altitude: 6,56 m.

Description du profil (profondeurs en cm): profil ouvert jusqu'à 280 cm de profondeur, sondage à la tarière au-delà.

- A_p 0-20 : Sableux à sablo-argileux, moyennement organique, brun gris. Structure polyédrique. Microfissures. Compact à la base de l'horizon (travail du sol). Très nombreux pores fins traversant les agrégats. Racines très nombreuses. Transition progressive.
- A₁₁ 20-50 : Sablo-argileux, peu organique, brun. Structure à débit polyédrique. Microfissures. Compacté par le travail du sol au sommet de l'horizon. Très poreux. Racines très nombreuses. Transition ondulée sur 5 cm.
- A₁₂ 50-115: Sablo-argileux, brun jaune puis jaune orangé. Structure polyédrique. Microfissures. Quelques petits (3 à 5 mm) volumes rouges. Très poreux. Racines très nombreuses. Présence de quelques gros quartz. Transition ondulée sur 5 cm.
- B₁₁ 115-190 : Sablo-argileux, jaune ocre. Trainées rouges violacées, bordées par une zone décolorée gris jaune. Volumes rouges plus ou moins indurés très denses à la base. Nodules ferrugineux friables à cœur violacé auréolé d'ocre. Racines plus nombreuses au sein des zones grises et porosité plus importante. Bien structuré.
- B₁₂ 190-220 : idem avec nodules rouges violacés indurés et plus nombreux. Limite ondulée.
- B₁₃ 220-250 : Disparition des nodules et réseau très dense de volumes rouges. Bien structuré et poreux. Limite brutale avec l'horizon sous-jacent.
- C₁₁ 250-320 : Sableux, gris blanchâtre. Quelques volumes rouges décolorés.

C₁₂ 320-370 : Sablo-argileux à argilo-sableux, rougeâtre avec volumes gris blanchâtres. Limite brutale et ondulée. La transition avec l'horizon sous-jacent s'effectue par l'intermédiaire d'un lit argileux gris de 2 à 3 cm d'épaisseur à volumes rouges. Nombreux cailloux et graviers.

IICG_r 370-530 : Argile grise. Volumes jaune ocre et rouges. Devient gris bleu en profondeur. Fragments de fossiles cylindriques de 2 cm de hauteur et 5 mm de diamètre (non identifiés).

IIIR 530-? : Arène gris blanchâtre à gros quartz. Altération du socle.

* Variantes et stations rattachées à ce type de sol :

Station SE3 - topographie : haut de versant; altitude: 5,04 m; profil en Annexe 2. Horizons sableux C absents et coloration générale plus claire. A 300 cm argile bariolée grise à volumes rouges jaunes et blanchâtres. Gris bleuté en profondeur; à 390-440... altération du socle.

* Type génétique voisin : **sol ferrallitique dégradé**. Sol de transition entre sols ferrallitiques conservés et sols à caractères planosoliques.

Station SE2 - topographie : milieu de versant; altitude: 4,15 m; profil en Annexe 2. Situation topographique à drainage externe plus défavorable. Enrichissement en argile plus proche de la surface (150 cm) et s'accroît très rapidement (55% à 280 cm de profondeur). Couleur d'ensemble plus claire. A 380 cm altération du socle.

Station SE14 - même topographie; altitude: 5,31 m; pas de profil.

4.3.2. Les podzols (station SE7)

La texture est très sableuse dans les horizons A₁ et E (< 3% d'argile), puis sablo-argileuse entre 90 et 150 cm de profondeur dans l'horizon B₁ (15 à 20% d'argile). Entre 190 et 360 cm, dans les horizons C, la texture est globalement sableuse (5 à 11% d'argile).

Le profil est morphologiquement très contrasté (planche 2). Entre 50 et 150 cm les variations latérales sont extrêmement rapides et importantes (Fig. 2-9) : à l'échelle du profil et suivant la face observée, certains horizons peuvent être présents ou absents (niveau sablo-argileux bariolé situé entre 175 et 190 cm de profondeur), ou être interrompus ponctuellement (poche sableuse grise dans l'horizon Bh₂Fe).

Les horizons spodiques, typiques des podzols, sont successivement identifiés, avec notamment un horizon beige (Bh₁), sablo-argileux, compacté (densité apparente sèche = 1.8 et porosité totale = 30%). Il repose sur un horizon Bh₂Fe induré, brun, à sable fin, aux faces des prismes recouvertes par un enduit organique marron foncé, tapissé de racines. Cet horizon est parfois traversé par des poches de l'horizon supérieur Bh₁ qui se prolongent, dans l'horizon B₁, par une trainée sableuse grise, parfois occupée par un chevelu racinaire extrêmement dense (planche 1). L'horizon B₁, très hétérogène est ponctué par de très nombreux volumes rouges.

Entre 150 et 190 cm, apparaissent des sables grossiers quartzeux, de forme anguleuse et irrégulière, souvent répartis en amas. Ils sont accompagnés de sables usés, arrondis et de muscovite. Ils sont agglomérés par un enduit jaunâtre et ménagent de larges vides. Dans les horizons C, à dominante sableuse et de tonalité ocre au gley typique, les pores, de forme tubulaire, occupés pour certains par d'anciennes racines en décomposition, sont soulignés de rouille et entourés par une zone plus compacte qui assure leur pérennité.

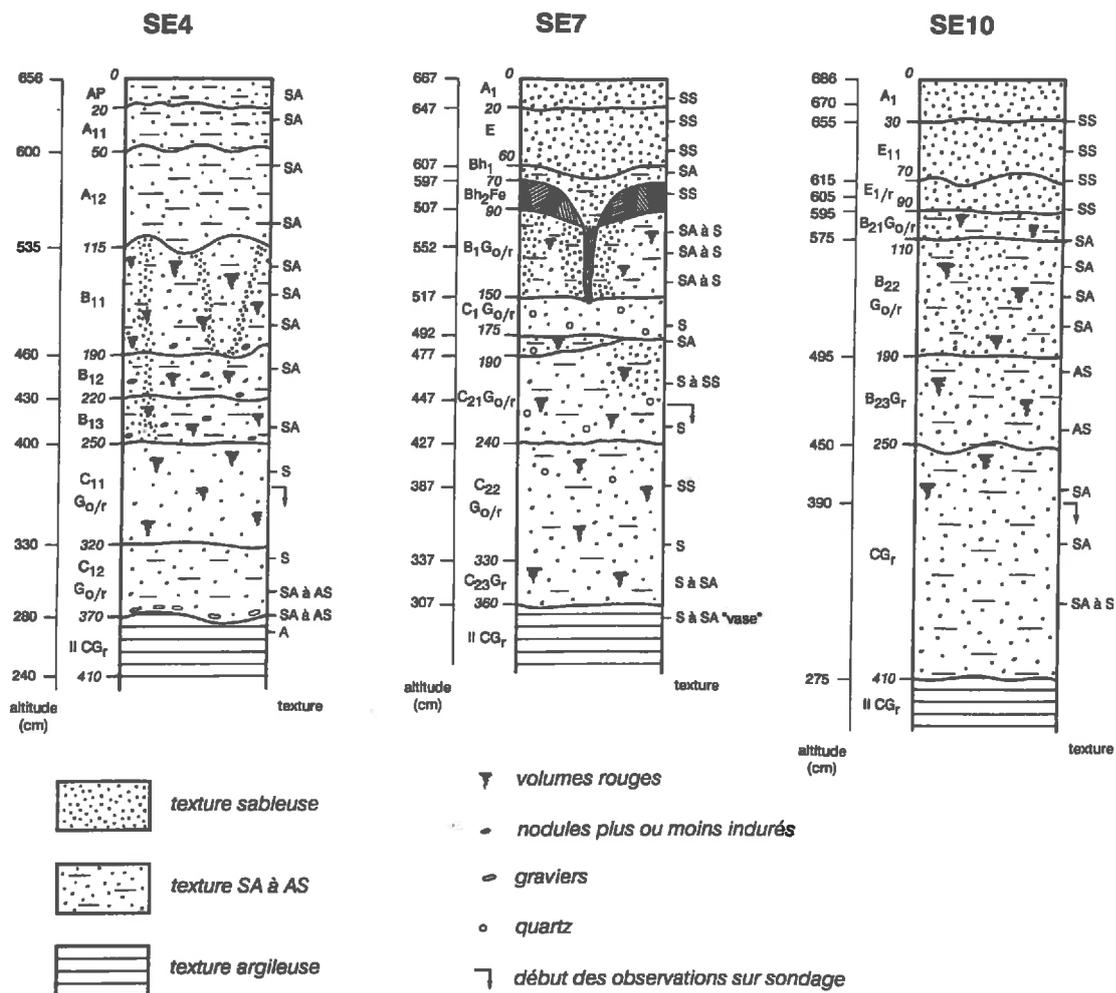


Figure 2-9 - Profils caractéristiques : - des sols ferrallitiques conservés (station SE4)
- des podzols (station SE7)
- des planosols jaunes (station SE10)

Fiche de sol : Station SE7 - Podzol de nappe (Fig. 2-9).

Topographie: sommet de barre; altitude: 6,62 m.

Description du profil: (profil ouvert jusqu'à 220 cm de profondeur puis sondage à la tarière).

A₁ 0-20 : Sableux à sable fin, gris. Structure particulaire. Nombreuses racines. Très poreux.

E 20-60 : Sableux, gris clair à blanchâtre. Structure particulaire. Nombreuses racines. Poreux. Limite nette mais très ondulée.

Bh₁ 60-70 : Sableux, beige. Alternance de minces lits beiges et blanchâtres. Structure particulaire. Plus compact à sa base. Racines peu nombreuses. Poreux. Limite nette, ondulée.

Bh₂ Fe 70-90 : Sableux à sablo-argileux, marron. Irrégulièrement cimenté en alios plus ou moins induré. Structure prismatique (gros prismes de 20 cm); faces des prismes recouvertes de dépôts organiques brun noirâtres, tapissées de racines. Sous-structure particulaire. Porosité réduite dans les zones indurées; petits pores gainés de rouille. Horizon parfois traversé par des poches de l'horizon Bh₁ qui se prolongent dans l'horizon B₁. Limite nette mais souvent interrompue.

B₁G_{0/r} 90-150 : Sablo-argileux, larges poches grises et poches de teinte jaune ocre. Les poches jaunes sont plus argileuses, à volumes ocre, puis à partir de 115 cm volumes rouges qui s'intensifient et se durcissent en profondeur. Les poches et trainées grises sont associées aux vides et aux racines. Structure prismatique. Poreux; pores gainés de rouille au sein des poches grises. Limite nette et ondulée.

C₁G_{0/r} 150-175 : Sableux, jaune ocre, rougeâtre. Quartz (3 à 5 cm), arrondis, friables, parfois agglomérés par un enduit jaunâtre. Nombreux micas et volumes gris.

C₂₁G_{0/r} 175-240 : Sableux, ocre. Racines. Poreux. Horizon localement remplacé par la succession d'un matériau sablo-argileux, bariolé rouge, gris et jaune, contenant quelques quartz, puis d'un matériau sableux grisâtre, à passées rougeâtres.

C₂₂G_{0/r} 240-330 : Sableux, jaune ocre. Volumes rouge vif et volumes gris. Quelques quartz. Vers 280 cm, les volumes rouges deviennent rares.

C₂₃G_{0/r} 330-360 : Sableux à sablo-argileux, gris verdâtre. Micas et quelques volumes rouges.

IICG_p 360-390.: Sablo-argileux puis argilo-sableux, gris bleuté (vase).

* Variantes et stations rattachées à ce type de sol :

Station SE6 - topographie: sommet de barre; altitude: 6,67 m; profil en Annexe 2. Plus sableux que le précédent. Horizon Bh₂Fe beaucoup plus épais et peu induré. Poches grises dans l'horizon B₁G₀ absentes.

Station SE9 - topographie: sommet de barre; altitude: 6,72 m; profil en Annexe 2. Sableux jusqu'à 110 cm puis sablo-argileux jusqu'à 300 cm. Sable gris puis bleu entre 300 et 390 cm. Horizon BG₀ plus épais, de teinte jaune ocre puis gris blanchâtre. Argile gris bleuté entre 390 et 550 cm de profondeur. Lentilles sableuses entre 450 et 550. Altération du socle (sable grossier gris blanchâtre à 550 cm.

4.3.3. Les planosols (station SE10)

Les différences essentielles avec les podzols sont liées à l'absence d'horizons spodiques (planche 1) et à la présence vers 100 cm de profondeur, d'un changement textural marqué: on passe de moins de 5% d'argile dans les horizons A₁, E₁₁, E₁₂, à environ 20%, à 110 cm, dans l'horizon B₂₁G₀. Il existe, ici encore, de très nombreux volumes rouges qui s'organisent en trainées verticales avant de disparaître vers 3 m de profondeur. Deux types de planosols ont été distingués suivant l'intensité de la dégradation des horizons sableux E₁₁ et E₁₂. Cette dégradation se traduit par la couleur: en position aval, les horizons éluviaux sont blancs et l'on parle de planosol blanc (station SE17), en haut de versant, les horizons éluviaux sont de teinte jaune, il s'agit alors de planosol jaune, à dégradation moins forte (stations SE5, SE10, SE15..).

Fiche de sol : Station SE10 - Planosol jaune (Fig. 2-9).

Topographie: sommet de barre; altitude: 6,86 m.

Description du profil: (profil ouvert jusqu'à 280 cm de profondeur puis sondage à la tarière). Une des faces du profil présente des caractères proches des podzols. Les trois autres faces sont par contre du type planosol jaune, La description suivante est celle du planosol jaune.

Transect T1

Transect T2

Transect T3

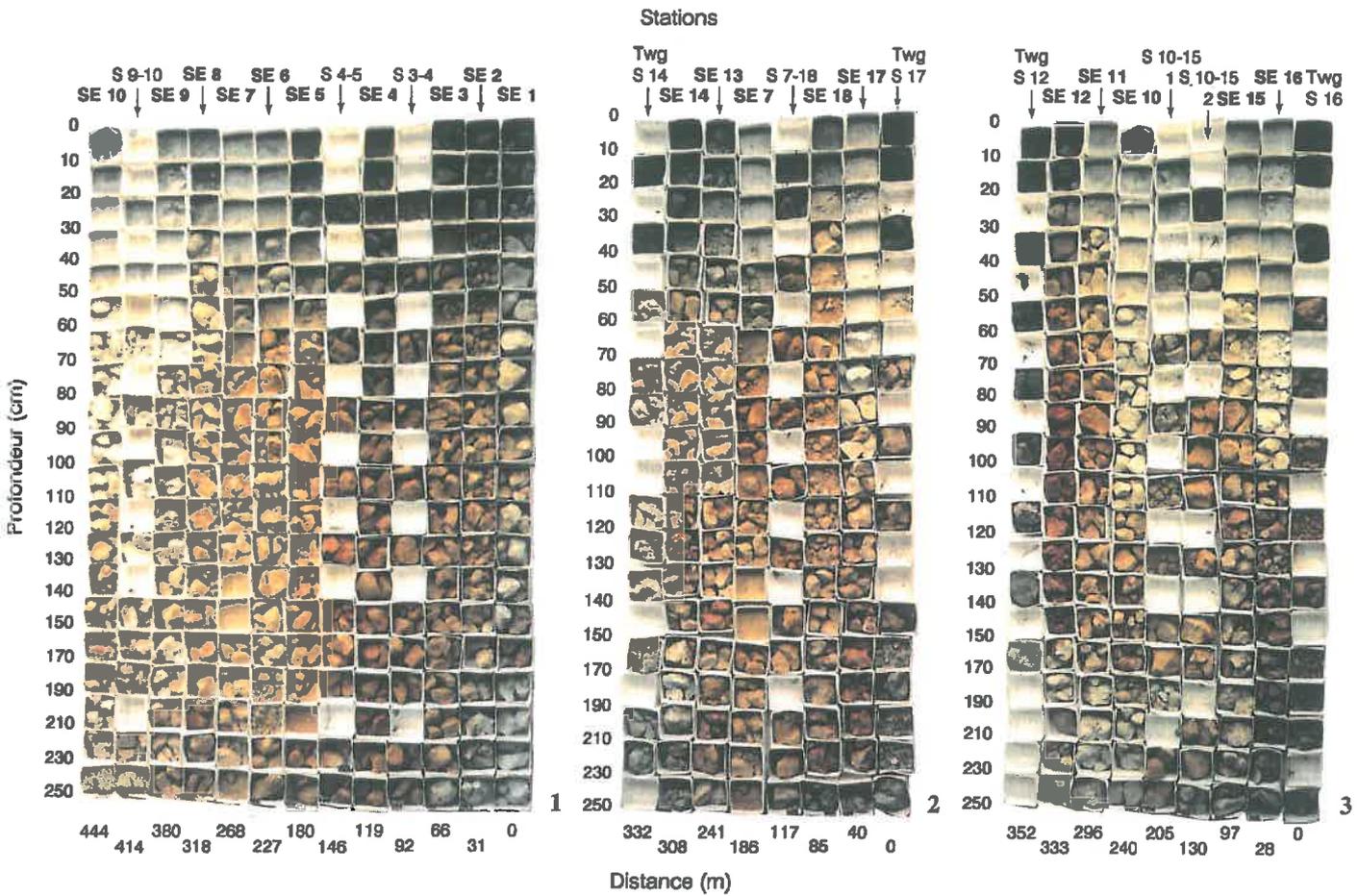
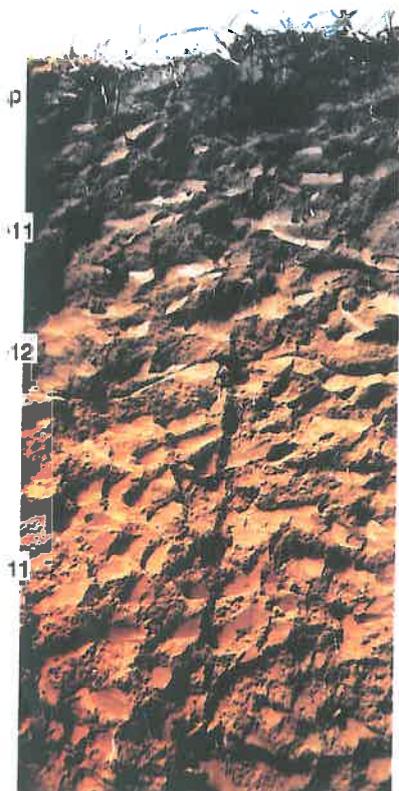
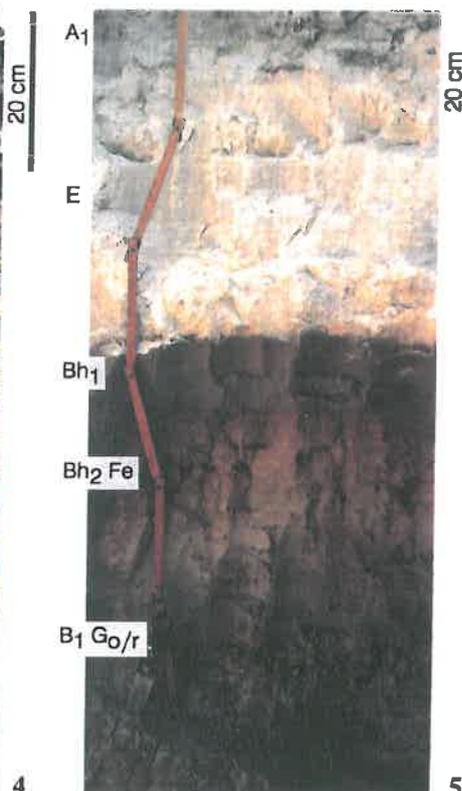


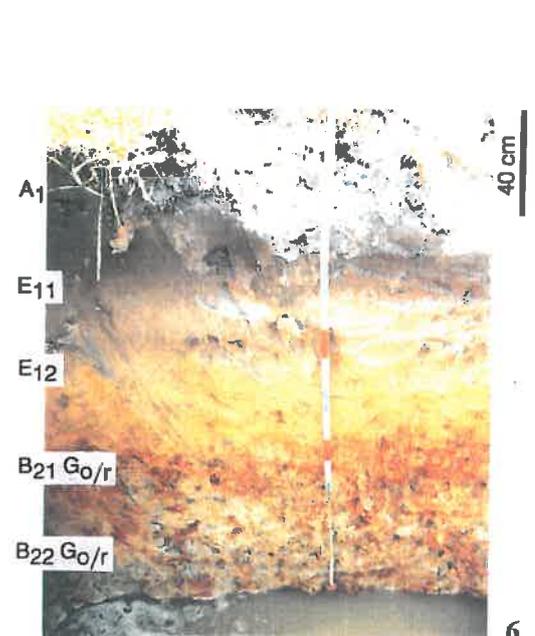
Photo 1 à 3 : "Pédocomparateurs" rassemblant les échantillons prélevés à la tarière sur l'ensemble des stations et des points de sondages des trois transects de mesure.



Station SE 4 - Sol ferrallitique



Station SE 7 - Podzol



Station SE 10 - Planosol

Photos 4 à 6 : Profils représentatifs des trois principaux types de sol.

- A₁** 0-30 : Sableux à sable fin, gris clair, peu humifère. S'éclaircit très rapidement en profondeur. Structure particulaire à polyédrique subanguleuse fine. Très poreux. Racines nombreuses. Limite ondulée.
- E₁₁** 30-70 : Sableux, beige puis jaune clair en profondeur. Volumes jaunes. Structure particulaire. Racines nombreuses, gainées de rouille (contraste faible). Porosité fine. Limite progressive et ondulée.
- E₁₂** 70-90 : Sableux, jaune clair, puis jaune en profondeur. Volumes blancs au sommet. Structure particulaire ou finement polyédrique. Très nombreux pores racinaires gainés de rouille. Racines nombreuses. Transition nette sur environ 3 cm.
- B_{21G₀/r}** 90-110 : Sableux à sablo-argileux, jaune ocre. Volumes rouges et volumes jaunes. Gains racinaires rouille moins contrastées. Nombreux pores millimétriques. Racines nombreuses.
- B_{22G₀/r}** 110-190 : Sablo-argileux à argilo-sableux, micacé, bariolé, ocre jaune à trainées beige jaunâtre dans la partie supérieure de l'horizon, puis ocre, rougeâtre à trainées gris bleuté verticales (3 à 4 cm de largeur), associées aux racines ou aux anciens vides racinaires. Volumes rouges légèrement indurés et auréolés d'ocre. Structure à gros éléments prismatiques (50 à 100 cm), séparés par des entraînements sableux et de nombreuses racines. Pores tubulaires d'origine racinaire. Limite brutale (2 à 3 cm).
- B_{23G_r}** 190-250 : Argilo-sableux, bariolage rouge et gris plus contrasté. Racines nombreuses. Trainées bleues autour des racines. Volumes rouges délavés. Structure plus nette. Limite ondulée.
- CG_r** 250-410 : Sablo-argileux, puis sablo-argileux à sableux vers 370 cm. Fond de teinte rouge à volumes blanchâtres, puis rougeâtre à 300 cm, et gris bleuté à 320 cm. Très micacé, fluant, baigné par la nappe. Transition progressive.
- IICG_r** 410-600 : Sablo-argileux, puis rapidement argileux, gris bleuté. Fluant puis compact.
- à 600 cm de profondeur altération du socle (arène blanchâtre).

*** Variantes et stations rattachées à ce type de sol:**

Station SE1 - topographie: bas de pente; altitude: 3,00 m; profil en Annexe 2. Changement textural vers 90 cm de profondeur. Horizons sablo-argileux à argilo-sableux (B_{21G₀ et B_{22G₀) épais (170 cm d'épaisseur), reposant directement sur l'altération du socle à 250 cm de profondeur.}}

Station SE5 - topographie: sommet de barre; altitude: 6,62 m; profil en Annexe 2. Texture globalement plus sableuse. L'horizon B₁ est plus épais (50 cm). L'horizon B_{21G₀ repose sur une succession d'horizons (C_{1G₀, C_{2G_r, C_{3G_r, C_{4G_r) sableux à faiblement sablo-argileux (moins de 10% d'argile), d'épaisseur totale 170 cm. L'altération du socle est localisée à 530 cm de profondeur.}}}}}

Station SE8 - topographie: sommet de barre; altitude: 6,55 m; profil en Annexe 2. idem que précédent.

Station SE11 - topographie: haut de pente faible; altitude: 6,56 m; pas de profil.

Station SE12 - topographie: pente faible; altitude: 5,75 m; pas de profil.

Station SE15 - topographie: pente faible; altitude: 6,17 m; pas de profil.

Station SE16 - topographie: bas de pente; altitude: 4,70 m; pas de profil.

Station SE18 - topographie: haut de pente; altitude: 5,36 m; pas de profil.

* Type génétique voisin : **planosol blanc - Sol de bas de pente.**

Station SE17 - altitude: 4,28 m; pas de profil. L'horizon éluvial jaune est remplacé par un horizon sableux blanc, souvent épais, descendant jusqu'à la discontinuité texturale.

4.3.4. *Les sols hydromorphes alluviaux*

Aucun profil n'a été ouvert dans les thalwegs du site expérimental pour caractériser ce type de sol. La description figurant ci-dessous est une synthèse des sondages effectués sur le site et des profils, ouverts dans la savane de Corossony, à proximité de la barre, dans des situations topographiques identiques (FAVROT et al., 1987).

Les sols développés dans les bas-fonds présentent une morphologie bien différente de celle des sols précédents. Les horizons de surface sont riches en matière organique (>3%), avec souvent présence d'un Anmoor dans les zones les plus affectées par l'engorgement. La texture des horizons de surface (A₁, E), dont l'appréciation tactile est rendue difficile par la richesse en matière organique, évolue du pôle sableux vers le pôle argileux, lorsque l'on passe des bordures vers le centre des thalwegs. Les horizons profonds sont constitués soit par des sables colluvionnés sur les bordures des barres, soit par des niveaux argileux bariolé. La couleur d'ensemble, gris à blanc, révèle la présence d'un gley peu profond.

Fiche de sol: sol hydromorphe alluvial - Sondage S17T, effectué à la tarière dans le thalweg nord-est, au niveau de la station SE17.

AH 0-30 : Limon argileux-sableux, noirâtre. Structure grumelleuse. Nombreuses racines. Poreux. Transition régulière sur 5 cm.

EG₀ 30-55 : Sableux à sablo-argileux, gris avec entraînements organiques bruns. Racines nombreuses, souvent gainées de rouille. Structure continue. Transition nette.

BG_p 55-160 : Sableux, beige à volumes jaunes. Puis fond brun clair passant à gris. Racines assez nombreuses. Pores tubulaires verticaux.

IICG_p 160-240 : Argilo-sableux passant rapidement à argileux, gris bleuté. Structure peu apparente, généralement développée en gros éléments prismatiques. Racines peu nombreuses. Moyennement poreux, à pores tubulaires verticaux. Transition avec l'altération du socle par l'intermédiaire d'un niveau mince (10 cm) de sable fin, micacé.

à 240 cm : Arène blanchâtre de l'altération du socle.

4.4. Conclusion

Les différentes mesures et observations pédologiques permettent de distinguer deux grands groupes morphologiques. Le premier groupe, constitué par les sols ferrallitiques à dégradation plus ou moins prononcée, présente des **organisations verticales à variations progressives et continues**. Le second groupe, rassemble tous les autres sols, podzols, planosols et sols hydromorphes alluviaux. Il est caractérisé, par une **variabilité verticale des organisations beaucoup plus rapide et marquée**. On constate cependant, pour ce second ensemble, qu'à côté de ces organisations très différenciées (changements texturaux plus ou moins rapides, horizons compactés, poches sableuses, lentilles argileuses, horizons spodiques ...), il existe un réseau de pores et de chenaux important, qui semble autoriser des transferts hydriques verticaux rapides.

5. CONCLUSION

Le site choisi est **géomorphologiquement et pédologiquement représentatif** de l'un des types, très répandu, de barres de la plaine côtière ancienne sableuse. Il est encadré par deux exutoires convergents et fonctionnels. Le relief est suffisamment marqué (la dénivellée entre le sommet et le point le plus bas est de 4.70 m) pour que l'on puisse distinguer trois zones, le sommet, les versants et les bas-fonds.

Un **niveau imperméable**, sensiblement plan à l'échelle de la barre, est localisé avec précision sur l'ensemble du site. Il est surmonté par **1 à 4 m de matériaux sablo-argileux à argilo-sableux** à nombreuses passées sableuses et argileuses. Ces matériaux sont marqués par une porosité importante et par de nombreux critères morphologiques témoins d'une hydromorphie plus ou moins permanente.

Les 80/120 premiers cm, à dominante sableuse, témoignent d'une **pédogénèse passée ou récente particulièrement intense**. Bien que les organisations pédologiques identifiées soient, d'une façon générale, à variations progressives et continues, il est possible de distinguer quatre grandes unités de sols, organisées en système à l'échelle de l'interfluve étudié. Elles occupent des positions topographiques remarquables qui sont le reflet de la distribution des sols au sein des paysages des savanes sableuses. Si l'on excepte les sols ferrallitiques, tous les sols sont caractérisés par la présence d'une **discontinuité texturale plus ou moins nette et tranchée**.

Les organisations pédologiques précédentes sont suffisamment différenciées pour que l'on puisse envisager qu'à chacune d'entre elle soit associé un comportement moyen hydrique distinct. Afin de poursuivre l'étude des relations existant entre les sols, le paysage et la dynamique hydrique, il nous faut donc à présent étudier les transferts hydriques existant au sein de la zone saturée.

Chapitre 3

Caractérisation hydrologique et hydrique

CARACTERISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRIQUE

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous nous proposons de décrire les méthodes d'acquisition et les résultats des mesures hydrologiques et hydriques. La pluie a fait l'objet de mesures précises sur le site, contrairement à l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui a été estimée à partir des valeurs régionales.

La caractérisation de la zone saturée est effectuée à l'aide de piézomètres. Les relevés pluviométriques et piézométriques, effectués suivant des pas de temps décennaires et horaires, doivent permettre la mise en évidence des principaux traits de la dynamique de la nappe. La caractérisation de la zone non saturée, réalisée à l'aide d'un humidimètre à neutrons, permet d'estimer les parts relatives prises par la dynamique hydrique en saturé et en non saturé dans le fonctionnement hydrique global de la barre. Un test d'infiltration, conduit sur podzol (station SE7), avec simulation en saison sèche d'une pluie de 190 mm et utilisation simultanée de la piézométrie, l'humidimétrie neutronique et la tensiométrie, nous conduit à tester le rôle éventuel joué par les horizons spodiques et la discontinuité texturale, dans la formation d'une nappe perchée.

L'emplacement des stations de mesure résulte de deux impératifs. Le premier est de pouvoir apprécier le fonctionnement hydrique à l'échelle de la barre; le second impératif consiste à caractériser les principales zones topographiques et les grands types de sols.

Après avoir présenté les méthodes expérimentales et le dispositif de mesure, nous abordons la description et l'analyse des résultats expérimentaux.

1. METHODES EXPERIMENTALES ET DISPOSITIF DE MESURE

1.1. Pluie et ETP

Un pluviomètre, installé à proximité des bâtiments de la ferme, à une distance de 500 m du site expérimental, permet de mesurer la pluviosité journalière. Des relevés horaires, ont d'autre part pu être effectués, épisodiquement, à l'aide d'un pluviographe à augets basculeurs, relié à une centrale d'acquisition (Fig. 3-1). Ce pluviographe est installé sur le site, près de la station SE15 (Fig. 3-4). Des problèmes de fonctionnement ne nous ont pas permis d'effectuer des relevés durant de longs épisodes.

En ce qui concerne l'ETP, étant donné l'absence de mesures sur le site et, au vu des quelques références bibliographiques, qui ne nous permettent pas de distinguer une valeur d'ETP pour la saison des pluies et une valeur pour la saison sèche, nous avons choisi une valeur d'ETP journalière unique sur l'année, soit 4 mm. Cette valeur est vraisemblablement légèrement sous-estimée pour la saison sèche. Aussi, nous garderons en mémoire que cette valeur est choisie avec une incertitude de 1 à 2 mm suivant la saison.

1.2. La piézométrie

Deux types de piézomètres, différant par leur technique de relevé et leur mode de mise en place, ont été utilisés. Pour chaque type de piézomètre, des tubes de différentes longueurs nous ont permis d'apprécier l'influence de la discontinuité texturale sur les fluctuations de la nappe. Le niveau de l'eau mesuré dans le tube indique la surface libre de la nappe, point où la pression est nulle (à la pression atmosphérique près).

Les piézomètres à relevés manuels, appelés par la suite piézomètres manuels, ont été implantés en force dans un forage. Il s'agit de tubes PVC de 71 mm de diamètre extérieur, crépinés sur une hauteur de 50 cm (Fig. 3-1). La base du tube est obturée pour empêcher que la terre y pénètre. Les relevés sont effectués avec un mètre souple, à l'extrémité duquel est fixé un flotteur. La précision de lecture est de l'ordre du centimètre.

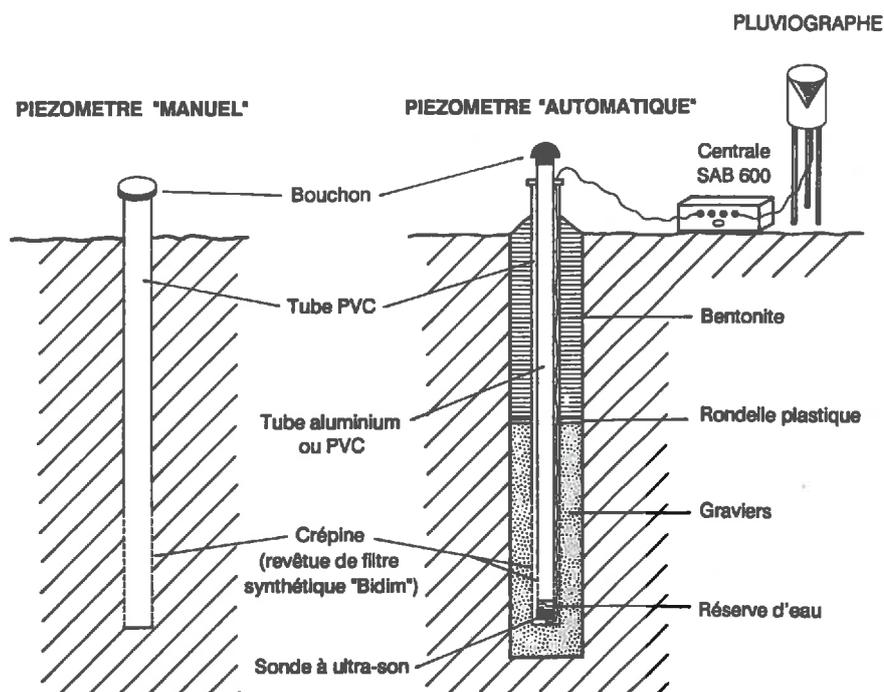


Figure 3-1 - Schémas des deux types de piézomètres utilisés.

Un piézomètre à relevés automatiques, dit piézomètre automatique, est constitué de deux tubes emboîtés l'un dans l'autre (Fig. 3-1). Une sonde à ultra-sons (UST 540) est fixée à l'extrémité du tube intérieur (40 mm de diamètre). La base du tube extérieur (PVC de 71 mm de diamètre) est crépinée sur une hauteur de 50 cm et revêtue d'un filtre synthétique ("Bidim"), pour éviter le dépôt de particules fines opaques aux ultra-sons. Afin d'éviter le colmatage de la crépine, celle-ci est entourée de graviers. De la bentonite permet d'éliminer toute circulation (ascendante ou descendante) d'eau le long du tube externe. Une réserve permanente d'eau, située au contact de la partie émétrice de la sonde, qui doit être immergée en permanence,

assure le bon fonctionnement du piézomètre. La hauteur de la nappe est déterminée par le temps de parcours aller-retour des ultra-sons (ils sont réfléchis à l'interface air-eau et la vitesse de propagation du son dans l'eau est constante). Les mesures sont stockées dans une centrale d'acquisition (SAB 600 - CR2M). Chaque centrale peut gérer quatre piézomètres et un pluviographe.

La précision de mesure des piézomètres automatiques, indiquée par le constructeur, est inférieure au centimètre.

Des problèmes de fonctionnement, des deux centrales dont nous avons pu disposer, ne nous ont pas permis d'obtenir de façon continue la pluviométrie et la piézométrie.

La validité des mesures piézométriques a été testée pour, d'une part comparer le fonctionnement des deux types de piézomètres, et d'autre part pour vérifier la justesse des relevés.

L'incidence éventuelle du mode d'implantation sur les relevés a été testée sur quatre stations différentes: deux stations à relevés manuels (SE4 et SE10), équipées en 1986 par un piézomètre manuel installé sur le même principe que les piézomètres automatiques (gravier et bentonite), et deux stations équipées de piézomètres manuels et automatiques (SE7 et SE15). La comparaison a été faite sur 4 mois (11/86 à 02/87) dans le premier cas, et sur 9 mois (04/86 à 09/86 et 06/87 à 10/87) dans le second cas. Ainsi, la comparaison des courbes piézométriques obtenues sur SE7 et SE15 à l'aide des relevés horaires avec celles obtenues après interpolation linéaire d'après les relevés décennaires montre, entre le 1er mai et le 18 septembre 1986 (Fig. 3-2), la bonne correspondance d'ensemble des deux piézométries.

La justesse des mesures a, quant à elle, été vérifiée ponctuellement à l'aide des fosses pédologiques ouvertes lors de la caractérisation pédologique et des différents sondages à la tarière (mesure de la conductivité hydraulique à saturation, prélèvements...) réalisés à proximité des stations. Ainsi, le 27/02/85, des sondages effectués à proximité (à environ 2 m) des stations SE9, SE16 et SE17, ont révélé des écarts respectivement de 2, 1 et 2 cm entre la mesure piézométrique et celle effectuée dans le sondage.

D'une façon générale, les écarts constatés entre les différentes méthodes n'excèdent jamais 10 cm (en ne tenant pas compte des différences de cote topographique entre les deux points de comparaison) et sont généralement inclus dans une fourchette de ± 5 cm.

Les principaux risques de mauvais fonctionnement des piézomètres sont un éventuel colmatage de la zone crépinée et des écoulements le long du tube. Or aucune fente de retrait n'a été observée dans le faciès sableux Cosvine et de plus, la zone crépinée est souvent située dans des horizons à texture faiblement argileuse, ce qui réduit les risques de colmatage. Sur notre site le mode de pose n'a donc aucune incidence sur les mesures piézométriques.

1.3. Humidimétrie neutronique.

Les teneurs en eau volumiques P sont mesurées à l'aide d'un humidimètre à neutrons SOLO 20 (NARDEUX) (source Am-Be, détecteur à Hélium et tubes en alliage d'aluminium AG3). Six stations ont été équipées (SE1, SE2, SE4, SE5, SE7 et SE10). Les mesures sont effectuées tous les 10 cm, sur 165 cm de profondeur. Un réflecteur de neutrons est utilisé pour les mesures réalisées à 15 cm de profondeur. Les comptages de terrain sont traités à l'aide du logiciel AIDHYS (LATY et VACHAUD, 1986).

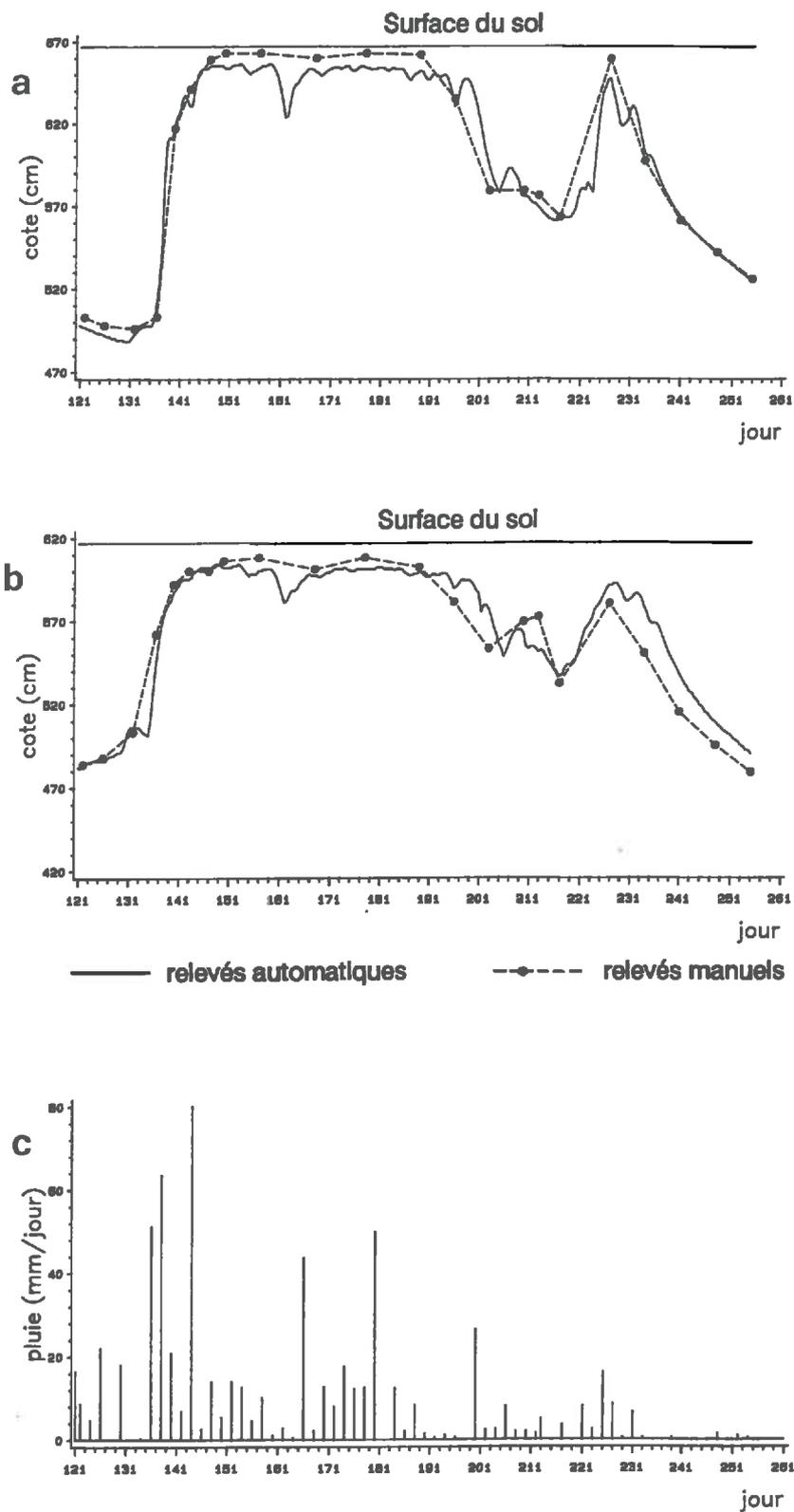


Figure 3-2 -
 Comparaison des piézomètres "manuels" et "automatiques" (piézomètres profonds).

Relevés du 1/05/86 au 18/09/86.

a) Station SE 7 sur podzol b) Station SE 15 sur planosol c) Pluviométrie journalière.

1.3.1. Corrections des comptages de terrain

La sonde est étalonnée par le constructeur pour inscrire mille impulsions dans l'eau libre. Les comptages de terrain sont multipliés par un facteur $1000/S$; S représentant la moyenne d'une série de cent comptages (en temps long) effectivement obtenus dans l'eau libre, soit $S = 1007,4$ avec $\sigma_n = 11,1$. Chaque campagne journalière de mesures est précédée de dix comptages de référence dans l'eau libre. On vérifie alors que leur moyenne est comprise dans l'intervalle $[S-2(S/10)^{1/2}; S+2(S/10)^{1/2}]$ (CATTAN, 1982).

La stabilité des mesures entre chaque tube de mesure est appréciée à l'aide du comptage étui. Le comptage étui moyen obtenu pour notre sonde est de 150. Tous nos comptages de terrain sont alors calculés en multipliant le comptage de terrain, moyenne de trois répétitions en temps long, par le ratio (rapport du comptage étui standard/comptage étui effectif).

1.3.2. Etalonnage

Les droites d'étalonnage sont obtenues par la méthode gravimétrique en s'appuyant sur la description des principaux matériaux mis en évidence (profils de sols en Annexe 2). Les mesures de densité apparente sont effectuées in situ (une fosse a été ouverte pour chaque station) par la méthode des blocs paraffinés ou des cylindres.

Trois points d'étalonnage ont été obtenus pour chaque profondeur: à l'installation des tubes (15/12/83) puis au cours d'une saison sèche (25/10/84) et d'une saison des pluies (19/04/88). Une droite d'étalonnage est obtenue par matériau élémentaire en corrélant les valeurs des comptages après correction et les teneurs en eau mesurées par gravimétrie pondérées par la densité apparente. La comparaison des droites de régression (TOMASSONE et al, 1983) nous autorise, lorsqu'elles ne sont pas significativement différentes, à calculer une droite de régression par groupe de matériaux. La cohérence de ces droites est par ailleurs vérifiée (Annexe 3) sur cinq tubes (SE1, SE4, SE5, SE7 et SE10) et pour quelques matériaux, après détermination des coefficients neutroniques d'absorption et de diffusion (méthode CEA-Cadarache).

Trois droites d'étalonnage distinctes sont établies pour les matériaux de surface ($z = 15$ cm). Les droites d'étalonnage, ainsi que l'écart-type sur les ordonnées à l'origine et les pentes, figurent en Annexe 3. Les équations des courbes d'étalonnage finalement obtenues sont les suivantes (θ en $\text{cm}^3/100\text{cm}^3$) :

horizons de surface ($Z = 15$ cm)

SE1	3 points	$\theta = 0.0784 N + 0.028$	$r^2 = 0.997$
SE2, SE4	5 points	$\theta = 0.0750 N - 1.520$	$r^2 = 0.935$
SE5, SE7, SE10	10 points	$\theta = 0.1241 N - 6.445$	$r^2 = 0.927$

Ces trois droites correspondent respectivement, aux planosols de bas de versant, aux sols ferrallitiques et aux horizons sableux des podzols et planosols du sommet.

horizons profonds ($Z \geq 25$ cm)

SE1 ($z \geq 25$ cm)	40 points	$\theta = 0.0696 N + 0.715$	$r^2 = 0.895$
SE2 ($z \geq 25$ cm)	30 points	$\theta = 0.0890 N - 6.620$	$r^2 = 0.975$

SE4 ($z \geq 25$ cm)	45 points	$\theta = 0.0784 N + 0.144$	$r^2 = 0.894$
SE5 ($25 \leq z \leq 65$)	15 points	$\theta = 0.0770 N - 0.274$	$r^2 = 0.895$
($75 \leq z \leq 165$)	25 points	$\theta = 0.0461 N + 11.801$	$r^2 = 0.630$
SE7 ($25 \leq z \leq 55$ et $95 \leq z \leq 145$)	40 points	$\theta = 0.0686 N + 2.788$	$r^2 = 0.896$
($65 \leq z \leq 5$)	12 points	$\theta = 0.0256 N + 23.618$	$r^2 = 0.414$
($155 \leq z \leq 165$)	5 points	$\theta = 0.0991 N - 2.465$	$r^2 = 0.945$
SE10 ($z \geq 25$ cm)	31 points	$\theta = 0.0806 N - 0.302$	$r^2 = 0.951$

Mis à part le podzol (SE5 et SE7) pour lequel l'hétérogénéité verticale des matériaux est soulignée, une droite d'étalonnage est obtenue par tube. Ce résultat confirme par ailleurs la forte différenciation latérale des organisations pédologiques précédemment signalée.

1.3.3. Validité des mesures

Les droites obtenues sur SE5 ($z \geq 75$ cm) et sur SE7 ($65 \leq z \leq 85$ cm) sont peu fiables ($r^2 = 0.630$ et 0.414). Pour SE7 il s'agit des horizons spodiques (horizons indurés). Toutefois, nous avons constaté, sur les trois cycles de mesures, une variation très faible des comptages tout au long de l'année, ce qui réduit le risque d'erreur.

L'erreur sur la mesure neutronique elle-même est faible, et dépend du comptage N. Comme $\Delta N/N = 100 \cdot (1/(40 \cdot N))^{1/2}$, relation fournie par le constructeur, que les comptages oscillent entre 150 et 550, l'erreur relative sur la mesure est donc proche de 1%.

L'erreur sur le calcul de θ , en revanche, n'est pas négligeable. BERTUZZI et al (1987) montrent sur un exemple que l'incertitude relative obtenue sur l'estimation de θ par l'équation d'étalonnage est comprise suivant la valeur de l'humidité volumique entre 9 et 16 $\text{cm}^3/100\text{cm}^3$. En supposant que l'on est proche de la normalité, au seuil de confiance de 5%, l'intervalle de confiance de la mesure est alors voisin de ± 3 à $\pm 4\%$.

1.4. Test d'infiltration

Le test a été conduit sur un anneau de 8 m^2 de surface (anneau de 1.6 m de rayon et 20 cm de hauteur, dont 10 cm enfoncés dans le sol), implanté sur podzol (station SE7). L'anneau est équipé d'un tube neutronique (165 cm de profondeur de mesure), de dix tensiomètres (T1 à T10 implantés respectivement à 15, 25, 40, 58, 70, 85, 100, 115, 130 et 145 cm de profondeur) et de trois piézomètres P1, P2 et P3 (crépinés respectivement à 210-250, 80-110 et 30-50 cm) (Fig. 3-3).

Le test est réalisé en fin de saison sèche. Seule la phase d'infiltration est suivie, des pluies survenues avant la fin du test nous ont empêché de suivre la phase de redistribution interne. On a apporté, sous charge variable, une lame d'eau de 190 mm (1.5 m^3) en deux apports. La disparition de la lame d'eau a été constatée 9h après le début de l'irrigation. Le couvert végétal du sol, continu et dense, permet d'éviter les remaniements de la couche superficielle lors des apports d'eau. La surface d'infiltration est recouverte par un film plastique pour supprimer toute évaporation.

L'instant t_0 se situe 30mn avant le début de l'irrigation et correspond aux relevés neutroniques et tensiométriques initiaux. De 0 (t_0) à 11 h les relevés tensiométriques et piézométriques sont effectués toutes les 30 mn et les relevés neutroniques sont horaires.

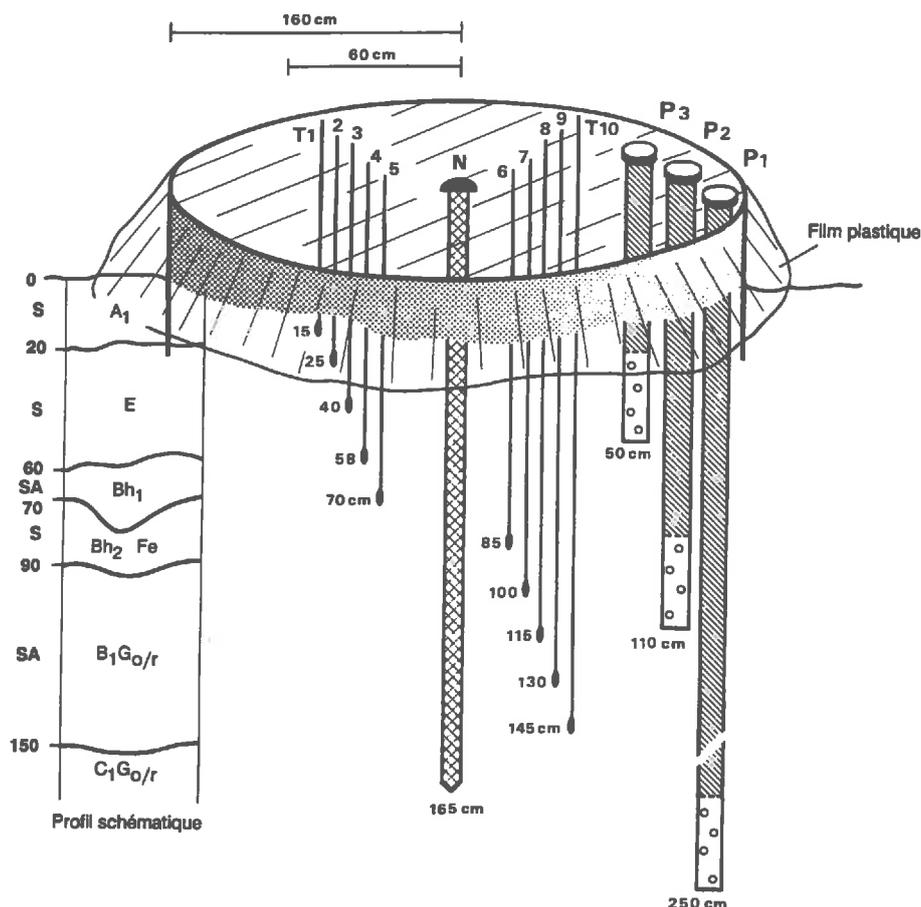


Figure 3-3 - Test d'infiltration sur podzol (station SE 7).
- Dispositif de mesure -

N : tube d'accès neutronique - P : piézomètres - T : tensiomètres

1.5. Le dispositif piézo-humidimétrique (Fig. 3-4)

Le dispositif piézométrique "manuel" est constitué par dix huit piézomètres dits "profonds", généralement de 3 m, sauf pour les stations situées à proximité des exutoires (1,6 à 2,0 m). Cinq piézomètres moyennement profonds (1,0 ou 1,5 m) et quatre piézomètres peu profonds (0,6 m de profondeur) complètent le dispositif. La hauteur crépinée est de 50 cm pour les premiers et de 20 cm pour les derniers. Dix huit stations (SE1 à SE18) ont été installées, en décembre 1983, selon trois transects T1, T2 et T3 (Fig. 3-4). Elles permettent ainsi la caractérisation des principales zones topographiques et des différentes unités de sols identifiées précédemment. Ce dispositif a été complété en février 86 par trois stations (SE0: 1,5 m, SE19: 1,4 m et SE20: 0,85 m), mises en place respectivement dans l'exutoire sud-est et dans les thalwegs nord-est et sud-ouest. Seules les stations SE4, SE7 et SE17 sont équipées de piézomètres manuels peu profonds (0,50 m).

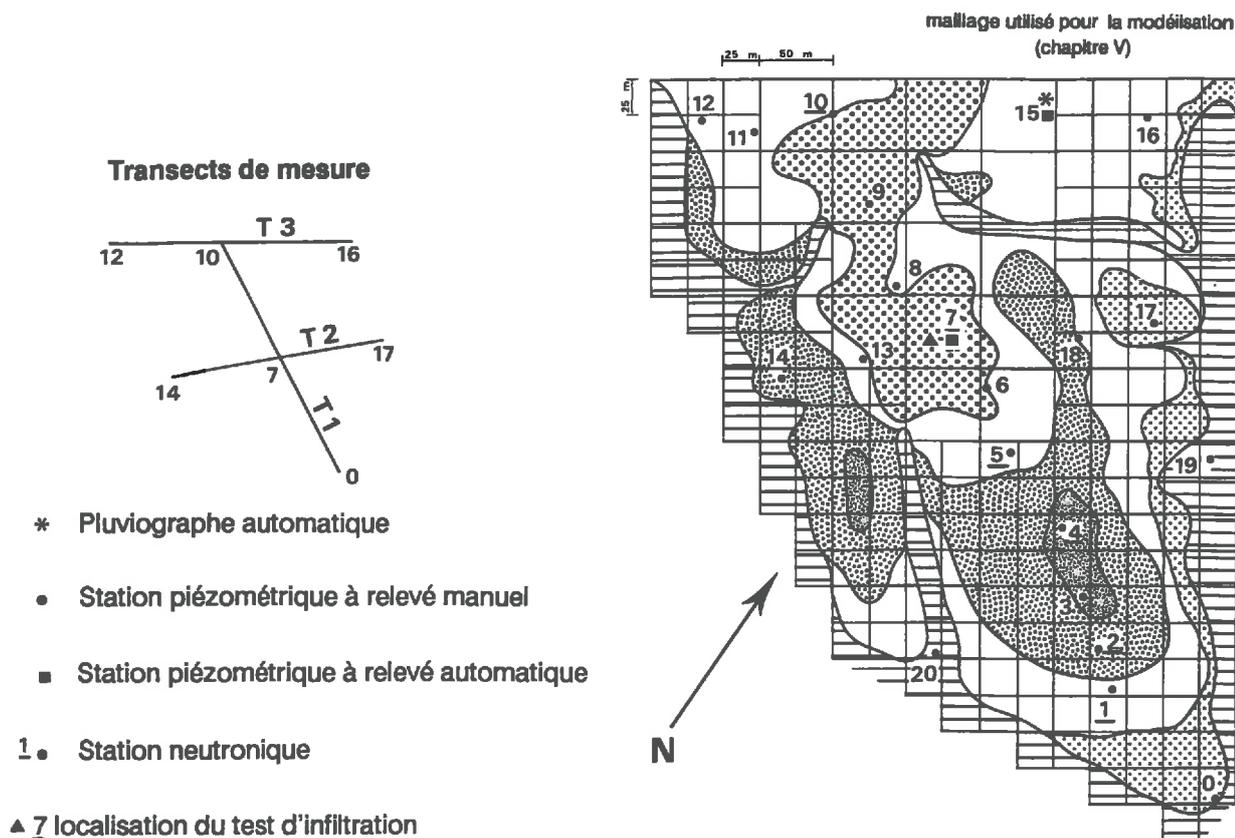


Figure 3-4 - Localisation des stations de mesures hydriques.

Le dispositif "automatique" est constitué par deux stations (SE7 et SE15) équipées d'un piézomètre profond (respectivement 2,74 m et 2,83 m de longueur) et d'un piézomètre peu profond (respectivement 1,21 m et 1,34 m).

Six tubes neutroniques, de 1,65 m de profondeur, équipent les stations SE1, SE2, SE4, SE5, SE7 et SE10 situées sur le transect axial T1.

2. RESULTATS

Le tableau 3-1 récapitule l'ensemble des épisodes de mesures hydriques (piézométrie, humidimétrie et test d'infiltration). Les relevés pluviométriques, piézométriques et neutroniques, sont rassemblés en Annexe 4.

Les résultats du fonctionnement hydrique sont présentés à deux échelles de temps complémentaires. A l'échelle décadaire, les relevés piézométriques et neutroniques doivent permettre d'observer l'incidence des différents épisodes climatiques sur les fluctuations de la nappe et d'apprécier l'importance relative prise par les écoulements en milieu saturé. A l'échelle journalière, les relevés piézométriques, calés sur des événements pluvieux bien individualisés, doivent souligner l'efficacité d'une pluie. A cette occasion et au cours du test d'infiltration sur SE7, le rôle éventuel de frein à l'infiltration, joué par la discontinuité texturale, est analysé.

Type de mesure	Pas de temps	Stations	Episode de mesure
Pluviométrie	jour	toutes	01/10/83 au 31/12/87
	heure	SE15	30/04/86 au 15/01/87 5/03/87 au 20/03/87
Piézométrie	décade	toutes	09/12/83 au 18/09/84
			09/11/84 au 12/09/86
			22/06/87 au 20/10/87
	jour	SE7	30/04/86 au 11/12/86 05/03/87 au 16/06/87
	SE15	30/04/86 au 15/01/87 05/03/87 au 20/03/87	
Neutrométrie	décade	SE1, SE4, SE7, SE10	15/12/83 au 24/01/85
			26/03/85 au 23/05/85 16/07/85 au 18/09/85
		SE2 et SE5	15/12/83 au 01/03/84
			19/04/84 au 24/01/85 26/03/85 au 23/05/85 16/07/85 au 18/09/85
Test d'infiltration	heure	SE7	19/11/86 au 21/11/86

Tableau 3-1 : Tableau récapitulatif des épisodes et stations de mesure

Les relevés piézométriques hebdomadaires ou décadaires ont été réalisés sur trois cycles climatiques complets, de décembre 1983 à septembre 1986, puis en 1987, durant une saison sèche supplémentaire, du 22/06 au 22/09. Les relevés horaires sont effectués sur podzol (SE7) et sur planosol (SE15), de mai à décembre 1986, puis de mars à juin 1987.

La teneur en eau volumique θ a, quant à elle, été suivie à l'échelle hebdomadaire ou décadaire, pendant les deux cycles climatiques compris entre décembre 1983 et septembre 1985. Le test d'infiltration a été réalisé en 1986, en fin de saison sèche, du 19/11 au 21/11 (241 mm de pluie entre le 01/09 et le 19/11).

2.1. Suivis à l'échelle décadaire

La périodicité des fluctuations de la nappe est notée dans un premier temps. Une typologie des stations, réalisée à l'échelle annuelle puis à l'échelle d'évènements climatiques particuliers, complète cette analyse.

2.1.1. Périodicité des fluctuations de la nappe

L'analyse des variations piézométriques enregistrées à un pas de temps proche de la décade (Fig. 3-5) souligne l'importance des fluctuations de la nappe sur toutes les stations. Une première série de constats peut être faite.

- A l'échelle annuelle, et sur la base des relevés décadaires, *piézométrie et pluviométrie sont bien corrélées.*

- **La saison des pluies est synonyme d'une nappe haute, peu fluctuante qui affecte durablement les horizons de surface.**

- **La saison sèche se traduit par un rabattement progressif et continu du niveau piézométrique jusqu'à l'apparition des premières pluies.**

- **Le passage de la saison sèche à la saison des pluies se manifeste par une remontée très rapide de la nappe** : en moyenne 1.50 m à 2 m en une à deux décades, voire même, lorsque la saison sèche est très marquée, comme en 1983, par une remontée de 2 à 3 m en quelques jours. Ce qui peut être expliqué par une très faible porosité de drainage ou/et par des fortes valeurs de conductivité hydraulique.

- **Les hauteurs de fluctuations de la nappe sont élevées et concernent une large tranche de sol : 3 m en moyenne pour l'ensemble des stations.** Elles sont très fortes en début de saison des pluies (par exemple 1,92 m et 2,76 m sur SE1 et SE7 en décembre 1983) et en saison sèche (1,44 m et plus de 2 m sur SE10 et SE4 entre juin et septembre 1985) et faibles durant la saison des pluies proprement dite (par exemple 0,80 m sur SE1 en 1985).

On peut définir en définitive, deux types de régime hydrique au sein d'un cycle hydrologique annuel :

- *un régime de type permanent*, caractérisé par des épisodes où les oscillations de la nappe sont faibles ; la saison des pluies, marquée par la présence d'une nappe affleurante sur la quasi totalité de la barre, et le petit été de mars, lorsqu'il est bien individualisé, illustrent respectivement un régime permanent en période de hautes eaux et un régime permanent de basses eaux.

- *un régime de type transitoire*, illustré par le passage de la saison sèche à la saison des pluies, où l'on observe une remontée rapide de la nappe, et par la saison sèche, durant laquelle la nappe est rabattue de façon progressive et continue.

D'une façon globale, les fluctuations saisonnières de la nappe s'opèrent sur toute la profondeur des piézomètres, soit 3 m de sol.

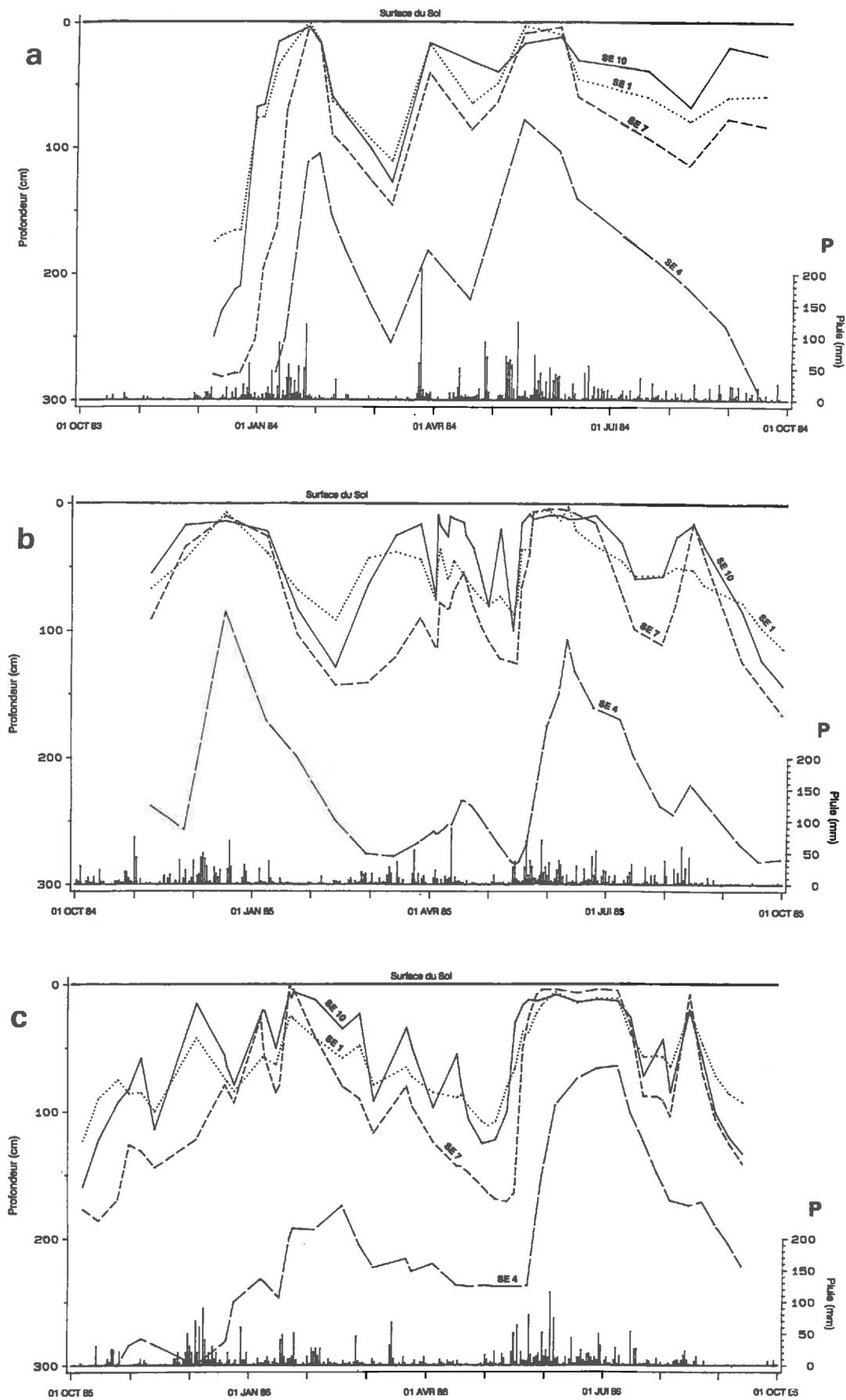


Figure 3-5 - Relevés piézométriques manuels sur quatre stations (SE 1, SE 4, SE 7, SE 10) et pluviométrie journalière (P), couvrant trois cycles climatiques.

a) année 1983 - 84 : 1.10.83 au 1.10.84 b) année 1984 - 85 : 1.10.84 au 1.10.85 c) année 1985 - 86 : 1.10.85 au 1.10.86

2.1.2. Typologie générale des stations à l'échelle annuelle

La traduction en termes de fréquence cumulée (sur trois années de relevés) de l'occurrence de la nappe au sein de différentes tranches de sol, permet d'établir une typologie des stations de mesure (Fig. 3-6) qui est confirmée par les différences d'évolution au cours du temps du taux de saturation $\theta/\theta_{\text{sat}}$ (θ_{sat} = teneur en eau à saturation) des 165 premiers cm. Trois groupes de stations sont mis en évidence.

- **groupe A : stations où la nappe occupe le premier mètre du sol pendant plus de 70% des décades.** Ce groupe est composé de onze stations (SE1, SE7, SE8, SE9, SE10, SE11, SE12, SE15, SE16, SE17 et SE18). Le taux de saturation moyen est supérieur à 80% et oscille entre 70 et 95% dans les 60 premiers cm. L'influence des différents épisodes climatiques sur les teneurs en eau H n'est observée que dans les 50 premiers cm.

- **groupe B : stations où la nappe occupe le premier mètre du sol pendant 20 à 60% des décades.** On dénombre cinq stations dans ce groupe (SE2, SE5, SE6, SE13 et SE14). Le taux de saturation des 60 premiers cm est sensiblement plus faible (60 à 85%). Les variations climatiques influencent les teneurs en eau de façon nette jusqu'à environ 90 cm de profondeur.

- **groupe C : stations où la nappe occupe le premier mètre du sol pendant moins de 10% des décades.** Ce groupe rassemble deux stations (SE3 et SE4).

Cette typologie souligne en premier lieu l'importance de la tranche de sol concernée par des transferts en milieu saturé. Sur les trois années de mesures dont nous disposons, la nappe occupe le premier mètre du sol pendant plus de 50% du temps pour les 3/4 des stations. Elle est située dans les deux premiers mètres pendant plus de 85% des décades pour seize stations sur dix huit. Seules les stations du groupe C présentent durant quelques épisodes climatiques faiblement pluvieux une tranche de sol, excédant rarement 2 m d'épaisseur, au sein de laquelle les transferts se font en milieu peu saturé (taux de saturation toujours supérieur à 50%). Ces sols occupent moins de 5% de la surface totale du site.

Au sein du groupe A, la station SE7 située sur podzol, apparaît comme étant singulière. Le taux de saturation mesuré entre 90 et 110 cm, c'est à dire sous la discontinuité texturale, oscille entre 60 et 90% alors qu'en surface et en profondeur il est très souvent supérieur à 80%.

Ce constat semble indiquer que les horizons spodiques du podzol ralentissent sensiblement l'infiltration des eaux de surface. Il doit toutefois être nuancé du fait de l'incertitude qui règne sur les mesures de densité apparente effectuées sur ces matériaux indurés.

Cette typologie peut être expliquée par trois facteurs principaux:

- la position topographique des stations de mesure,
- leur éloignement par rapport à l'exutoire aval (station SE0),
- le type de sol.

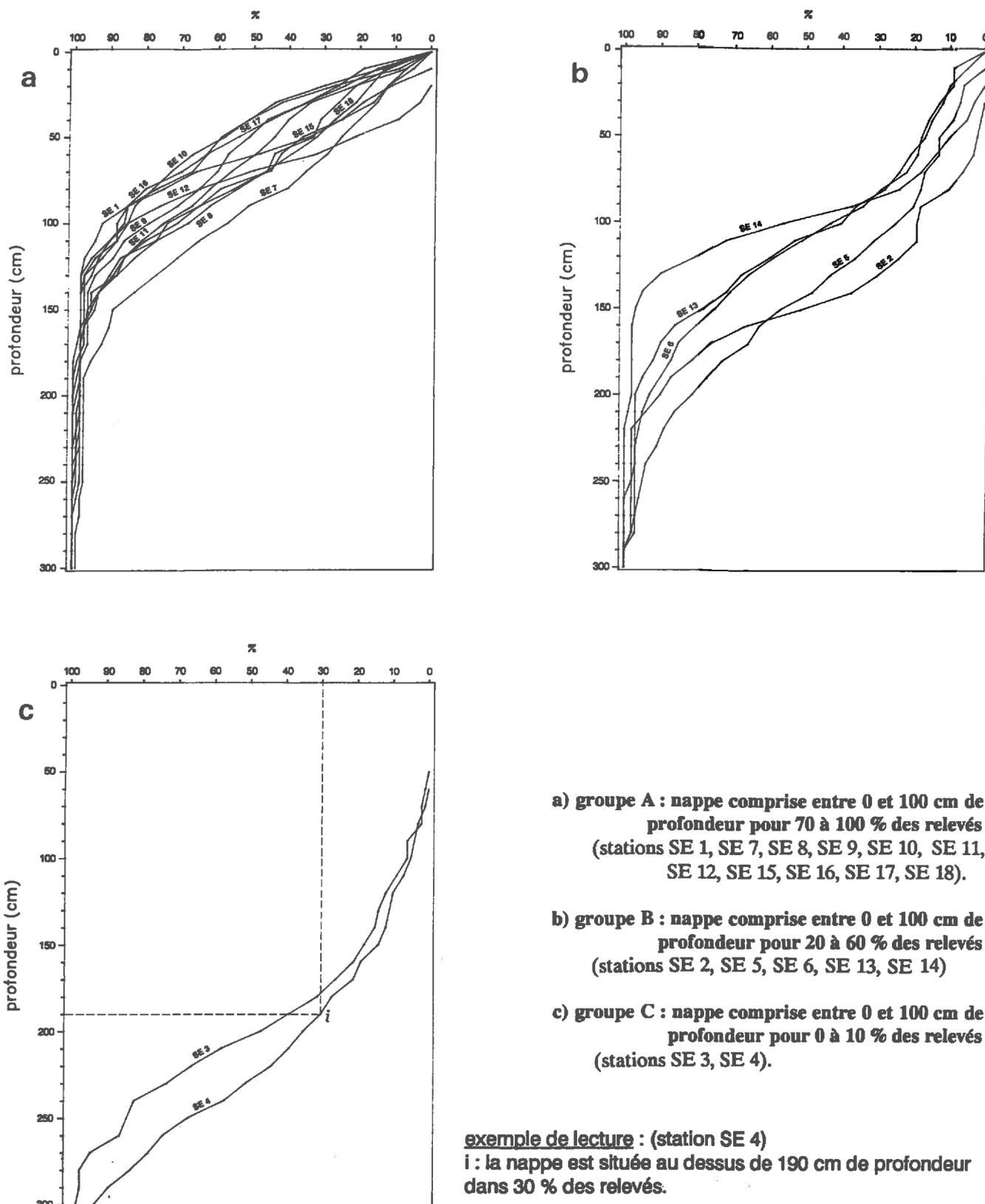


Figure 3-6 - Fréquence d'occurrence de la nappe au dessus d'une profondeur donnée.

Courbes établies pour chaque station à partir d'estimations des hauteurs piézométriques décadaires, calculées par interpolation linéaire des relevés piézométriques manuels.

Le tableau 3-2 rassemble ces informations pour 5 stations représentatives du transect axial T1 (SE1, SE2, SE4, SE7 et SE10), occupant des situations topographiques et pédologiques différentes. Les relevés piézométriques indiqués concernent une période de 1000 jours (09/12/83 au 12/09/86).

Station	SE1	SE2	SE4	SE7	SE10
Relief	aval	versant	épaulement	sommet	sommet
Sol	planosol	ferrallitique appauvri	ferrallitique	podzol	planosol
Profondeur					
0-50 cm	360	34	0	270	560
50-100 cm	904	188	68	584	834
100-200 cm	1000	938	374	1000	1000
200-300 cm	1000	1000	880	1000	1000
altitude (m)	3,0	4,2	6,6	6,7	6,9
alt. relative / exutoire (m)	1,0	2,2	4,6	4,7	4,9
distance / exutoire (m)	40	70	160	300	500

Tableau 3-2 : Temps de présence (en jours) de la nappe par tranche de profondeur sur 5 stations (SE1, SE2, SE4, SE7 et SE10). Comparaison des altitudes et de leur distance par rapport à l'exutoire aval (station SE0). Durées observées sur la période 09/12/83 à 12/09/86 (1000 jours).

Si l'on retient les valeurs extrêmes, il apparaît que:

- **A l'aval, près de l'exutoire, sur planosol (Station SE1),** la tranche de sol 0-50 cm est atteinte par la nappe durant 360 jours sur 1000; cette période est sans doute simultanée des périodes où l'exutoire est en fonctionnement.

- **Sur le versant, sur sol ferrallitique dégradé (SE2),** la nappe atteint la tranche de sol 0-50 cm pendant 34 jours seulement.

Deux critères différencient ces deux stations, l'une appartenant au groupe A (SE1), l'autre au groupe B (SE2), il s'agit de leur altitude relative par rapport à l'exutoire, soit 1,20 m d'écart, et de la nature du sol: planosol pour SE1 et ferrallitique dégradé pour SE2.

Si l'on compare à présent, des stations situées à la même cote altitudinale, il ressort que:

- **Sur l'épaulement, en sol ferrallitique (SE4),** la nappe n'atteint jamais l'horizon A₁₁. La nappe n'atteint la tranche 50-100 cm (horizon A₁₂) que pendant 68 jours en pleine saison des pluies et, pendant 374 jours elle oscille entre 100 et 200 cm de profondeur (horizon B₁₁).

- **Sur le sommet, sur podzol (SE7)**, pendant 270 jours la nappe est présente dans les 50 premiers cm du sol (horizons A₁ et E), et pendant plus de 500 jours elle est à une profondeur inférieure à 100 cm.

- **A l'amont, sur planosol (SE10)**, la nappe oscille entre 0 et 50 cm de profondeur (horizons A₁ et E) pendant 560 jours. Le premier mètre est occupé durant 834 jours.

Toutes ces stations, appartenant aux groupes A (SE7 et SE10) et C (SE4) et ayant une altitude voisine, ne sont différenciées que par leur éloignement à l'exutoire et par le type de sol.

En résumé, le temps de présence de la nappe dans tel ou tel horizon semble conditionné par plusieurs facteurs étroitement corrélés, dont trois apparaissent déterminants. Bien qu'il soit difficile de les hiérarchiser, les deux premiers semblent prépondérants:

- **l'altitude par rapport à l'exutoire** : pour un même type de sol, plus son altitude par rapport à l'exutoire est faible et plus le temps de présence de la nappe en surface est important;
- **l'éloignement de l'exutoire** : à altitude relative égale, plus une station est éloignée de l'exutoire et plus le temps de présence de la nappe aux faibles profondeurs est important;
- **le type de sol** : la nappe est proche de la surface pendant des périodes beaucoup plus longues sur planosol que sur podzol. Sur sol ferrallitique, le premier mètre est rarement atteint. Dans une situation topographique identique et au sein d'une même unité de sol (podzol), deux stations présentant des caractéristiques morphologiques légèrement différentes, présence de niveaux sableux plus développés (SE7) et profil globalement plus argileux (SE9), montrent un comportement piézométrique très comparable, quelque soit l'épisode climatique.

2.1.3. Typologie des stations à l'échelle d'épisodes climatiques particuliers

Une analyse plus fine est réalisée à l'échelle d'épisodes marqués par un régime permanent, en basses et hautes eaux, et à l'échelle d'épisodes définis par un régime transitoire.

2.1.3.1. En régime permanent de basses et hautes eaux

Un cartogramme de la surface piézométrique (épaisseur de la nappe en trois dimensions), élaboré sur la base des relevés effectués à un instant t sur les dix huit stations piézométriques et par interpolation sur le restant du domaine, donnent une image ponctuelle de l'aquifère. Deux exemples, choisis en 1984, en période de hautes eaux après le début de la saison des pluies (27/01) et en période de basses eaux, lors du "petit été de mars" (9/03), donnent une image identique de l'aquifère.

En régime permanent, et au vu de cette première analyse, **la surface de la nappe épouse la surface topographique du sol**. Les écoulements souterrains s'effectuent, conformément aux lois générales de l'hydraulique, du sommet de la barre vers les thalwegs nord-est et sud-ouest, et vers l'exutoire aval.

2.1.3.2. En régime transitoire

La phase de réhumectation du sol et d'installation de la nappe (passage de la saison sèche à la saison des pluies) et *la phase de rabattement de la nappe* et de ressuyage du sol (grande saison sèche ou petit été de mars), sont étudiées de façon détaillée sur l'ensemble des stations piézométriques et neutroniques. Trois exemples illustrent ces deux phases. Pour les deux premiers, les profils piézométriques en long sur le transect T1 n'incluent pas la station SE0, qui n'a été installée qu'en janvier 1986. Le dernier exemple, choisi après l'installation de SE0, complète cette analyse.

- Phase de réhumectation (09/12/83 - 27/01/84)

Cet exemple illustre le passage d'une saison sèche très marquée (moins de 1 mm par jour en moyenne en octobre et novembre 1983), à une saison des pluies typique (15 mm par jour en moyenne durant deux mois, dont 644 mm en janvier 1984) (Fig. 3-7). L'analyse des profils piézométriques (Fig. 3-8) et neutroniques (Fig. 3-9) permet de décomposer cet épisode en trois temps.

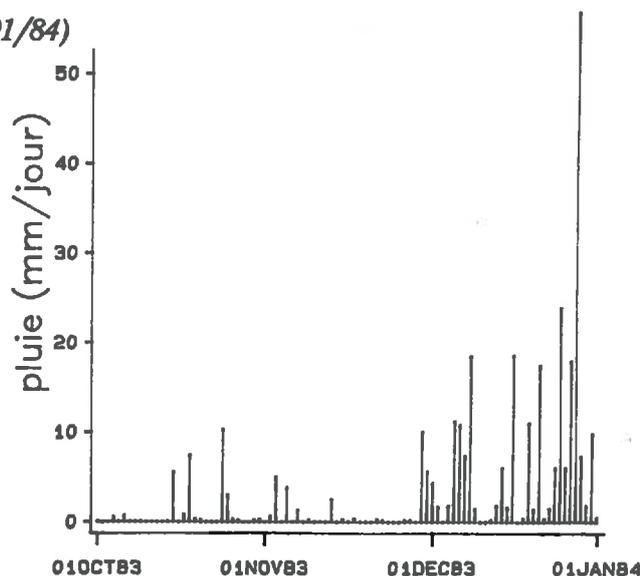


Figure 3-7 - Pluviométrie journalière du 01.10.83 au 01.01.84.

1- Remontée rapide de la nappe à l'aval (SE1) et à l'amont (SE9 et SE10), du 09/12 au 23/12.

- A la fin de la saison sèche, les profils de teneur en eau situés en dessous de 80 cm de profondeur sont proches de la saturation (taux de saturation $T_s = 80\%$). Aussi l'arrivée des premières pluies (50 mm entre le 5/12 et le 9/12) entraîne une remontée sensible de la nappe à l'aval (SE1) et sur les stations du sommet les plus éloignées de l'exutoire (SE9 et SE10). Sur les autres stations la nappe ne bouge pas.

2- Propagation de la remontée de la nappe (23/12 au 04/01).

- La persistance des pluies (23/12 au 31/12) provoque une augmentation de la vitesse de remontée de la nappe sur les stations amont et aval.

- A compter du 31/12/83, après un ralentissement des pluies (15 mm en 5 jours), la remontée de la nappe se propage rapidement aux autres stations. Sur les sols ferrallitiques de versant (SE2) et sur l'épaulement (SE4), on observe dès le 31/12 la propagation rapide d'un front d'infiltration. Il aboutit dans un premier temps à la saturation des 50 premiers cm. Bien que moins net, le comportement observé sur SE5 est semblable.

- Sur le podzol, au sommet (SE7), la saturation des horizons de surface est notée dès le 31/12 ($T_s = 80$ à 95%). Un front d'infiltration est noté en dessous de 90 cm de profondeur et la variation de teneur en eau des horizons spodiques, entre la saison sèche et la saison des pluies, est très faible ($\approx 5\%$).

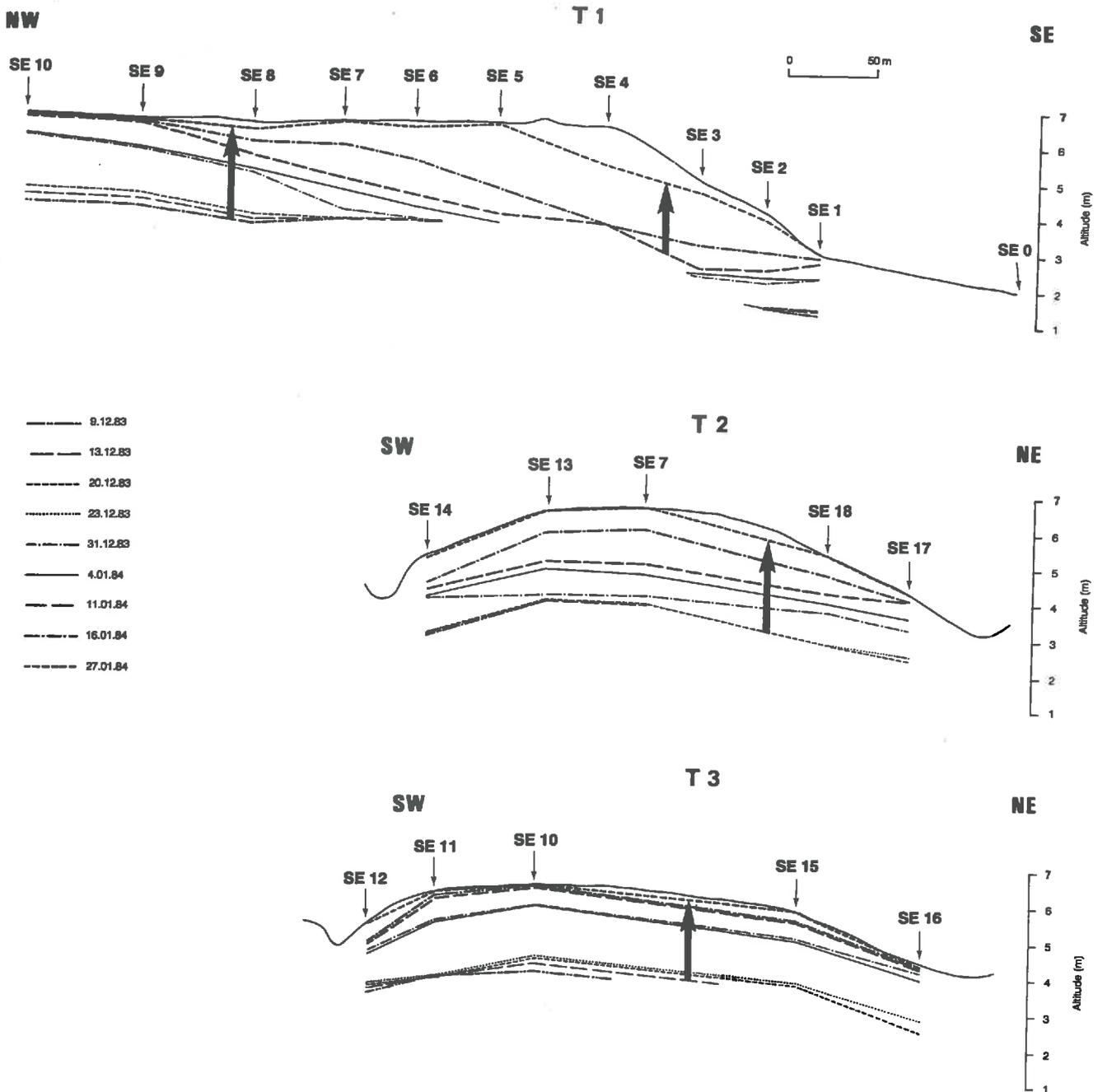


Figure 3-8 - Evolution des niveaux piézométriques sur les trois transects de mesure (T 1, T 2 et T 3) en période de remontée de nappe (9.12.83 au 27.01.84).

3- Affleurement de la nappe à l'amont et à l'aval puis sur la quasi totalité des stations (04/01 au 27/01).

- Le 11/01/84, la nappe est quasiment affleurante sur les planosols (SE10 et SE1).
- Dès le 04/01 sur SE2 et après le 16/01 sur SE4, l'action conjointe du front d'infiltration et de la remontée de la nappe aboutit à la saturation de l'ensemble du profil. Celle-ci est effective le 02/02, plus d'un mois après SE1 et 6 jours après l'arrêt des pluies.
- La réhumectation du profil est atteinte le 16/01 sur le podzol SE7 et le 27/01 sur le planosol SE5. La nappe est alors affleurante sur la majorité des stations.

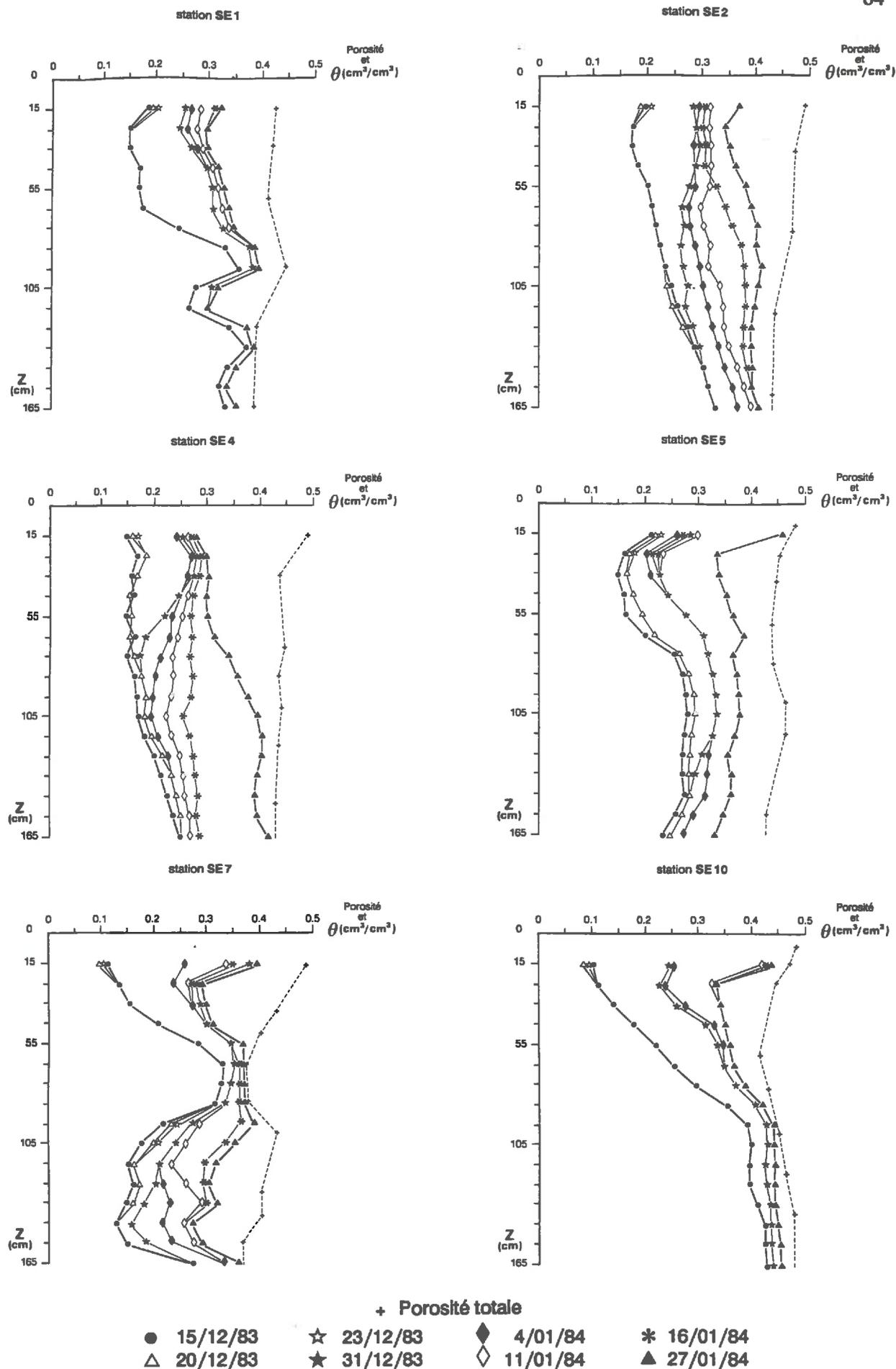


Figure 3-9 - Evolution des profils de teneur en eau volumique en période de réhumectation (15/12/83 au 27/01/84), sur six stations du transect T 1.

La forme de la nappe épouse de façon globale la forme du relief, sauf au niveau de la station SE4, sur sol ferrallitique conservé, où l'on constate un net décrochement de la nappe (Fig. 3-8).

La vitesse de remontée, observée sur les différentes stations, est importante. Elle atteint une moyenne de 18 cm/jour sur podzol (SE7), entre le 11/01 et le 16/01, et 15 cm/jour sur sol ferrallitique (SE4), entre le 16/01 et le 27/01.

Dans le même temps, sur les deux transects secondaires T2 et T3, la nappe remonte et affleure rapidement dans les thalwegs. Cette remontée se propage ensuite vers le centre de la barre (Fig. 3-8).

A partir de ces observations, une explication de la cinétique de la nappe en phase de remontée peut être proposée:

- l'évacuation lente à l'exutoire entraîne une accumulation d'eau et un engorgement rapide des thalwegs;
- sur le sommet de la barre, le drainage de l'eau vers les thalwegs est d'autant plus limité que la distance au thalweg est grande;
- sur les zones à convexité plus prononcée, le drainage naturel est facilité et entraîne une remontée lente de la nappe.

- Phase de rabattement (27/01/84 au 09/03/84 et 22/06/87 au 22/09/87)

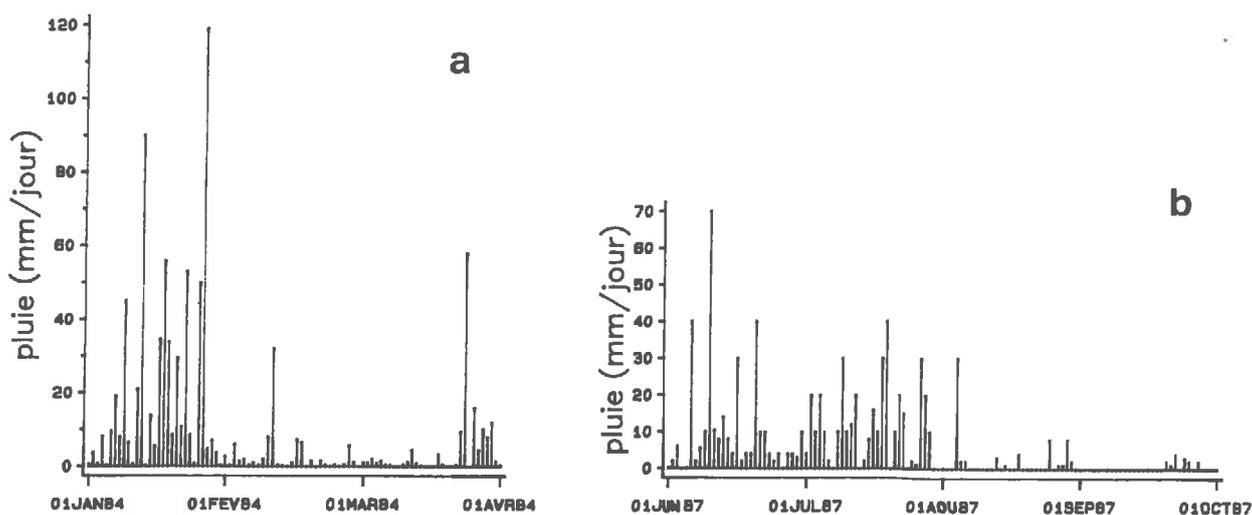


Figure 3-10 - Pluviométrie journalière : a) du 01.01.84 au 01.04.84. b) du 01.06.87 au 01.10.87.

Les deux exemples choisis caractérisent sur le plan climatique (Fig. 3-10), pour le premier, le petit été de mars de 1984 - 2,5 mm par jour en moyenne - qui s'est poursuivi en fait jusqu'au 22/03/84 (pas de relevés entre le 09/03 et le 22/03), et pour le second, en 1987, le passage de la saison des pluies à la saison sèche (pluviométrie journalière moyenne de 5 mm).

Dans les deux cas le ralentissement des pluies entraîne un rabattement régulier et général de la nappe, illustré par l'évolution des niveaux piézométriques de 1987 (Fig. 3-11). On constate ici encore, comme précédemment, un net décrochement de la surface de la nappe par

rapport à la surface du sol. La vitesse de rabattement atteint entre le 24/07/87 et le 26/07 des valeurs moyennes de 12 cm/jour, soit $\approx 10^{-6} \text{ms}^{-1}$. Le rabattement total observé sur les différentes stations entre le 22/06 et le 22/09 oscille entre 150 et 200 cm. Sur SE0, en bordure de l'exutoire aval, le rabattement est plus faible (50 cm); le 20/08, près de 2 mois après le début de la saison sèche, la nappe est toujours affleurante et le 03/09 elle est localisée à 15 cm de profondeur.

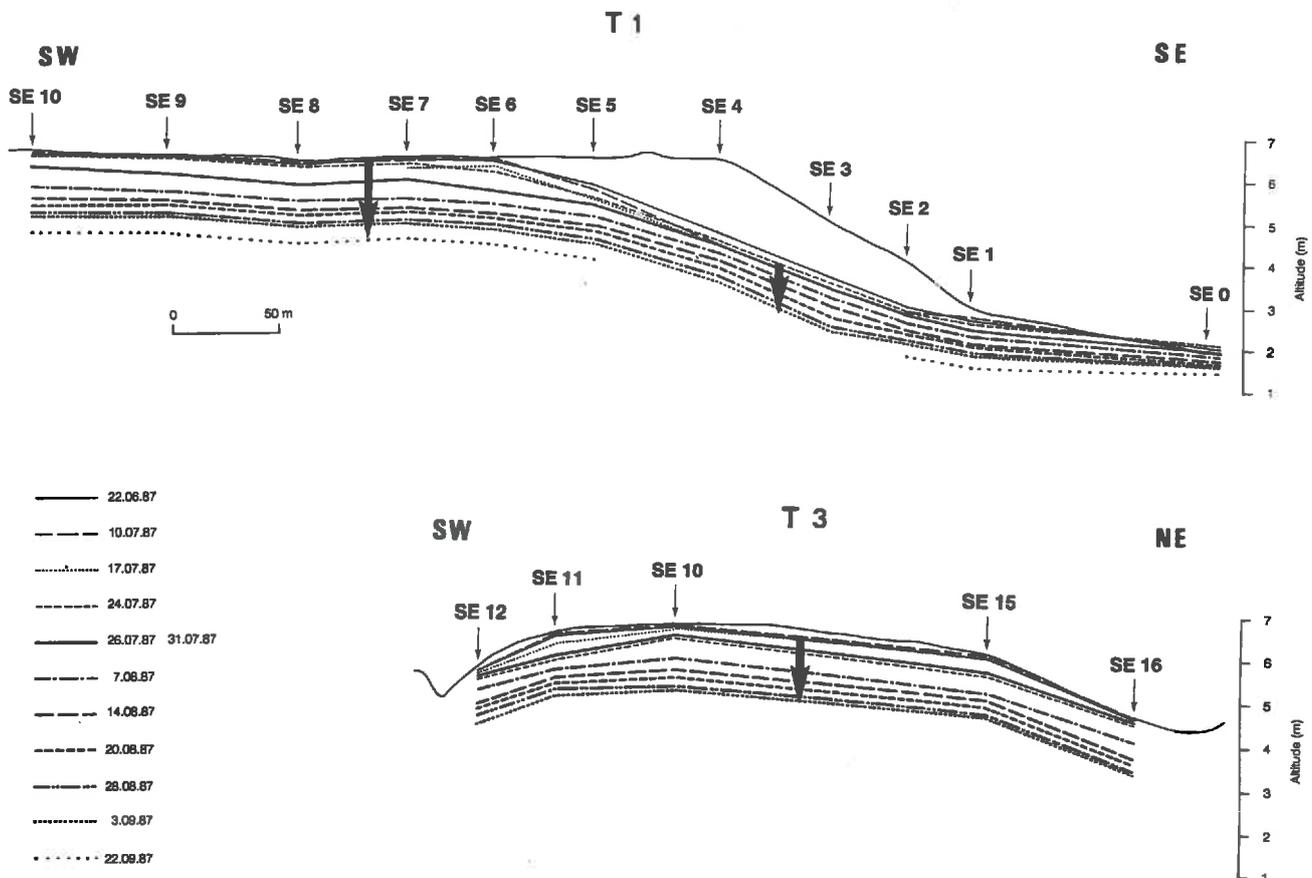


Figure 3-11 - Evolution des niveaux piézométriques en période de rabattement de nappe sur les transects T 1 et T 3 (saison sèche 1987 : 22.06 au 22.09).

Cette baisse importante du niveau de la nappe n'entraîne cependant pas d'importantes modifications des profils de teneur en eau, comme l'indiquent les profils de teneur en eau relevés en 1984 (Fig. 3-12). Pour cet exemple, aucune évolution n'est à signaler sur les stations SE1, SE7 et SE10. Sur SE5, on observe dans les 80 premiers cm une diminution des teneurs en eau de 10 à 3% suivant la profondeur. Sur les sols ferrallitiques (SE2 et SE4) elle est plus significative et se matérialise sur l'ensemble du profil.

Deux explications peuvent être fournies pour expliquer le rabattement de la nappe, sans qu'il y ait une diminution de la teneur en eau :

- la sensibilité de la méthode neutronique est insuffisante pour mesurer de faibles variations de teneur en eau volumique;
- la porosité de drainage de ces sols est faible;

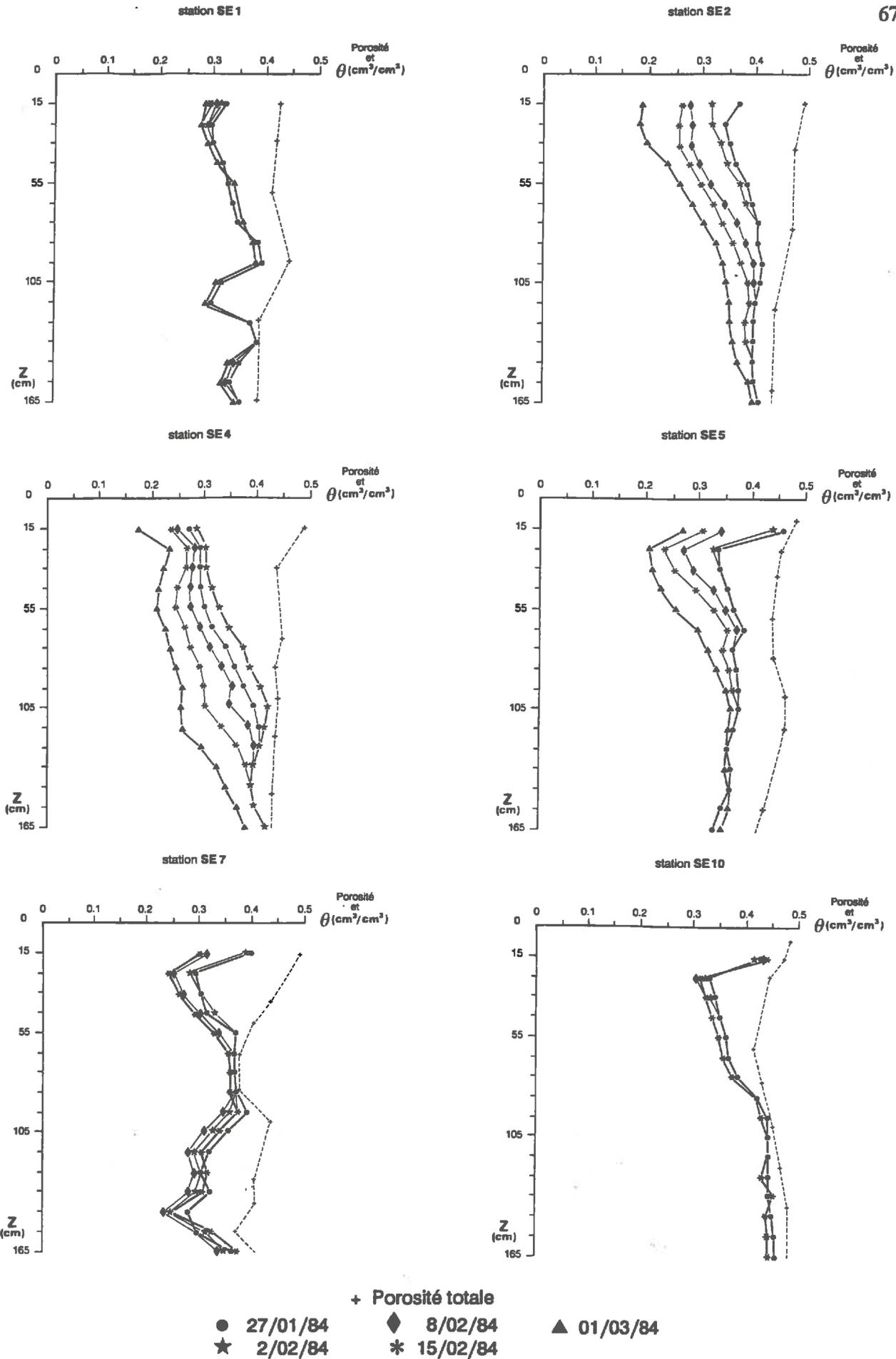


Figure 3-12 - Evolution des profils de teneur en eau volumique en période de rabattement de nappe (petit été de mars 1984 : 27/01 au 01.03), sur six stations représentatives du transect T 1.

2.1.4. Conclusion des observations à l'échelle décadaire

Que ce soit en phase de recharge ou de rabattement de nappe, les relevés effectués montrent que les épisodes climatiques conditionnent largement les fluctuations piézométriques, lesquelles concernent les trois premiers mètres de sol.

Une typologie des stations de mesure permet de distinguer trois groupes suivant la fréquence de saturation en eau du premier mètre de sol. D'une façon plus globale, cette typologie montre que, mis à part les sols ferrallitiques (stations SE3 et SE4), où l'on peut mettre en évidence une couche faiblement saturée d'environ 1 m d'épaisseur, tous les autres sites sont affectés par la présence de la nappe dans les deux premiers mètres de sol durant plus de 85% des relevés. **Les transferts en saturé sont donc largement prédominants.**

Le temps de présence de la nappe à différentes profondeurs peut être relié à un groupe de trois facteurs étroitement corrélés : **l'altitude relative par rapport à l'exutoire, la distance séparant la station de mesure de l'exutoire aval et le type de sol.** Comme les différents types de sols occupent des positions topographiques spécifiques, déterminant une plus ou moins bonne aptitude à drainer les eaux de surface, il est difficile de déterminer parmi ces trois critères celui qui est le moteur essentiel de la forme et de la dynamique de la nappe.

Une analyse fine des relevés piézométriques et neutroniques met en évidence trois phases essentielles.

- **Le passage de la saison sèche à la saison des pluies** est marqué par une réhumectation et une remontée rapide de la nappe sur le planosol, en bordure de l'exutoire aval, et sur les stations de sommet les plus éloignées de l'exutoire (podzols). La remontée se propage ensuite rapidement vers les sols ferrallitiques situés au centre du relief, en position d'épaulement.
- **La saison des pluies** se traduit par l'affleurement de la nappe sur la majeure partie de la barre. L'apparition de quelques épisodes secs peut entraîner une baisse de la nappe de quelques dizaines de cm sur la zone centrale de la barre, mais sans que les profils de teneur en eau volumique soient significativement perturbés.
- **En saison sèche et lors du petit été de mars** (lorsque ce dernier est bien net), il y a un rabattement continu de la nappe jusqu'à la reprise des pluies. En saison sèche, on observe parallèlement, une diminution progressive des teneurs en eau; au contraire, lors du petit été de mars, celles-ci sont peu modifiées.

Le décrochement de la surface de la nappe par rapport à la surface du sol, constaté sur les sols ferrallitiques (station SE4), en phase de remontée et en phase de rabattement de la nappe, semble être le témoin d'une différence de cinétique hydrique entre les sols ferrallitiques et les autres sols.

Cette première analyse de la dynamique hydrique au sein de la barre - prédominance des transferts en milieu saturé, influence des facteurs topographiques et pédologiques - associée à une connaissance fine du milieu, nous permet d'envisager, d'ores et déjà d'avoir recours à une modélisation des transferts en milieu saturé, pour tenter de mettre en évidence les principaux moteurs de la cinétique et de la forme de la nappe.

La mise en évidence, à l'échelle des profils, d'organisations de la couverture pédologique susceptibles de perturber les transferts hydriques verticaux, nous conduit cependant à poursuivre l'analyse des relations sols - dynamique hydrique à une échelle de temps plus fine.

2.2. Suivis à l'échelle journalière

Les deux stations piézométriques, équipées chacune en avril 1986 d'un piézomètre de moyenne profondeur et d'un piézomètre profond à relevés horaires, nous permettent de suivre dans le détail l'incidence d'épisodes pluvieux élémentaires sur la nappe.

Ces deux stations ont été choisies suivant deux critères majeurs: mesure du temps de réponse de la nappe à différentes sollicitations pluviométriques et mise en évidence de l'éventuel rôle de frein joué par la discontinuité texturale. Notre choix s'est alors porté sur deux stations, représentatives des planosols (SE15) et des podzols (SE7), pour lesquelles le changement textural est significatif. On passe dans les deux cas de 2% d'argile à 50 cm (horizons A₁-E) à 20% à 100 cm (horizon B₁G₀ de SE7) ou 110 cm (horizon B₁ de SE15). Sur podzol (SE7), la discontinuité texturale s'accompagne, entre 60 et 90 cm, d'une discontinuité morphologique brutale (matériaux plus ou moins indurés), représentée par les horizons spodiques.

TURENNE (1977), BOULET et al (1979), puis BOULET et al (1982b) ont envisagé la présence de nappes perchées, notamment au-dessus des horizons spodiques des podzols. L'objectif du test d'infiltration, installé sur podzol (SE7), est de vérifier la présence d'éventuelles nappes perchées plus ou moins permanentes, en simulant une forte pluie (190 mm en 9 h). Il a été conduit en novembre 1986, en fin de saison sèche, lors d'un épisode où la nappe était absente en profondeur.

2.2.1. Suivis piézométriques journaliers

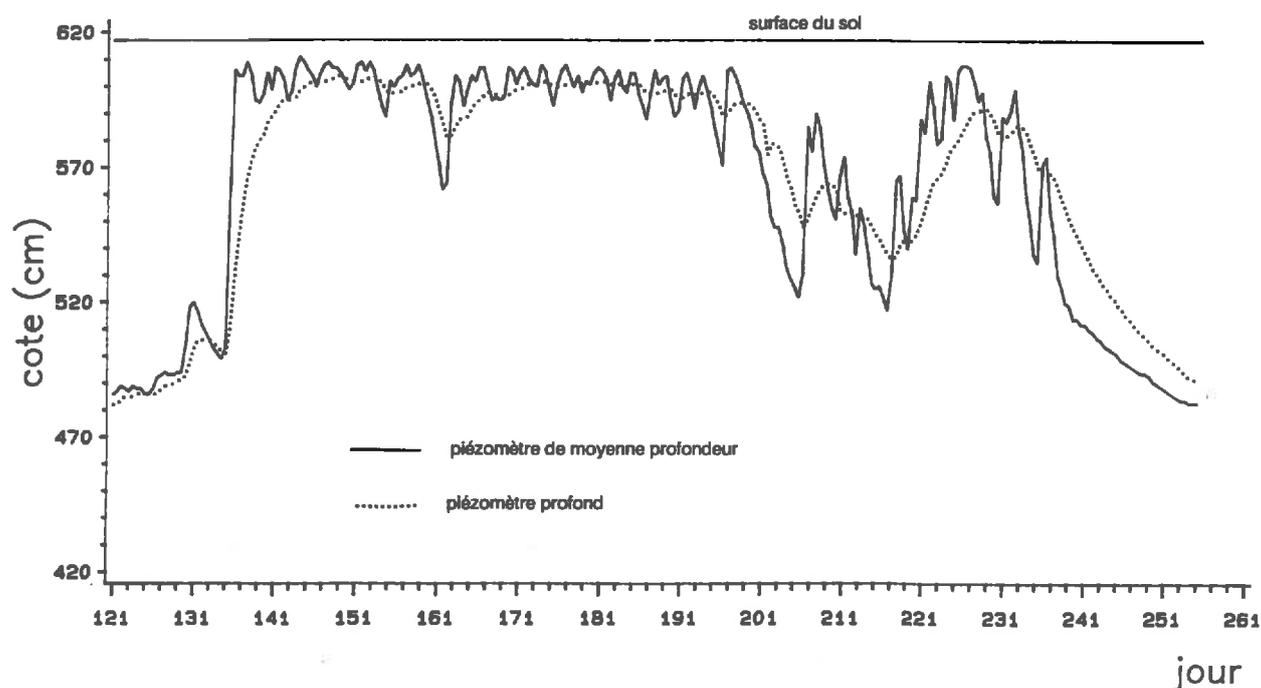


Figure 3-13 - Relevés piézométriques journaliers : comparaison des relevés du piézomètre profond et du piézomètre de moyenne profondeur. Station SE 15 (planosol). Relevés du 01.05.86 au 18.09.86.

La comparaison, sur podzol (SE7) et sur planosol (SE15), des relevés à pas de temps journalier, issus des piézomètres profonds (environ 3 m de longueur) et des piézomètres de moyenne profondeur (1 m à 1,5 m de longueur), montre un léger décalage entre les deux séries de relevés. Ainsi, sur planosol (SE15), le piézomètre profond lisse les fluctuations observées sur les relevés de moyenne profondeur (Fig. 3-13). Il semble traduire un phénomène d'inertie de transmission du signal pluviométrique. Ce phénomène semble pouvoir être relié aux observations de ZIMMER (1988). Cet auteur montre qu'il existe un décalage non négligeable entre le temps de réponse d'un piézomètre et le phénomène réel de mouvement de la surface de la nappe. En fonction des résultats obtenus sur notre site, ce retard semble directement lié à la distance séparant la surface de la nappe de la base du piézomètre où se font les échanges avec la nappe. Plus cette distance est élevée et plus le retard entre le signal piézométrique de profondeur et celui de surface est grand.

Une analyse plus fine de ce décalage, qui s'observe de façon régulière et périodique, montre qu'il est de l'ordre de un à deux jours et qu'il apparaît étroitement lié aux épisodes pluvieux (Fig. 3-14).

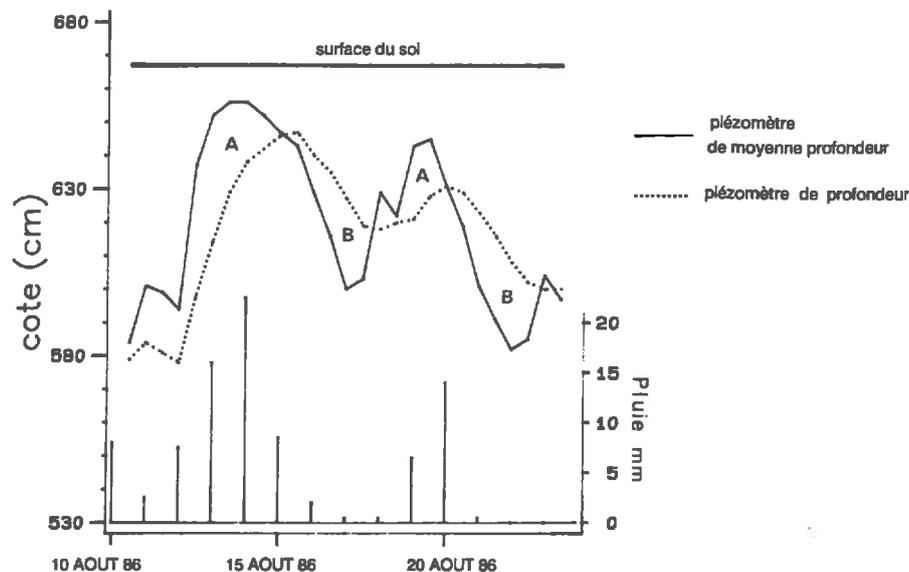


Figure 3-14 - Mise en évidence du phénomène de drainance sur la station SE 7 (planosol) :

phase A : "vidange" de la surface vers la profondeur.
phase B : "réalimentation" de la surface.

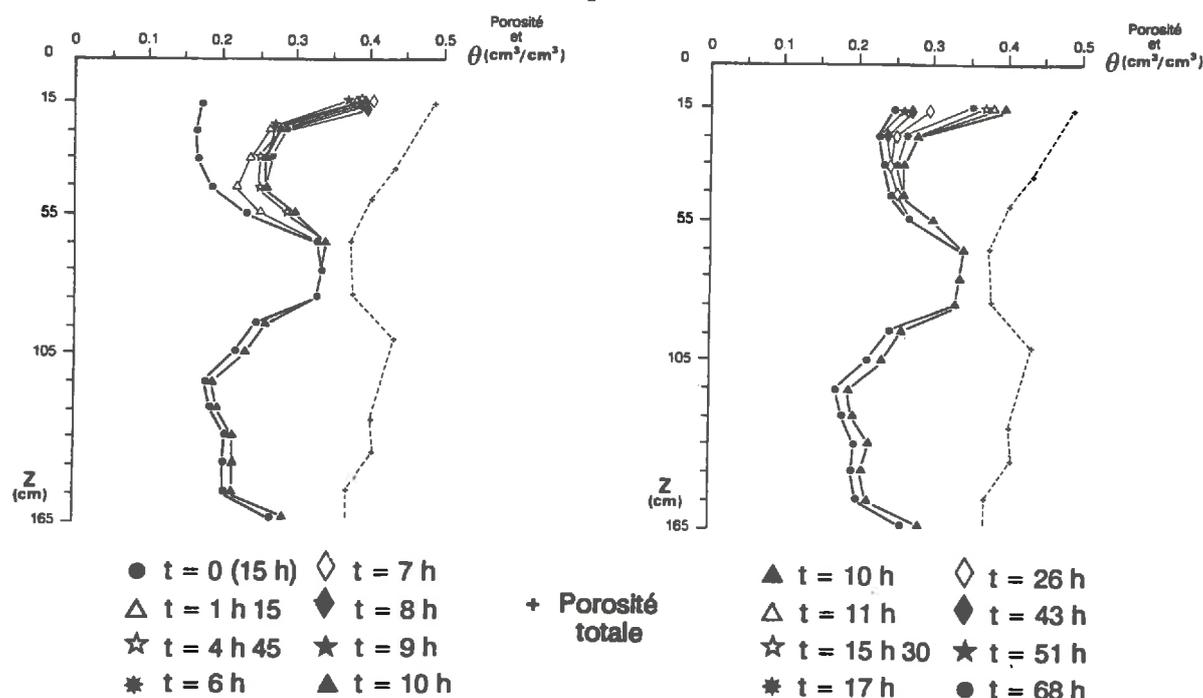
Ce décalage peut être décomposé en deux étapes: une phase A consécutive à un épisode de pluies durant laquelle la cote piézométrique de moyenne profondeur est plus élevée que celle de profondeur, et une phase B consécutive à la précédente caractérisant un arrêt des pluies durant laquelle la cote piézométrique profonde est cette fois plus élevée.

Ce comportement illustre un **phénomène de drainance** : échange d'eau entre une nappe captive et une nappe libre (WOLSACK, 1977 et de MARSILY, 1981). Nous sommes alors amenés à considérer l'existence d'un matériau appelé éponte à perméabilité plus faible que les couches supérieures et inférieures. Le décalage entre les deux piézométries s'observe entre 50 et 120 cm de profondeur. Ceci nous conduit à supposer que l'éponte, correspondant probable-

ment à la discontinuité texturale, est à l'origine d'un double fonctionnement de la nappe que l'on peut rattacher en surface à une nappe libre et en dessous du changement textural à une nappe semi-captive. Cette éponte ne semble toutefois pas devoir être considérée comme un "plancher imperméable".

2.2.2. Test d'infiltration sur podzol (SE7)

Le dispositif est illustré par la figure 3-3. Durant l'expérimentation la nappe générale n'est pas décelée dans les 250 premiers cm. Six heures après le début de l'infiltration - soit à $t=6h30$ (puisque les mesures ont été initiées 30 mn avant le début de l'irrigation) - le piézomètre de surface (P3) montre la présence d'une petite nappe perchée localisée au-dessus des horizons spodiques (Bh_1 et Bh_2Fe), situés entre 60 et 80 cm de profondeur. Elle est très fugace et ne persiste que durant 3h30 de temps.



Début infiltration à $t = 0 h 30$, fin infiltration à $t = 9 h 30$

Figure 3-15a - Test d'infiltration sur podzol (station SE 7). Profils de teneur en eau volumique (θ cm^3/cm^3)

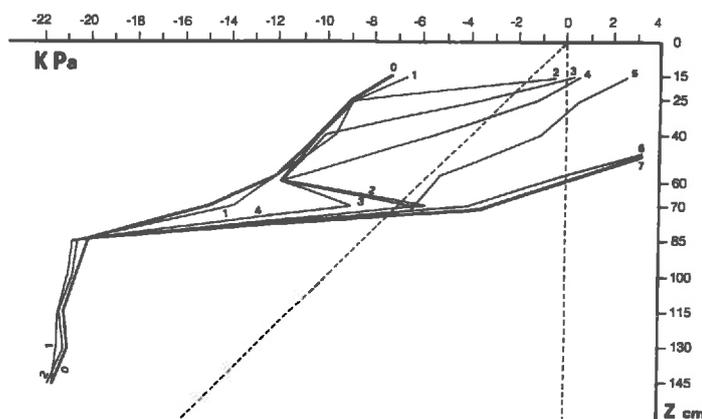
Les données d'humidité neutronique montrent un front d'infiltration qui ne dépasse pas 65 cm de profondeur (Fig. 3-15a). Le profil de teneur en eau volumique reste inchangé en dessous de 65 cm de profondeur pendant tout l'essai. La saturation est atteinte dans les 25 premiers cm (horizon A1) 45 mn après le début de l'infiltration et l'augmentation du stock hydrique dans les 65 premiers cm (horizons A_1 et E) est maximale 6h30 après le début de l'infiltration, où elle atteint une valeur de 80 mm.

L'écart de 100 à 110 mm avec la lame d'eau infiltrée (190 mm), en l'absence de dispositif latéral d'étanchéité, semble être la traduction d'importants écoulements latéraux qui doivent s'effectuer au sommet des horizons spodiques (Bh_1 et Bh_2Fe). Ce résultat est en parfait accord avec les observations précédentes et confirme nos observations sur la savane de Corossony montrant, après de grosses averses en saison sèche, des sorties ponctuelles d'eau affleurant au

contact des horizons spodiques sur les versants de barres pré-litorales à relief convexe. Ces écoulements se traduisent par une lame d'eau qui ruisselle en aval sur la surface du sol.

Les relevés tensiométriques montrent la saturation progressive des horizons de surface qui se traduit par l'installation d'une nappe perchée sur les horizons spodiques, situés à 60 cm de profondeur (Fig. 3-15b). La saturation très rapide (15 mn après le début de l'irrigation) du sol à 70 cm de profondeur, alors qu'elle est plus lente entre 25 et 60 cm de profondeur, peut être expliquée par l'existence de cheminements préférentiels d'écoulement. L'horizon Bh₁ (sable argileux beige, tassé) semble jouer le rôle d'une barrière capillaire.

- 0 t = 0 (15 h)
- 1 t = 0h30 - début infiltration
- 2 t = 0h45
- 3 t = 1h
- 4 t = 1h30
- 5 t = 1h45
- 6 t = 2h15
- 7 t = 2h30



- 8 t = 9h30 - fin Infiltration
- 9 t = 10h
- 10 t = 10h30
- 11 t = 11h
- 12 t = 11h30
- 13 t = 15h30
- 14 t = 16h30
- 15 t = 22h30
- 16 t = 26h
- 17 t = 43h

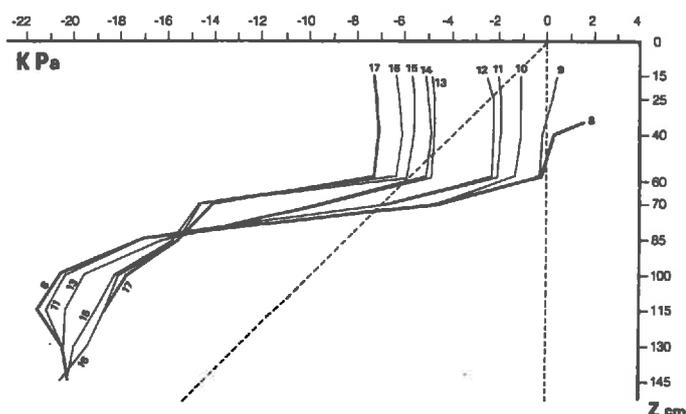


Figure 3-15b - Test d'infiltration sur podzol (station SE 7). Profils tensiométriques - charge hydraulique calculée (1 KPa = 10 mb).

Si l'on estime que le profil de charge hydraulique mesuré avant l'infiltration, à t=0, est identique au profil hors anneau, la différence de potentiel créée entre l'extérieur et l'intérieur de l'anneau est de l'ordre de 6 kPa (1 kPa = 10 mb). La différence de potentiel sur l'axe vertical mesurée dans l'anneau est du même ordre de grandeur (10 kPa). Or aucune réhumectation des horizons profonds n'est observée; on peut donc en déduire que les écoulements verticaux sont

très faibles, à moins qu'il y ait un écoulement rapide en profondeur sans que la tranche de sol 70-150 cm soit réhumectée. Cette éventualité doit être écartée du fait des valeurs relativement faibles de conductivité dans ces matériaux ($\approx 10^{-5} \text{ms}^{-1}$). L'analyse du bilan hydrique suggère donc l'existence d'importants écoulements latéraux, qui ne peuvent être justifiés par un gradient de charge latéral supérieur au gradient de charge vertical. Seule l'existence, dans les matériaux de surface, de conductivités à composante latérale beaucoup plus forte que la composante verticale, permet d'expliquer ce phénomène.

Cet écoulement latéral doit cependant être considéré avec beaucoup de prudence car l'essai, réalisé sur une surface relativement faible (8 m^2), correspond à l'application d'une charge importante mais ponctuelle au sein de matériaux secs. Etant donné la topographie du site, la nappe perchée, créée ici artificiellement, est susceptible d'exister de manière très fugace, en conditions naturelles, après de fortes pluies à la fin de la saison sèche.

2.2.3. Conclusion des observations à l'échelle journalière

Les relevés piézométriques horaires et le test d'infiltration mettent en évidence les comportements hydriques très différenciés des matériaux encadrant la discontinuité texturale. Ce changement textural, plus ou moins brutal suivant les sols, peut jouer ponctuellement le rôle d'un frein à l'infiltration verticale de l'eau (phénomène d'éponte) qui se traduit par un déphasage des cotes piézométriques de surface et de profondeur de l'ordre de un à deux jours.

La nappe perchée créée artificiellement sur quelques m^2 au-dessus des horizons spodiques ne peut être généralisée, en l'absence de tests similaires sur d'autres sites, à l'ensemble des sols à changement textural marqué. D'autant plus que nos observations révèlent la présence d'une macroporosité (chenaux verticaux, poches sableuses décolorées...) importante qui facilite certainement les transferts verticaux.

3. CONCLUSION

Un certain nombre de constats sont issus de la description physique du site et du suivi hydrique.

Le suivi hydrique réalisé sur trois cycles climatiques consécutifs souligne les fortes interrelations entre la géomorphologie, les sols et le fonctionnement hydrique du système. Les sols sont baignés par une nappe dont les importantes fluctuations, étroitement liées aux épisodes pluvieux, concernent les trois premiers mètres. La forme générale de la nappe épouse le relief de la barre sur la plupart des sols, sauf au niveau des sols ferrallitiques où l'on note un décrochement significatif de la surface de la nappe par rapport à la surface du sol. Le temps de présence de la nappe au sein des différents horizons semble dépendre de trois facteurs qu'il est difficile de hiérarchiser: l'altitude, l'éloignement par rapport à l'exutoire et le type de sol.

Le cycle hydrologique annuel se décompose en épisodes à régime hydrique de type permanent - la saison des pluies, marquée par la présence d'une nappe affleurante sur la quasi totalité de la barre, et le petit été de mars, lorsqu'il est bien individualisé - et en épisodes à régime hydrique de type transitoire, illustré par le passage de la saison sèche à la saison des pluies, où l'on observe une remontée rapide de la nappe, et par la saison sèche, durant laquelle le rabattement continu de la nappe semble commandé par le niveau de l'eau dans les thalwegs

et l'exutoire. Près de 95% de la surface du site d'étude est concernée par des transferts hydriques en milieu saturé à une faible profondeur. Seuls les sols ferrallitiques peu appauvris en argile (stations SE3 et SE4) sont le siège durant quelques épisodes d'échanges en milieu non saturé.

Les relevés piézométriques journaliers mettent en évidence sur deux stations, à l'échelle de un à deux jours, des échanges par drainance entre les matériaux de surface et ceux sous-jacents à la discontinuité texturale. Ce rôle de frein à l'infiltration n'est pas mis en évidence à l'échelle décadaire. Nous n'avons pu confirmer l'existence de nappes perchées. Leur existence reste cependant possible mais de manière fugace et ponctuelle.

A la lumière de ces résultats, l'importance de la variabilité spatiale physique du système géomorphologique et pédologique étudié apparaît suffisamment marquée pour que l'on puisse s'interroger sur son incidence sur les flux d'eau à l'échelle de la barre. Etant donné les fortes précipitations, l'alternance régulière d'épisodes climatiques d'excès et de déficits en eau, et au vu des fortes et rapides fluctuations de la nappe, les flux hydriques mis en jeu ne peuvent être négligeables.

Trois hypothèses peuvent être d'autre part formulées:

- une seule nappe est à l'origine de l'engorgement des sols de la barre étudiée; aucune nappe perchée durable n'a pu être mise en évidence;
- la pluie semble être le moteur essentiel des fluctuations de la nappe;
- on peut distinguer deux types de cinétique hydrique, en liaison avec la forme de la nappe. La première concerne les sols ferrallitiques et la seconde les autres sols: podzols, planosols et sols hydromorphes alluviaux, marqués par la présence d'une discontinuité texturale plus ou moins nette. L'influence de cette discontinuité texturale sur la cinétique hydrique est cependant tempérée par l'existence d'une porosité texturale (sols à dominante sableuse) et d'une porosité structurale d'origine biologique importantes.

Deux points essentiels restent à étudier:

- déterminer les moteurs du fonctionnement de la nappe (forme et dynamique); une explication du décrochement de la surface de la nappe par rapport à la surface du sol reste à formuler;
- tenter une estimation des flux hydriques mis en jeu, notamment la pluie efficace et le ruissellement. La quantification expérimentale des flux est difficile voire impossible à réaliser sur l'interfluve étudié.

Seule l'utilisation d'un modèle de transferts peut nous permettre de résoudre ce problème. Nous chercherons, en utilisant un modèle de transferts en milieu saturé, à répondre en fait aux 4 questions suivantes:

- 1) la forte pluviométrie suffit-elle à expliquer la cinétique de la nappe ? Ce qui revient alors à se demander si la barre est hydrauliquement isolée.
- 2) quelles sont les relations éventuelles entre les zones de recharge de la nappe et d'une part le relief et d'autre part les sols ?
- 3) les unités pédologiques décrites ont-elles une signification en termes de fonctionnement hydrique ?
- 4) quelle est l'importance du ruissellement induit par la dénivelée ?

Deuxième partie

**Mise en évidence des relations
sol-paysage-dynamique hydrique :
identification numérique des
alimentations de la nappe**

Chapitre 4

Principes du modèle utilisé et acquisition des paramètres

PRINCIPES DU MODELE UTILISE ET ACQUISITION DES PARAMETRES

INTRODUCTION

L'objectif de cette seconde partie est de mettre en évidence les relations existant entre le sol, la géomorphologie et la dynamique hydrique de la barre pré littorale étudiée. Pour atteindre cet objectif, et par conséquent tester les hypothèses de fonctionnement formulées précédemment, il nous faut connaître les principaux déterminants de la forme et de la dynamique de la nappe, d'une part, les flux d'alimentation de la nappe, d'autre part.

La démarche adoptée repose sur les deux étapes suivantes:

1- **identification de la recharge par simulation** (somme des apports d'eau à la nappe) et plus particulièrement de sa composante essentielle: la pluie efficace (flux de drainage à l'interface des zones non saturées et saturées, soit la somme de l'eau gravitaire et de l'eau percolée) (Fig. 4-1). Cette identification est réalisée à l'aide d'un modèle numérique de simulation des flux au sein de systèmes aquifères multicouches, et de mesures *in situ* de la conductivité hydraulique à saturation et de la charge hydraulique. Cette détermination d'un (ou plusieurs) paramètre(s) d'écoulement par un processus d'identification est connue sous le nom de résolution du *problème inverse* ou calage automatique (DELHOMME, 1984). Une étude bibliographique récente (YEH, 1986) présente les principales techniques de résolution du problème inverse.

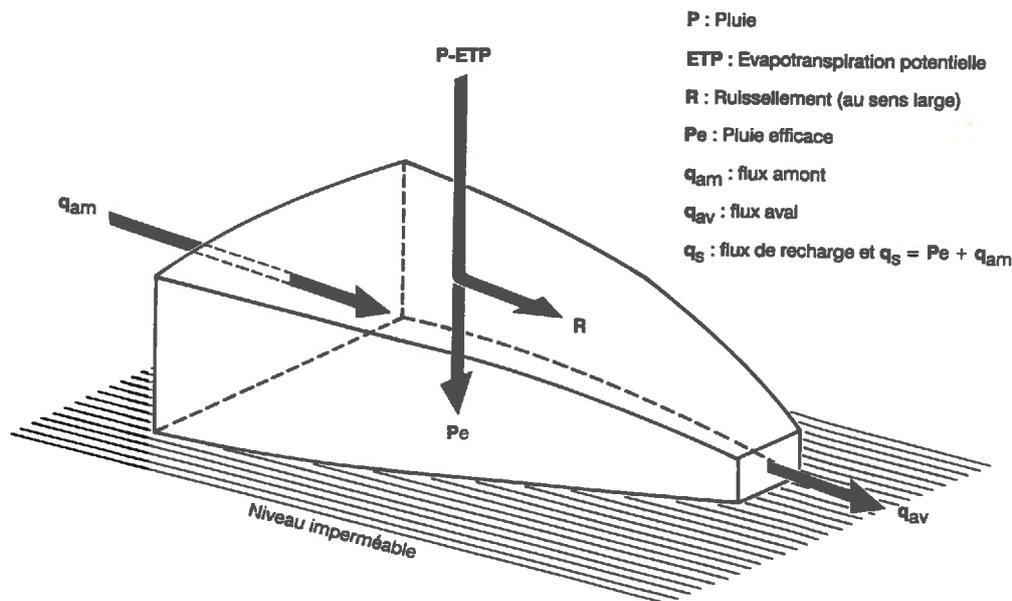


Figure 4-1 - Schématisation des échanges hydriques entre le milieu extérieur et l'aquifère (la zone non saturée n'est pas représentée).

2- analyse de sensibilité du modèle aux principaux paramètres afin de tester le poids des différents déterminants identifiés et surtout de pallier l'absence de mesure de flux à l'exutoire. Ce dernier point, essentiel dans notre démarche, est résolu par l'intermédiaire d'une analyse de sensibilité du modèle à la conductivité hydraulique.

Les relations existant entre la variabilité spatiale de la pluie efficace identifiée, de la conductivité hydraulique et des caractéristiques géomorphologiques et pédologiques de la barre pré littorale sont tout particulièrement étudiées. La mise en évidence de ces relations éventuelles devrait nous permettre, d'une part, de répondre à l'objectif fixé ci-dessus et, d'autre part, d'extrapoler les résultats de ce travail aux autres barres pré littorales de la plaine côtière ancienne.

A cet effet, nous présentons dans un premier temps (Chapitre 4), le **modèle numérique à paramètres distribués** choisi et le jeu de paramètres caractérisant le système aquifère, en abordant successivement le modèle mathématique, le code informatique, la méthode de discrétisation, le type de conditions aux limites nécessaires, puis l'acquisition des différents paramètres. Les principes de mesure de la conductivité hydraulique sont détaillés à cette occasion. Nous abordons, à travers une approche géostatistique, le problème du changement d'échelle, pour passer de mesures de conductivités ponctuelles, à des conductivités équivalentes affectées à des blocs, de section carrée de 25 m de côté et 1,50 m de hauteur (blocs, définis suivant des critères morpho-pédologiques de terrain et, considérés comme ayant un fonctionnement hydrique homogène).

Nous aboutissons, dans un second temps (Chapitre 5), à la description des résultats de la modélisation où, après avoir présenté les principes de l'identification, les résultats des estimations des flux en régime permanent et en régime transitoire sont successivement abordés. En dernier lieu (Chapitre 6), une discussion présente les problèmes méthodologiques apparus, ainsi qu'une interprétation synthétique des résultats.

1. PRESENTATION DU MODELE DE TRANSFERTS HYDRIQUES UTILISE.

La modélisation des transferts en milieu saturé est basée sur une schématisation hydraulique du type Darcy-Dupuit. Le code informatique utilisé : WATASI 5 (WOLSACK, 1982) a été développé par le CEMAGREF.

1.1. Enoncé du problème général

En tout point d'une nappe, deux relations fondamentales liant le flux horizontal et la piézométrie peuvent être exprimées : la *loi de Darcy* et l'*équation de continuité*. Ces deux équations aux dérivées partielles ne sont pas suffisantes pour calculer, dans une situation donnée, les flux et la piézométrie. Il est nécessaire de leur adjoindre une condition initiale (piézométrie à $t=0$ sur tout le domaine étudié) et des conditions aux limites (conditions de potentiel ou de flux en un point).

L'énoncé du problème est alors complet et l'on admet que la solution existe et est unique. Le calcul numérique de la solution du problème (piézométrie en tout point et à chaque instant) peut être effectué.

1.1.1. Principales hypothèses

Les équations de base du modèle sont fondées sur les hypothèses de Darcy et de Dupuit.

H1. Le milieu est non déformable (pour un aquifère libre).

H2. L'eau est incompressible et chimiquement pure.

H3. Les vitesses d'écoulement sont proportionnelles aux gradients de pression.

H4. La distribution des pressions sur une verticale est hydrostatique.

1.1.2. Equations de base :

Les symboles utilisés sont rassemblés dans le tableau 4-1. L'essentiel de ce paragraphe provient de l'ouvrage de de MARSILY (1981). La description des processus permanents de l'écoulement repose sur la loi de Darcy :

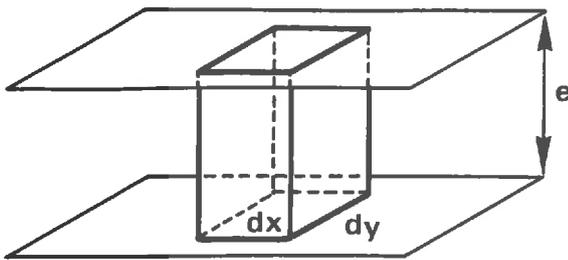
$$q = -K \cdot \nabla h$$

SYMBOLE	NOM ET DIMENSION
q	Vitesse de filtration [LT ⁻¹]
K	Tenseur de perméabilité [LT ⁻¹]
Ks	Conductivité hydraulique à saturation [LT ⁻¹]
h	Charge hydraulique, ou hauteur piézométrique [L]
qs	Recharge par unité de surface (prélèvement ou injection) [LT ⁻¹]
W	Stock d'eau par unité de surface [L]
T	Transmissivité [L ² T ⁻¹]
θ	Teneur en eau volumique [L ³ L ⁻³]
S	Coefficient d'emménagement [L ³ L ⁻³]
μ	Porosité de drainage [L ³ L ⁻³]
D	Coefficient de drainance [T ⁻¹]
t	Temps [T]
q _{am}	Flux amont [LT ⁻¹]
q _{av}	Flux aval [LT ⁻¹]

Tableau 4-1 : Liste des symboles utilisés.

La description des phases transitoires de l'écoulement (flux et gradient de potentiel de grandeur et direction variables dans le temps), nécessite l'introduction d'une loi supplémentaire : la loi de conservation de masse appliquée aux écoulements, appelée équation de continuité. Pour une nappe libre, on néglige la compressibilité de l'eau et du milieu poreux; elle s'exprime alors ainsi : toute variation de charge va entraîner un mouvement de la surface libre, qui, en

saturant ou désaturant le milieu poreux, va stocker ou déstocker de l'eau. Soit un prisme transversal à la nappe, d'épaisseur e , entre le substratum imperméable σ et la surface libre h .



surface libre $h(x,y)$

substratum imperméable $\sigma(x,y)$

On a :

$$\frac{\delta W}{\delta t} = - \int_{\sigma}^h \nabla q \cdot dz + q_s \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\delta W}{\delta t} = \int_{\sigma}^h \nabla(K \cdot \nabla h) \cdot dz + q_s$$

[La recharge surfacique q_s , pour une couche i donnée est constituée de la recharge imposée: injections (P-ETP pour la 1ère couche), pompages, infiltration, flux imposés... et de recharges éventuelles par drainance (échange entre deux nappes à travers l'éponte commune) avec la couche située au-dessus du toit de i et avec celle située en dessous du mur de i . Ce terme permet de tenir compte des échanges de la nappe avec l'extérieur en supposant qu'ils se réalisent sur toute son épaisseur].

Nous supposons que, dans cette nappe libre, toutes les vitesses sont horizontales et parallèles entre elles sur une même verticale (hypothèse de Dupuit, qui est bien satisfaite dans la réalité si l'épaisseur de la nappe est suffisamment faible par rapport à son extension horizontale et si la pente est faible).

D'après la loi de Darcy, s'il n'y a pas de composante verticale de la vitesse, c'est qu'il n'y a pas de gradient de charge vertical. Nous nous ramenons alors à un problème plan $h(x,y)$, car h est indépendant de z ; h représente ainsi la charge sur une verticale, et en particulier, la cote de la surface libre de la nappe.

Dans ces conditions d'écoulement bi-dimensionnel et en tenant compte de l'anisotropie:

$$\frac{\delta W}{\delta t} \cdot dx \cdot dy = \left[\frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{\delta h}{\delta x} \cdot \int_{\sigma}^h K_x \cdot dz \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{\delta h}{\delta y} \cdot \int_{\sigma}^h K_y \cdot dz \right) \right] dx \cdot dy + q_s \cdot dx \cdot dy$$

En simplifiant par $dx \cdot dy$, qui est l'aire élémentaire de la couche étudiée:

$$\frac{\delta W}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{\delta h}{\delta x} \cdot \int_{\sigma}^h K_x \cdot dz \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{\delta h}{\delta y} \cdot \int_{\sigma}^h K_y \cdot dz \right) + q_s$$

avec,

$$\int_{\sigma}^h K_x \cdot dz = T_x \quad \text{et} \quad \int_{\sigma}^h K_y \cdot dz = T_y$$

[La transmissivité T est égale en chaque point au produit de la conductivité hydraulique horizontale moyenne sur la verticale correspondante par la puissance de la nappe. Elle est constante dans le temps pour une nappe captive et varie avec la piézométrie pour une nappe libre. On supposera par la suite que T varie peu avec h , c'est à dire que les variations de h sont négligeables devant $(h-\sigma)$].

On a alors :

$$\frac{\delta W}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} (T_x \cdot \frac{\delta h}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (T_y \cdot \frac{\delta h}{\delta y}) + q_s$$

Dans un milieu isotrope et homogène: $T_x = T_y = T$ et $K_x = K_y = K$

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} = \frac{1}{T} \cdot \frac{\delta W}{\delta t} - \frac{q_s}{T}$$

Si on appelle S le coefficient d'emmagasinement défini, pour une nappe libre, comme étant le volume d'eau pouvant être effectivement libéré par un prisme vertical de matériau aquifère de section égale à l'unité, pour une baisse d'une unité de hauteur du niveau piézométrique :

$$\frac{\delta W}{\delta t} = S \cdot \frac{\delta h}{\delta t} \quad \text{et} \quad \frac{\delta W}{\delta h} = \int_{\sigma}^h \frac{\delta \theta}{\delta h} \cdot dz$$

Nous obtenons donc finalement l'équation de diffusivité, équation aux dérivées partielles, linéaire de second ordre et parabolique, dont l'intégration permet de calculer la fonction $h(x,y,t)$, soit l'évolution des charges et, consécutivement l'évolution des flux :

$$\nabla^2 h = \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} = \frac{\delta h}{\delta t} \cdot \frac{S}{T} - \frac{q_s}{T}$$

1.2. Résolution numérique

1.2.1. Le code informatique utilisé : WATASI 5 (WOLSACK, 1982)

WATASI (WATER TABLE SIMULATION) permet la modélisation des transferts saturés bidimensionnels au sein de systèmes aquifères multicouches connectés avec le réseau hydrographique.

L'équation de transfert utilisée est celle présentée ci-dessus (équation de diffusivité). Elle est linéarisée et appliquée au centre de chaque maille. Le problème continu est alors formalisé par un système d'équations aux dérivées partielles d'espace et de temps. Le système d'équations est de type parabolique quasi-linéaire en régime transitoire et de type elliptique quasi-linéaire en régime permanent.

La résolution du système des équations discrètes est effectuée par combinaison des procédures itératives de Newton et Frankel-Young, avec calcul de corrections sur toutes les mailles jusqu'à obtention d'un résidu (SUP) inférieur à une précision demandée sur le bilan des flux.

1.2.2. Discrétisation

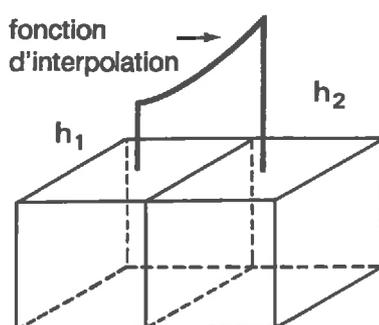
Deux familles de méthodes numériques sont actuellement employées pour résoudre les systèmes d'équations du type qui nous préoccupe:

- les méthodes aux différences finies,
- les méthodes aux éléments finis.

Elles permettent d'obtenir une solution approchée du problème en référence à un maillage spatial du domaine étudié. La solution approchée, ainsi que tous les paramètres distribués sont alors définis sur chaque maille.

La discrétisation permet ainsi de remplacer le système d'équations aux dérivées partielles par un système d'équations algébriques (linéaires si la nappe est captive et non linéaires si la nappe est libre).

La discrétisation spatiale retenue dans WATASI est aux éléments finis.



Les calculs se rapportent à des prismes à section carrée, au centre desquels une fonction d'interpolation est calculée. Le maillage spatial est de type "gigogne". Toutes les mailles sont des carrés de même orientation et de taille multiple d'une longueur référence donnée (ici 25 m).

Un maillage est défini pour chaque couche. Quelques règles simples régissent les rapports de voisinage entre mailles d'une même couche et entre mailles de couches différentes.

La discrétisation du temps est basée sur la méthode aux différences finies, en schéma implicite (on n'attribue pas à priori de valeurs numériques aux inconnues).

. *en régime permanent* on a $\partial h / \partial t = 0$ et l'équation de diffusivité devient:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} = -\frac{q_s}{T}$$

(équation différentielle aux dérivées partielles de type elliptique).

. *en régime transitoire* $\partial h / \partial t \neq 0$. La résolution du problème va consister à calculer les variations de potentiel et de flux entre deux instants t_n et t_{n+1} consécutifs. La division de cet intervalle de temps en pas de temps élémentaires Δt permet d'assurer la convergence du modèle (variations de stocks progressives) par incréments successives. Δt est estimé empiriquement en fonction de la taille des mailles élémentaires et du rapport T/S (diffusivité hydraulique) qui traduit la "nervosité" ou l'inertie de l'aquifère. On impose (WOLSACK, 1982):

$$\frac{1}{4} \frac{S_{\min}}{T_{\max}} \cdot dx^2 < \Delta t < \frac{1}{4} \frac{S_{\max}}{T_{\min}} \cdot dx^2$$

avec dx : dimension des mailles élémentaires.

1.2.3. Choix des conditions aux limites

Trois types de conditions aux limites des domaines d'intégration de l'équation de diffusivité sont généralement distinguées. On peut en fait les regrouper en deux ensembles:

- conditions de potentiel

. condition de DIRICHLET: la piézométrie est imposée sur la limite du domaine étudié. On suppose alors que la charge hydraulique sur la limite est indépendante des conditions de circulation dans la nappe;

- conditions de flux

. condition de NEUMANN: le débit traversant la limite est imposé;
 . condition de FOURIER: le débit traversant la limite vers l'extérieur est une fonction imposée de la piézométrie sur la limite.

Pour ce qui concerne WATASI, en régime permanent et transitoire, une condition aux limites en tout point de la frontière du domaine étudié est nécessaire.

Les échanges avec le réseau de surface sont pris en compte par drainage. On impose une condition de DIRICHLET pour la couche supérieure (charge imposée dans les thalwegs). La prise en compte d'un drain se traduit par une charge nulle imposée sur les mailles correspondantes (on impose une cote égale à celle du fond du thalweg, c'est à dire à la cote seuil de drainage). A l'exutoire (station SE0), le potentiel imposé correspond à la piézométrie mesurée (ou estimée pour les épisodes sans mesure). Sur les autres limites, la condition de NEUMANN est nécessaire. On peut alors distinguer les limites du domaine à flux nul et les limites à flux imposé non nul.

1.2.4. Choix de la condition initiale

Dans le cas du régime permanent ($\partial h/\partial t=0$), la connaissance de la piézométrie sur une maille du domaine à $t=0$ est suffisante (condition pour que le problème soit bien posé).

Dans le cas du régime transitoire ($\partial h/\partial t \neq 0$), la piézométrie doit être connue à $t=0$ en tout point du domaine.

2. MISE EN OEUVRE DU MODELE : acquisition des paramètres

Les différentes variables et paramètres du modèle sont rassemblés dans le tableau 4-2. Ils peuvent être classés en deux groupes: les paramètres géométriques et les paramètres hydrodynamiques. Certains sont d'accès plus ou moins aisé, d'autres n'ont pas été mesurés. C'est le cas notamment des flux de sortie q_{av} qui n'ont pas été mesurés pour des raisons pratiques: il est particulièrement difficile de capter toutes les eaux de drainage de la barre étudiée, qui constitue un interfluve. C'est pourquoi, des tests de sensibilité sont effectués, pour les paramètres les moins connus et pour ceux obtenus par l'intermédiaire de méthodes de mesure incertaines. Cette analyse de sensibilité est essentielle pour tester la validité des paramètres mesurés ou calés par le modèle.

TYPE DE VARIABLE		DESCRIPTION
Variables d'état et de sortie Variable d'entrée		. calculées par le modèle, pour chaque maille : piézométrie et flux . recharge, fonction de P et ETP (<i>connues</i>)
Paramètres	géométriques	. maillage spatial (<i>à définir</i>) ; géométrie de l'aquifère (<i>connue</i>)
	hydrodynamiques	. conductivité hydraulique à saturation K_s (<i>à mesurer</i>) . porosité de drainage μ (<i>ordre de grandeur connu</i>) et coefficient d'emmagasinement S (<i>inconnu</i>) . recharge par unité de surface (q_s) : fonction de transfert Pe (pluie efficace) : échanges verticaux atmosphère - surface (<i>inconnue</i>) . drainance D : échanges intercouche (<i>inconnue</i>)
Conditions aux limites		. condition de potentiel : piézométrie imposée dans les thalwegs (<i>connue en quelques points, estimée ailleurs</i>) . conditions de flux : - flux amont entrant q_{am} (<i>estimé : loi de Darcy</i>) - flux aval sortant q_{av} (<i>inconnu</i>) - flux nul sur les autres limites
Condition initiale		. piézométrie connue sur au moins une maille

Tableau 4-2 : Variables et paramètres du modèle

2.1. Paramètres géométriques

La géométrie de l'aquifère est schématisée par le maillage spatial. L'aquifère a pour limite supérieure la surface topographique, pour limite inférieure le substratum imperméable et pour limites latérales les deux thalwegs.

La définition du maillage repose sur deux critères majeurs. Il doit être compatible avec la densité d'informations disponibles, notamment les mesures de K_s , et il doit permettre de représenter la topographie et la superposition des matériaux. La dimension de maille élémentaire choisie est de 25x25 m.

La prise en compte de données texturales et piézométriques nous conduit à choisir un maillage tri-couche (Fig. 4-2). Les thalwegs sont matérialisés par une couche de surface (CT) de faible épaisseur qui permet de traduire leur rôle de drain. Sous cette couche, au niveau des thalwegs, et sur toute la surface de la barre - hors thalwegs - l'aquifère est schématisé par deux couches superposées C1 et C2. Elles sont séparées par une éponte ou semi-perméable de faible épaisseur (30 cm en moyenne). Les échanges d'eau (drainance) à travers cette éponte sont exprimés par un coefficient de drainance D de valeur inconnue qu'il nous faut estimer par calage.

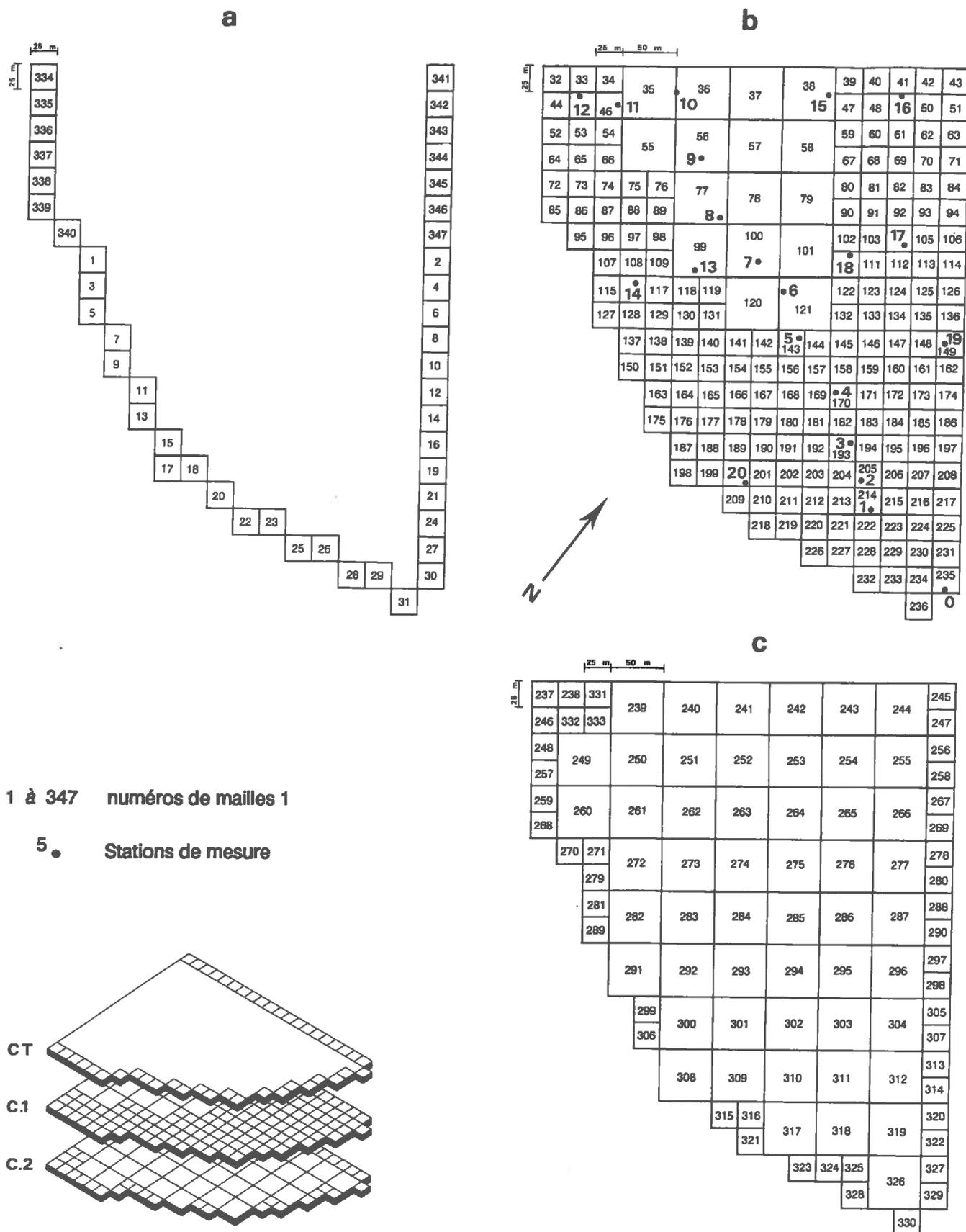


Figure 4-2 - Discrétisation de l'aquifère modélisé.

Domaine de surface : a) couche C_T (localisée aux thalwegs)

b) couche C_1 : surface topographique diminuée de la couche C_T .

Domaine de profondeur : c) couche C_2 .

Le flux à travers l'éponte est :
$$\frac{D \cdot e \cdot (H_2 - H_1)}{e}$$

avec D : coefficient de drainance ($D \cdot e$ = conductivité), e : épaisseur de l'éponte et $H_2 - H_1$: gradient de charge entre les couches C_1 et C_2 .

Cette formulation du débit de drainance n'est en toute rigueur valable qu'en régime permanent, car elle néglige la capacité de stockage de l'éponte en postulant que les flux entrant et sortant de l'éponte sont identiques. Etant donné la faible épaisseur du semi-perméable, les variations du stock en eau peuvent y être négligées.

Les cotes toit et mur de chaque couche (Annexe 5) sont calculées par interpolation linéaire des données topographiques et des observations sur sondages de la discontinuité texturale.

Le maillage retenu est donc composé de trois couches (C_1 , C_2 et C_T). Il respecte la topographie, les données pédologiques et permet la prise en compte des conditions aux limites (Fig. 4-3).

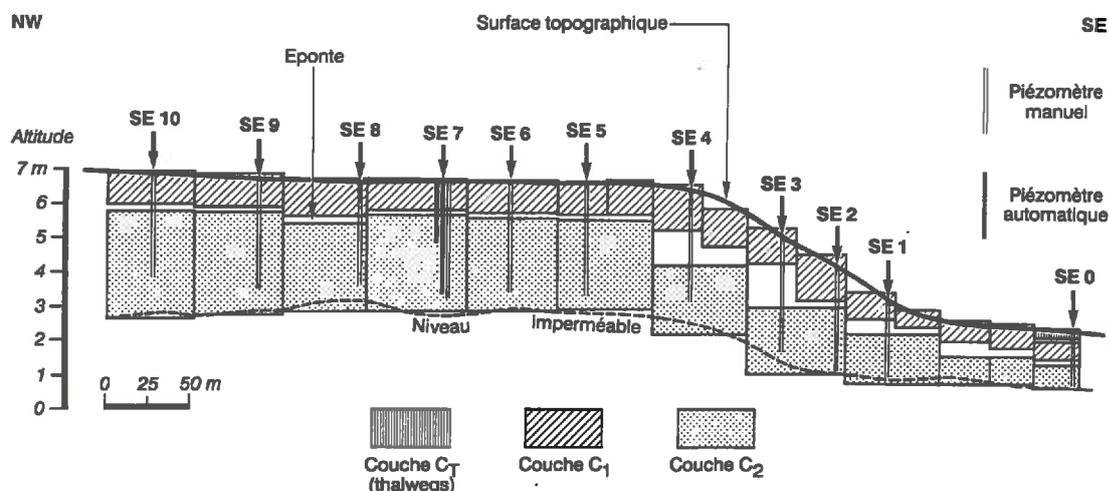


Figure 4-3 - Maillage vu en coupe. Transect (T1) passant par les stations de mesure.

2.2. Paramètres hydrodynamiques

Ils regroupent la conductivité hydraulique à saturation K_s , la porosité de drainage μ , le coefficient d'emmagasinement S et la recharge par unité de surface q_s .

2.2.1. Conductivité hydraulique à saturation

La connaissance d'une valeur de conductivité pour chaque maille et pour chacune des couches du maillage est nécessaire à l'identification de la recharge.

2.2.1.1. Méthode d'acquisition

L'acquisition d'une mesure tous les 25 m n'est pas réaliste. Nous avons, par conséquent, été conduits à utiliser une méthode de mesure nous permettant d'effectuer un nombre suffisant de mesures ponctuelles, pour pouvoir estimer une valeur de conductivité équivalente par maille élémentaire. Le dispositif de mesure doit de plus nous permettre d'une part d'estimer la variabilité spatiale de la conductivité K_s sur la totalité du domaine (15,8 ha) et d'autre part de caractériser tous les sols cartographiés sur toute l'épaisseur de l'aquifère. Or la nappe n'est jamais observée dans le premier mètre des sols ferrallitiques (horizons A_1).

On distingue deux groupes de techniques de mesure in situ de la conductivité hydraulique à saturation suivant qu'une nappe d'eau est présente ou absente (POIREE et OLLIER, 1981). Lorsqu'une nappe est présente elles permettent de caractériser les sols situés au dessus ou en dessous de la surface libre d'une nappe (BOUWER, 1961; BOERSMA, 1965a; 1965b; COLOMBANI et al., 1972; STEPHENS et NEUMAN, 1982; BOUMA, 1983b; SOELS, 1983; GONZALEZ-CASILLAS, 1984; BICKI et al., 1988)). Seules les méthodes de caractérisation des sols situés au dessus d'une nappe nous permettent de mesurer la conductivité des sols ferrallitiques. Parmi celles-ci, différentes techniques ne permettent que des mesures de surface (anneaux de Müntz...), à moins de creuser des fosses profondes. D'autres, comme les "tests de Porchet" à charge constante, utilisent de grandes quantités d'eau qui deviennent démesurées lorsque l'on désire effectuer de nombreuses mesures. Il apparait en conclusion, que la méthode dite des "tests de Porchet" à charge variable est celle qui répond le mieux aux critères définis ci-dessus. C'est cette méthode que nous avons par conséquent retenu malgré les nombreuses critiques qui lui sont faites.

Le principe de la méthode consiste à mesurer la vitesse d'infiltration d'une charge d'eau variable à l'intérieur d'un trou de tarière préalablement saturé. Trois critiques essentielles sur le plan théorique sont formulées habituellement.

- 1) Pour que la loi de Darcy puisse être appliquée, le sol est supposé être homogène et isotrope, ce qui est rarement le cas.
- 2) L'eau s'infiltré par les parois latérales et la base du trou, aussi la direction de la composante de la perméabilité mesurée est considérée comme étant oblique, sans que l'on soit réellement assuré de sa direction.
- 3) Le gradient hydraulique est supposé être égal à 1, ce qui n'est certainement pas le cas. BOUMA (1971) déconseille l'utilisation de cette méthode, car il considère que le problème est physiquement mal posé et, que les résultats obtenus sont excessivement aléatoires.

A la suite de COLOMBANI et al. (1972), et pour répondre à la première critique, la méthodologie de dépouillement repose sur la loi de Darcy appliquée à une superposition de couches de 10 à 15 cm d'épaisseur, que l'on peut alors supposer homogènes et isotropes. La seconde critique est tout à fait fondée et doit être prise en compte. Pour ce qui concerne le gradient i , celui-ci peut être considéré comme étant voisin de 1 si l'épaisseur initiale de la lame d'eau dans le trou h est négligeable devant l'épaisseur de sol traversée par la lame d'eau après infiltration E ($i = (E+h)/E$). On veillera donc, lorsque l'on veut mesurer la conductivité d'une grande épaisseur de sol, à procéder par approfondissements successifs.

Ceci étant, différentes précautions sont à respecter lors des mesures. Elles concernent en tout premier lieu les conditions de saturation du sol préalables aux mesures.

2.2.1.2. Acquisition et analyse des résultats

La distribution des K_s est déterminée par plusieurs séries d'essais, sur 71 sites (avec en moyenne 3 répétitions par site soient 189 mesures entre 0 et 50 cm de profondeur et 198 mesures au-delà) répartis aux noeuds d'une grille carrée de maille 50 m (la localisation des sites est précisée en Annexe 1). Une série de mesures est réalisée avec un écartement de 25 m pour prendre en compte une éventuelle micro-structure de surface. Les essais sont conduits jusque vers trois mètres de profondeur par un ou deux approfondissements successifs et permettent ainsi de caractériser les matériaux sablo-argileux surmontant le substratum imperméable.

Un programme de dépouillement, écrit en langage FORTRAN 77 (Annexe 6), permet d'obtenir les conductivités élémentaires K_i , qui sont composées en conductivités équivalentes K_e (composition en série : $K_e.L_e = \sum K_i.L_i$) affectées aux principaux matériaux pédologiques. Trois conductivités sont calculées : la première K_{1sup} (0-50 cm) correspond à l'horizon cultivé à forte densité racinaire, les deux autres sont affectées aux horizons encadrant la discontinuité texturale, soit K_{1inf} (50 cm -Discontinuité Texturale DT) et K_2 (DT-Niveau Imperméable NI).

Une analyse critique des résultats nous permet d'estimer l'erreur imputable à la méthode de mesure : $\pm 50\%$ (estimation obtenue après simulation, sur quelques cas, d'une erreur de lecture - $\pm 0,5$ cm, ± 1 cm, $\pm 1,5$ cm et ± 2 cm - sur la règle graduée indiquant la baisse de la lame d'eau, et conséquences sur le calcul de la conductivité), ce qui constitue une précision tout à fait acceptable en regard du fait que généralement deux conductivités sont jugées significativement différentes si elles diffèrent d'au moins une puissance de dix (CASTANY, 1966). Pour KLUTE (1965), l'intervalle de confiance de K_s pour trois répétitions est de $1.9 \times K_{moyen}$.

K_s	Strate	N	m	E.T	C.V	mini	maxi	As	Ap
K_{1sup}	0-50 cm	189	71,3	68,0	95,3	1,1	353,7	1,58	2,41
K_{1inf}	50-D.T	197	14,2	17,6	123,9	0,2	91,8	2,24	4,91
K_2	D.T-N.I	198	12,1	14,6	120,7	0,1	67,5	1,62	2,04

D.T : Discontinuité Texturale

m : Moyenne

E.T : Ecart-type

C.V : Coefficient de variation

N.I : Niveau Imperméable

As : Coefficient d'asymétrie

Ap : Coefficient d'applatissage

Tableau 4-3 : Paramètres statistiques des conductivités hydrauliques mesurées (10^{-6}ms^{-1})

De nombreuses études montrent que les valeurs de conductivité hydraulique à saturation et de transmissivité mesurées sur le terrain sont distribuées lognormalement (de MARSILY, 1981). Les paramètres statistiques (moyenne, écart-type, coefficient de variation, minimum, maximum, coefficients d'asymétrie et d'applatissage) des conductivités hydrauliques mesurées sur notre site, sont rassemblés dans le tableau 4-3. Les valeurs calculées des coefficients d'asymétrie et d'applatissage semblent montrer une asymétrie de la loi de distribution des trois valeurs de conductivité, confirmée par les fréquences de distribution (Fig. 4-4). L'ajustement d'une loi lognormale, bien qu'imparfait, semble satisfaisant et en accord avec cette notion généralement admise.

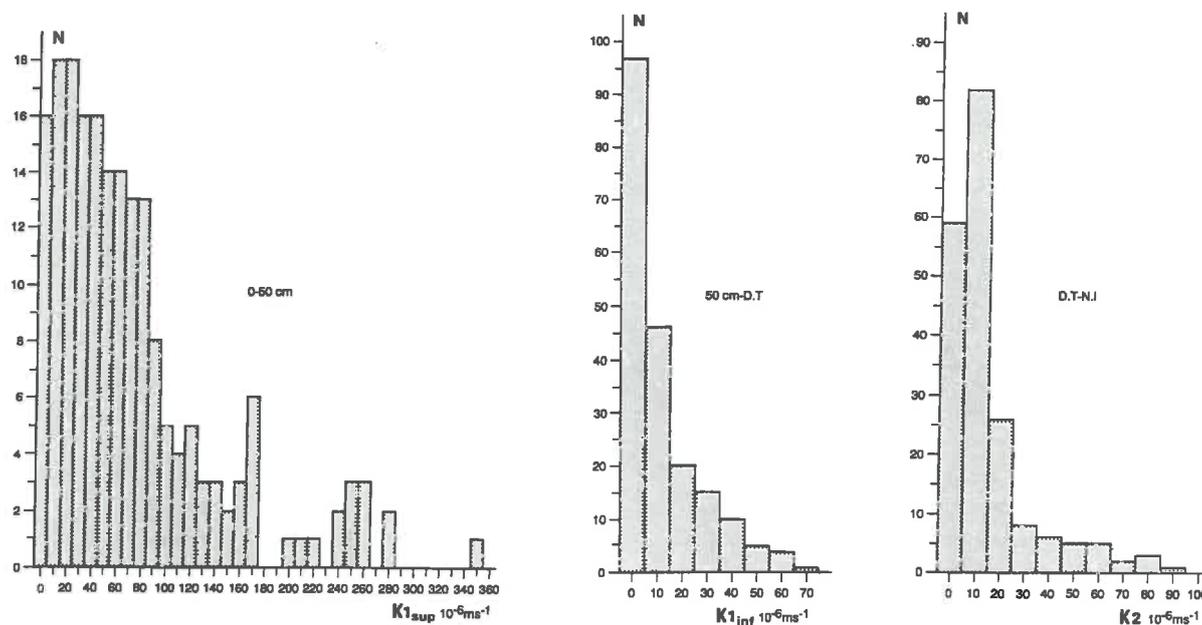


Figure 4-4 -
 Histogrammes expérimentaux des valeurs de conductivités hydrauliques à saturation. D.T. : discontinuité texturale, NI : niveau imperméable.

Le coefficient de variation, compris entre 95 % et 124 % suivant la couche de mesure, souligne la variabilité des valeurs de conductivités, conformément aux différents travaux cités par VAUCLIN (1982). La comparaison des écarts-types calculés pour nos données avec ceux fournis par d'autres auteurs (cf synthèses bibliographiques de FREEZE (1975), WARRICK et NIELSEN (1980) et HOEKSEMA et KITANIDIS (1985)) montre clairement que, étant données les dimensions relativement faibles de la barre pré littorale, le milieu poreux étudié est caractérisé par une variabilité spatiale de la conductivité hydraulique à saturation, qu'il est difficile d'explicitier simplement. On constate cependant des différences significatives entre les trois couches étudiées. Les cinquante premiers centimètres sont caractérisés par une variabilité plus élevée que celle notée dans les horizons sous-jacents.

Les variogrammes expérimentaux calculés pour chacune des trois couches sont représentés sur la figure 4-5. Les courbes théoriques sont obtenues par ajustement d'un modèle sphérique aux valeurs mesurées, représentées ici par des points, par approximation par la méthode des moindres carrés (McBRATNEY et WEBSTER, 1986). Les paramètres des variogrammes (pépite, palier et portée) suggèrent trois remarques :

1- les rapports entre les tailles de l'effet de pépite et du palier sont du même ordre de grandeur pour les trois couches;

2- l'effet de pépite représente la somme des erreurs de mesure et des micro-variations à l'intérieur de l'intervalle d'échantillonnage le plus faible (25 m). Si l'on considère que les erreurs expérimentales sont identiques pour les trois couches, il en résulte que les variations de taille de l'effet de pépite constatées ne sont liées qu'aux différences de micro-variabilité entre les couches. De surcroît, l'erreur de mesure est très faible et inférieure à la valeur de l'effet de pépite la plus faible;

3- la portée de chaque variogramme, qui traduit la distance d'autocorrélation entre les points de mesure, est très voisine et comprise entre 90 et 100 m.

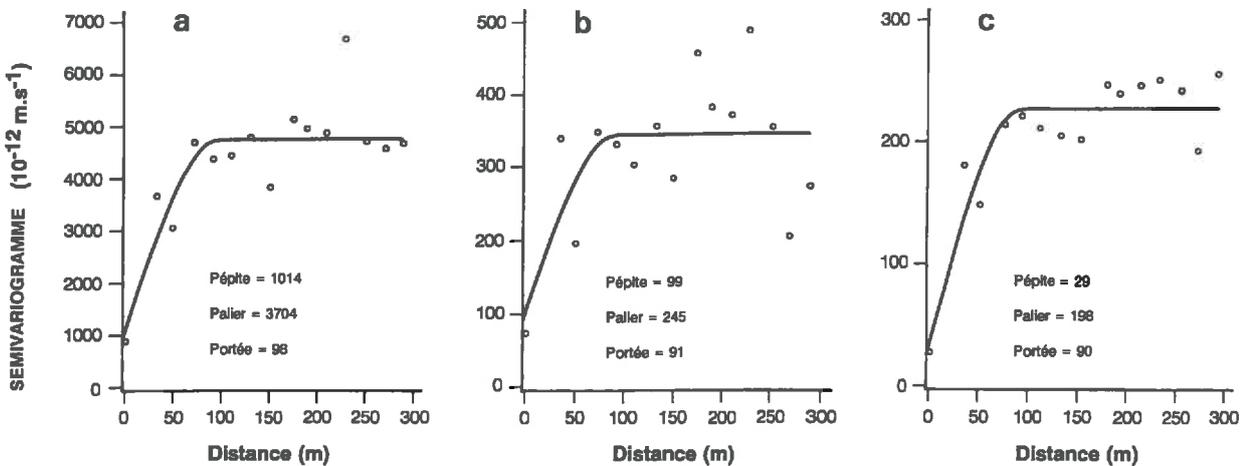


Figure 4-5 - Variogrammes expérimentaux et théoriques des conductivités hydrauliques à saturation.

a) $K_{1\text{sup}}$ (0-50 cm) ; b) $K_{1\text{inf}}$ (50 cm - Disc. texturale) ; c) K_2 (D.T. - Niveau imper.).

2.2.1.3. Interpolation des données ponctuelles

La mise en évidence d'une distribution non aléatoire des conductivités hydraulique à l'échelle de la barre pré littorale, permet d'effectuer une interpolation par krigeage des valeurs mesurées. Il en résulte le calcul d'une valeur moyenne de conductivité pour chacun des blocs élémentaires du maillage défini précédemment.

L'estimation de conductivités équivalentes sur des blocs à partir de mesures ponctuelles, soulève de fait le problème fondamental du changement d'échelle.

Dans le cas d'un milieu stratifié et lorsque la loi de distribution des conductivités est log-normale, il est connu que la conductivité équivalente est égale à la moyenne arithmétique des conductivités de chaque strate dans le cas d'écoulements parallèles aux strates, alors qu'elle est égale à la moyenne harmonique dans le cas d'écoulements perpendiculaires (GELHAR, 1984).

Dans le cas d'un milieu à conductivités régionalisées, lorsque l'écoulement est bidimensionnel et que la loi de distribution des conductivités est lognormale, MATHERON (1984) montre que le milieu se caractérise par une perméabilité macroscopique exactement égale à la moyenne géométrique des perméabilités ponctuelles. Ce résultat incite dès lors à effectuer une interpolation par krigeage sur les transformées logarithmiques. Cependant, dans le cas d'écoulements tridimensionnels, la conductivité équivalente apparaît supérieure à la moyenne géomé-

trique et plus proche de la moyenne arithmétique (GUTJAHR et al., 1978; PECK, 1983; MATHERON, 1984). L'interpolation doit alors être réalisée par un krigeage normal. DELHOMME (1984) explique ce résultat par le fait que "les filets de courant ont plus de facilités à trois dimensions pour contourner les zones de mauvaise perméabilité". De MARSILY (1981), citant les travaux de MATHERON (1967), signale que dans le cas d'écoulement uniforme la perméabilité moyenne est toujours comprise entre la moyenne harmonique ($1/K_{\text{moy}} = E(1/K)$) et la moyenne arithmétique ($K_{\text{moy}} = E(K)$) des perméabilités locales, quelles que soient la loi de distribution de K et le nombre de dimensions de l'espace.

En ce qui concerne notre étude, le modèle utilisé ne prend en compte que des écoulements bidimensionnels, ce qui doit nous conduire à utiliser la règle de composition géométrique des conductivités ponctuelles. On peut cependant se demander si dans le milieu étudié, manifestement hétérogène, et étant donnée la taille des mailles de discrétisation, la présence de lentilles de dimensions importantes et de faible conductivité ne doit pas nous inciter à privilégier l'emploi de la règle de composition arithmétique.

Aussi, et dans la mesure où il ne saurait être question de faire un choix à priori, les deux règles de composition ont été employées; un krigeage des valeurs brutes de conductivité et un krigeage des transformées logarithmiques ont été successivement réalisés afin de calculer une valeur moyenne de conductivité sur chaque maille carrée de 25 m de côté. L'influence des deux krigeages sur l'identification de la recharge est analysé ultérieurement (Chapitre 5).

	K_S	Couche	N	m	E.T	C.V	mini	maxi
K_N	$K1_{\text{sup}}$	0-50 cm	253	66,7	42,7	64,0	4,6	222,9
	$K1_{\text{inf}}$	50 cm-D.T	253	12,4	9,5	76,6	1,4	55,7
	$K2$	D.T-N.I	253	10,3	10,1	98,0	0,6	49,9
K_{Ln}	$K1_{\text{sup}}$	0-50 cm	253	51,9	36,4	70,1	2,6	174,0
	$K1_{\text{inf}}$	50 cm-D.T	253	8,8	7,2	81,8	0,6	45,3
	$K2$	D.T-N.I	253	7,4	8,9	120,3	0,3	50,5

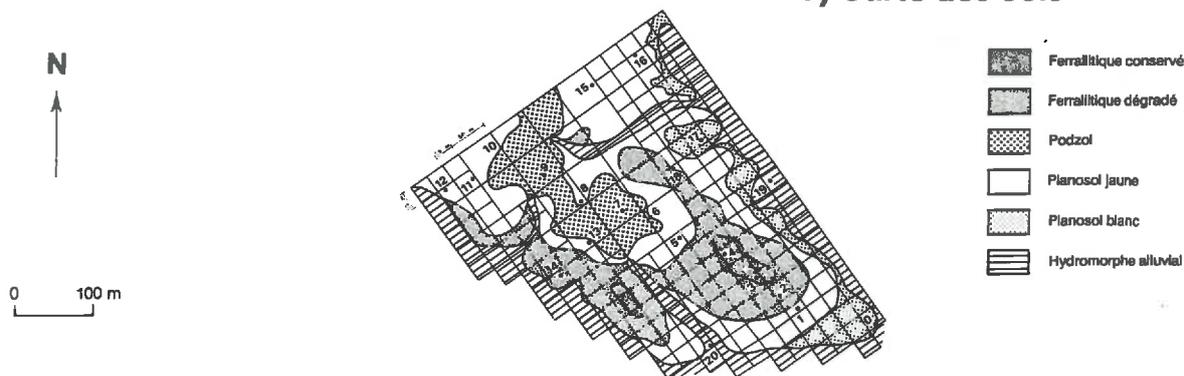
Tableau 4-4 : Paramètres statistiques des conductivités hydrauliques estimées par krigeage normal (K_N) et krigeage log-normal (K_{Ln}) [10^{-6} ms^{-1}]

Le tableau 4-4 rassemble les paramètres statistiques des valeurs krigées. Comme la logique le laissait supposer, les valeurs issues du krigeage sur les conductivités logarithmiques se caractérisent par une moyenne et une variabilité plus faibles que celles obtenues avec le krigeage normal. Une carte des conductivités et des écarts-types est obtenue pour chaque tranche de profondeur et peut alors être comparée à la carte des sols.

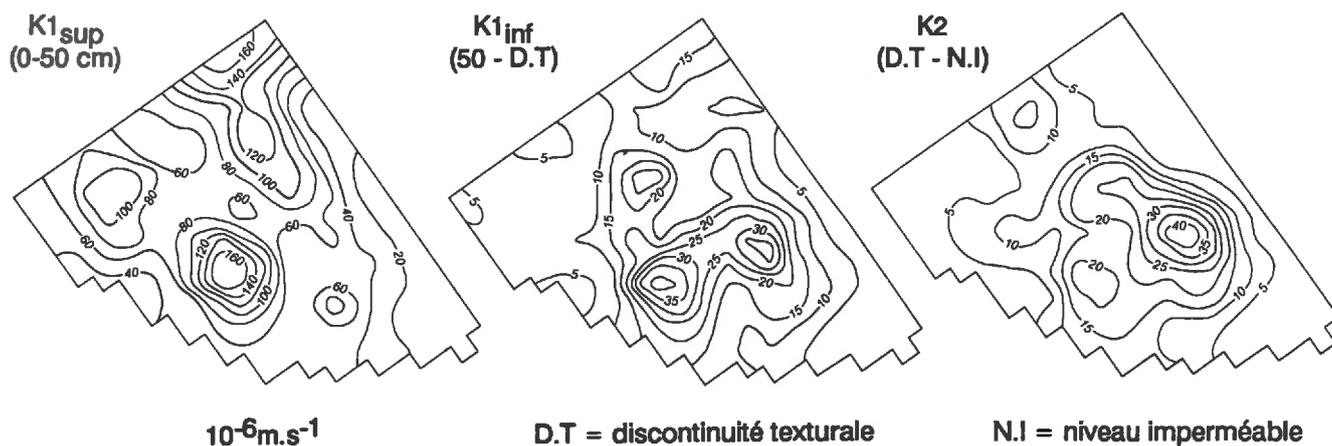
Les cartes des conductivités (krigeage normal) montrent des valeurs comprises entre 10^{-6} et 10^{-4} ms^{-1} sur l'ensemble du site (Fig. 4-6).

a) de 0 à 50 cm de profondeur on distingue trois zones. Dans l'axe de la barre les conductivités sont homogènes et faibles (5 à $7 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$). Sur le versant sud-ouest et la partie supérieure du versant est, elles sont plus fortes (8 à $16 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$) alors que, sur les bordures et à

a) Carte des sols



b) Conductivités krigées (krigeage normal)



c) Ecart-types d'erreur (krigeage normal)

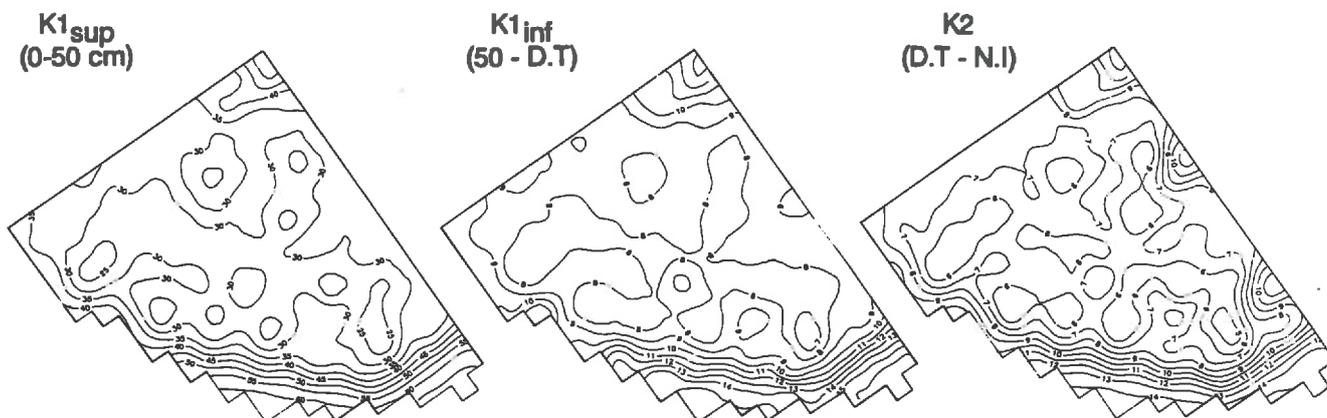


Figure 4-6 - Comparaison de la carte des sols et des cartes des valeurs de conductivités hydrauliques krigées (krigeage normal).

a) carte des sols b) carte des conductivités c) carte des écarts-types d'erreur

l'aval, les valeurs sont plus faibles ($1 \text{ à } 5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$). La zone latérale sud-ouest (interrompue par un thalweg), à "forte" conductivité, peut être assimilée aux sols ferrallitiques. Les autres zones ne peuvent être directement reliées aux unités de sols. Notons de plus, l'existence d'un gradient centrifuge à valeurs croissantes et d'un gradient à valeurs décroissantes dans les thalwegs d'amont en aval.

b) en dessous de 50 cm de profondeur et sous la discontinuité texturale DT, les conductivités sont faibles ($1 \text{ à } 40 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$). Les valeurs les plus fortes sont localisées au centre du domaine, et parmi celles-ci deux zones, de conductivité comprise entre 20 et $40 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$, peuvent être distinguées au niveau des ferrallitiques.

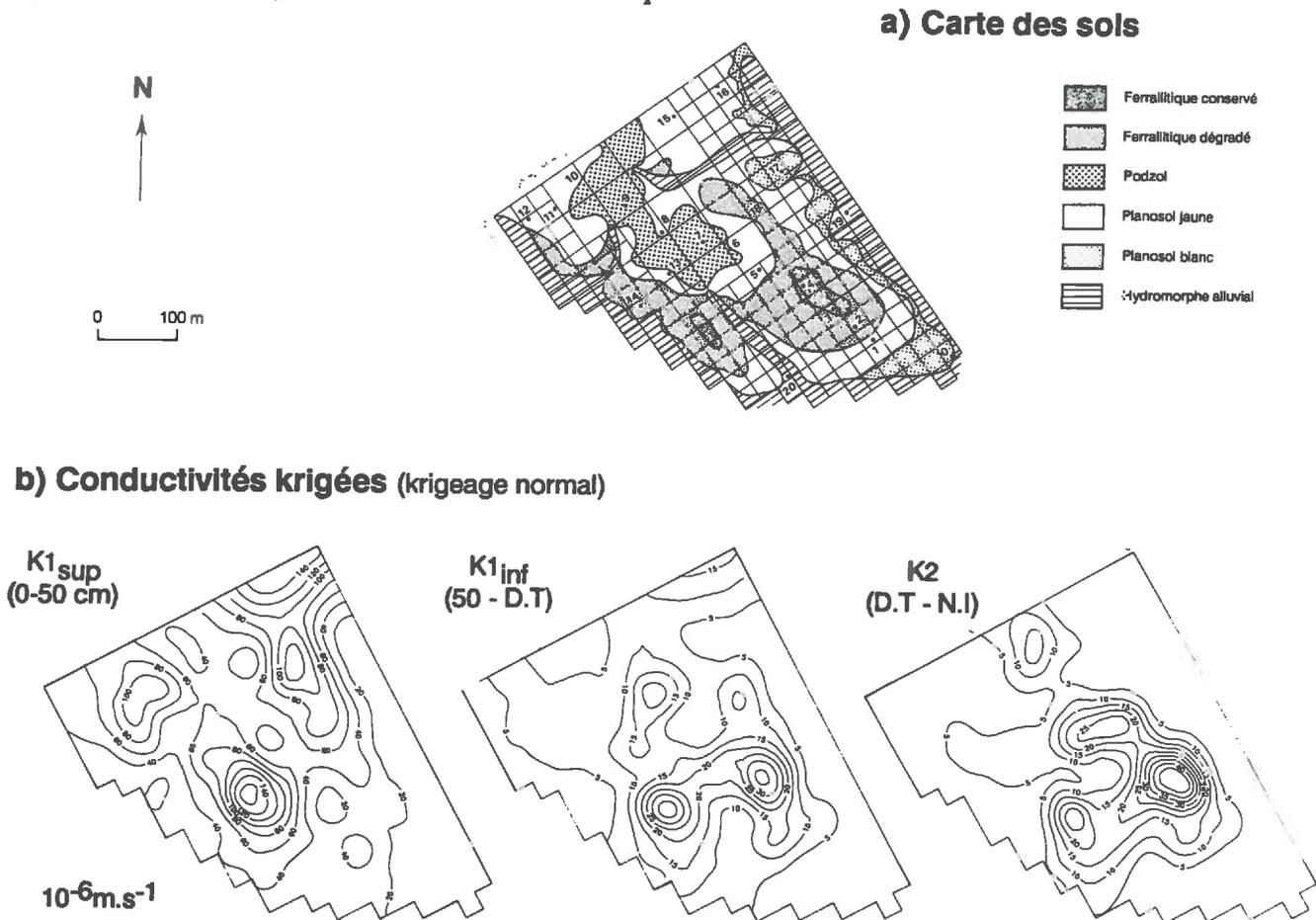


Figure 4-7 - Comparaison de la carte des sols et des cartes des valeurs de conductivités hydrauliques krigées (krigeage log-normal).
 (a) carte des sols b) carte des conductivités

Les cartes des conductivités issues du krigeage log-normal (Fig. 4-7) sont peu différentes. La structure globale est conservée, seules les valeurs extrêmes sont réduites.

La loi de distribution de l'erreur ne suit pas une loi normale, et l'intervalle de confiance sur l'estimation du logarithme de la conductivité devient un facteur de multiplication sur l'estimation de la valeur naturelle de la conductivité hydraulique. La représentation traditionnelle de la carte des écarts-types n'est pas, par conséquent, significative dans ce cas. C'est pourquoi, seules les cartes de conductivités sont présentées.

Une structure spatiale de la conductivité est donc mise en évidence. Seuls les sols ferrallitiques (zones d'épaulement) apparaissent bien différenciés du point de vue des Ks avec des

valeurs plus élevées (dans les cinquante premiers cm et en profondeur). La différence de variabilité, mise en évidence entre les niveaux de surface à forte hétérogénéité, et les niveaux profonds à faible hétérogénéité, semble pouvoir être reliée à l'homogénéité initiale du dépôt d'origine sédimentaire. Il reste à la confirmer ultérieurement.

Les valeurs de conductivité affectées à chacune des mailles des couches C1, C2 et CT, issues du krigeage normal et log-normal, sont rassemblées en Annexe 7. Pour la couche CT, les valeurs de conductivité sont celles de la tranche de sol 0-50 cm ($K_{1\text{sup}}$), pour la couche C2 ce sont les valeurs K2. La faible épaisseur de la tranche de sol située au dessus de la discontinuité texturale (78 cm en moyenne), nous a conduit à ne considérer qu'une seule couche de surface, C1, dont les mailles élémentaires sont affectées d'une conductivité équivalente, égale à la composée (en série) des conductivités $K_{1\text{sup}}$ et $K_{1\text{inf}}$.

2.2.2. Porosité de drainage μ et Coefficient d'emmagasinement S

La mise en évidence d'une éponte nous conduit à considérer, pour certaines étapes de la modélisation, une nappe libre, située au-dessus de l'éponte et une nappe captive, située en dessous. Il s'agit d'une schématisation (basée sur les relevés des piézomètres profonds et de moyenne profondeur). Aussi, il est nécessaire d'estimer la porosité de drainage μ et le coefficient d'emmagasinement S. Rappelons, que le premier paramètre représente la part de porosité qui peut être drainée par gravité, dans le cas d'une nappe libre, et le second exprime la réaction de stockage d'un milieu poreux à une sollicitation hydraulique, dans le cas d'une nappe semi-captive (de MARSILY, 1981).

2.2.2.1. porosité de drainage

μ est déterminé sur le terrain soit en utilisant un réseau de drainage (il n'en n'existe pas sur le site), soit par la méthode du puits et des piézomètres établie par GUYON (CHOSSAT, 1985). Un certain nombre de mesures de μ ont pu être réalisées dans la savane de Corossony, dont une sur le site lui-même, dans le cadre de l'opération Secteur de Référence Drainage (FAVROT et al., 1987). La généralisation de ces mesures sur la barre n'a pu être effectuée pour des raisons matérielles (lenteur des mesures et mesures effectuées à la fin de la saison des pluies en période de rabattement de la nappe).

Deux méthodes différentes nous permettent d'estimer grossièrement μ .

1) Les valeurs de porosité calculées à partir des quelques essais "puits et piézomètres". Elles sont rassemblées dans le tableau 4-5. Sur planosol et podzol la porosité de drainage est comprise entre 0.4 et 5 % (aucune mesure n'a été effectuée sur sol ferrallitique).

2) L'exploitation des données d'humidimétrie neutronique, permet d'estimer la variation de stock en eau (ΔS , mm) de la couche de sol comprise entre le niveau initial et le niveau final de la nappe, lors d'un rabattement. Cette valeur de ΔS divisée par l'épaisseur de la couche correspond à une approximation de la porosité de drainage. Les valeurs moyennes, calculées

par station, sur plusieurs épisodes climatiques, figurent dans le tableau 4-6. Elles sont comprises entre 0.7 et 2.3 %.

Sol	mesure n°	μ (%)
Planosol	3 et 5	4
	4	1,8

* : Mesure effectuée sur la station SE7.

Tableau 4-5 : Porosité de drainage μ mesurée sur deux types de sols de la savane de Corossony, avec la méthode "Puits et piézomètres" (d'après FAVROT et al. , 1987).

Sol	Station	μ (%)	σ_n *	n **
Planosol	SE1	0.7	0.4	15
Ferrallitique	SE2	1.9	1.7	11
Ferrallitique	SE4	2.3	1.9	4
Planosol	SE5	1.8	2.0	13
Podzol	SE7	1.2	0.9	20
Planosol	SE10	1.6	1.4	17

* : Ecart-type ; ** : Echantillon

Tableau 4-6 : Porosité de drainage μ estimée à l'aide de mesures d'humidité neutroniques (variation du stock en eau entre deux niveaux de nappe, lors d'épisodes de rabattement de nappe). Valeurs moyennes calculées sur n épisodes.

Nous constatons, en conclusion, des ordres de grandeur voisins pour les deux méthodes. Nous retiendrons en définitive les valeurs fournies par la méthode "neutronique" qui a l'avantage de nous fournir des estimations de μ en un plus grand nombre de points.

2.2.2.2. Coefficient d'emmagasinement

S est déterminé habituellement in situ par pompage. Cette mesure, lourde à mettre en oeuvre (pompages profonds) n'a pu être réalisée sur notre site. Il est cependant établi qu'il varie dans le même sens que μ . D'après de MARSILY (1981) S est environ mille à dix mille fois plus petit que μ . Pour CASTANY (1966) S est généralement compris entre 10^{-3} et 10^{-6} . Le calage est donc initié avec une valeur unique sur l'ensemble du maillage égale à 10^{-4} .

2.2.2.3. Conclusion

μ et S sont mal évalués. Seul l'ordre de grandeur de ces deux paramètres est connu. C'est pourquoi des tests de sensibilité du modèle à ces deux paramètres sont mis en oeuvre. Les valeurs de μ estimées et les valeurs de S , dont l'ordre de grandeur est connu, sont prises comme valeurs initiales pour l'identification de la recharge, puis calées en régime transitoire.

2.2.3. Recharge par unité de surface q_s

La recharge q_s se décompose (Fig. 4-8), suivant la couche considérée, en **pluie efficace** Pe (fonction de transfert représentant les flux de drainage à l'interface des zones non saturée et saturée), qui est identifiée au cours de la modélisation, et en **échanges par drainance** dépendant d'un coefficient D inconnu, qui est estimé par calage en régime permanent puis affiné en régime transitoire. Au voisinage de la limite NW, la recharge inclut également les **flux amont** q_{am} en limite du domaine souterrain. Ces apports n'ont pas été mesurés et sont estimés par calcul.

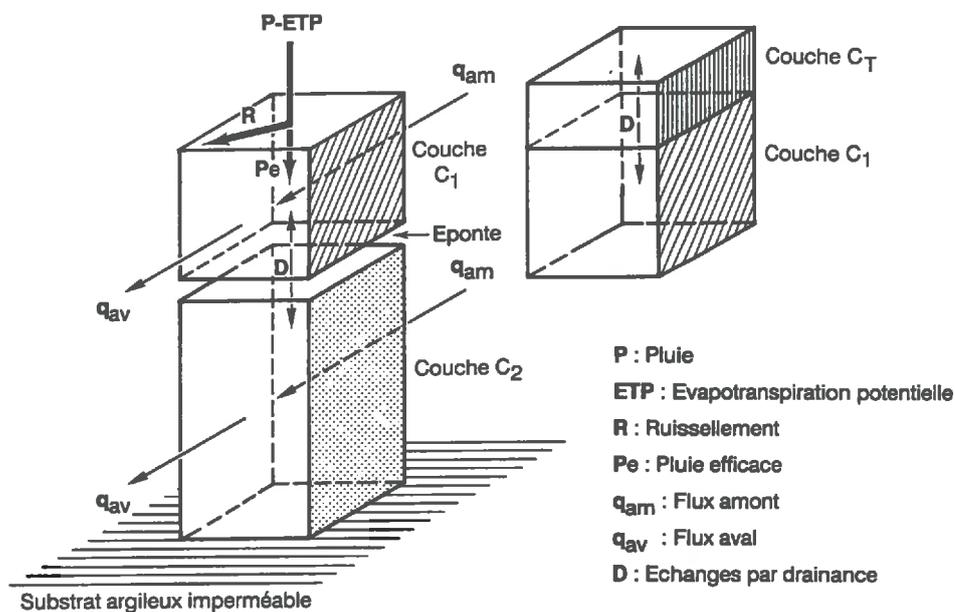


Figure 4-8 - Schéma montrant les principaux flux échangés entre l'extérieur et les trois couches C_1 , C_2 et C_T (les échanges latéraux entre les mailles d'une même couche ne sont pas représentés sur cette figure).

La pluie efficace n'est pas constante, ni dans le temps, ni dans l'espace, même si la pluie effective est considérée comme étant constante sur la surface de la barre. La pluie efficace est fortement dépendante de la pluie et de l'état hydrique de surface. Les processus physiques mis en jeu sont cependant complexes et impliquent notamment des mesures de ruissellement qui sont particulièrement délicates à conduire et qui n'ont pas été effectuées ici.

La résolution du problème consiste donc à estimer, simultanément sur chacune des mailles de l'aquifère, une valeur de pluie efficace particulière. L'identification simultanée de 253

inconnues est irréaliste. Seule une technique de *paramétrisation* (diminution du nombre de paramètres inconnus) peut nous permettre de résoudre ce problème (YEH, 1986). Parmi les deux techniques recensées par YEH, nous avons retenu la méthode dite du zonage, qui consiste à **diviser le domaine de transferts en n zones caractérisées par un paramètre à valeur constante** (EMSELLEM et de MARSILY, 1971; COOLEY, 1977, 1979). Le paramètre inconnu, ici la pluie efficace, est alors représenté par un nombre d'inconnues égal au nombre de zones, soit six zones dans un premier temps (Chapitre 5).

Dans la suite de notre travail, la pluie efficace est identifiée pour chaque simulation en régime permanent et en régime transitoire, alors que le zonage, défini ultérieurement, est considéré comme constant dans le temps.

2.3. Les conditions aux limites

On distingue les conditions sur les limites aval, amont et latérales.

2.3.1. Condition aval

Le flux de sortie aval q_{av} n'est pas mesuré, il est difficilement accessible. La position du site en interfluve implique pour sa mesure l'installation d'un vaste dispositif de captage des eaux de drainage.

La condition de flux sur la limite aval est remplacée par une *condition de potentiel*. La piézométrie sur SE0 est connue avec une bonne précision pour l'année 1987, par contre pour les années antérieures, elle est estimée à partir d'observations visuelles et par analogie avec les mesures de 1987. La méconnaissance de cette condition aval est essentielle. Elle peut en effet conduire à sous-estimer les écoulements au sein de l'aquifère et, par conséquent, sous-estimer les flux de recharge de la nappe. Ces écoulements, régis par la loi de Darcy, dépendent de la conductivité hydraulique des sols. C'est pourquoi, une analyse de sensibilité du modèle aux valeurs de conductivité hydraulique est effectuée. Elle nous permet d'affiner la connaissance des conductivités et, par conséquent, de pouvoir identifier la recharge de façon satisfaisante. Un test de sensibilité sur q_{av} est d'autre part réalisé en régime transitoire.

2.3.2. Condition amont

Les apports souterrains q_{am} sur la limite amont peuvent être estimés par calcul (loi de Darcy), connaissant K_s et le gradient de potentiel, existant entre les stations SE9 et SE10, situées à l'aplomb de la surface d'échange (Fig. 4-9). Cette surface d'échange est égale à la surface latérale des mailles 35, 36, 37 et 38 pour la couche C1 et des mailles 239, 240, 241 et 242 pour la couche C2. Ce flux fait l'objet d'un calcul pour chaque épisode permanent et pour chaque pas de temps des épisodes transitoires étudiés.

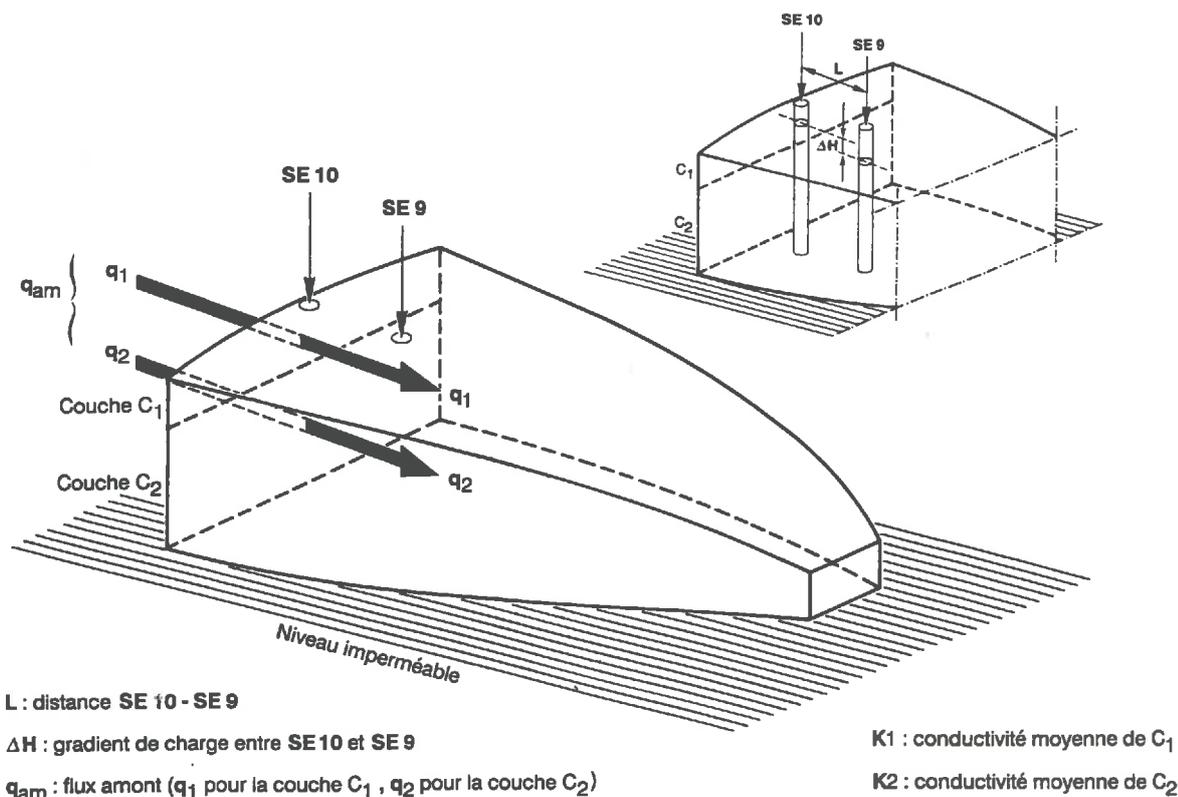


Figure 4-9 - Estimation des flux amont souterrains q_{am} pour les couches C_1 et C_2
 $q_1 = (K_1 \cdot \Delta H) / L$ et $q_2 = (K_2 \cdot \Delta H) / L$

Ainsi les 12 et 13/05/86 :

- * gradient de potentiel SE10-SE9 : $\Delta H = 5.10^{-1} m$;
- * distance SE10-SE9: $L = 65 m$;
- * conductivités moyennes par couche : $C_1, K_1 = 40.10^{-6} ms^{-1}$
 $C_2, K_2 = 4.10^{-6} ms^{-1}$;
- * surfaces d'échange : C_1 (épaisseur moyenne = 1 m) $S = 200 m^2$
 C_2 (épaisseur moyenne = 3 m) $S = 600 m^2$;

d'où, comme $q = K \cdot \Delta H / L$, le flux à travers la couche C_1 est $q_1 = 30.76 \cdot 10^{-8} ms^{-1}$ ($26.6 mmj^{-1}$) et, à travers la couche C_2 , $q_2 = 3.08 \cdot 10^{-8} ms^{-1}$ ($2.7 mmj^{-1}$). Soit un débit à travers chaque couche de $6.15 \cdot 10^{-5} m^3 s^{-1}$ et $1.85 \cdot 10^{-5} m^3 s^{-1}$. A travers toute la surface d'échange le débit total est de $8 \cdot 10^{-5} m^3 s^{-1}$ ($6.9 m^3 j^{-1}$).

Sur cet exemple, les valeurs de q_{am} sont faibles. Elles sont cependant certainement sous-estimées, car, en appliquant la loi de Darcy, on suppose que la surface de la nappe est contenue dans un plan horizontal, alors qu'elle est en réalité légèrement convexe. Suivant la position des deux stations de référence on peut donc faire une erreur de $\pm 10 cm$ sur le gradient. C'est pourquoi, une analyse de sensibilité du modèle aux flux amont q_{am} calculés est effectuée par la suite.

2.3.3. Conditions latérales

La connaissance de la piézométrie dans les thalwegs latéraux est imprécise (stations piézométriques installées en juillet 1987). Elle est compensée par des observations visuelles: thalwegs fonctionnels durant toute la saison des pluies puis s'assèchant environ 3 semaines après la fin des pluies (Chapitre 3). Les thalwegs sont donc assimilés à des drains.

2.4. Conclusion

Parmi les différents paramètres du modèle certains sont relativement bien connus. C'est le cas de la géométrie du volume étudié et des conductivités hydrauliques K_s . D'autres, comme le coefficient de drainance D , qui permet de calculer la conductivité hydraulique de l'éponte, la porosité de drainage μ et le coefficient d'emmagasinement S , sont mal connus. Le coefficient de drainance est obtenu par calage en régime permanent et transitoire, alors que μ et S sont calés en transitoire (couches C1 et C2).

La pluie efficace P_e est identifiée au cours de chaque simulation en régime permanent et transitoire. Le zonage de la mobilisation de la pluie efficace est calé en régime permanent, puis validé en régime permanent et en régime transitoire. Les flux amont q_{am} sont estimés par calcul. L'absence de mesure des flux de sortie q_{av} nous conduit à développer une analyse de sensibilité du modèle aux conductivités.

Des tests de sensibilité du modèle pour la conductivité K_s , la profondeur du niveau imperméable, le débit amont, S , μ et D , sont nécessaires.

Chapitre 5

Résultats de la modélisation

RESULTATS DE LA MODELISATION

Nous envisagerons successivement, les principes de l'identification, puis les simulations en régime permanent et en régime transitoire.

1. PRINCIPES DE L'IDENTIFICATION

La méthode d'identification utilisée est du type "indirect" (NEUMAN, 1973); elle repose sur l'utilisation d'un critère d'erreur sur une variable de sortie du modèle, ici la charge piézométrique (CHAVENT, 1979b).

La position des stations de mesure, irrégulière en regard de la grille de simulation, nous contraint à établir quelques règles simples de comparaison entre la piézométrie mesurée et celle simulée par le modèle au centre de chaque maille. La mise au point d'un critère d'optimisation le plus objectif possible, puis la précision demandée sur les calculs des flux et des potentiels, sont successivement présentés.

1.1. Représentativité des mailles et stations de contrôle.

STATION	COUCHE C ₁		COUCHE C ₂			di(m)
	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂		
SE1	214	214 215	318	318 319		18 33
SE2	205	205 214	311	311 318		20 33
SE3	193	193 194	311	311 312		15 52
SE4	170	170 169	303	303 302 294 295		25 32 47 42
SE5	143	121	294	285 294		35 16
SE6	121	121	285	285		
SE7	100	100	274	274		
SE8	77	77 78 99 100	262	262 263 273 274		28 38 34 43
SE9	56	56	251	251		
SE10	35 36	35 36	239 240	239 240		27 25
SE11	46	35	333	239		
SE12	45	53	332	249		
SE13	99	99	273	273		
SE14	116	116	282	282		
SE15	38	38	242	242		
SE16	49	49	244	244		
SE17	104	104	277	277		
SE18	110	110	276	276		

Piézométrie calculée référence $P_c = R (P_i/d_i) / R (1/d_i)$

avec, P_i : piézométrie calculée sur chaque maille; d_i : distance station - centre de la maille

N_1 : numéro de la maille où est localisée la station de mesure

N_2 : mailles réellement prises en compte

Tableau 5-1 : Mailles prises en compte pour l'ajustement des piézométries, mesurées et calculées

La localisation particulière de dix des dix huit stations piézométriques sur les mailles (Fig. 4-2 : Chapitre 4) nous conduit à prendre en compte les potentiels et flux calculés sur les mailles voisines. Trois cas de figure se présentent:

- a) station située entre deux mailles : SE10;
- b) stations situées sur une même maille : SE2 et SE3 (en couche C2);
- c) stations en bordure de maille : SE1, SE2, SE3, SE4, SE5, SE8, SE11, SE12.

Pour ces stations, la piézométrie mesurée est comparée au résultat d'une interpolation linéaire des piézométries simulées au centre des mailles voisines. Le choix des mailles voisines à prendre en compte repose sur un critère de géométrie: leurs cotes toit et mur doivent être peu différentes de celles de la maille d'implantation de la station de mesure.

Le tableau 5-1 regroupe les différentes mailles prises en compte pour la comparaison des piézométries mesurées et calculées.

1.2. Critère d'optimisation de l'identification.

Un critère M d'optimisation des ajustements est calculé après chaque simulation. M est égal à la racine carrée des écarts quadratiques moyens entre la piézométrie observée sur la station i et la piézométrie interpolée à partir des valeurs calculées sur les mailles voisines.

$$M = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\text{obs}(i) - \text{calc}(i))^2}$$

M est exprimé en cm,

avec, n : nombre de stations prises en compte, $n \in [1,18]$;

obs(i) : piézométrie mesurée sur la station i ;

calc(i) : piézométrie calculée interpolée.

Une analyse de la qualité d'ajustement des hauteurs piézométriques simulées et mesurées est effectuée à l'aide de trois modalités M1, M2 et M3.

M1 : prise en compte de toutes les stations;

M2 : station SE4 et stations de bordure SE1, SE10, SE12, SE14, SE16, SE17;

M3 : stations SE1, SE4, SE5, SE7, SE10, SE11, SE12, SE13, SE14, SE15, SE16, SE17 et SE18.

L'identification est réalisée en faisant varier les différents paramètres, jusqu'à ce que le critère d'optimisation soit jugé satisfaisant. La valeur des paramètres est modifiée manuellement, par essais successifs, sans algorithme automatisé. La sensibilité du critère de calage est testée. Celle-ci est indispensable, pour pouvoir noter une amélioration des différentes simulations et, pour départager, du point de vue de la qualité de l'ajustement, les différents jeux de paramètres testés.

1.3. Précision de calcul des flux et potentiels.

L'erreur maximale Δq , admise sur le calcul des débits échangés entre mailles, est de l'ordre de $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, soit une erreur de $2,7 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$ (hauteur moyenne d'échange entre mailles : $1,5 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ de surface d'échange) sur les flux horizontaux et, de $1,6 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$ ($25 \times 25 = 625 \text{ m}^2$ de surface d'échange) sur les flux verticaux. Il est possible de transformer ce critère sur les flux en un critère sur les potentiels en appliquant la loi de Darcy. L'erreur Δh maximale tolérée sur la piézométrie est alors de :

$$\Delta h = \frac{\Delta q \cdot d}{K}$$

avec,

Δq [erreur sur les flux horizontaux	: $2,7 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$;
[erreur sur les flux verticaux	: $1,6 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$;
K (conductivité moyenne)	: $2 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$;
d (distance horizontale entre deux centres de maille)	: 25 m;
d (distance verticale moyenne entre deux centres de maille)	: 2 m;

d'où une erreur $\Delta h = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ en prenant en compte les flux horizontaux, et une erreur $\Delta h < 10^{-3} \text{ m}$ en prenant en compte les flux verticaux.

Si l'on suppose que la loi de distribution de l'erreur suit une loi normale, l'erreur numérique maximale faite sur la piézométrie calculée sur chaque maille peut être estimée à $2\sigma = 3 \text{ cm}$, soit $\sigma = 1,5 \text{ cm}$.

Etant donnée l'erreur admise sur le calcul des potentiels, il est illusoire de vouloir différencier deux simulations, dont les résultats sur les piézométries calculées diffèrent de moins de 1,5 cm.

2. ESTIMATION DES FLUX EN REGIME PERMANENT

2.1. Jeu de données et épisode d'identification choisi.

L'épisode d'identification de la pluie efficace (06/06/86) est choisi en période de hautes eaux, en pleine saison des pluies : 23,2 mm de pluie en moyenne par jour, depuis le 01/05/86. La pluviométrie et l'ETP (estimée) sont ce jour là respectivement de 40 mm (40 l/m^2) et 4 mm (46,1 mm de pluie en moyenne sur cinq jours).

Les conductivités hydrauliques prises en compte, sont celles issues du krigeage normal, soit $K_{1\text{sup}}$ (0-50 cm) pour la couche CT, une conductivité équivalente K_1 (composée en série de $K_{1\text{sup}}$ et $K_{1\text{inf}}$ (50-DT)) pour la couche C1 et K_2 (DT-NI) pour la couche C2. La valeur de q_{am} retenue pour initier l'identification est donnée par la loi de Darcy, soit $5 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$ ($0,4 \text{ mmj}^{-1}$) (le gradient hydraulique entre SE10 et SE9 est de 0,11 m ce jour là). Des tests de sensibilité sont effectués par la suite.

La valeur du coefficient de drainance D pour les échanges entre CT et C1 est 10^{-3} s^{-1} . Elle n'est donc pas limitante. En ce qui concerne les échanges entre C1 et C2, en régime permanent, la conductivité de l'éponte, et par conséquent la valeur de D, n'est pas essentielle car chaque simulation est effectuée après équilibre des charges dans ces deux couches.

2.2. Identification de la pluie efficace en régime permanent

L'identification est réalisée avec, dans un premier temps, une pluie efficace uniforme sur le domaine, puis variable dans l'espace, dans un second temps. Le tableau 5-2 rassemble les valeurs des critères d'ajustement des principales simulations.

CRITERES D'AJUSTEMENT (cm)				
SIMULATION	M ₁	M ₂	M ₃	CARACTERISTIQUE
A	54.9	51.5	53.6	pluie efficace uniforme
B	39.7	42.7	40.5	
C	32.5	44.3	36.5	
D	30.0	40.9	33.4	
E	23.0	32.9	25.9	
<i>Analyse de sensibilité</i>				
F	31.5	35.7	32.0	profondeur du niveau imperméable
G	22.9	32.9	25.9	débit amont souterrain q _{am}
<u>H</u>	<u>29.6</u>	<u>29.2</u>	<u>23.5</u>	
I	20.8	28.5	23.0	
J	24.7	32.9	27.6	
K	38.8	37.8	39.1	Log Ks une conductivité moyenne deux conductivités moyennes par couche
L*	103.7	116.0	90.5	
M*	64.0	70.4	58.0	
N	23.2	33.5	26.2	valeurs de Ks
O	24.3	27.8	25.4	
P	21.1	27.1	22.7	
<i>Contrôle expérimental</i>				
	31.0	32.1	27.3	

H : Simulation retenue pour l'identification de la recharge

* : Simulations obtenues avec une précision de calcul sur les débits et potentiels de $80 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ par maille élémentaire de $25 \times 25 \text{ m}$. La précision de calcul pour toutes les autres simulations est de l'ordre de $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ par maille élémentaire.

- Stations prises en compte :

M1 : toutes les stations (18 stations) ;

M2 : SE1, SE4, SE10, SE12, SE14, SE16, SE17 (7 stations) ;

M3 : SE1, SE4, SE5, SE7, SE10, SE11, SE12, SE13, SE14, SE15, SE16, SE17, SE18 (13 stations).

Tableau 5-2 : Valeurs du critère d'ajustement M pour les trois modalités considérées (M₁, M₂, M₃).

2.2.1. Identification avec une pluie efficace uniforme

L'application d'une infiltration uniforme ($Pe = 0$ puis $Pe = 9,6 \cdot 10^{-9} \text{ms}^{-1}$, soit $0,8 \text{ mmj}^{-1}$) est à rejeter. L'ajustement n'est pas satisfaisant. Le modèle génère un excès d'eau important à l'aval (stations SE1 et SE2) et un fort déficit sur le centre de la barre (SE4, SE5, SE6, SE7, SE8, SE13 et SE17), alors qu'en amont le déficit est plus réduit (Fig. 5-1 *simulation A*).

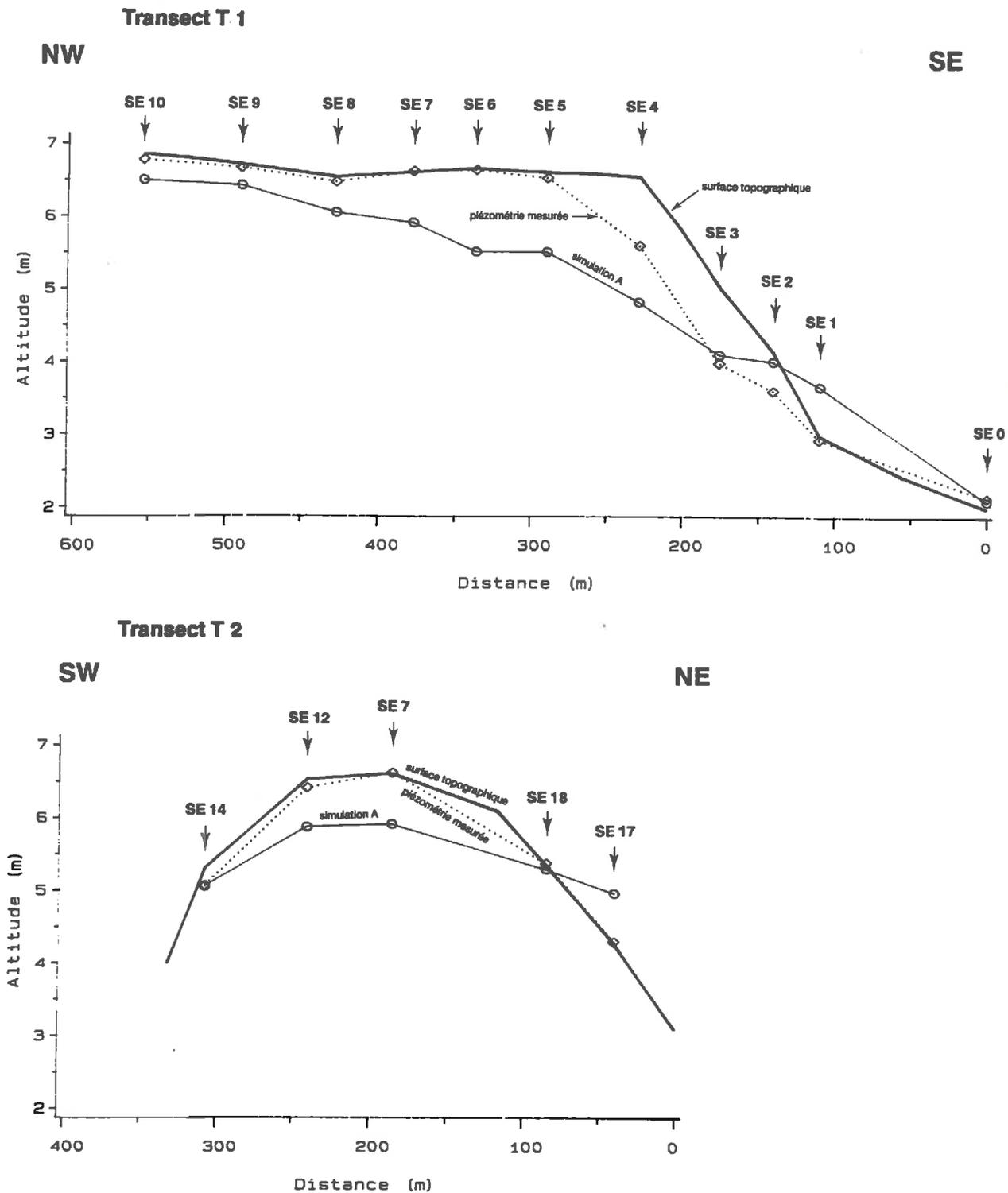


Figure 5-1 - Piézomètres et piézométries calculés. Régime permanent du 06.06.86.

Simulation A (transects T1 et T2).

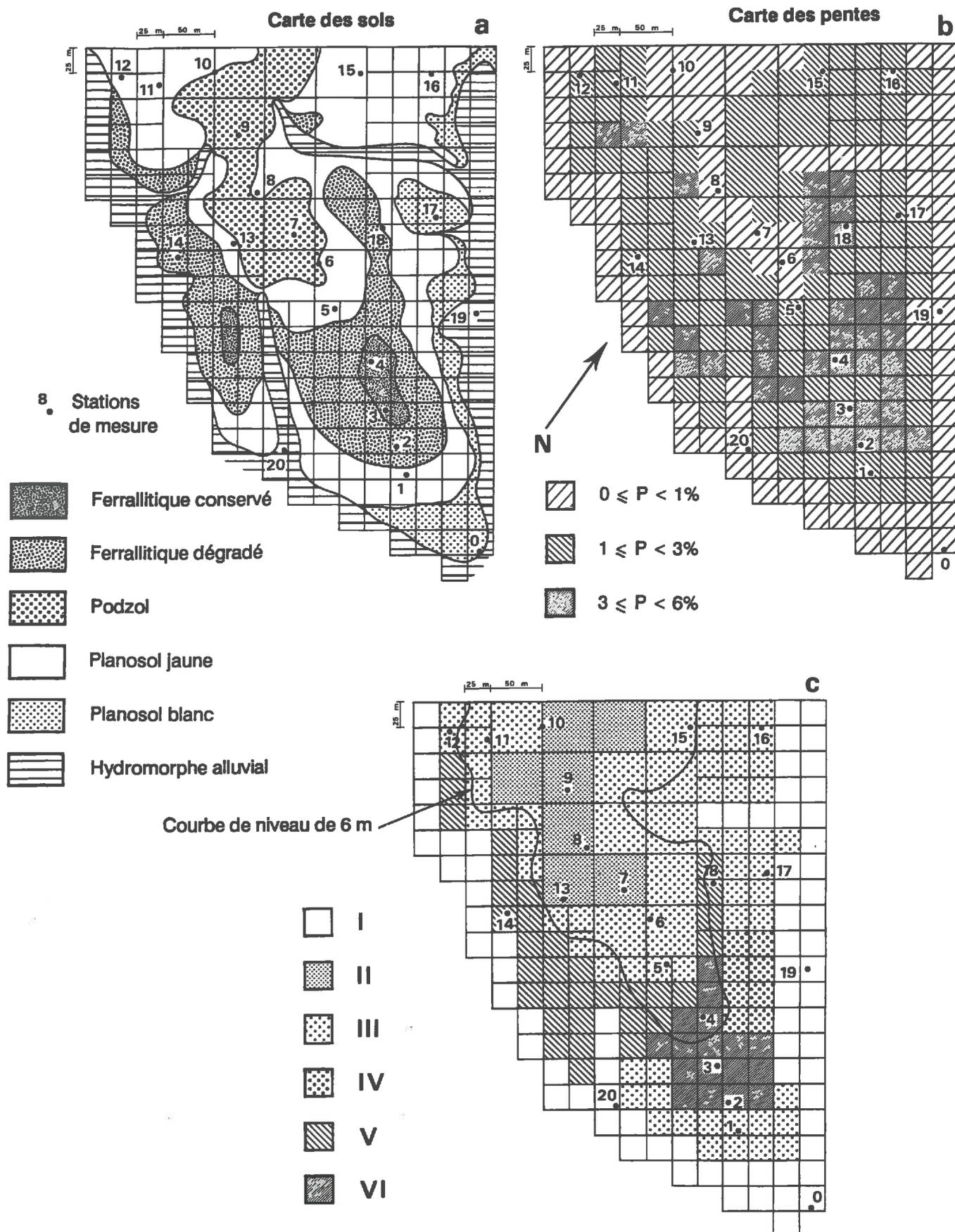


Figure 5-2 - Zonage pédo-topographique (c) issu du croisement de la carte des sols (a) et de la carte en classes de pente (b).

2.2.2. Identification avec une valeur de pluie efficace par zone

La paramétrisation testée, nous conduit à définir 6 zones (de I à VI) homogènes en terme de pluie efficace, sous l'hypothèse d'un effet sol et pente (Fig. 5-2). Elles résultent d'un croisement entre le maillage, la carte des sols et une carte en classes de pente (Chapitre 3). L'incertitude sur la délimitation de ces zones est estimée à ± 25 m. Cette imprécision résulte de l'incertitude sur les cotes affectées au centre de chaque maille et sur les limites pédologiques.

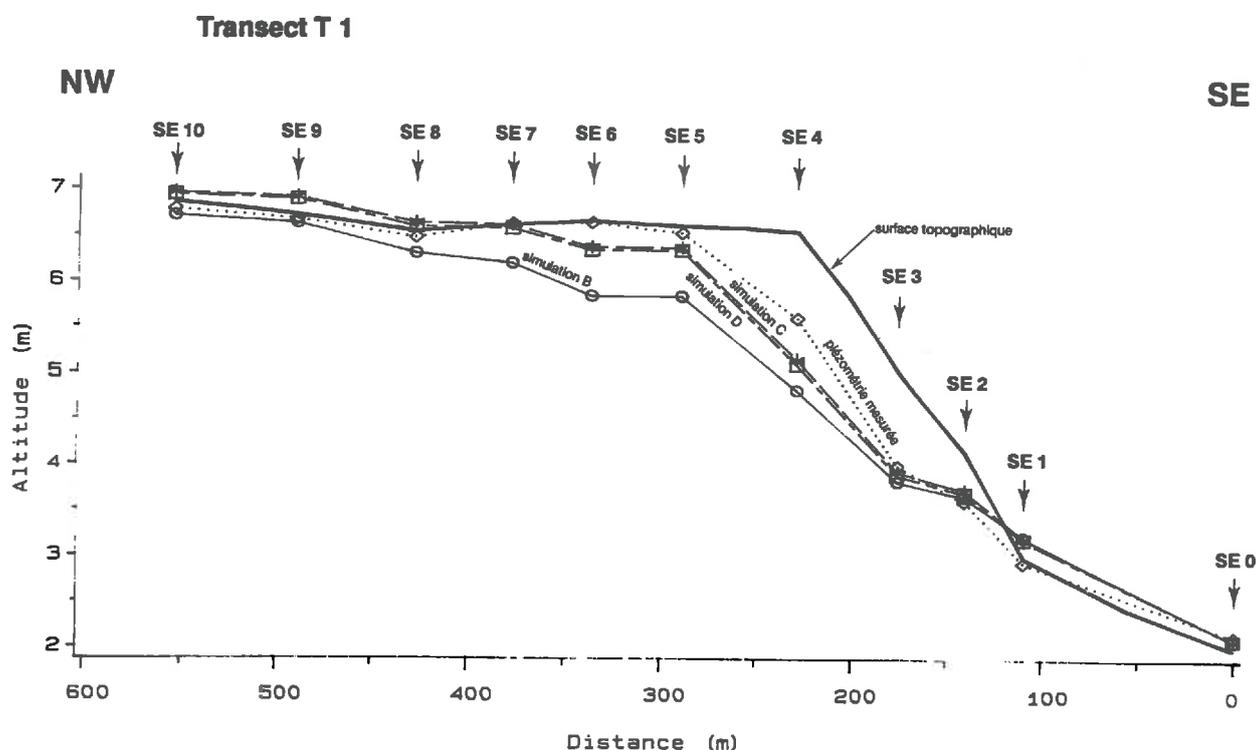


Figure 5-3 - Piézométries mesurées et calculées. Régime permanent du 06.06.86.
Simulation B, C, et D (tranchet T 1).

La première phase de l'identification (*simulations B,C,D*), illustrée par la figure 5-3, aboutit à réduire le nombre de zones initiales et met en évidence 4 zones d'infiltration (Fig. 5-4a) : une zone où l'infiltration est quasiment nulle ($1,6 \cdot 10^{-10} \text{ ms}^{-1}$, soit $0,01 \text{ mmj}^{-1}$), une zone où elle est très faible ($1,6 \cdot 10^{-10} < Pe \leq 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$), une zone où la pluie efficace est faible ($1,6 \cdot 10^{-9} < Pe \leq 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$) et une dernière zone où l'infiltration est moyenne ($Pe > 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$). Ces valeurs sont globalement faibles. Pour quatorze des dix huit stations, l'écart entre les piézométries mesurées et calculées est proche de 30 cm. Pour les 4 autres stations cet écart est plus élevé (33 cm pour SE12 et SE16, 37 cm pour SE15 et 76 cm pour SE17). Ce zonage ne peut donc être accepté.

L'infiltration semble prépondérante sur le sommet de la barre. C'est pourquoi, nous testons dans une deuxième étape (*simulation E*) un nouveau critère de calage directement relié à la topographie : la courbe altitudinale 6 m (Fig. 5-4b). L'ajustement est alors bien amélioré. L'erreur moyenne entre la piézométrie mesurée et calculée est de -7,6 cm (écart-type: 21,7). L'excès d'eau est diminué en SE17 (74 cm). Partout ailleurs l'écart est inférieur à 30 cm et, dans

la plupart des cas, inférieur à 20 cm (Fig. 5-5). Le choix de ce critère topographique semble donc meilleur que le précédent, lié quant à lui aux sols et classes de pente.

Trois zones de recharge sont finalement mises en évidence (Fig.5-4b):

- . $q_1 = 0 \text{ ms}^{-1}$
- . $q_2 = 9,6 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$ ($0,8 \text{ mmj}^{-1}$) et $q_{am} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$ ($0,4 \text{ mmj}^{-1}$) ;
- . $q_3 = 4,8 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$ soit $4,1 \text{ mmj}^{-1}$.

La pluie efficace identifiée est très faible : elle représente 2 % et 10 % de P ($P = 40 \text{ mm}$) pour q_2 et q_3 . Sur q_2 la recharge totale atteint 2,2 % de P.

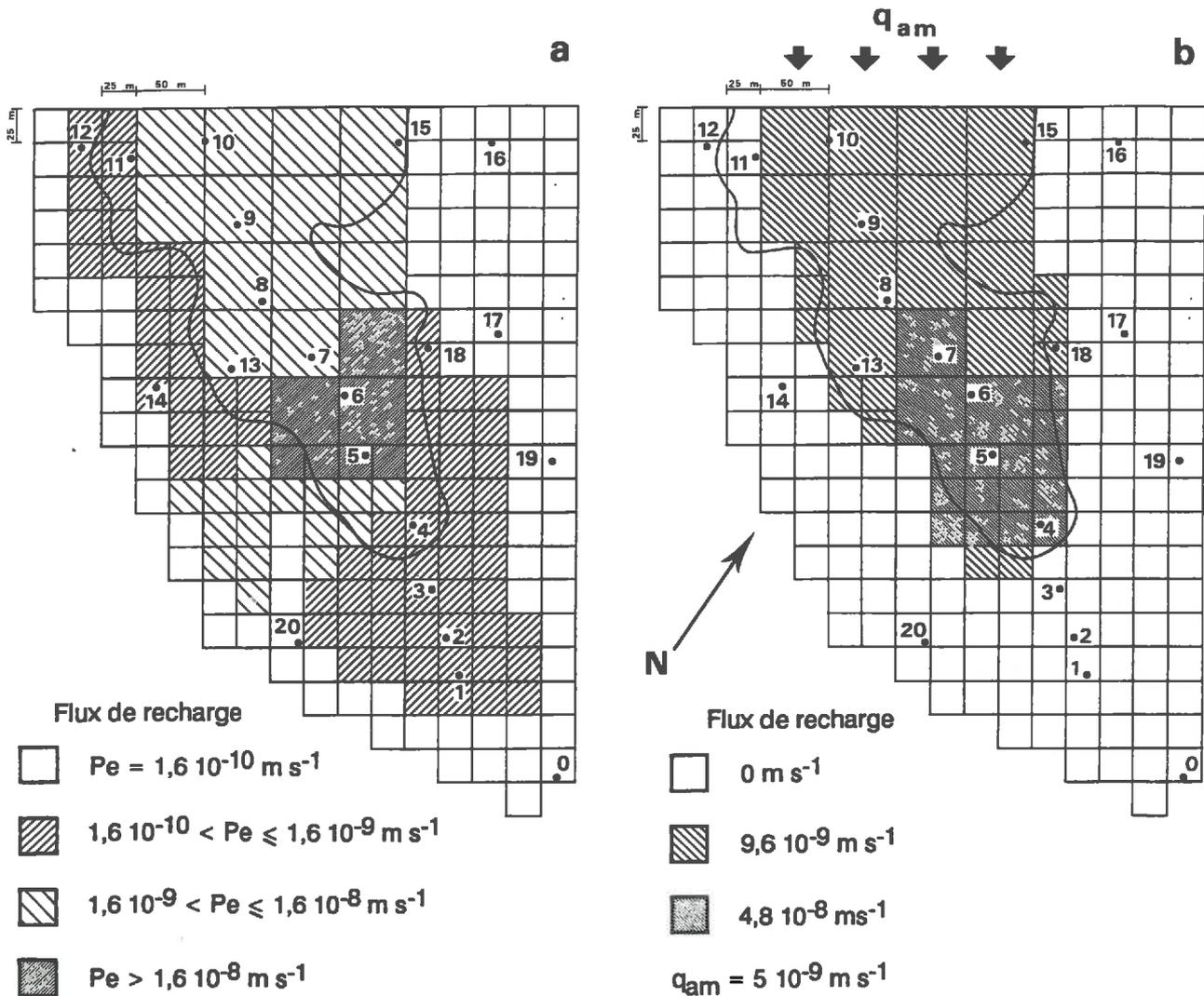


Figure 5-4 - Modifications du zonage initial au cours de l'identification de la Recharge en régime permanent (06.06.86).

a) Simulation B, C, D.

b) Simulation E

2.3. Analyse de sensibilité

Nous abordons successivement, la sensibilité de l'identification aux conductivités K_s , de la profondeur du substrat imperméable, puis du débit amont q_{am} .

2.3.1. Les conductivités

La connaissance des valeurs de conductivité sur le domaine est assez bonne. Deux points restent cependant à préciser.

Le premier concerne le choix du jeu de conductivités (Chapitre 4). Nous faisons l'hypothèse, dans un premier temps, que les écoulements à l'échelle des mailles de calcul sont tridimensionnels. Ce qui nous conduit dès lors à utiliser les Ks issues du krigeage normal (composition par moyenne arithmétique). Un test de sensibilité du modèle aux Ks est réalisé dans un deuxième temps, en utilisant les transformées logarithmiques issues du krigeage lognormal (écoulements bidimensionnels). La comparaison des ajustements obtenus dans les deux cas, nous permettra de vérifier cette hypothèse. Deux tests de sensibilité sont de plus effectués en utilisant des valeurs de conductivité homogènes sur la barre. Ils permettent de tester l'importance de la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des Ks.

Le second point à vérifier résulte du choix de la méthode de mesure des conductivités. Il est probable en effet, que les valeurs de Ks soient entachées d'erreurs de mesure; il reste à vérifier si elles sont acceptables. Trois tests de sensibilité du modèle aux erreurs de mesure sur les conductivités sont réalisés.

2.3.1.1. Analyse de sensibilité à l'amplitude de l'hétérogénéité spatiale des conductivités Ks.

Un premier test est effectué avec les transformées logarithmiques de Ks. Deux simulations sont enfin réalisées avec des conductivités homogènes sur la totalité de la barre, d'une part en affectant une seule valeur de Ks aux deux couches C1 et C2, puis d'autre part, en affectant deux valeurs de Ks pour chacune de ces deux couches.

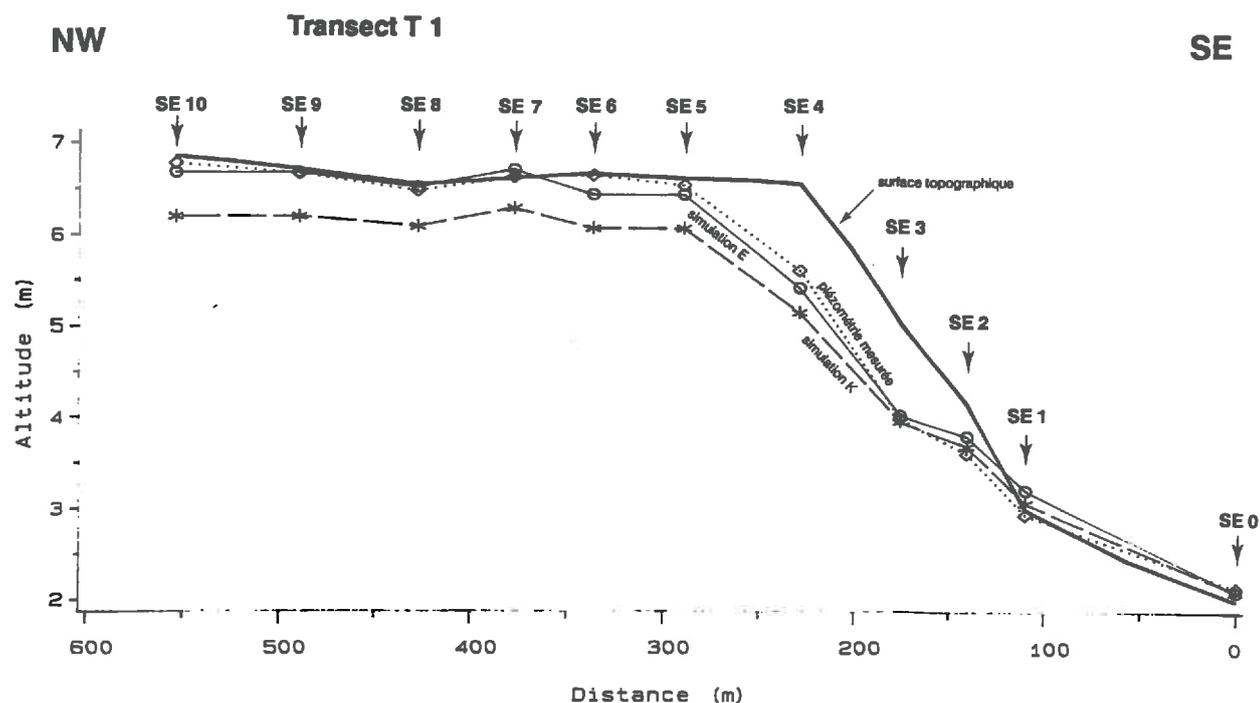


Figure 5-5 - Piézométrie mesurée et piézométries calculées. Régime permanent du 06.06.86.

Simulation E et K (tranchée T 1).

a) *LogKs* :

La comparaison rapide des critères de calage (tab. 5-2, *simulation E (Ks)* et *simulation K (LogKs)*) révèle une dégradation des critères M1 et M3 avec LogKs. L'erreur moyenne entre la piézométrie mesurée et calculée est de 26.3 cm. Elle est donc très supérieure à celle obtenue avec Ks (Tab. 5-3). Le modèle génère d'importants déficits en eau sur l'ensemble des stations, excepté pour les stations SE1, SE2, SE16 et SE17 qui sont mieux représentées avec les conductivités logarithmiques (Fig. 5-5). L'identification de la pluie efficace sur les trois zones q₁, q₂ et q₃ aboutit à diviser par deux les valeurs précédentes obtenues sur q₂ et q₃, soit 0.4 mmj⁻¹ et 2 mmj⁻¹.

Jeu de conductivité	Erreur moyenne (cm)	Critère des moindres carrés (cm ²)
Krigeage normal: Ks	0.4	464.8
Krigeage log-normal: LogKs	26.3	1505.4
deux conductivités moyennes par couche	-28.6	4101.1
une conductivité moyenne	-62.9	10753.7

Tableau 5-3 : Comparaison des erreurs moyennes et des critères des moindres carrés pour différents jeux de conductivités.

Les conductivités LogKs semblent donc devoir être rejetées pour deux raisons : l'uniformisation du champ des conductivités entraîne une mauvaise représentation piézométrique de la nappe et elle est synonyme de valeurs de recharge très faibles (1 % pour q₂ et 5 % pour q₃).

b) *Une conductivité moyenne pour C1 et C2 (simulation L)* :

La valeur de Ks choisie (10⁻⁵ ms⁻¹) correspond à la moyenne de toutes les conductivités K1 et K2 confondues (44,5 10⁻⁶ ms⁻¹ avec 205 observations pour K1, 12,1 10⁻⁶ ms⁻¹ avec 198 observations pour K2). La simulation est lancée dans un premier temps avec une recharge nulle sur l'ensemble du domaine. Elle est rapidement interrompue pour des problèmes de calcul numérique, sans que l'on ait pu atteindre une précision de calcul sur les flux comparable à celle atteinte pour les simulations précédentes.

La prise en compte d'une conductivité homogène, entraîne un nivellement de la piézométrie sur le domaine, alors qu'au voisinage des thalwegs nous observons un gradient considérable entre les mailles à potentiel imposé (thalwegs) et les mailles calculables voisines (Fig. 5-6). Il s'agit d'un problème numérique non soluble pour le modèle sans un remaniement important du maillage. Il faudrait effectivement augmenter la discrétisation des mailles de bordure (couches C1 et C2).

Avec la précision de calcul obtenue (2 10⁻⁶ ms⁻¹ sur les échanges horizontaux et 1,3 10⁻⁷ ms⁻¹ sur les échanges verticaux), qui est faible, les critères d'ajustement sont mauvais (Tab. 5-2). L'erreur moyenne entre piézométries mesurée et calculée est de -62,9 cm (Tab. 5-3). Le modèle génère un gradient de charge de 1.28 m entre SE1 et SE10, et crée une lame d'eau de 2.23 m d'épaisseur au dessus du sol de la station SE1.

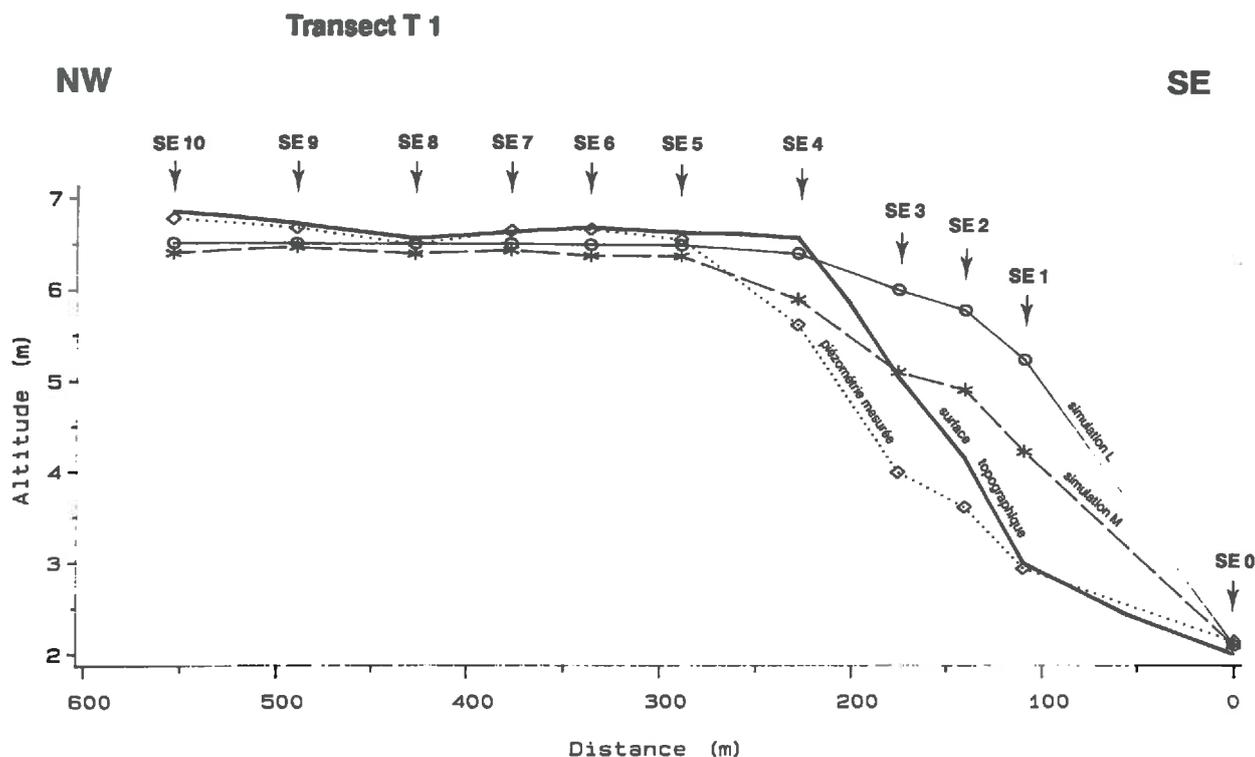


Figure 5-6 - Piézométrie mesurée et piézométries calculées. Régime permanent du 06.06.86.

Simulation L et M (transect T 1).

c) Deux conductivités moyennes par couche (simulation M) :

Deux valeurs de conductivité sont calculées pour chacune des deux couches : une valeur pour les sols ferrallitiques ($53 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ pour C1 et $22 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ pour C2) et une seule valeur pour tous les autres sols ($42 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ pour C1 et $7 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ pour C2). Ici encore, le modèle ne peut effectuer les calculs avec une précision acceptable. Au seuil de précision obtenu, soit $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ sur les échanges horizontaux et $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ sur les échanges verticaux, on constate cependant une amélioration sensible par rapport à la simulation précédente (Tab. 5-2). L'erreur moyenne est de -28,6 cm (Tab. 5-3). Un excès d'eau considérable est cependant toujours noté sur SE1 (1,20 m) et SE2 (0,75 m) (Fig. 5-6). La discrétisation des mailles de bordure est, ici encore, insuffisante.

2.3.1.2. Analyse de sensibilité à l'ordre de grandeur des valeurs de Ks

Trois tests sont effectués, sans modification du zonage de la pluie efficace. Un premier avec des valeurs de Ks supérieures à celles mesurées, un second avec des valeurs inférieures et, un dernier test nous permet enfin d'estimer l'effet de l'insuffisance de mesures de Ks sur la bordure sud.

La sensibilité du modèle à ce paramètre est donc élevée. Les modifications éventuelles apportées à la profondeur du niveau imperméable sont à rejeter. La sensibilité du modèle à ce paramètre permet de confirmer la validité des sondages profonds.

2.3.3. Sensibilité au flux amont q_{am}

La valeur de q_{am} est probablement sous-estimée (Chapitre 4). C'est pourquoi quatre valeurs de q_{am} différentes sont testées. La valeur initiale ($5 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$, soit 0.4 mmj^{-1}) est multipliée par 5 (simulation G), 10 (simulation H), 20 (simulation I) et 40 (simulation J). Les critères d'ajustement (Tab. 5-2) sont améliorés avec $q_{am} \times 20$ et $q_{am} \times 10$. La figure 5-7 montre qu'avec $q_{am} \times 10$ la piézométrie de SE9, SE10 et SE11 est mieux représentée; par contre celle de SE15 est moins bonne. L'écart entre piézométries mesurées et calculées est inférieur à 30 cm; seule la station SE17 s'individualise avec un écart de 60 cm (Fig. 5-8). L'erreur moyenne sur la piézométrie est de 0,4 cm (Tab. 5-3). On retiendra donc par la suite la valeur de q_{am} précédente multipliée par 10, soit celle de la simulation H $5 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$ ou 4.3 mmj^{-1} .

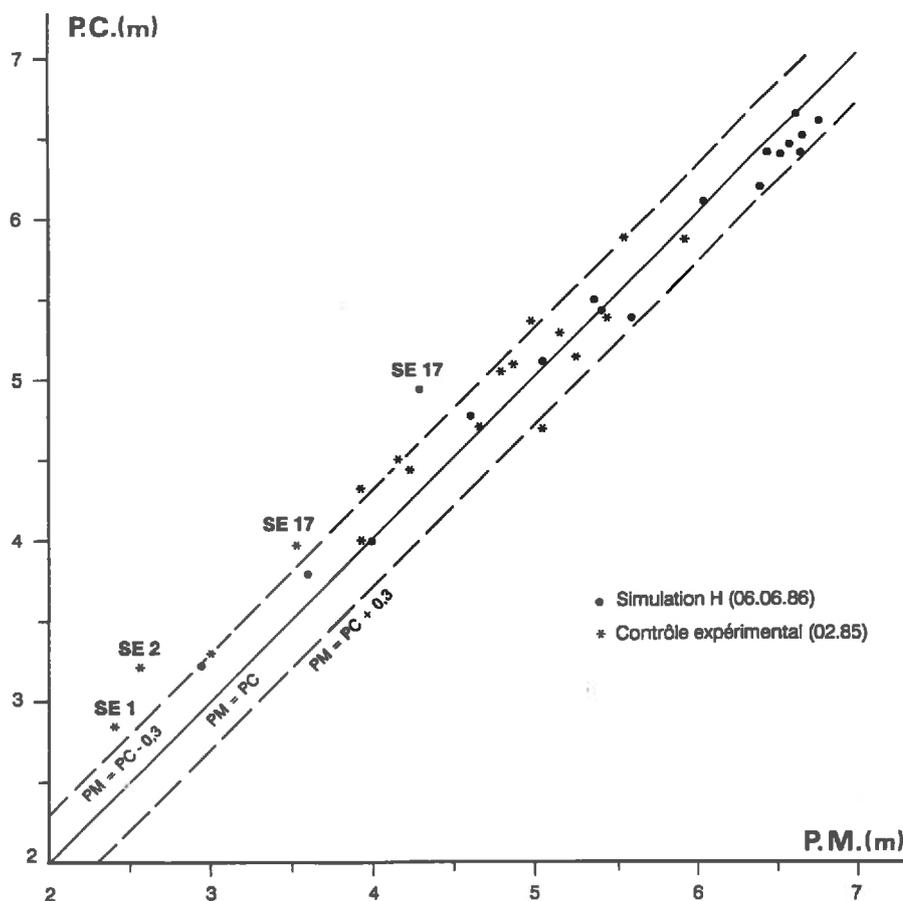


Figure 5-8 - Comparaison des piézométries mesurées (PM) et calculées (PC). Régime permanent.

Cette valeur reste cependant très faible en regard de la pluie efficace. Le flux amont calculé sur toute la surface d'échange, soit 800 m^2 (4 m de hauteur et 200 m de largeur) est de $3,4 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$, alors que la recharge totale calculée sur la barre atteint $103,4 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ [$32,6 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$].

pour la zone q_2 (63 mailles) et $67.4 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ pour la zone q_3 (26 mailles)]. Le flux amont représente seulement 3.3 % de la recharge totale. En conséquence, une erreur relative, même importante, sur le flux amont modifiera très peu les résultats de simulation.

2.4. Contrôle expérimental lors d'un épisode indépendant.

Pour valoriser au maximum le contrôle expérimental, nous avons choisi un épisode où la nappe est basse (basses eaux); l'identification précédente étant réalisée en hautes eaux. Il se situe à la fin du "petit été de mars" (12 au 27/02 1985). La pluviométrie moyenne est de 6 mm/jour. La piézométrie observée entre ces deux dates peut être considérée comme relativement stable, exceptée une remontée (20 à 50 cm), mesurée sur les stations SE1, SE4, SE9, SE10, SE11, SE12, SE14, SE15, SE16, SE17 et SE18, consécutive à quelques pluies sporadiques survenues entre le 25 et 27/02 (52 mm au total).

La piézométrie simulée est comparée à la moyenne des piézométries mesurées le 12/02 et le 27/02 (relevés manquants entre ces dates). Les conditions aux limites imposées sont la moyenne des conditions aux limites mesurées.

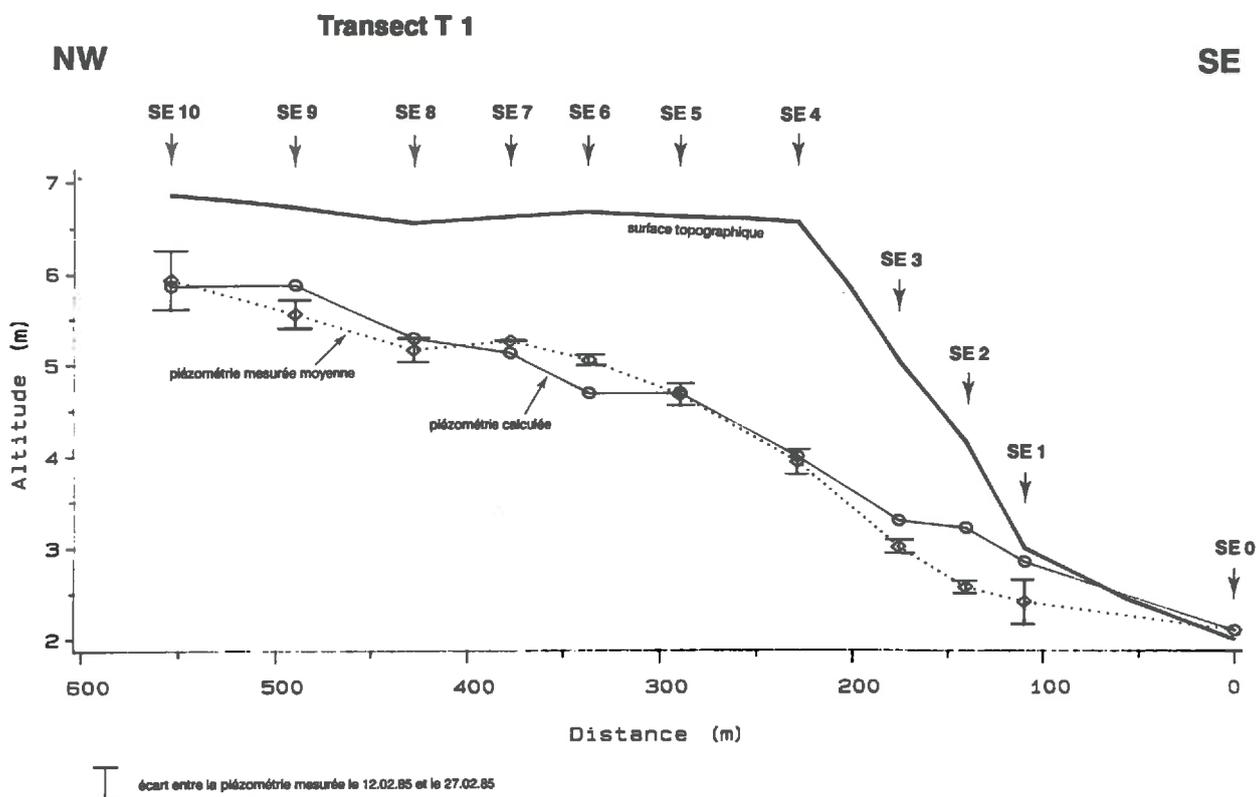


Figure 5-9 -
Piézométrie mesurée et piézométrie calculée. Régime permanent du 12-27.02.85.
Contrôle expérimental (transect T1).

Les critères d'ajustement sont comparables à ceux obtenus pour l'identification précédente (Tab. 5-2, *contrôle exp.* et *simulation H*). La modalité M2, représentative des stations de bordure, est comme pour toutes les autres simulations moins bonne que M1 et M3. Les figures 5-8 et 5-9 permettent de comparer les piézométries mesurées et calculées. Mises à

part les stations SE1, SE2 et SE17, pour lesquelles l'écart est respectivement de 44, 65 et 42 cm, pour les quinze autres stations cet écart est inférieur à 40 cm et, pour dix d'entre elles, l'écart est inférieur à 30 cm. L'erreur moyenne entre la piézométrie mesurée et la piézométrie simulée est de 18,6 cm; elle est du même ordre de grandeur que la différence moyenne entre la piézométrie du 12/02 et celle du 27/02, soit 25,1 cm. L'ajustement obtenu est donc acceptable.

Ces résultats nous permettent de **confirmer le zonage calé précédemment**. Les valeurs de pluie efficace, identifiées pour chacune des trois zones d'infiltration, sont de (en % de P) 0 % pour q_1 , 4 % pour q_2 et 10 % pour q_3 . **L'ordre de grandeur de la pluie efficace est donc également confirmé.**

2.5. Conclusion de l'identification en régime permanent.

L'hétérogénéité spatiale de la conductivité hydraulique apparaît comme un élément déterminant de l'hydrologie de la barre étudiée. Sa structure peut être reliée entre 0 et 50 cm de profondeur aux podzols et à une grande partie des sols ferrallitiques, alors qu'en profondeur seuls les ferrallitiques s'individualisent. **L'analyse de sensibilité du modèle aux Ks valide l'hétérogénéité spatiale des mesures expérimentales.** Elle permet de plus, en l'absence de mesure des flux de sortie q_{av} et des flux dans la nappe, de ne pas remettre en cause les valeurs de recharge identifiées (rappelons que les écoulements dans la nappe sont régis par la loi de Darcy, et qu'ils dépendent, par conséquent, des valeurs de Ks).

La pluie efficace identifiée dépend fortement de la qualité de mesure des conductivités. Elle est corrélée positivement avec les valeurs de Ks, et est donc susceptible d'être en réalité supérieure à celle identifiée en régime permanent.

Les simulations effectuées en régime permanent mettent en évidence une **distribution spatiale marquée de la pluie efficace**. Trois zones d'infiltration sont distinguées (Fig. 5-4b) :

- une zone de bordure q_1 , couvrant 65 % de la surface totale, délimitée par la courbe de niveau 6 m où la pluie efficace est nulle;
- le sommet de la barre (altitudes supérieures à 6 m) divisé en:
 - . une zone amont q_2 (SE8 à SE10) où l'infiltration est très faible (2 à 4 % de P). Elle couvre 25 % de la surface totale et regroupe planosols et podzols;
 - . une zone centrale q_3 (SE4 à SE7) où l'infiltration est faible (≈ 10 % de P). Elle couvre 10 % de la surface totale et rassemble les ferrallitiques et la zone de transition entre ces derniers et les podzols.

Un zonage, constitué à partir de critères topographiques, s'avère donc pertinent. Il reste cependant à le confirmer et à le préciser en régime transitoire. La quantification de la pluie efficace sur les trois zones doit être analysée plus finement, en observant notamment l'incidence de différents épisodes pluvieux sur les valeurs de pluie efficace (effet d'inertie ?). Un premier constat montre, que pour une pluie faible (6 mm/jour, du 12 au 27/02/85), l'infiltration sur la zone amont q_2 représente environ 4 % de la pluviométrie alors qu'elle est estimée à 2 % pour le 06/06/86 (40 mm de pluie); par contre elle est invariable sur q_3 (10 %).

L'écart entre piézométries mesurée et calculée est d'une façon générale satisfaisant. Les deux stations aval, SE1 et SE2 et surtout SE17 située sur la bordure, sont cependant, pour la plupart des simulations, représentées de façon médiocre; il est probable qu'avec une discrétisation spatiale plus fine des mailles voisines des thalwegs nous aurions pu améliorer ce résultat.

Du fait même du protocole d'optimisation choisi (absence d'algorithme automatisé), l'unicité de la solution proposée ne peut être certaine. Il n'en reste pas moins que, le jeu de variables, conditions aux limites et paramètres retenus ou identifiés semble cohérent. Il reste cependant à confirmer ces résultats en régime transitoire.

3. ESTIMATION DES FLUX EN REGIME TRANSITOIRE

L'objectif essentiel de l'identification de la recharge en régime transitoire est d'estimer la pluie efficace sur des cycles longs. Pour cela, il est nécessaire d'estimer les paramètres non calés en régime permanent : S (coefficient d'emmagasinement), μ (porosité de drainage) et D (coefficient de drainance).

On cherche à estimer, en régime transitoire, les flux de drainage (pluie efficace) et à les différencier en fonction des matériaux et des positions topographiques. Les flux sont étudiés à deux échelles de pas de temps: le premier journalier, afin de préciser l'influence de l'épente, due à la discontinuité texturale, et le second à l'échelle décadaire, afin de relier pluie efficace et pluie météorique.

3.1. Jeu de données et épisodes d'identification choisis.

La pluie efficace est identifiée en transitoire sur un épisode de 81 jours (23/05/85 au 20/08/85) à pas de temps décadaire et sur un épisode de 6 jours (15/05/86 au 21/05/86) à pas de temps journalier. Pour ce dernier, nous disposons, sur deux stations (SE7 et SE15), de relevés piézométriques horaires qui nous permettent de caractériser distinctement les potentiels pour chacune des couches C1 et C2 (Chapitre 3).

Ces relevés montrent l'existence de nombreuses périodes, illustrées par un épisode de mai 1986 (Fig. 5-10), où la piézométrie de la couche de surface C1 et celle de la couche profonde C2 sont déphasées. La simulation de ce phénomène nous permet d'ajuster le calage de S et μ autour de ces deux stations.

La précision de calcul retenue est celle du régime permanent. La condition aux limites est la piézométrie de la station SE0, imposée sur deux mailles (30 et 31) aval.

Les valeurs de μ retenues pour initialiser cette identification sont issues du calcul de variation du stock en eau dans la zone saturée (Chapitre 4). Le zonage résultant du croisement Sol x Pente x Maillage (Fig. 5-2) est utilisé pour discrétiser les valeurs de μ .

La valeur du coefficient de drainance D est choisie, dans un premier temps, de telle façon, que les échanges entre C1 et C2 ne soient pas freinés de manière excessive. La

conductivité moyenne de la couche C2 (couche dont la conductivité est la plus limitante dans les échanges entre couches) est de $12 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ (moyenne géométrique comprise entre 10^{-6} et $40 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$). La conductivité maximale de l'éponte, compatible avec ces valeurs, calculées pour C1 et C2, est donc de $40 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$. La conductivité de l'éponte choisie est de $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$, soit un coefficient de drainance de $5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (c'est à dire la conductivité de l'éponte divisée par son épaisseur moyenne : 0.3 m). L'identification à pas de temps horaire permet de préciser ce choix.

Un contrôle expérimental est réalisé à pas de temps décadaire sur 115 jours (20/05/86 au 12/09/86) et un second à pas de temps hebdomadaire sur 35 jours (11/01/84 au 15/02/84).

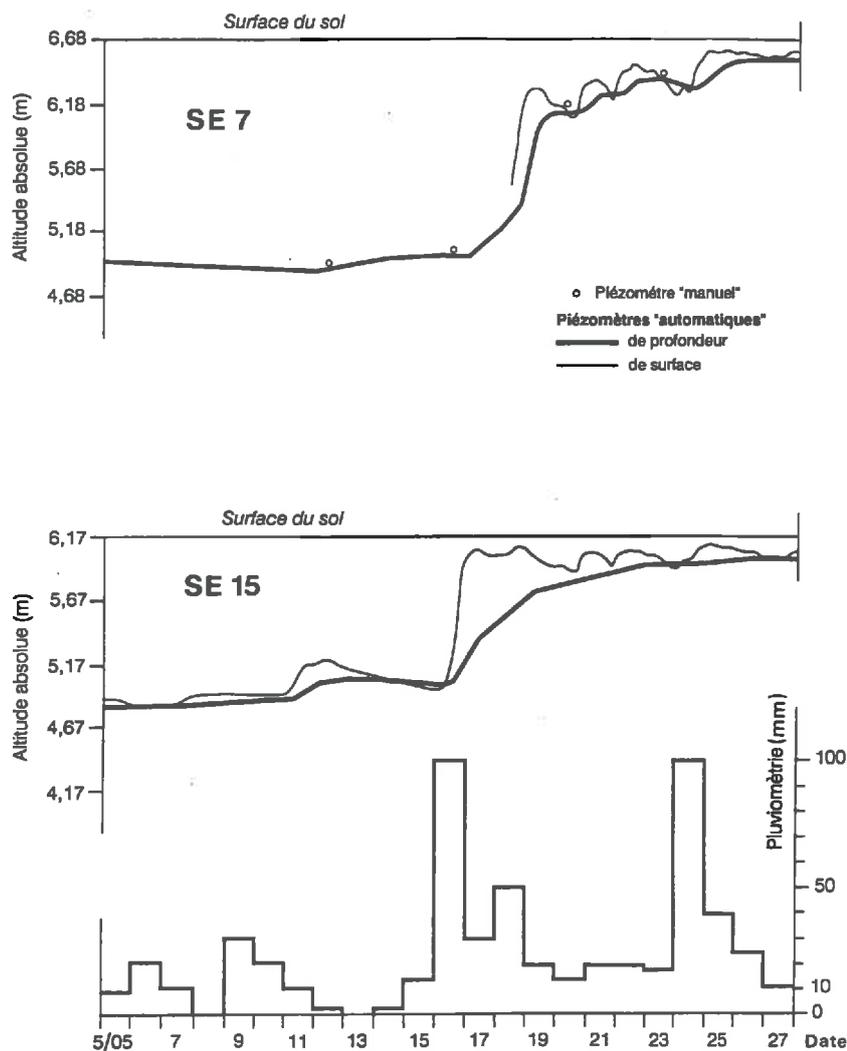


Figure 5-10 - Piézométrie et pluviométrie journalières sur podzol (SE7) et sur planosol (SE15). Episode du 05.05.86 au 27.05.86.

3.2. Identification de la pluie efficace en régime transitoire.

Le zonage de la pluie efficace calé en régime permanent est conservé (Fig. 5-4b). Une valeur de pluie efficace, dépendant de la pluviométrie affectant chaque pas de temps, est utilisée pour initier l'identification ($q_1 = 0$, $q_2 = 2\%$ de P et $q_3 = 10\%$ de P).

Le flux entrant amont q_{am} est calculé pour chaque pas de temps à partir des données expérimentales des stations SE9 et SE10.

3.2.1. Identification sur l'épisode 23/05 au 20/08/85.

Le modèle reproduit correctement l'allure des variations piézométriques sur la majorité des stations. La comparaison des piézométries mesurées et calculées, pour l'ensemble des stations de mesure et sur la totalité des pas de temps de calcul, montre cependant qu'un excès d'eau, souvent supérieur à 30 cm, est généré par le modèle pour les piézométries mesurées les plus faibles (Fig. 5-11); une analyse plus fine de l'erreur permet d'individualiser un groupe de cinq stations (SE1, SE2, SE3, SE14 et SE17), situées à proximité des thalwegs et de l'exutoire, pour lesquelles l'écart entre la piézométrie mesurée et la piézométrie calculée est compris entre 30 et 70 cm (Fig. 5-12). Le tableau 5-4 rassemble les valeurs de l'erreur moyenne et de son écart-type, calculés pour chaque pas de temps de calcul. L'ajustement entre les piézométries mesurées et calculées est illustré par la figure 5-13; quatre exemples de stations sont présentés: les stations SE4 et SE10 pour le groupe des stations ajustées de façon satisfaisante (Fig. 5-13a) et, les stations SE1 et SE17 pour le groupe des stations mal ajustées (Fig. 5-13b).

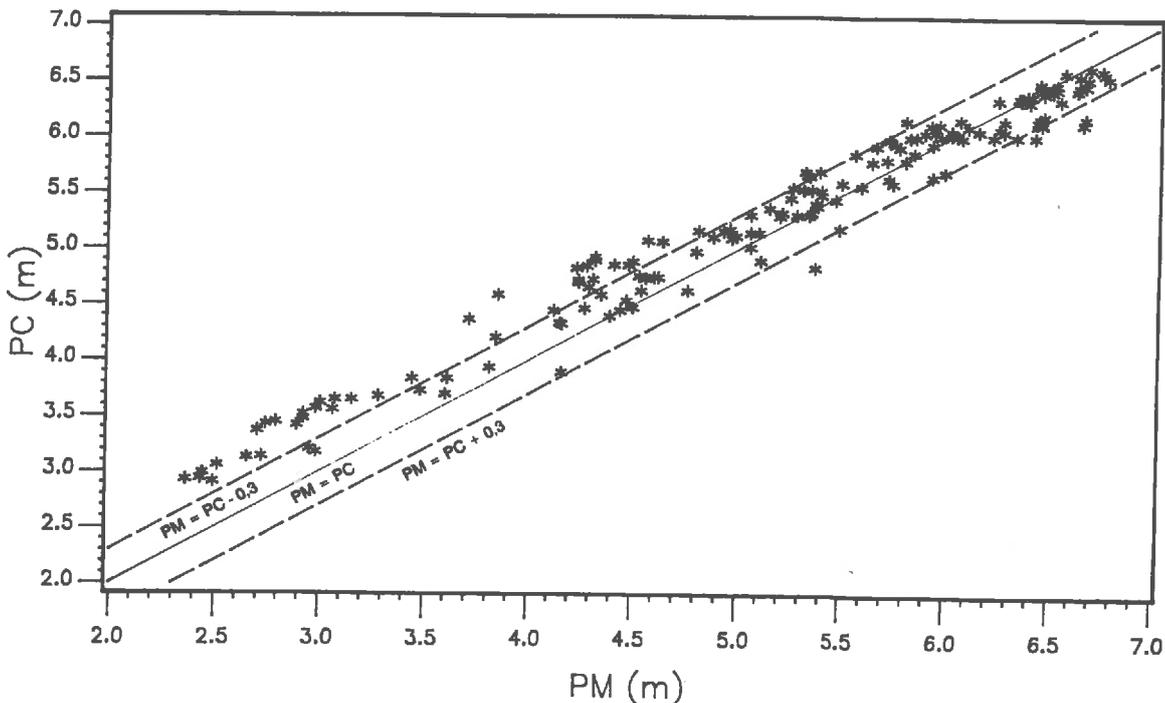


Figure 5-11 - Comparaison des piézométries mesurées (PM) et calculées (PC) pour l'ensemble des 9 pas de temps de calcul. Régime transitoire du 23.05.85 au 20.08.85.

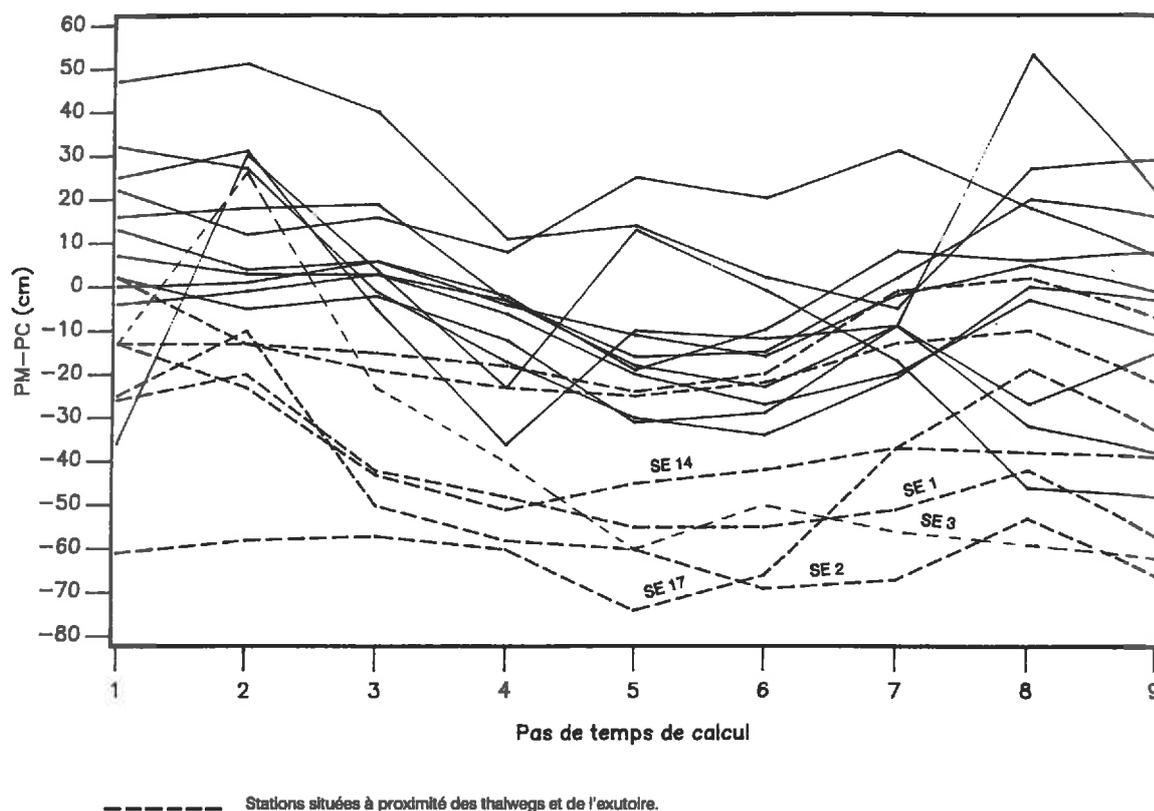


Figure 5-12 - Comparaison des erreurs d'ajustement (PM - PC) par station et par pas de temps de calcul. Régime transitoire du 23.05.85 au 20.08.85.

Pas de temps	EM (cm)	ET
1	-1,4	25,4
2	3,3	24,6
3	-8,9	25,2
4	-21,4	21,9
5	-24,8	26,1
6	-26,0	22,9
7	-17,4	23,7
8	-11,0	29,8
9	-17,8	28,5

Tableau 5-4 -

Erreur moyenne EM (PM-PC) et écart-type ET calculés pour chaque pas de temps de calcul. Régime transitoire du 23/05/85 au 20/08/85.

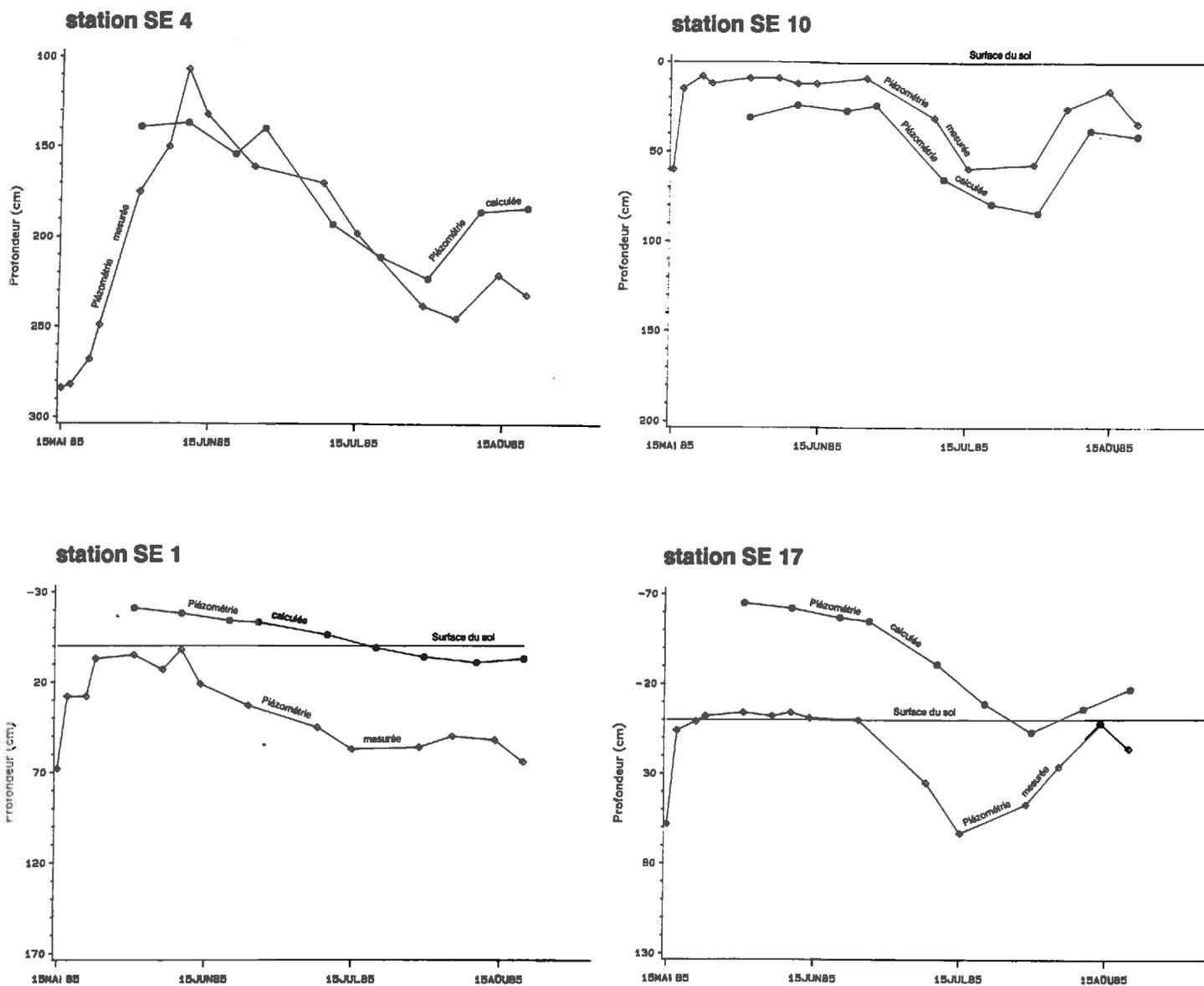


Figure 5-13 - Piézométrie mesurée et piézométrie calculée. Régime transitoire du 23.05.85 au 20.08.85.

- a) Exemples de stations caractérisées par un bon ajustement (SE 4 et SE 10).
- b) Exemples de stations caractérisées par un mauvais ajustement (SE 1 et SE 17).

Les valeurs de pluie efficace obtenues du 23/05 au 20/08/85 sont rassemblées dans le tableau 5-5. Ces valeurs, rapportées à la pluie moyenne quotidienne par pas de temps, sont comprises entre 2 et 12 % pour q_2 et entre 10 et 32 % pour la zone q_3 .

Pas de temps	Période	P(mmj ⁻¹)	q_1	Pe(mmj ⁻¹)			
				(a) q_2	(b)	(a) q_3	(b)
-	1 - 9/05	2,9					
-	10 - 22/05	16,5					
1	23 - 31/05	25,0	0	0,7	2,9	2,5	10
2	1 - 9/06	21,5	0	1	4,8	2,5	11,6
3	10 - 19/06	6,4	0	0,8	11,9	2,0	31,7
4	20 - 25/06	22,2	0	0,9	4	3,5	15,9
5	26 - 9/07	6,6	0	0,2	2,6	1,1	16
6	10 - 19/07	7,3	0	0,1	1,9	0,9	12
7	20 - 30/07	7,0	0	0,2	3	0,8	12
8	1 - 9/08	9,7	0	1,2	12	2,5	26
9	10 - 20/08	14,5	0	0,7	4,8	2,1	14,3

Tableau 5-5 : Pluie totale (P) et pluie efficace (Pe) par zone de recharge.
Régime transitoire du 23/05/85 au 20/08/85
(a) Valeurs exprimées en mmj-1 et (b) en % de la pluie totale.

Pas de temps	Pluie efficace (m ³ j ⁻¹)			Pe totale	q_{am} (m ³ j ⁻¹)	(*)
	q_1	q_2	q_3			
1	0	27,6	40,6	68,2	0,9	1,3
2	0	39,4	40,6	80	2,2	2,6
3	0	31,5	32,5	64	0,9	1,4
4	0	35,5	56,8	92,3	0,9	1
5	0	7,9	17,9	25,8	0,8	3
6	0	4	14,6	18,6	0,8	4,1
7	0	7,9	13	20,9	0,8	3,6
8	0	47,3	40,6	87,9	0,9	1
9	0	27,6	34,1	61,7	0,8	1,3

(*) Valeurs exprimées en % de la recharge totale.

Surfaces de calcul :

$$q_1 : 165 \text{ mailles de } 625 \text{ m}^2 = 103125 \text{ m}^2$$

$$q_3 : 26 \text{ mailles de } 625 \text{ m}^2 = 16250 \text{ m}^2$$

$$q_2 : 63 \text{ mailles de } 625 \text{ m}^2 = 39375 \text{ m}^2$$

$$q_{am} : 200 \text{ m} \times 4 \text{ m de hauteur} = 800 \text{ m}^2$$

Tableau 5-6 : Comparaison du flux amont q_{am} et de la pluie efficace Pe calculée pour la totalité de la barre (en m³j⁻¹). Régime transitoire du 23/05/85 au 20/08/85.

Les évolutions de la pluie efficace et de la pluviométrie sont simultanées (Fig. 5-14). La variabilité temporelle des valeurs de pluie efficace pour une même zone est certainement liée à l'intensité pluviométrique et au degré de saturation du sol.

Le flux amont q_{am} , estimé pour les couches C1 et C2 confondues, oscille entre $1.2 \cdot 10^{-8}$ et $3,2 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$. Ce flux étendu à toute la surface d'échange (800 m^2) atteint 0.8 à $2.2 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (Tab. 5-6). Il représente 1 % à 2 % de la recharge totale et n'atteint 4 % qu'au cours d'épisodes marqués par une faible pluviométrie et ponctués par quelques grosses averses. Ce flux reste négligeable.

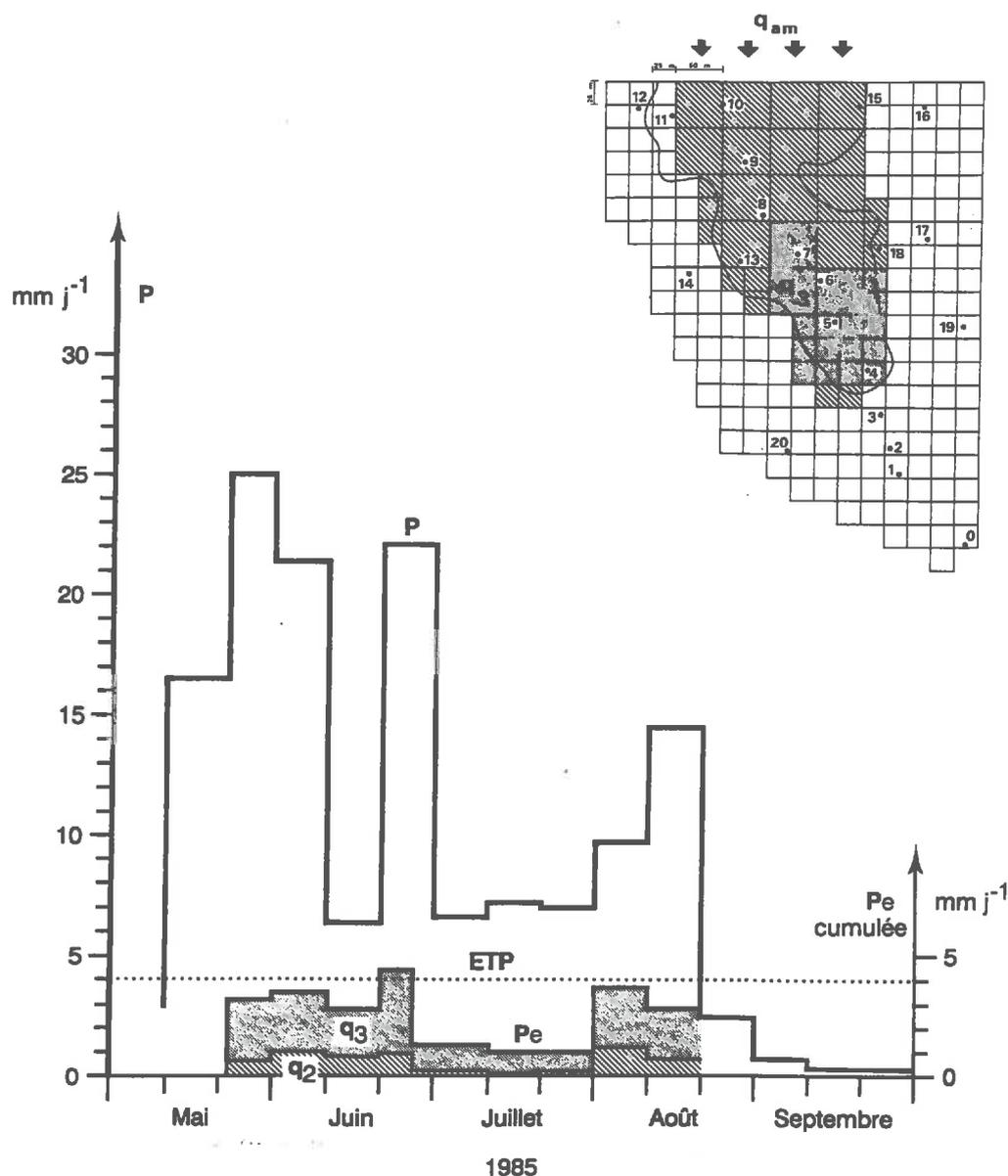


Figure 5-14 - Pluviométrie journalière moyenne P et pluie efficace Pe par zone de recharge. Régime transitoire du 23/05 au 20/08/85

3.2.2. Identification sur SE7 et SE15 (épisode 15/05 au 21/05/86).

La figure 5-15 rassemble les simulations réalisées sur SE7 et SE15.

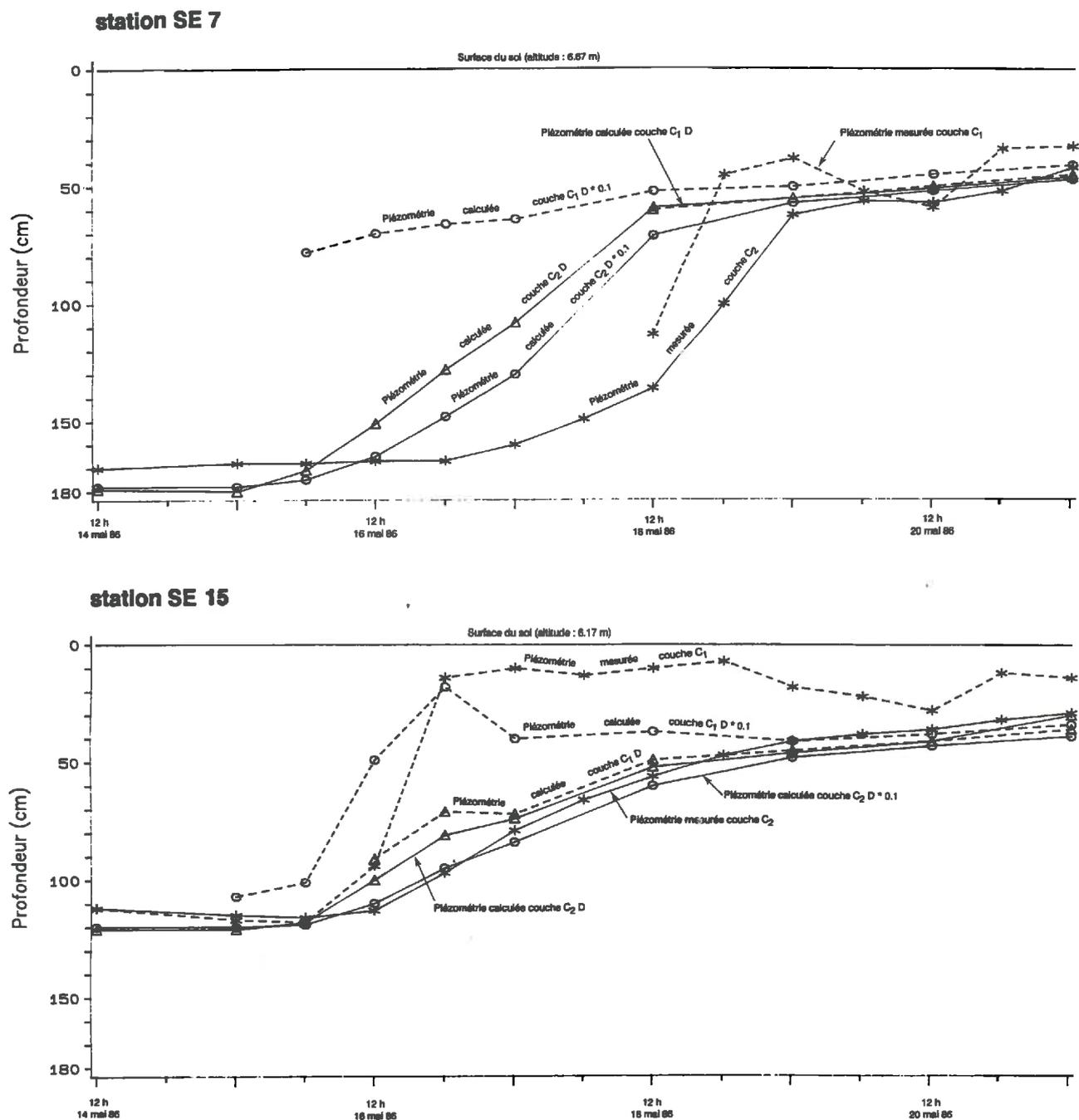


Figure 5-15 - Piézométries mesurées et piézométries calculées sur podzol (SE 7) et plansol (SE 15) pour les couches C₁ et C₂. Influence du coefficient de drainage D. Régime transitoire du 15.05.86 au 21.05.86.

Pour la station SE7, les mesures révèlent, entre le 18 et le 19/05, un décalage oscillant entre 25 et 50 cm entre la piézométrie de la couche C₁ et celle de la couche C₂. Ce phénomène: formation d'une nappe perchée fugace, est faiblement reproduit par le modèle.

L'observation détaillée du piézomètre de surface montre que sa crépine recoupe la base de la couche C1 et le sommet de C2 (Fig. 5-16). Son comportement n'est donc probablement pas tout à fait représentatif de la piézométrie de la couche C1.

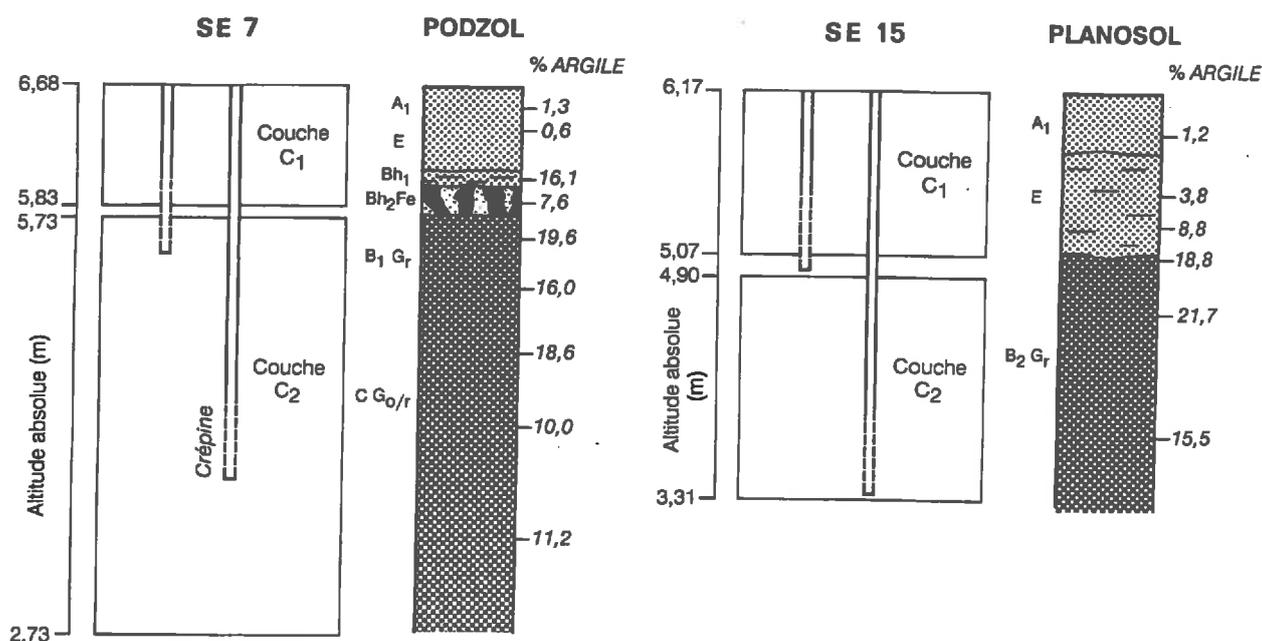


Figure 5-16 - Schéma précisant l'implantation des piézomètres automatiques des stations SE7 (podzol) et SE15 (planosol) par rapport aux mailles des couches C1 et C2.

L'allure de la piézométrie de la couche profonde C2 est, quant à elle, satisfaisante si l'on excepte un léger déphasage entre simulation et observation, d'environ 24 heures. Ce résultat semble pouvoir être relié à l'inertie de réponse du piézomètre profond (Chapitre 3). Ceci a par ailleurs été observé, sur ce même site, à l'occasion du test d'infiltration réalisé en novembre 1986. La simulation d'une pluie de 190 mm, nous a permis de mettre en évidence une nappe perchée, qui a persisté durant 5h 30mn. Les tests de sensibilité sur le coefficient de drainance, détaillés ci-dessous, tendent à confirmer cette hypothèse sur le retard à l'infiltration.

Pour la station SE15, le déphasage, observé sur les mesures du 16/05 au 19/05, entre la couche C1 et C2, n'est pas reproduit par simulation. La piézométrie de la couche C2 est, quant à elle, bien représentée. La valeur du coefficient de drainance, probablement trop élevée pour ce site, peut expliquer le mauvais ajustement pour la piézométrie de surface. Les échanges surface profondeur ne sont pas suffisamment ralentis. Une analyse de sensibilité s'avère donc indispensable.

Les relevés pluviométriques sont journaliers - il n'y a pas de relevés horaires sur cette période - et ne peuvent être reliés directement aux valeurs de pluie efficace, identifiées toutes les douze heures pour les cinq premiers pas de temps. Le cumul journalier de la pluie efficace montre, pour cet épisode marqué par de très fortes pluies, qu'elle est comprise entre 5 et 40% de la pluie totale P sur q₂, alors qu'elle atteint 70% de P sur q₃ (Tab. 5-7). La mobilisation de la pluie efficace après une forte pluie est quasi immédiate sur q₂, elle est plus lente sur q₃ : un effet retard de un à deux jours est observé (Fig. 5-17).

Pas de temps	Episode		P			Pe		
	jour	heure	(a)	q ₁	(a) q ₂	(b)	(a) q ₃	(b)
Régime permanent	12 13 14		2	0	0,1	5	0,7	35
1	15	0 à 12 h		0	1		4,8	
2	15	12 à 24 h	14	0	1	14,3	4,8	68,6
3	16	00 à 12 h		0	9,7		9,7	
4	16	12 à 24 h	100	0	9,7	19,4	9,7	19,4
5	17	00 à 12 h	30	0	1,9	38,7	9,7	64,7
6	17 au 18	12 h 12 h	50	0	2,9	5,8	14,5	29,0
7	18 au 19	12 h 12 h	20	0	1	5,0	4,8	24,0
8	19 au 20	12 h 12 h	14	0	1	7,1	4,8	34,3
9	20 au 21	12 h 12 h	20	0	1	5,0	4,8	24,0

Tableau 5-7 : Pluie totale (P) et pluie efficace (Pe) par zone de recharge.
Régime transitoire du 15/05/86 au 21/05/86
(a) Valeurs exprimées en mmj⁻¹ et (b) en % de P.

Sur la zone amont q₂, les fluctuations piézométriques, **Pinfiltration et la pluie sont synchrones**. Alors que sur q₃, où la pluie efficace est plus forte, on observe un net décalage entre la pluie d'un côté et la pluie efficace et la piézométrie de l'autre.

Les flux amont, calculés pour chaque pas de temps (4,3 m³ j⁻¹, soit 5,4 mmj⁻¹ pour les neuf pas de temps de calcul), sont négligeables en regard de la pluie efficace : 1 à 3 % de la recharge totale (Tab. 5-8).

Une identification est tentée avec deux conductivités moyennes par couche (une valeur pour les ferrallitiques et une pour les autres sols). Le modèle diverge dès le premier pas de temps. Le problème de discrétisation spatiale au voisinage des thalwegs se repose donc, de la même façon qu'en régime permanent.

L'identification réalisée ci-dessus, avec le coefficient de drainance utilisé pour les pas de temps longs ($D = 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$), ne s'avère pas satisfaisante. Il est par conséquent nécessaire de l'affiner. Une nouvelle identification est réalisée successivement sur les deux épisodes en modifiant la valeur de D. Ces résultats sont illustrés, pour l'épisode du 23/05/85 au 20/08/85, par le tableau 5-9 et, pour l'épisode du 15/05/86 au 21/05/86, par la figure 5-15.

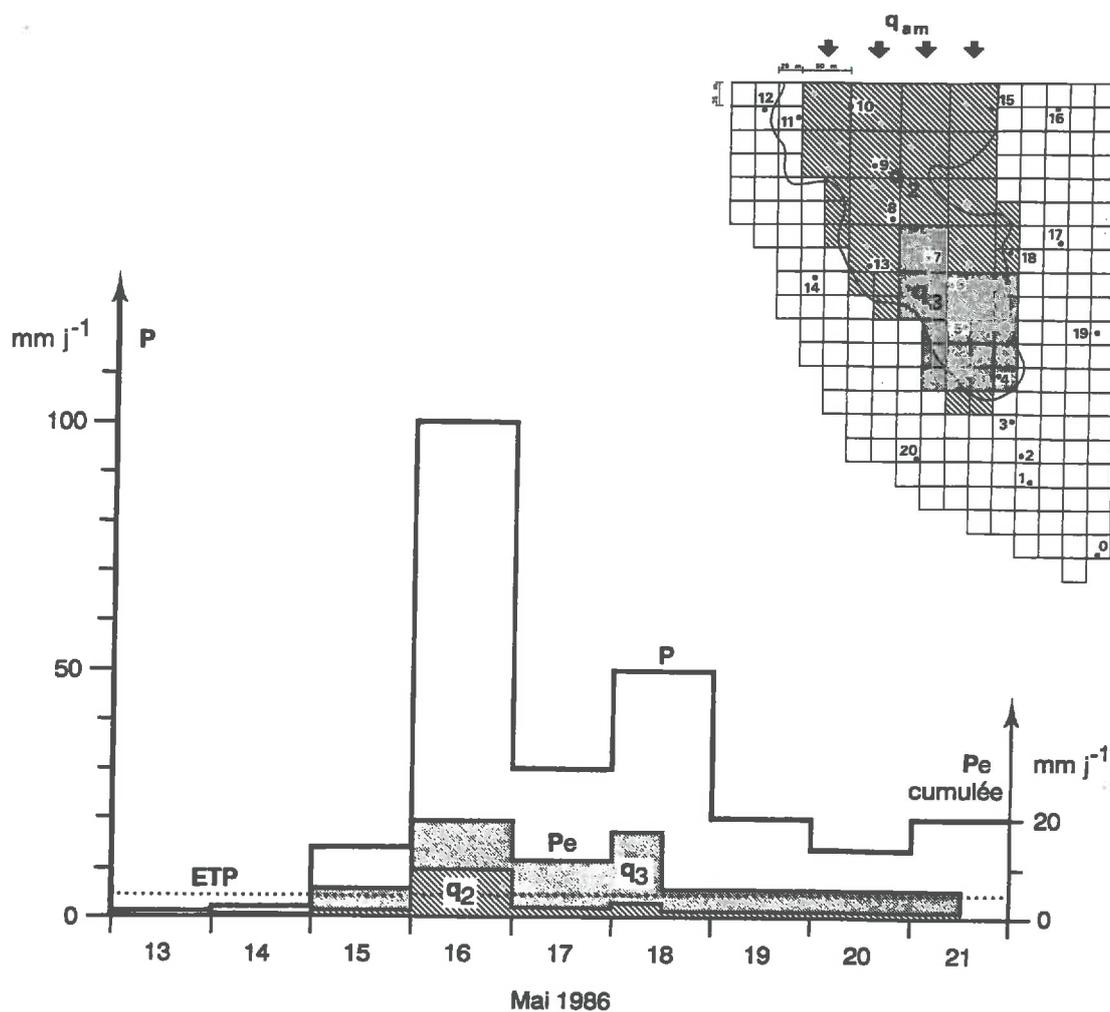


Figure 5-17 - Pluviométrie journalière P et pluie efficace Pe par zone de recharge. Régime transitoire du 15 au 21/05/86.

Pas de temps	Pluie efficace (m^3j^{-1})				q_{am} (m^3j^{-1})	(*)
	q_1	q_2	q_3	Pe totale		
1 et 2	0	39,4	78	117,4	4,3	3,5
3 et 4	0	381,9	157,6	539,5	4,3	0,8
5	0	74,8	157,6	232,4	4,3	1,8
6	0	114,2	235,6	349,8	4,3	1,2
7 8 et 9	0	39,4	78	117,4	4,3	3,5

(*) Valeurs exprimées en % de la recharge totale.
(Surfaces de calcul : cf tab. 5-6)

Tableau 5-8 - Comparaison du flux amont q_{am} et de la pluie efficace Pe calculée pour la totalité de la barre (en m^3j^{-1}). Régime transitoire du 15/05/86 au 21/05/86.

Les résultats précédents nous incitent à tester des coefficients de drainance plus faibles.

Pour l'épisode 1985, avec $D \times 0.01$ ($5.10^{-8} s^{-1}$), nous constatons une dégradation générale de la représentation piézométrique. Le modèle crée de plus, pour un certain nombre de stations (SE4, SE6, SE7 et SE8 ...), une nappe perchée qui n'a jamais été mise en évidence à cette période. Les résultats sont nettement améliorés avec $D \times 0.1$ ($5.10^{-7} s^{-1}$), mais restent moins bons que ceux observés avec D . Les valeurs $D \times 0.5$ et $D \times 5$ donnent des résultats très voisins de ceux obtenus avec D , alors qu'une valeur plus élevée $D \times 10$ ($5.10^{-5} s^{-1}$) dégrade les critères relatifs d'ajustement (Tab. 5-10).

Episode	Pas de temps	Modalité	Coefficient de drainance					
			Dx0,1	Dx0,01	Dx0,5	D	Dx5	Dx10
23/05 au 29/05	1	M1	0,088	0,103	0,087	0,087	0,087	0,087
		M2	0,122	0,134	0,121	0,121	0,120	0,121
		M3	0,098	0,111	0,097	0,097	0,097	0,098
30/05 au 09/06	2	M1	0,096	0,107	0,096	0,096	0,096	0,096
		M2	0,173	0,187	0,171	0,172	0,172	0,172
		M3	0,120	0,129	0,120	0,120	0,120	0,120
10/06 au 19/06	3	M1	0,100	0,117	0,098	0,098	0,098	0,098
		M2	0,181	0,210	0,177	0,176	0,176	0,176
		M3	0,110	0,125	0,109	0,109	0,109	0,109
20/06 au 25/06	4	M1	0,100	0,123	0,097	0,096	0,0961	0,096
		M2	0,178	0,219	0,173	0,171	0,1720	0,172
		M3	0,103	0,125	0,101	0,100	0,1004	0,100
26/06 au 09/07	5	M1	0,109	0,131	0,107	0,106	0,1060	0,106
		M2	0,211	0,246	0,206	0,205	0,2043	0,204
		M3	0,122	0,145	0,119	0,118	0,1180	0,118
10/07 au 19/07	6	M1	0,114	0,135	0,110	0,109	0,1087	0,109
		M2	0,205	0,239	0,198	0,197	0,1964	0,196
		M3	0,120	0,143	0,115	0,114	0,1135	0,113
20/07 au 29/07	7	M1	0,100	0,119	0,097	0,096	0,0967	0,096
		M2	0,170	0,204	0,164	0,163	0,1617	0,161
		M3	0,095	0,117	0,091	0,091	0,0906	0,090
30/07 au 09/08	8	M1	0,099	0,117	0,099	0,098	0,0984	0,098
		M2	0,148	0,191	0,143	0,141	0,1411	0,141
		M3	0,096	0,111	0,096	0,095	0,0961	0,096
10/08 au 20/08	9	M1	0,099	0,119	0,098	0,098	0,0971	0,097
		M2	0,163	0,206	0,157	0,156	0,1551	0,156
		M3	0,093	0,114	0,092	0,091	0,0910	0,091

Tableau 5-9 : Influence du coefficient de drainance sur les critères relatifs (sans valeur absolue) d'ajustement de la couche C2 (modalités M1, M2, M3) calculés pour chaque pas de temps de calcul. Régime transitoire du 23/05/85 au 20/08/85.

Pour l'épisode 1986 (stations SE7 et SE15), l'influence du coefficient de drainance est particulièrement nette : sur podzol (SE7), bien que l'exploitation des relevés de surface soit incertaine, le modèle montre, avec $D \times 0.1$, l'existence d'une nappe perchée très fugace, située au-dessus de la discontinuité texturale, assimilable ici aux horizons BhFe du podzol. Elle persiste durant deux à trois jours. Ce résultat est proche de celui observé sur le terrain. Sur planosol (SE15), on constate à partir du troisième pas de temps (17/05 à 0h) et avec le même coefficient de drainance, un décalage d'environ 25 cm entre les piézométries de surface mesurée et simulée.

Il est probable, et en accord avec les données de terrain (gradient textural plus ou moins marqué), que la conductivité de l'éponte ne doit pas être homogène sur la totalité de la barre. C'est-à-dire que pour une épaisseur d'éponte identique, le coefficient de drainance doit être variable dans l'espace. Sur les ferrallitiques, où le gradient textural est très progressif, nous serions tentés de choisir la valeur maximale de D soit $D \times 20$ (K_s éponte = $40 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$); sur les planosols il semblerait plus logique de prendre $D \times 0.1$ et sur les podzols, où la discontinuité texturale (alios) est mitée, nous privilégierions D ou $D \times 0.1$, suivant les stations.

En conclusion, la prise en compte de $D \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (K_s éponte = $2 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$), comme valeur de coefficient de drainance sur l'ensemble du domaine, nous semble satisfaisante, même s'il s'avère qu'elle ne permet pas de reproduire des phénomènes fugaces tels que la nappe perchée, observée essentiellement sur SE15 et de façon plus ténue sur SE7. L'absence de relevés à pas de temps horaire sur d'autres stations ne nous permet pas d'affiner le calage de D .

3.3. Contrôle expérimental

Il ne s'agit pas à proprement parler de véritables validations puisque la pluie efficace est à nouveau identifiée. Nous cherchons en fait à valider le zonage de la pluie efficace, afin d'améliorer l'analyse du phénomène de mobilisation de la recharge sur la barre.

Deux simulations sont réalisées. La première en 1986, sur un épisode de 109 jours (20/05 au 12/09) et la seconde en 1984, sur un épisode de 34 jours (11/01 au 15/02), pour lequel nous disposons de mesures simultanées de la piézométrie et de la teneur en eau volumique. Ce dernier épisode nous permettra ainsi d'estimer le ruissellement (Chapitre 6). Pour chaque épisode, les pas de temps élémentaires de calcul sont déterminés de telle façon que sur chaque pas de temps la pluviométrie soit constante.

3.3.1. Episode du 20/05/86 au 12/09/86

Cet épisode, composé de quinze pas de temps de calcul, est directement précédé par celui étudié précédemment (15/05 au 21/05). La dernière piézométrie calculée pour ce dernier nous sert de condition initiale. Une première simulation, avec trois zones de pluie efficace (q_1 , q_2 et q_3) permet de valider le zonage. Nous notons cependant, qu'en distinguant au sein de la zone q_3 , une zone q_4 où l'infiltration est plus forte (Fig. 5-18), l'ajustement sur SE4 et SE5 est amélioré pour les pas de temps quatre à huit.

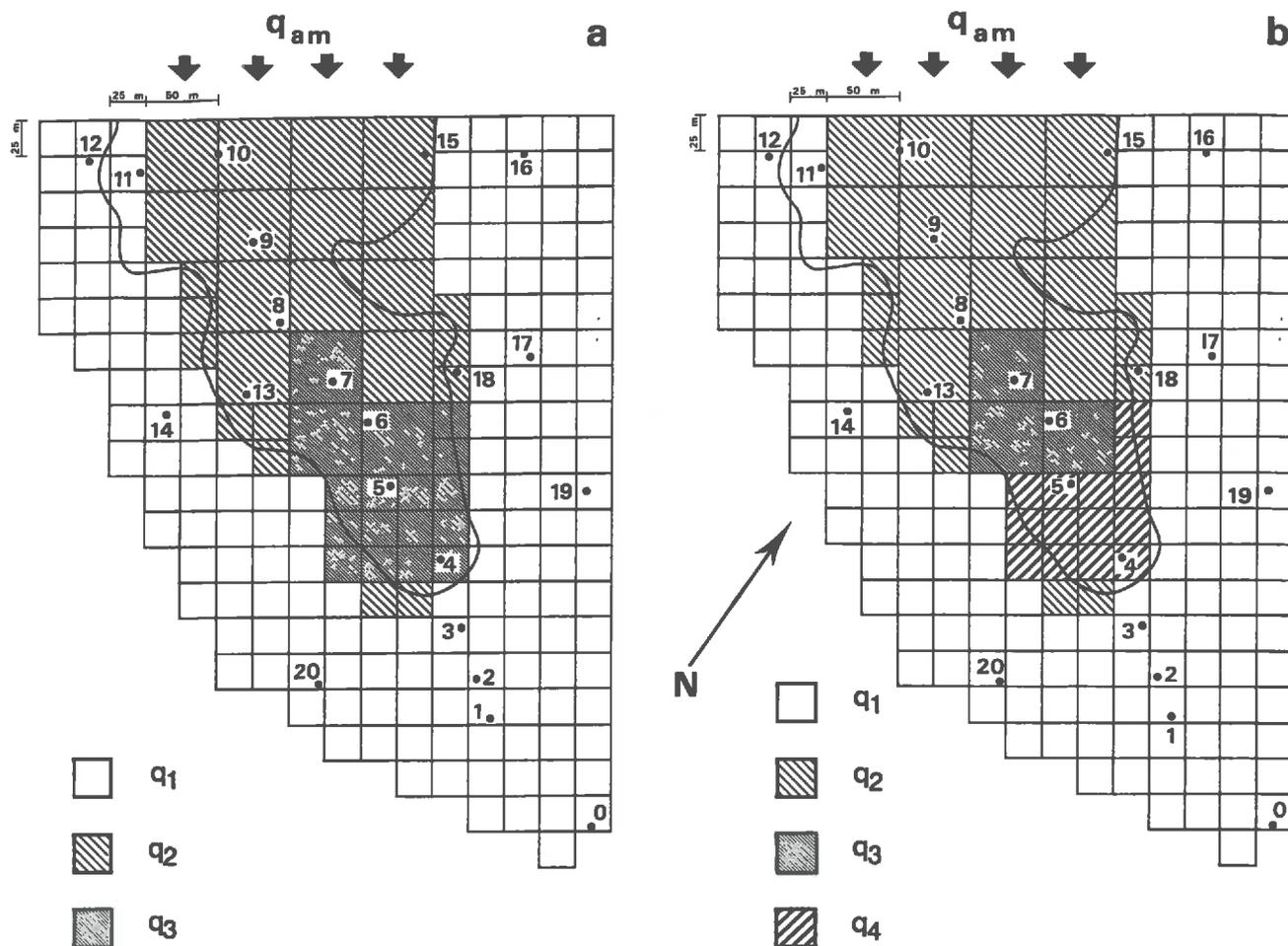


Figure 5-18 - Modification du zonage de la Recharge en régime transitoire.

a) Zonage initial (régime permanent).

b) Zonage définitivement adopté.

Les critères d'ajustement et l'erreur moyenne, calculés pour les quinze pas de temps avec les quatre zones de recharge, sont rassemblés dans le tableau 5-10. L'erreur moyenne oscille entre 3,8 cm et -33,3 cm suivant le pas de temps de calcul.

La comparaison, sur l'ensemble des quinze pas de temps de calcul, de la piézométrie mesurée et calculée, révèle une surestimation de la piézométrie par le modèle pour les valeurs les plus faibles (Fig. 5-19). Ce phénomène est particulièrement net pour trois stations, SE1, SE2 et SE17, et, d'une façon générale, pour toutes les stations situées à proximité des thalwegs et de l'exutoire, qui sont par conséquent localisées sur les points bas (Fig. 5-20). Pour la majorité des stations cet écart est inférieur à 30 cm.

La figure 5-21 illustre l'ajustement réalisé pour l'ensemble des stations entre les piézométries mesurées et calculées; les stations SE7 et SE10 sont représentatives des stations pour lesquelles l'ajustement est satisfaisant (Fig. 5-21a), alors que les stations SE2 et SE17 illustrent le groupe des stations situées en bordure des thalwegs, pour lesquelles l'ajustement est mauvais (Fig. 5-21b). Même si l'ajustement réalisé pour ces stations est jugé peu satisfaisant - 30 à 90 cm d'excès d'eau sont générés par le modèle - l'allure générale des fluctuations de la nappe est dans tous les cas correctement reproduite.

Episode	Pas de temps	Modalité	Critère	E.M (cm)	E.T
22/05 au 26/05	1	M1 M2 M3	0,077 0,076 0,078	-6,7	26,9
27/05 au 30/05	2	M1 M2 M3	0,080 0,101 0,086	3,8	20,4
31/05 au 7/06	3	M1 M2 M3	0,075 0,153 0,094	-7,5	16,3
8/06 au 18/06	4	M1 M2 M3	0,099 0,199 0,116	-14,7	23,7
19/06 au 29/06	5	M1 M2 M3	0,110 0,209 0,125	-15,8	29,2
30/06 au 05/07	6	M1 M2 M3	0,109 0,214 0,128	-15,5	27,9
6/07 au 10/07	7	M1 M2 M3	0,107 0,218 0,124	-17,3	28,4
11/07 au 15/07	8	M1 M2 M3	0,118 0,246 0,136	-23	31,7
16/07 au 31/07	9	M1 M2 M3	0,111 0,215 0,124	-12,8	32,8
1/08 au 12/08	10	M1 M2 M3	0,112 0,194 0,120	-1,5	36,1
13/08 au 15/08	11	M1 M2 M3	0,102 0,157 0,107	-0,2	33,5
16/08 au 22/08	12	M1 M2 M3	0,097 0,182 0,112	-0,5	26,6
23/08	13	M1 M2 M3	0,102 0,199 0,114	-9	26,7
24/08 au 03/09	14	M1 M2 M3	0,136 0,277 0,157	-26	35
4/09 au 12/09	15	M1 M2 M3	0,144 0,298 0,173	-30	38,6

**Tableau 5-10 - Critères d'ajustement relatifs (sans valeur absolue) pour la couche C2 (modalités M1, M2, M3) et erreur moyenne (E.M = PM-PC) calculés pour chaque pas de temps de calcul.
Régime transitoire du 20/05/86 au 12/09/86 (contrôle expérimental).**

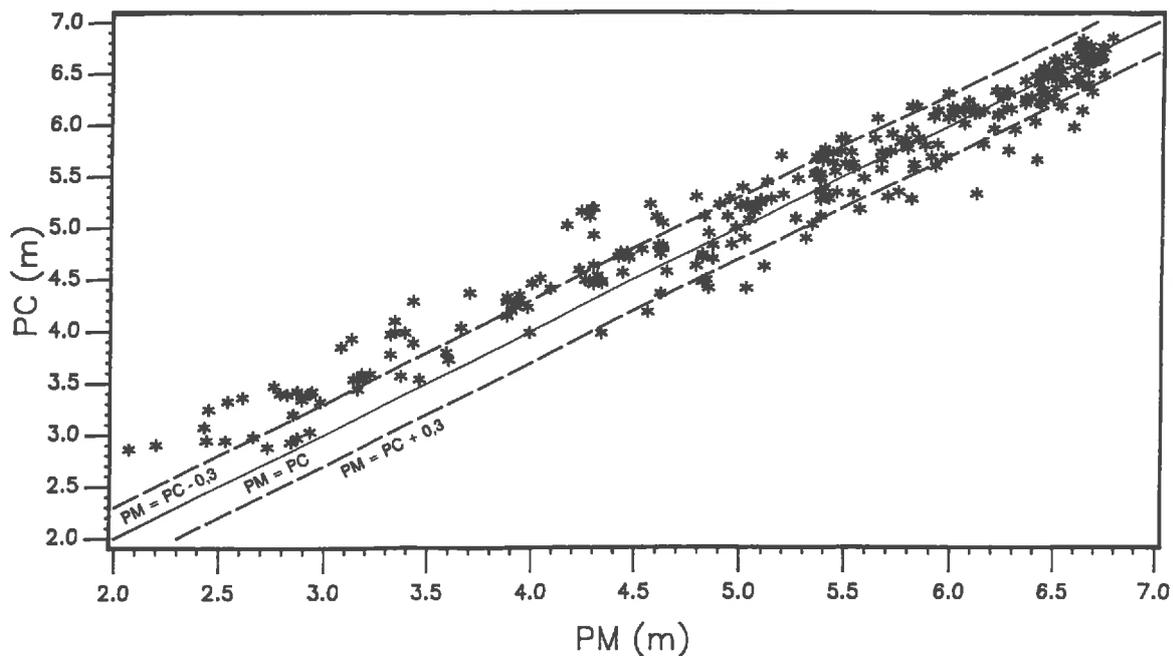


Figure 5-19 - Comparaison des piézométries mesurées (PM) et calculées (PC) pour l'ensemble des 15 pas de temps de calcul. Régime transitoire du 22.05.86 au 12.09.86.

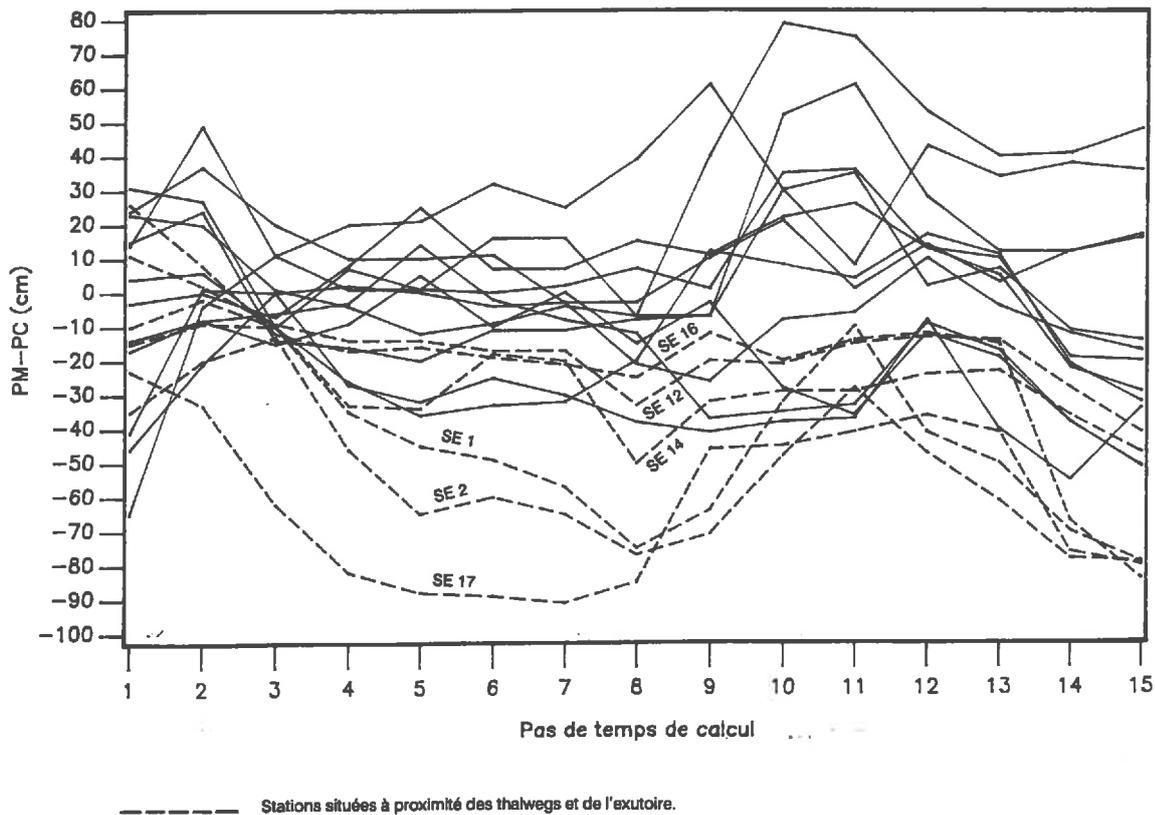


Figure 5-20 - Comparaison des erreurs d'ajustement (PM - PC) par station et par pas de temps de calcul. Régime transitoire du 22.05.86 au 12.09.86.

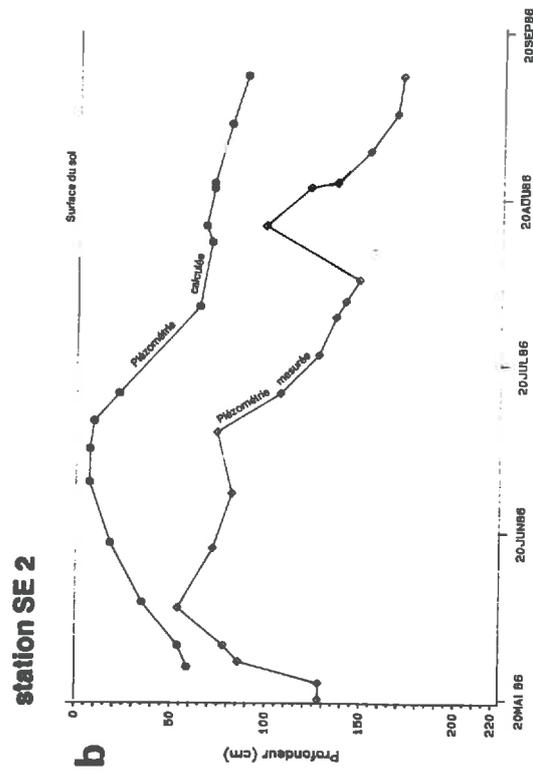
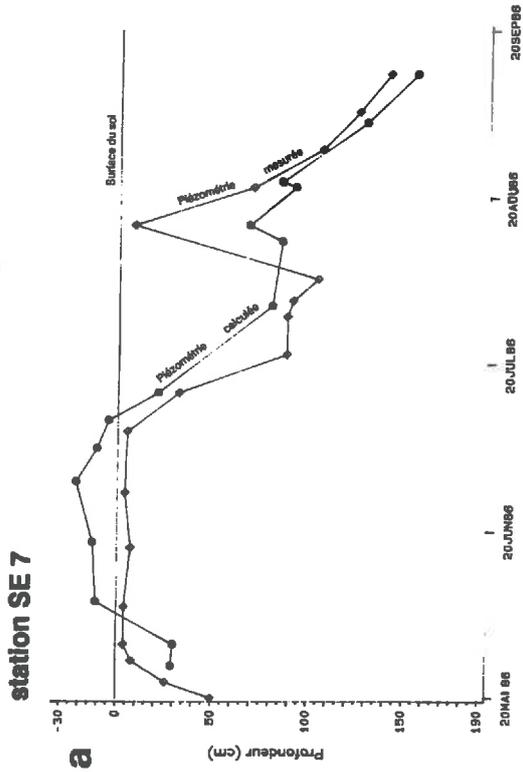
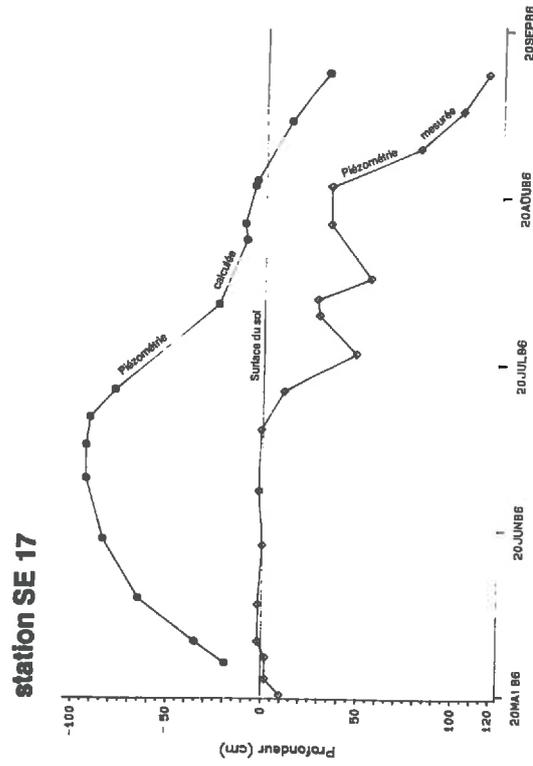
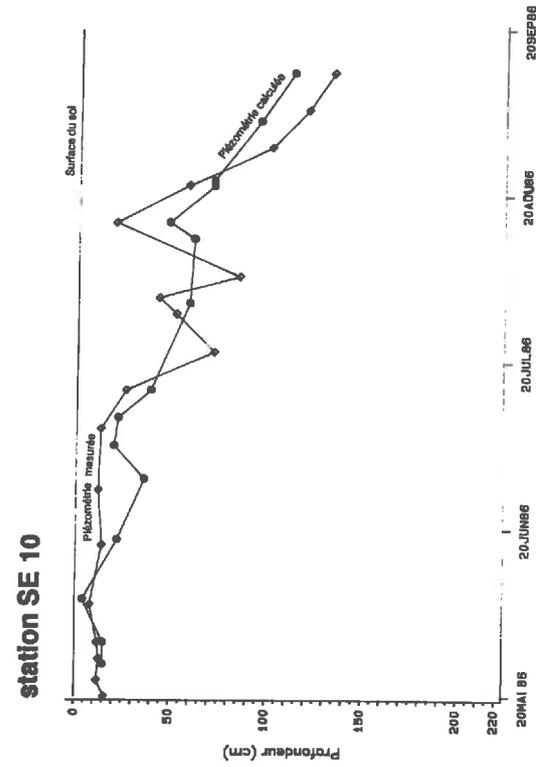


Figure 5-21 - Piézométrie mesurée et piézométrie calculée. Régime transitoire du 20.05.86 au 12.09.86

- a - Exemples de stations caractérisées par un bon ajustement (SE 7 et SE 10)
- b - Exemples de stations caractérisées par un mauvais ajustement (SE 2 et SE 17)

Il semble logique de se demander si l'excès d'eau, observé sur les stations aval (déjà signalé pour les simulations précédentes, y compris en régime permanent), n'est pas une conséquence du rôle joué par l'éponte sur les mailles aval (232 à 236 pour C1 et 328 à 330 pour C2) qui, en ralentissant de façon excessive les échanges entre C1 et C2, freine l'élimination de l'eau en surface, par la couche CT. L'imposition d'un flux aval sortant, calculé à l'aide du gradient de potentiel mesuré entre SE1 et SE0 sur ces mailles (du 19 au 29/06 $\Delta h = 62$ cm et $K_{s\text{moy}} = 8.10^{-6} \text{ms}^{-1}$), soit $q_{\text{av}} = 3,4.10^{-8} \text{ms}^{-1}$ ($0,1 \text{m}^3\text{j}^{-1}$), n'améliore pas l'ajustement des stations aval. Une nouvelle tentative, faite en multipliant par 10 le flux calculé pour les différents pas de temps, est également infructueuse.

La mauvaise connaissance des conditions aux limites, notamment au cours de la saison sèche, semble dès lors être la cause essentielle des écarts entre les piézométries mesurées et calculées, constatés pour les stations localisées à proximité des thalwegs et de l'exutoire.

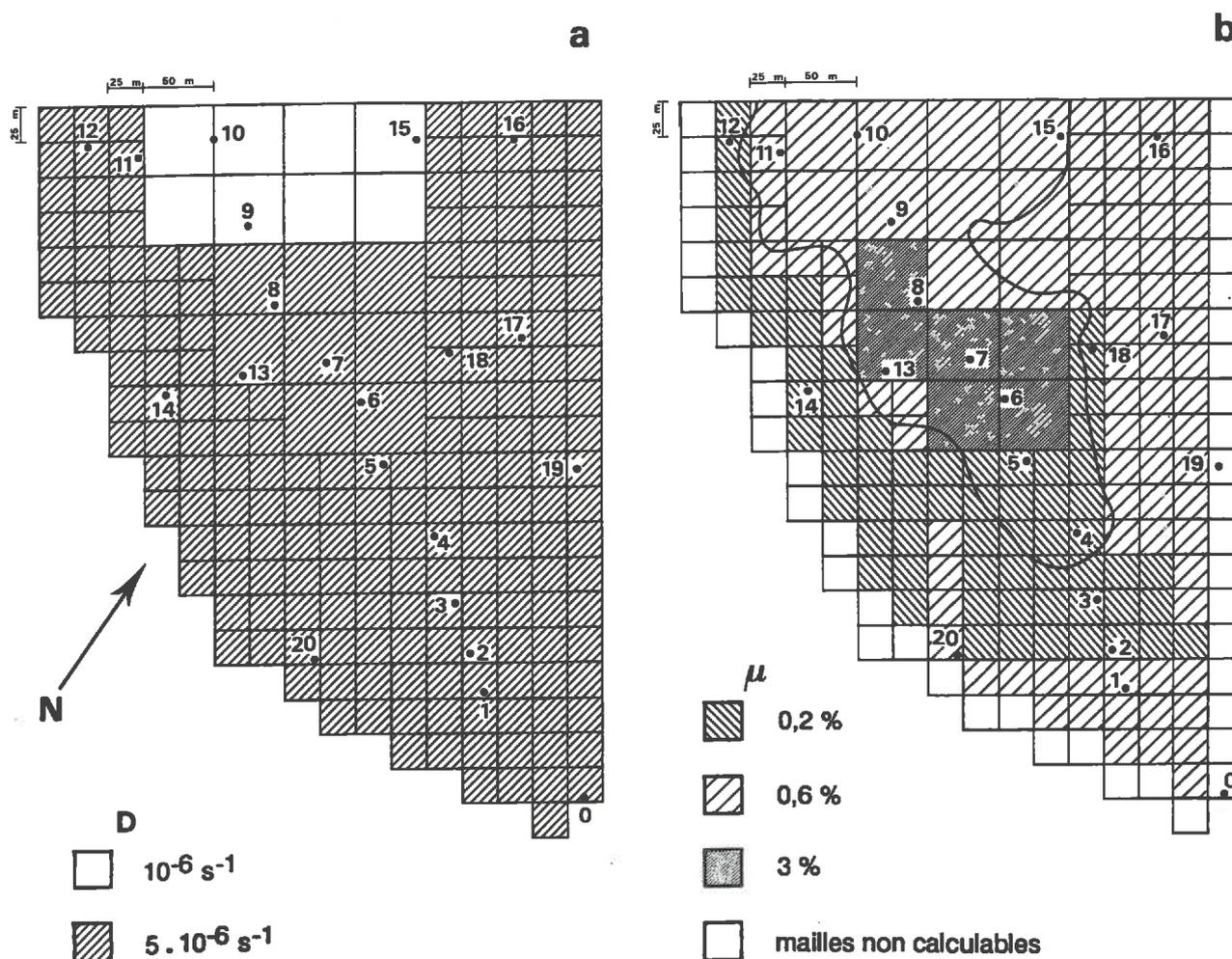


Figure 5-22 - Valeurs des paramètres du modèle calés en régime transitoire.

a) Coefficient de drainage : D

b) Porosité de drainage : μ

et coefficient d'emmagasinement : $S = 6 \cdot 10^{-3}$ sur toutes les mailles

Les valeurs des paramètres S , D et μ calés sont regroupés figure 5-22. La pluie efficace identifiée est comprise entre 2 et 10 % de P sur la zone q_2 et entre 10 et 32 % de P sur q_3 (Tab. 5-11). Sur la zone q_4 , mise en évidence pour les pas de temps 4, 5, 6, 7 et 8, la pluie efficace est comprise entre 14 et 38 % de P . La simultanéité de l'évolution de la pluie efficace et de la pluviométrie est, ici encore, soulignée, comme l'atteste par exemple le 13ème pas de temps marqué par une averse de 30 mm (Fig. 5-23).

Le flux amont q_{am} , est compris entre $0,2 \cdot 10^{-8} \text{ms}^{-1}$ ($0,1 \text{m}^3 \text{j}^{-1}$) et $1,9 \cdot 10^{-8} \text{ms}^{-1}$ ($1,3 \text{m}^3 \text{j}^{-1}$) (Tab. 5-12). Il est ici aussi négligeable: il représente 1 à 2 % de la recharge totale et atteint 4 à 5 % de celle-ci lors d'épisodes marqués par une pluviométrie très faible (100 % pour l'épisode du 3/09 au 12/09, où il ne pleut pas).

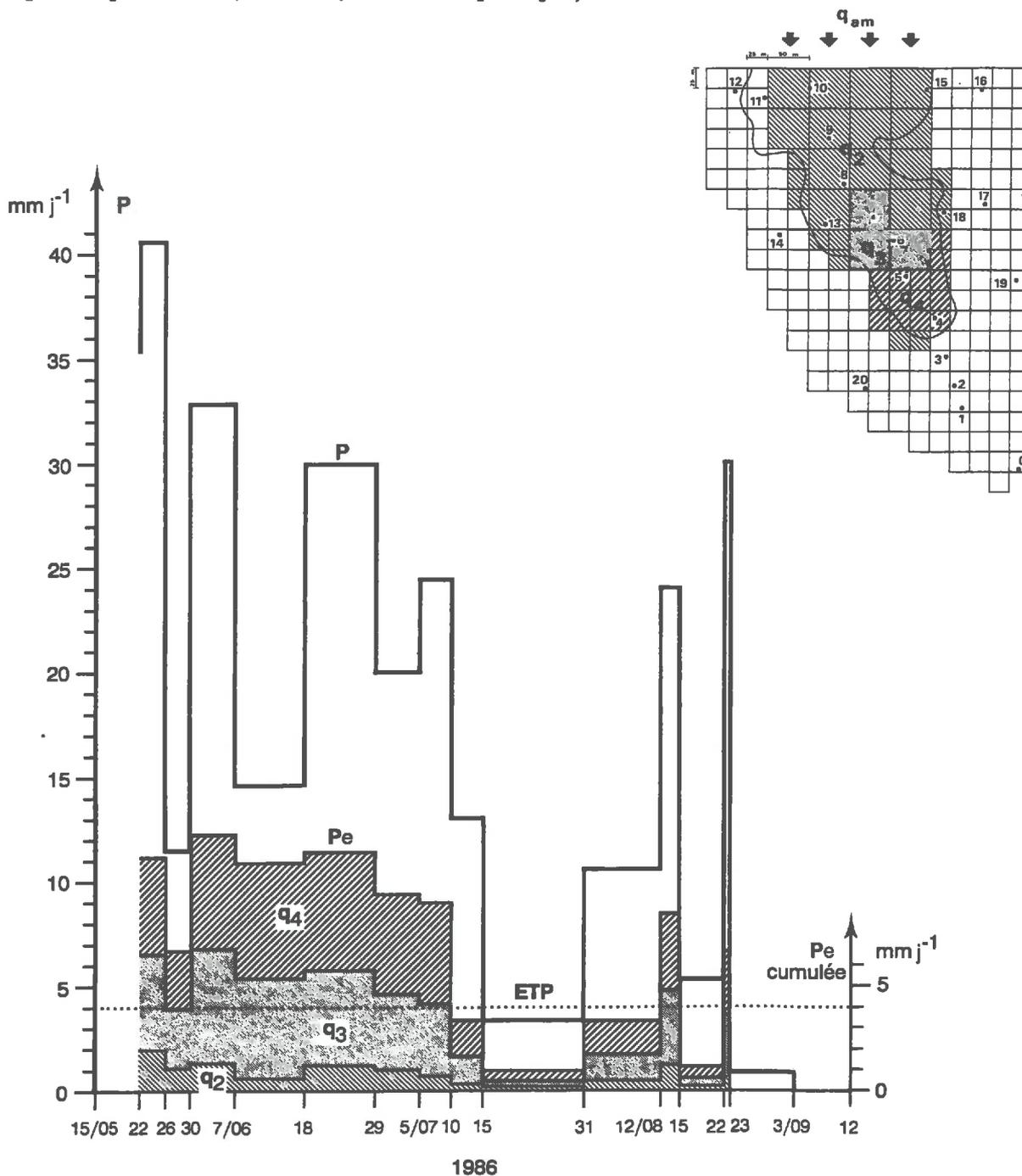


Figure 5-23 - Pluviométrie journalière moyenne P et pluie efficace Pe par zone de recharge. Régime transitoire du 22/05 au 12/09/86 (contrôle expérimental).

Pas de temps	Episode	P		Pe						
		(a)	q1	(a)	q2	(b)	(a)	q3	(b)	(a)	q4	(b)
1	22 au 26/05	40,6	0	2	4,9	4,6	11,3	4,6	11,3	
2	27 au 30	11,5	0	1,1	9,6	2,8	24,3	2,8	24,3	
3	31 au 7/06	32,8	0	1,3	4	5,5	16,8	5,5	16,8	
4	8 au 18	14,6	0	0,7	4,8	4,7	32,2	5,5	37,7	
5	19 au 29	29,9	0	1,2	4	4,5	15	5,7	19,1	
6	30 au 5/07	20,0	0	1,0	5	3,6	18	4,8	24	
7	6 au 10	24,4	0	0,7	2,9	3,4	13,9	4,9	20	
8	11 au 15	13,0	0	0,3	2,3	1,3	10	1,8	13,8	
9	16 au 31	3,5	0	0,1	3	0,4	11,1	0,4	11,1	
10	1/08 au 12	10,6	0	0,5	4,7	1,2	11,3	1,6	15,1	
11	13 au 15	24,0	0	1,2	5	3,6	15	3,6	15	
12	16 au 22	5,3	0	0,1	1,9	0,5	9,4	0,5	9,4	
13	23/08	30,0	0	0,6	2	3	10	3	10	
14	24 au 3/09	0,9	0	0,2	2,2	0,09	10	0,09	10	
15	4 au 12/09	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tableau 5-11 - Pluie totale (P) et pluie efficace (Pe) par zone de recharge. Régime transitoire du 20/05/86 au 12/09/86 (Valeurs exprimées en mmj^{-1} (a) et en % de P(b)).

Pas de temps	Pluie efficace (m^3j^{-1})				Pe totale	qam	
	q1	q2	q3	q4		(m^3j^{-1})	(*)
1	0	80,6	34,2	39,9	154,7	1,3	0,8
2	0	43,5	20,7	24,2	88,4	1,3	1,4
3	0	52,2	41,5	48,4	142,1	1,3	0,9
4	0	28,6	35,0	48,4	112,0	1,3	1,1
5	0	46,8	33,6	49,6	130,0	1,3	1
6	0	39,2	27,0	41,9	109	1,3	1,2
7	0	28,3	25,6	42,6	96,5	0,8	0,8
8	0	10,3	9,7	15,7	35,7	0,8	2,2
9	0	5,4	2,6	3	11	0,5	4,3
10	0	20,7	9,4	14	44,1	0,8	1,8
11	0	47,9	27,1	31,6	106,6	0,8	0,7
12	0	4,4	3,9	4,6	12,9	0,1	0,8
13	0	23,9	22,5	26,2	72,6	0,1	0,1
14	0	0,5	0,7	0,8	2	0,1	5
15	0	0	0	0	0	0,1	100

(*) Valeurs exprimées en % de la recharge totale. (Surfaces de calcul : cf Tab. 5-6)

Tableau 5-12 - Comparaison du flux amont q_{am} et de la pluie efficace. Pe calculés pour la totalité de la barre (en m^3j^{-1}). Régime transitoire du 22/05/86 au 12/09/86 (contrôle expérimental).

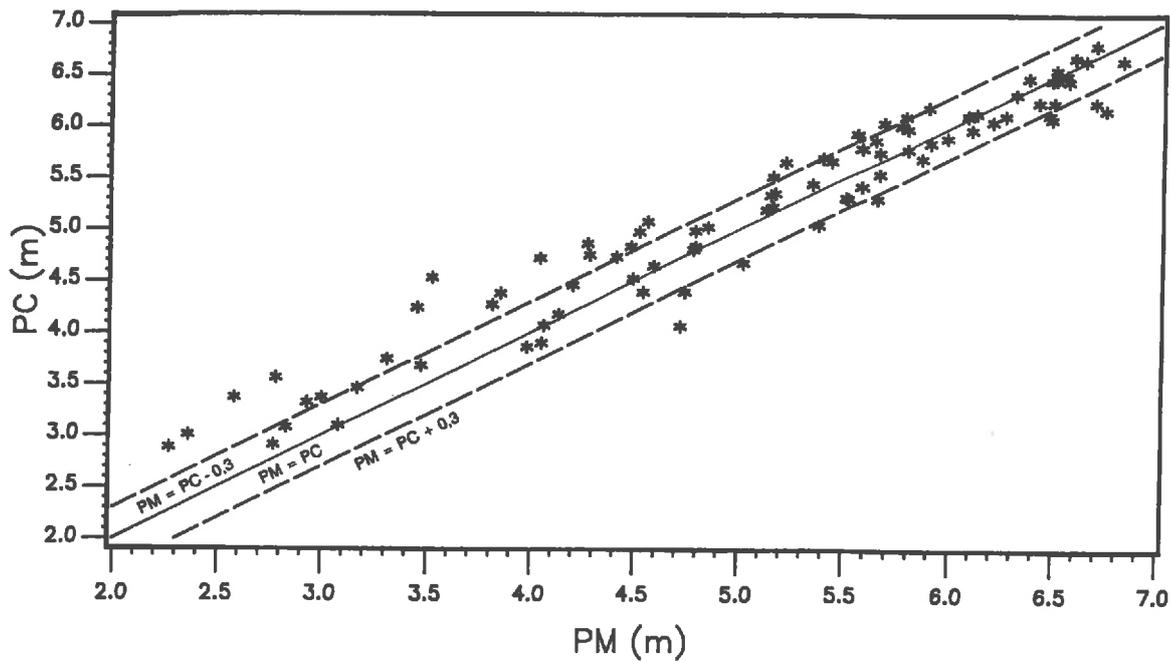


Figure 5-24 - Comparaison des piézométries mesurées (PM - PC) et calculées (PC) pour l'ensemble des 5 pas de temps de calcul. Régime transitoire du 11.01.84 au 15.02.84.

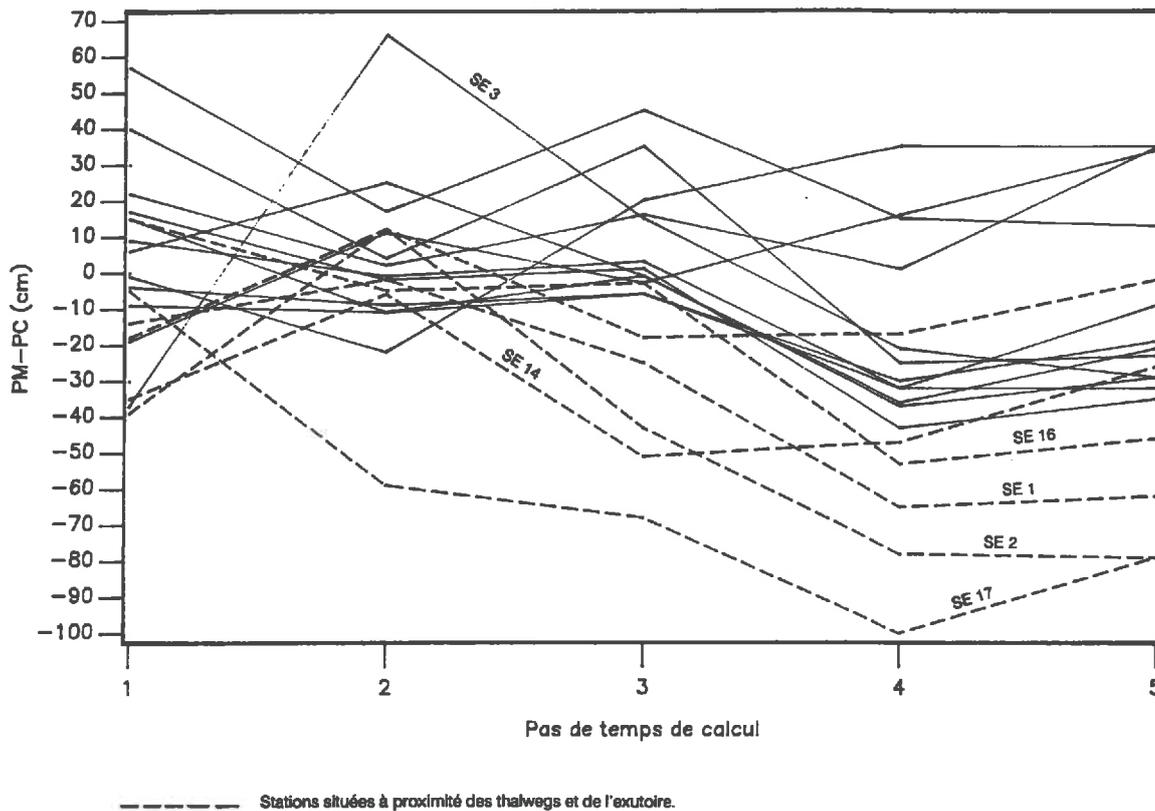


Figure 5-25 - Comparaison des erreurs d'ajustement (PM - PC) par station et par pas de temps de calcul. Régime transitoire du 11.01.84 au 15.02.84.

3.3.2. Episode du 11/01/84 au 15/02/84

Ce dernier contrôle expérimental confirme les résultats précédents. L'écart entre la piézométrie mesurée et la piézométrie calculée est inférieur à 30 cm pour la plupart des stations, sauf pour les stations situées à proximité des thalwegs et des exutoires (Fig. 5-24 et Fig. 5-25). Les critères d'ajustement et les valeurs de l'erreur moyenne, entre la piézométrie mesurée et la piézométrie calculée, pour les cinq pas de temps de calcul sont réunis dans le tableau 5-13. On constate une nette dégradation de l'ajustement pour les deux derniers pas de temps, pour lesquels l'erreur moyenne est proche de 30 cm. La mauvaise connaissance des conditions aux limites ne suffit pas à expliquer ce mauvais ajustement pour les deux derniers pas de temps. Le quatrième et le cinquième pas de temps sont caractérisés, entre autres, par une pluviométrie très faible - respectivement 1,9 et 6,1 mm/jour - proche ou inférieure à la valeur de l'ETP journalière.

Date	Pas de temps	Modalité	R.E.Q.M. (*) (1)		E.M (1)		E.T (1)	
11/01 au 16/01	1	M1	25,1	25,1	0	0,4	25,1	25,1
		M2	27,4	28,9				
		M3	24,2	25,4				
17/01 au 27/01	2	M1	23,6	28,1	1,2	6,3	23,6	27,4
		M2	25,2	23,1				
		M3	20,2	19,8				
28/01 au 2/02	3	M1	28,1	27,5	-4,9	0,7	27,8	27,5
		M2	38,9	37,5				
		M3	30,2	29,2				
3/02 au 8/02	4	M1	44,7	37,5	-31,3	-2,7	32,9	37,4
		M2	55,0	46,6				
		M3	45,8	39,7				
9/02 au 15/02	5	M1	39,6	35,3	-20,8	4,5	33,7	35
		M2	45,1	37,6				
		M3	38,4	35,0				

E.M (= PM-PC) : erreur moyenne (cm) ;

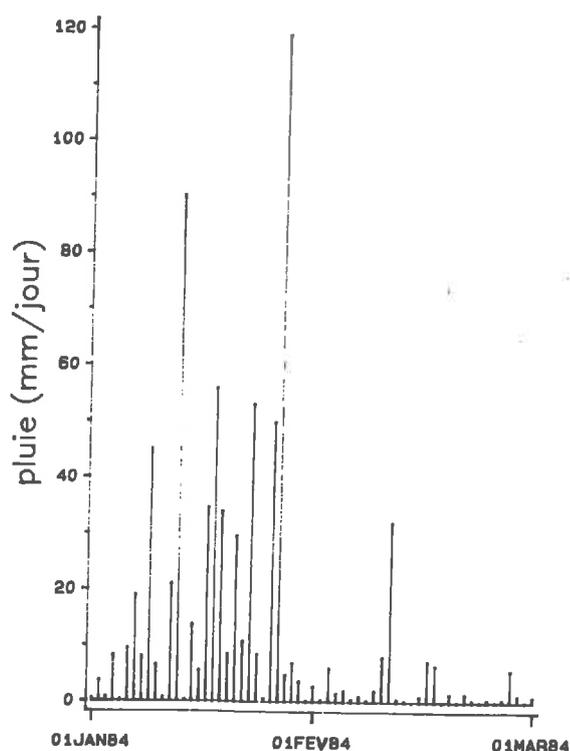
E.T : écart-type;

(*) en cm.

(1) Calcul avec $K_s \times 2$ sur les mailles proches de l'exutoire.

Tableau 5-13 - Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*) pour la couche C2 (modalités M1, M2, M3) et erreur moyenne calculés pour chaque pas de temps de calcul. Régime transitoire du 11/01/84 au 15/02/84 (contrôle expérimental).

Figure 5-26 - Pluviométrie journalière
du 01.01.84 au 01.03.84.



Trois phénomènes, éventuellement simultanés, peuvent expliquer l'important excès d'eau généré par le modèle (près de 80 cm pour la station SE2) pour ces deux pas de temps du petit été de mars 1984:

- il peut sembler particulièrement critiquable, de calculer une valeur de pluie moyenne sur des épisodes de courte durée (six et sept jours), caractérisés par une pluviosité faible et répartie sous forme d'averses ponctuelles (Fig. 5-26);

- les valeurs de conductivité de la zone aval, proche de l'exutoire, sont peut-être sous-estimées, ce qui peut entraîner une évacuation insuffisante de l'eau à l'exutoire: une simulation est lancée avec des valeurs de conductivité multipliées par deux sur les mailles proches de l'exutoire. Les critères d'ajustement pour les trois modalités, ainsi que l'erreur moyenne, calculés pour chaque pas de temps sont effectivement améliorés (Tab. 5-13). Cette simulation tend à montrer que les conductivités de la zone aval sont effectivement légèrement sous-estimées;

- la participation de la nappe, par capillarité, à la réhumectation des horizons de surface, se traduisant par des valeurs de recharge négatives, n'a pas été simulée; or l'introduction de valeurs de recharge négatives peut améliorer l'ajustement.

La diminution sensible de l'excès d'eau généré par le modèle, en multipliant les conductivités de la zone aval par deux, ne permet pas d'expliquer totalement l'excès d'eau constaté au voisinage de l'exutoire. Il nous est difficile de résoudre concrètement ce problème. Les trois hypothèses explicatives restent cependant plausibles.

Ces différents constats semblent montrer les limites de la modélisation telle qu'elle a été conduite. La simulation des écoulements, lors d'épisodes secs, se traduisant par un aquifère partiellement dénoyé, ne peut être effectuée avec WATASI : la zone non saturée ne peut être alors négligée.

La pluie efficace identifiée est comprise entre 0 et 12 % de la pluie totale sur la zone q_2 et entre 0 et 20 % de P sur q_3 (Tab. 5-14). Sur la zone q_4 , la pluie efficace oscille entre 11 et 42 % de P . Les valeurs identifiées pour les deux derniers pas de temps sont cependant peu fiables. Le flux amont q_{am} atteint, sur la totalité de l'épisode modélisé (33 jours), une valeur de 90 m^3 , soit près de 2 % de la recharge totale ($3786,2 \text{ m}^3$) : il est donc négligeable (Tab. 5-15).

Pas de temps	Episode	P				Pe			
		(a)	q ₁	(a) q ₂	(b)	(a)	q ₃	(b)	(a) q ₄	(b)
1	11 au 15/01	25,2	0	3,1	12,3	3,1	12,3	2,7	10,7
2	16 au 26/01	26,4	0	1,8	6,8	5,3	20	7,7	29,2
3	27 au 1/02	22,9	0	1,5	6,6	3,9	17	4,8	21
4	2 au 7/02	1,9	0	0	0	0	0	0,8	42
5	8 au 15/02	6,1	0	0	0	0,1	1,6	1	16,4

Tableau 5-14 : Pluie totale (P) et pluie efficace (Pe) par zone de recharge. Régime transitoire du 11/01/84 au 15/02/84 (Valeurs exprimées en mmj^{-1} (a) et en % de P(b)).

Pas de temps	Pluie efficace (m^3j^{-1})				Pe totale	q_{am}	
	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄		(m^3j^{-1})	(*)
1	0	122,5	23,3	23,6	169,4	1,2	0,7
2	0	69,7	39,8	67,7	177,2	6	3,3
3	0	61	29	42,3	132,3	2,2	1,6
4	0	0	0	7	7	0,3	4,1
5	0	0	0,7	8,5	9,2	0,4	4,2

(*) Valeurs exprimées en % de la recharge totale (surfaces de calcul : cf tab. 5-6)

Tableau 5-15 : Comparaison du flux amont q_{am} et de la pluie efficace Pe calculés pour la totalité de la barre (en m^3j^{-1}). Régime transitoire du 11/01/84 au 15/02/84. (contrôle expérimental).

3.4. Conclusion de l'identification en régime transitoire.

Trois zones essentielles d'infiltration sont mises en évidence par l'identification en régime transitoire. La pluie efficace n'est mobilisée que sur le sommet de la barre, délimité par la courbe de niveau 6 m. Elle est par conséquent régie prioritairement par la topographie.

On distingue:

- une zone centrale q_3 à forte infiltration, soit 10 à 38 % de la pluie totale, autour des stations SE4, SE5, SE6 et SE7. En son sein, et au cours de quelques épisodes, est mise en évidence une zone q_4 à infiltration plus élevée (+ 5 % par rapport à q_3), localisée autour des stations SE4 et SE5;
- la zone sommitale complémentaire (q_2) à infiltration faible, soit 2 à 10 % de la pluie, distribuée autour de SE8, SE9, SE10, SE11, SE15, SE13 et SE18.

La zone, située entre la station SE4 (sol ferrallitique) et la station SE5 (podzol), correspondant donc à q_4 , est considérée par GRIMALDI et al. (1986, 1987) comme étant "la charnière actuelle" de ce système de transformation; ces auteurs montrent que le passage du pôle ferrallitique au podzol est caractérisé par des transformations à l'échelle microscopique très importantes. Ces observations semblent en accord avec le résultat de la modélisation.

Aucun effet d'inertie de la pluie efficace n'a pu être mis en évidence sur q_2 . L'effet d'une pluie sur la nappe est quasi immédiat. Ce résultat est confirmé par les observations piézométriques (Chapitre 3) et par les faibles valeurs de flux amont. Par contre, sur la zone de transition entre les podzols et les ferrallitiques (stations SE4 à SE7), la modélisation met en évidence une inertie de l'effet pluie sur l'aquifère de l'ordre de 1 à 2 jours.

Les observations de terrain nous ont permis de mettre en évidence une discontinuité texturale, plus ou moins marquée suivant les sols. Le modèle confirme son importance sur le plan hydrodynamique, sur deux sites caractéristiques (SE7 sur podzol et SE15 sur planosol), sous la forme d'une couche susceptible de ralentir les transferts d'eau et donc de générer une nappe perchée extrêmement fugace.

L'identification de la recharge en régime transitoire permet de compléter l'analyse, faite précédemment en régime permanent, des relations existant entre les sols, la géomorphologie et la dynamique hydrique de la barre. Elle confirme l'importance des critères topographiques pour expliciter l'hydrologie de la barre, mais elle montre aussi, que la prise en compte des sols est essentielle pour comprendre la forme et la dynamique de la nappe. Ils interviennent indirectement, par l'intermédiaire de la conductivité hydraulique à saturation et, de façon plus directe, sur une zone occupée par des sols ferrallitiques et des planosols jaunes, situés en position de transition entre les sols ferrallitiques et les podzols, pour lesquels la recharge de la nappe atteint des valeurs élevées.

Il est cependant nécessaire, avant de poursuivre cette analyse, de s'assurer de la validité de la méthodologie adoptée et des résultats obtenus au cours de la modélisation. C'est l'objet du chapitre suivant. Il semble d'ores et déjà manifeste, et en accord avec nos hypothèses de travail initiales, que la modélisation des transferts hydriques, réalisée avec WATASI, ne doit être effectuée que pour des épisodes pour lesquels les écoulements en milieu saturé sont prépondérants.

Chapitre 6

Synthèse et discussion

SYNTHESE ET DISCUSSION

Nous aborderons, dans une première partie, les problèmes méthodologiques apparus lors de notre étude, puis, dans une seconde partie, l'interprétation des résultats. L'analyse de sensibilité du modèle aux valeurs de conductivités hydraulique à saturation, nous permet de discuter la cohérence et la validité des valeurs de recharge identifiées. Aussi, dans une troisième partie, et après avoir évalué le terme de stockage en eau dans les matériaux non saturés, nous tenterons d'estimer, sur six épisodes élémentaires modélisés précédemment, le ruissellement (incluant les différents processus regroupés sous ce terme générique) sur les six stations de mesure du transect T1 équipées d'un tube d'accès neutronique (SE1, SE2, SE4, SE5, SE7 et SE10).

1. CONSIDERATIONS METHODOLOGIQUES

Une analyse critique est faite, sur le type de modélisation choisi dans un premier temps, puis sur la méthode d'optimisation dans un deuxième temps et enfin en dernier lieu, sur la paramétrisation.

1.1. Sur l'approche de modélisation choisie

La modélisation des systèmes hydrologiques concerne généralement des aquifères, dont les dimensions sont comprises entre une dizaine de km² et plusieurs milliers de km². L'approche traditionnelle considère qu'ils sont constitués d'une superposition de couches homogènes et isotropes. Nous montrons pour notre part, à l'échelle de l'aquifère étudié (≈ 0.1 km²), que la forme de la nappe ne peut être reproduite sans tenir compte de l'hétérogénéité spatiale de la conductivité hydraulique; celle-ci s'exprime sur de courtes distances (inférieures à 100 m). La modélisation de notre aquifère, caractérisé par cette forte variabilité d'une part, et par des fluctuations rapides et importantes (rapportées aux faibles dimensions de l'aquifère) de la nappe d'autre part, n'est pas compatible avec l'approche traditionnelle.

La résolution du problème inverse peut être abordée de différentes façons. YEH (1986) en fait une synthèse où il apparaît que dans la plupart des études concernant la modélisation des écoulements bi-dimensionnels, la recharge est soit connue, soit jugée négligeable. Les auteurs identifient alors la transmissivité ou la conductivité, sans avoir effectué des mesures préalables de T ou Ks (DiSTEFANO et RATH, 1975; YOON et YEH, 1976; YEH et YOON, 1976; NEUMAN et YAKOWITZ, 1979; NEUMAN, 1980), ou après avoir réalisé quelques mesures ponctuelles de transmissivité (HOEKSEMA et KITANIDIS, 1984; 1985; DAGAN, 1985). L'absence, généralement constatée aux échelles de travail habituelles, de mesures de transmissivités ou conductivités est également soulignée par HUMBERT (1984); les mesures de terrain fournissent essentiellement des relevés piézométriques. La résolution du problème inverse consiste alors à caler le modèle, c'est à dire en fait à identifier les conductivités, de façon à retrouver au mieux la piézométrie mesurée.

Or, la majorité des aquifères exploités sont alimentés par une recharge non négligeable (infiltrations de la pluie, drainances) sur lesquelles règne une incertitude souvent plus grande (SAUTY et VANDENBEUSCH, 1984). Les auteurs cités par YEH, effectuant une identification de la recharge et de la conductivité, sont cependant très rares: deux études en régime permanent sont signalées (COOLEY, 1977; 1982).

Notre étude apparaît comme étant singulière puisque nous montrons que la recharge ne peut être négligée et que son identification est intrinsèquement liée à celle de la conductivité. L'identification conjointe de la recharge et de la conductivité nous est apparue peu réaliste, c'est pourquoi nous avons opté pour une étude détaillée de la variabilité spatiale des conductivités.

La nécessité de connaître, de façon la plus précise possible, la variabilité spatiale de la conductivité apparaît d'autant plus cruciale, que nous montrons que la validité de la recharge identifiée est fortement dépendante de la validité des mesures de conductivité. Une erreur de mesure sur K_s entraîne une erreur du même ordre de grandeur sur la recharge. L'analyse de sensibilité du modèle aux conductivités permet toutefois de valider l'hétérogénéité spatiale de K_s . La validité des mesures de K_s paraît assurée dans un écart de 1 à 5. Le 06/06/86 ($P=40$ mm), en multipliant les conductivités mesurées par 10, la recharge identifiée sur la zone de q_3 , pour laquelle une tranche de sol non saturée en surface ne peut être négligée, atteint 40 mm, soit 100 % de la pluie totale (Tab. 6-1); avec un coefficient multiplicateur de 5, la recharge atteint 50 % et semble plus plausible. Cette analyse reste cependant à être confirmée par une étude plus précise des transferts dans la zone non saturée.

Conductivité hydraulique	Zone de recharge	Recharge	
		mm	% de P
K_s	q_1	0	0
	q_2	0,8	2
	q_3	4	10
	q_4	4	10
$K_s \times 10$	q_1	0	0
	q_2	8	20
	q_3	40	100
	q_4	40	100
$K_s \times 5$	q_1	0	0
	q_2	4	10
	q_3	20	50
	q_4	20	50

Tableau 6-1 : Mise en évidence de la relation entre la conductivité hydraulique (K_s) et la recharge. Régime permanent du 06/06/86 ($P = 40$ mm et $ETP = 4$ mm).

La nécessité d'analyser la sensibilité du modèle aux conductivités hydrauliques apparaît indispensable sur le plan méthodologique du fait de l'absence de mesures des flux à

l'exutoire. Elle permet, en resserrant l'écart de validité des mesures de conductivité, d'éviter de sous-estimer - ou de façon moins probable de surestimer - l'importance des écoulements d'eau au sein de la nappe, et par là même de s'assurer de la validité de l'identification de la recharge.

La modélisation des transferts dans la zone saturée est réalisée indépendamment de la zone non saturée. Le problème des transferts à l'interface entre la zone saturée et non saturée est ici négligé. Ce problème, abordé par VAUCLIN et al. (1976), peut entraîner une erreur d'estimation des valeurs de recharge. Nous considérons cependant, pour notre part, cette erreur comme devant être faible étant donné, d'une part l'importance relative de la tranche saturée en regard de la zone non saturée et, d'autre part les dimensions du système hydrologique étudié.

Il est clair, qu'il ne saurait être question ici de vouloir modéliser l'ensemble des flux. En l'absence de mesures de recharge, son identification est nécessaire et reste notre objectif essentiel. Le modèle numérique choisi nous permet de répondre à cet objectif dans des conditions satisfaisantes, dès lors que la connaissance d'un nombre suffisant de mesures piézométriques et de conductivités fiables est assurée.

1.2. Sur la procédure d'optimisation choisie

La résolution du problème inverse nécessite l'intégration dans le code de calcul d'un critère mathématique d'ajustement, que l'on souhaite minimiser. Nous avons utilisé le critère le plus fréquemment utilisé : le *critère des moindres carrés* (YEH, 1986). L'utilisation d'un algorithme d'optimisation automatique est censée améliorer la recherche d'une valeur minimale du critère. Etant donnée la structure actuelle du modèle WATASI, seule une procédure d'optimisation manuelle était possible. La justification de l'emploi d'un tel critère repose sur un problème de vitesse de convergence du modèle en régime permanent. La convergence n'est assurée qu'après des modifications progressives du seuil de précision des calculs. De plus, toute modification d'un paramètre n'est pas nécessairement physiquement acceptable. Cette procédure reste dès lors difficilement automatisable. Elle s'apparente plutôt à un système expert car il s'agit de prendre une décision en fonction de plusieurs critères de choix. Il serait néanmoins souhaitable de poursuivre le travail dans ce sens, car avec l'utilisation d'une procédure d'optimisation manuelle, le problème de l'unicité de la solution est accru. Un travail récent (KAUFFMANN, 1990) dégage des perspectives intéressantes sur cette voie.

1.3. Sur la paramétrisation

La méthode de paramétrisation retenue, dite du *zonage*, consiste à **définir des zones où la recharge est constante**. Le problème de l'optimisation du zonage reste cependant posé, tant pour le choix du nombre de zones que pour leur localisation. Si l'on souhaite affiner le zonage, c'est à dire augmenter le nombre de zones, il est nécessaire de recueillir un plus grand nombre de mesures. En effet, à nombre d'observations constant, l'incertitude sur la valeur affectée à chaque zone augmente, quand le nombre de zones augmente (YEH, 1986).

Nous aurions pu, pour notre part, tenter d'améliorer le zonage de la pluie efficace, en installant un plus grand nombre de stations piézométriques automatisées, sur des situations topographiques et pédologiques plus variées. Ceci n'a pu être fait pour des raisons matérielles. La mesure des flux à l'exutoire aurait pu, elle aussi, permettre d'optimiser la paramétrisation. Les difficultés pratiques, notamment pour installer un collecteur susceptible de récupérer tous les écoulements à l'exutoire, nous ont conduit à abandonner cette détermination.

2. CONSIDERATIONS SUR LES RESULTATS

Nous avons souligné que la participation de la pluie à la recharge de la nappe oscille, suivant les zones et les épisodes, entre 0 et 40 % des apports météoriques. En effet, même si l'on considère que les pourcentages cités précédemment sont entachés d'erreur, seule une faible part de la pluie suffit à expliquer la dynamique observée de la nappe. De plus, les flux souterrains amont q_{am} , estimés par calcul et calage, en provenance des unités géomorphologiques voisines, n'excèdent pas 4 % de la recharge totale. Ils sont en fait généralement inférieurs à 2 % de celle-ci, et sont par conséquent négligeables. L'hypothèse d'isolement hydraulique de la barre apparaît donc fondée. Cet isolement doit cependant être relativisé. La nappe, dont le fonctionnement a été étudié au cours de ce travail, ne peut être disjointe de la nappe observée dans la savane de Corossony. En effet, lors des épisodes sans pluie, le flux amont est certes très faible ($0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ par exemple en 1986, entre le 3/09 et le 12/09), mais il n'est pas nul. L'isolement hydraulique de la barre n'est donc pas absolu.

L'importance des apports pluviométriques (supérieurs à 400 mm en mai et juin) associée à la faiblesse de la recharge, nous conduit à supposer qu'une part importante de la pluie s'écoule en surface, sous forme de ruissellement (au sens large) ou est stockée dans les horizons de surface non saturés. La faible importance relative de ces derniers, déjà signalée précédemment, confirme donc l'intérêt d'estimer la fraction ruisselée.

La recharge de la nappe n'est mise en évidence que sur le sommet de la barre, sur une surface représentant plus du tiers du site. Sur la surface restante (65 %), la pluie efficace est nulle, ou en tous cas très réduite. Il apparaît dès lors important d'analyser les liens existant entre la dynamique et la forme de la nappe, la variabilité des conductivités, le zonage de la recharge, les sols et le relief.

La forme de la nappe dépend directement de l'hétérogénéité spatiale des conductivités. Les liens entre la variabilité spatiale des conductivités et les sols est moins évidente: ils ne sont mis en évidence qu'en profondeur au niveau des sols ferrallitiques, alors qu'en surface ils semblent plus ténus. Signalons cependant que la différenciation pédologique des matériaux est observée essentiellement dans le premier mètre, et qu'elle n'affecte donc que faiblement les écoulements saturés.

Le lien entre le zonage de la recharge et le relief est par contre, très marqué. Seul le sommet de la barre est concerné par une recharge non nulle.

Parmi les différents sols cartographiés, le zonage de la pluie efficace ne permet d'individualiser nettement que les ferrallitiques, sur une surface couvrant 10 % du domaine. Les fortes valeurs de pluie efficace identifiées (30 à 40 % de P) ne concernent cependant que quelques épisodes transitoires. Les autres sols, situés au dessus de la courbe de niveau 6 m, sont

marqués par des valeurs d'infiltration comprises entre 2 et 10 % de la pluie totale. Leur comportement est globalement voisin; il est impossible de distinguer les planosols des podzols. On peut dès lors s'étonner que les sols jouant un rôle de tampon dans les échanges avec la nappe, n'interviennent pas de façon plus nette dans les phénomènes de recharge.

La dynamique et la forme de la nappe, semblent régis par la combinaison de quatre pa-ramètres : le relief, les conditions aux limites, l'hétérogénéité spatiale des conductivités hydrau-liqués et dans une moindre mesure les sols. Les sols interviennent de manière plus ou moins nette sur l'hétérogénéité des conductivités, mais leur rôle apparaît beaucoup plus réduit que celui que l'on pouvait supposer au commencement de ce travail.

Ca
alors!

L'analyse du temps de réponse de la nappe aux différents apports pluviométriques permet de constater deux faits. La zone amont q_2 , occupée par les podzols et les planosols, où la recharge est faible, est caractérisée par une proportionnalité parfaite à un instant donné entre la pluie et la pluie efficace. Cette zone est, par ailleurs, marquée par des teneurs en eau proches ou égales de la saturation durant la quasi totalité du cycle climatique. Pour les zones à forte recharge, q_3 et q_4 , la simultanéité est conservée mais avec un décalage très net, de 24 à 48 heures, dans le temps entre l'averse et la recharge de la nappe. Ces sols sont, quant à eux, marqués par des taux de saturation des horizons de surface relativement faibles.

Il semble donc que d'une façon globale, la pluie efficace soit toujours proportionnelle à la pluie totale, mais qu'il existe un temps de réponse, plus ou moins long suivant l'état de saturation des horizons de surface.

3. ESTIMATION DU RUISSELLEMENT

L'estimation de la variation du stock en eau ΔS_{NS} dans la tranche de sol non saturée, nous permet d'estimer le terme de ruissellement R dans l'équation du bilan hydrique :

$$P - ETP - \Delta S_{NS} - Pe - R = 0.$$

La modélisation a été réalisée sur des épisodes pour lesquels nous disposions également de mesures d'humidimétrie neutronique, effectuées avec un pas de temps de relevés le plus réduit possible.

Quatre épisodes élémentaires, de courte durée, ont été choisis en 1984, entre la fin de la petite saison des pluies et le petit été de mars (11/01 au 15/02); deux épisodes ont enfin été choisis en 1985, pendant la grande saison des pluies (23/05 au 16/07) et pendant la saison sèche (16/07 au 14/08). Pour les épisodes de l'année 1984, les relevés neutroniques sont hebdomadaires; pour ceux de l'année 1985, ils sont distants de 54 jours, pour l'épisode situé en pleine saison des pluies, période pendant laquelle on observe de faibles variations de la teneur en eau, et de 29 jours pour le dernier.

Le ruissellement a été estimé en tenant compte des incertitudes sur les différents termes du bilan hydrique. L'incertitude sur la valeur journalière de l'ETP (4 mm) est d'environ 2 mm; les calculs ont été faits avec une ETP journalière de 3 mm, 4 mm et 6 mm. L'incertitude sur la valeur de la pluie efficace identifiée - coefficient multiplicatif de 1 à 5 - nous a conduits à faire trois calculs en prenant successivement comme valeur de Pe , la valeur identifiée précédemment sur chaque zone multipliée par un facteur 1, 2 ou 5, soit Pe , $2Pe$ et $5Pe$. L'erreur

relative faite sur le calcul de la variation de stock en eau dans la tranche non saturée, en utilisant la méthode trapézoïdale, est estimée à 2 % (HAVERKAMP et al., 1984). Trois calculs ont donc été faits avec une erreur relative de 0, -2 % et +2 %. La succession des calculs, réalisés en tenant compte des incertitudes sur les différents termes du bilan hydrique, est illustrée par la figure 6-1.

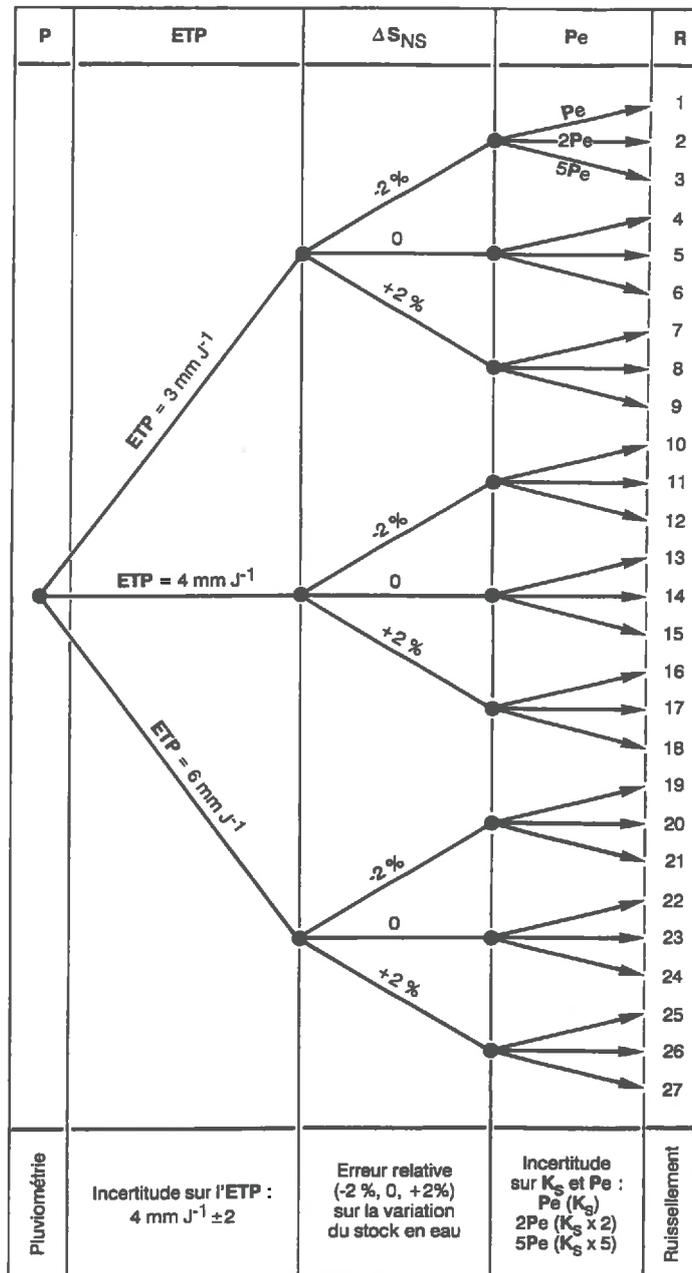


Figure 6-1 - Schématisation des calculs effectués pour estimer le ruissellement (pour chaque station de mesure* et pour chaque épisode), en tenant compte des incertitudes sur les différents termes du bilan hydrique. $R = P - ETP - \Delta S_{NS} - P_e$

* Pour les stations SE1 et SE2 $P_e = 0$: neuf valeurs de ruissellement sont déterminées.

N.B.: Les chiffres figurant dans la colonne "Ruissellement" correspondent à des indices et non à des valeurs.

Le tableau 6-2 rassemble les principales valeurs de ruissellement estimées pour les six stations de mesure. Les résultats concernant l'épisode du 8/02/84 au 15/02/84 n'ont pas été retenus du fait d'une très forte variabilité des valeurs estimées ($R = 10$ à 90 % de la pluie P pour SE1 et SE2). Elle est expliquée par une combinaison de deux facteurs essentiels :

- cet épisode est peu pluvieux, 43 mm de pluie (6,1 mm par jour), aussi la valeur de l'ETP semble très douteuse;
- l'ajustement des piézométries mesurées et calculées, réalisé précédemment, est mauvais pour certaines stations, notamment les stations SE1 et SE2 (l'écart, sur cet épisode, entre les deux piézométries est proche de 60 cm, et l'erreur moyenne est de 25,8 cm). La valeur de la pluie efficace identifiée peut être alors remise en cause ponctuellement.

		Année 1984			Année 1985	
		11 au 15/01 P = 125,8 mm (25,2 mmj ⁻¹)	16 au 26/01 290,3 (26,4)	27 au 2/02 137,5 (22,9)	23/05 au 15/07 775,8 (14,4)	16/07 au 14/08 260,9 (9)
Station	Pe					
SE1	(1)	68 à 85	76 à 89	73 à 89	59 à 81	31 à 69
SE2	(1)	32 à 76	60 à 78	80 à 98	64 à 89	25 à 71
SE4	Pe	27 à 67	5 à 30	30 à 64	41 à 66	21 à 68
	2Pe	16 à 56	1 à <0(2)	10 à 43	27 à 52	4 à 51
	5Pe	<0(2)	<0(2)	<0(2)	<0(2)	<0(2)
SE5	Pe	55 à 98	9 à 29	53 à 73	46 à 71	14 à 57
	2Pe	45 à 87	0 à <0(2)	32 à 52	32 à 57	0 à 41
	5Pe	12 à 55	<0(2)	<0(2)	<0(2)	<0(2)
SE7	Pe	35 à 69	52 à 66	55 à 72	55 à 78	23 à 61
	2Pe	22 à 57	32 à 46	38 à 55	51 à 74	16 à 55
	5Pe	<0(2)	<0(2)	<0(2)	39 à 61	0 à 39
SE10	Pe	62 à 78	70 à 83	66 à 83	55 à 77	24 à 60
	2Pe	50 à 66	63 à 76	59 à 76	50 à 72	17 à 54
	5Pe	13 à 29	42 à 55	40 à 56	38 à 60	0 à 35

(1) Pe = 0 (2) Ruissellement non calculable

Tableau 6-2 : Synthèse des valeurs estimées de ruissellement (en % de la pluie totale) pour six stations (SE1, SE2, SE4, SE5, SE7 et SE10) et pour cinq épisodes de calcul.

Trois résultats principaux peuvent être dégagés de cette analyse :

1°)- les valeurs de pluie efficace 5Pe, obtenues avec des conductivités 5Ks, doivent être rejetées: les valeurs de ruissellement qui résultent de leur utilisation sont négatives et incompatibles avec un bilan hydrique équilibré. Les valeurs de ruissellement obtenues avec 2Ks, soit 2Pe, sont limites (stations SE4 et SE5, épisode du 16/01/84 au 27/01/84). Ce résultat permet de confirmer la validité des valeurs de conductivités mesurées et, par conséquent, des valeurs

de recharge identifiées dans le chapitre précédent. Il permet d'affiner l'ordre de grandeur des conductivités et de la recharge: la borne supérieure de l'intervalle de validité est réduite à une valeur proche de $3K_s$ soit une pluie efficace égale à $3P_e$. Cette valeur limite reste cependant à préciser.

2°)- **L'importance du ruissellement est soulignée** : elle ne peut cependant être généralisée pour l'ensemble des épisodes de calcul. On note, par exemple pour la station SE2 et durant l'épisode du 11/01/84 au 16/01/84, des valeurs de ruissellement qui sont comprises entre 32 et 76 % de la pluviométrie. Cette variabilité peut être expliquée, ici encore, par un écart important entre la piézométrie mesurée et la piézométrie calculée par le modèle ($PM - PC = -39$ cm).

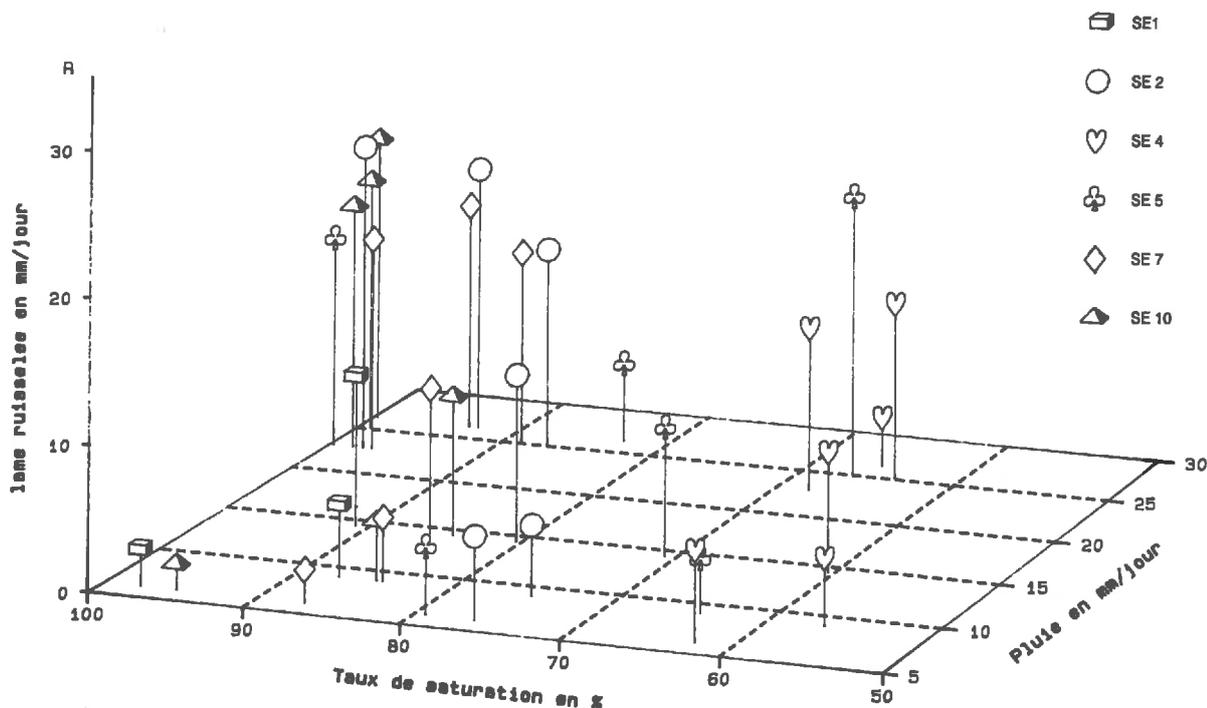


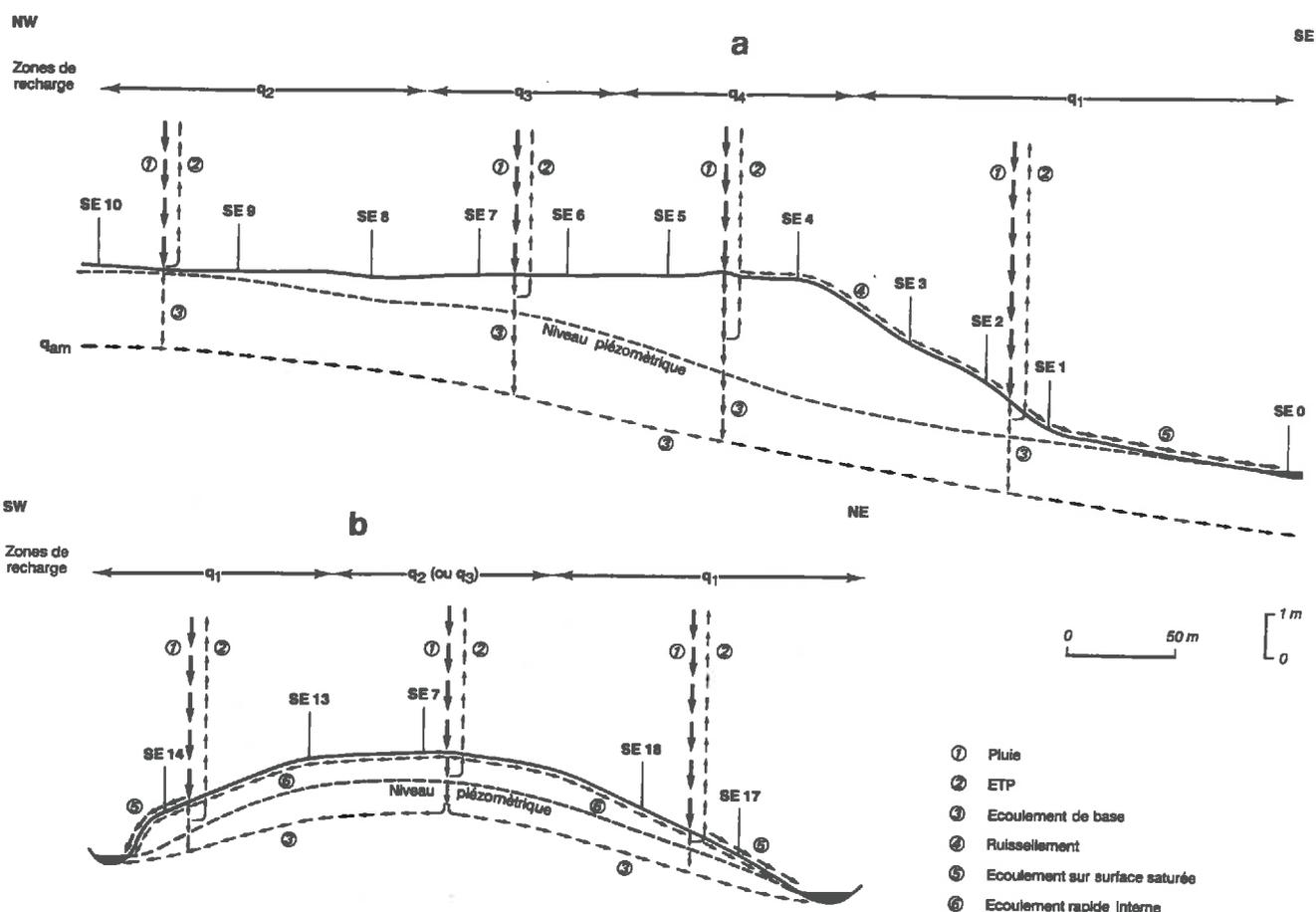
Figure 6-2 - Ruissellement estimé sur six épisodes*, et pour chaque station, en fonction de la pluie journalière moyenne et du taux de saturation moyen du sol (à 30 cm de profondeur).

*(11.01.84 au 15.01.84 ; 16.01.84 au 26.01.84 ; 27.01.84 au 01.02.84 ; 08.02.84 au 14.02.84 ; 23.05.85 au 15.07.85 et 16.07.85 au 14.08.85)

La figure 6-2 met en évidence une relation, logique, existant entre le ruissellement, la pluie et le taux de saturation du sol T_s (taux de saturation calculé à 35 cm de profondeur, avec $T_s = \theta/\eta$ η représentant la porosité totale pour la station SE4 sur sol ferrallitique, pour laquelle la nappe n'atteint pas le premier mètre de sol, et $T_s = \theta/\theta_{max}$ pour toutes les autres stations). Cette relation est quasiment linéaire et les coefficients de détermination des régressions linéaires $R=f(P)$, $R=f(T_s)$ et de la régression multilinéaire $R=f(P, T_s)$ sont respectivement égaux à 0,63, 0,23 et 0,70. La variable explicative "pluie" est donc déterminante: 63 % de la variance du ruissellement est expliquée par P; la combinaison de P et T_s permet d'expliquer 70 % de la variance du ruissellement. La connaissance simultanée de la pluie et du taux de saturation du sol en surface, permet d'estimer le ruissellement de façon acceptable.

3°- le zonage de la recharge, calé puis validé lors de la modélisation, semble cohérent et il peut être relié à Ts: le ruissellement varie suivant les stations de mesure (Tab. 6-2 et Fig. 6-2), et l'on peut distinguer les stations SE1, SE2, SE7 et SE10, pour lesquelles le taux de saturation est élevé (80 à 98 %) et le ruissellement important, des stations SE4 et SE5, caractérisées par un taux de saturation peu élevé (60 à 80 %) et des valeurs de ruissellement globalement plus faibles. Cette typologie est cohérente avec le zonage de la recharge.

Ces différents résultats, nous conduisent à proposer un schéma, regroupant de façon synthétique, les principaux types d'écoulement caractérisant les versants de la barre pré littorale étudiée (ce paragraphe est largement inspiré du travail de CHEVALLIER, 1988). Ils nous conduisent alors, à préciser la notion de ruissellement, qui a été employée dans ce travail de manière très globale. On distingue généralement trois grands types de processus sur les versants (DUNNE, 1978; KIRKBY, 1988 in CHEVALLIER, 1988): l'écoulement de surface (ruissellement), l'écoulement rapide interne et l'écoulement sur surface saturée. Ils sont à distinguer de l'écoulement de base qui alimente, pour sa part, directement la nappe. Il nous semble dès lors possible de proposer différents chemins de l'écoulement de l'eau sur les versants de la barre, suivant les quatre zones de recharge (q_1 , q_2 , q_3 et q_4) mises en évidence précédemment (Fig. 6-3) :



- **Pécoulement de surface**, encore appelé *ruissellement hortonien*, est rarement observé sur de grandes surfaces dans les régions humides (DUNNE, 1978). Il affecte des surfaces pour lesquelles la capacité d'infiltration est inférieure aux entrées pluviométriques (CHORLEY, 1978; BURT et BUTCHER, 1985) et, des surfaces généralement non saturées. Il se manifeste donc probablement sur les sols ferrallitiques, situés en position d'épaulement (zone de recharge q_4);
- **Pécoulement sur surface saturée**, ou temporairement saturée, se manifeste sur des sols saturés par la remontée de la nappe, qui est alors pratiquement affleurante. Il est caractéristique, d'après DUNNE (1983), des bas de versant concave. Il doit donc logiquement affecter tous les sols pour lesquels la recharge est nulle (zone q_1): planosols jaunes et blancs situés à proximité des thalwegs et sols hydromorphes alluviaux;
- **Pécoulement rapide interne**, dont les mécanismes semblent peu compris, regroupe diverses terminologies : *effet piston*, *écoulement de retour*, *intumescence de nappe*... IL nous semble, en ce qui concerne notre site, correspondre à ce que nous avons précédemment appelé écoulements hypodermiques. Cet écoulement caractérise probablement, les transferts verticaux et horizontaux, qui se manifestent dans la tranche de sol non saturée des sols situés dans la zone de recharge q_2 et q_3 , c'est à dire entre autres, les circulations occasionnelles au dessus des horizons Bh des podzols.

Même s'il apparaît que le ruissellement ne peut être négligé, les résultats de cette analyse doivent cependant être relativisés. Les différentes mesures et estimations, qui nous ont permis d'évaluer l'importance du ruissellement sur notre site, sont peu nombreuses et surtout pas assez fines dans le temps et l'espace.

Le ruissellement est estimé en supposant que la recharge et la pluie sont constantes dans le temps, sur chaque épisode de calcul, ce qui n'est pas le cas, sauf peut être en pleine saison des pluies ou en saison sèche, lorsque la pluviométrie est nulle. Un pas de temps de mesure plus fin, de la pluviométrie et de la piézométrie, aurait permis de réaliser une identification de la recharge plus précise dans le temps, et par conséquent, une estimation plus satisfaisante du ruissellement.

Des mesures complémentaires et ponctuelles, réalisées à l'aide d'un dispositif de terrain simple, tel que le "mini-piège" de ruissellement utilisé par PLANCHON (1990) en Côte d'Ivoire, auraient également permis de préciser cette estimation.

L'absence de figures d'érosion, constatée sur le terrain, tendrait à minimiser le rôle joué par le ruissellement. Ce constat doit toutefois être complété par des observations soulignant la forte densité du peuplement végétal, constitué d'une graminée couvrant bien le sol (*Brachiaria decumbens*) et, d'une graminée se développant en touffes (*Brachiaria USDA*), qui permet à l'eau ruisselée de ne pas créer de figures d'érosion marquées.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté abordait le thème des **inter-relations existant entre la topographie, le sol et la dynamique hydrique**. Un postulat a guidé notre travail: une connaissance approfondie de la réalité terrain est une condition essentielle pour orienter les opérations de simulation et de juger leur validité. Deux étapes essentielles ont donc jalonné ce travail. Une "étape terrain" nous a permis, après avoir caractérisé le milieu, de réaliser un suivi hydrologique et de formuler des hypothèses de fonctionnement de la nappe. Ces hypothèses sont confirmées, dans une seconde étape, par une modélisation des écoulements en zone saturée. Celle-ci permet de préciser les principaux déterminants du fonctionnement hydrologique de l'unité de relief étudiée.

Le rôle primordial des facteurs géomorphologiques et pédologiques, dans la description et la compréhension de la dynamique hydrique, nous a conduits à mettre en évidence des indicateurs de la dynamique hydrique: sol, relief, intensité pluviométrique,.... Puis nous avons estimé les principaux flux hydriques, et montré l'importance des eaux météoriques participant à la recharge de cette nappe. L'objectif à plus long terme auquel concourt ce travail, réside en l'amélioration de la gestion de l'eau, à l'échelle des barres pré littorales, unités géomorphologiques élémentaires de la plaine côtière ancienne.

Trois caractéristiques essentielles soulignent l'originalité du site choisi.

- Il s'agit d'un interfluve de 16 ha; ce choix particulier (habituellement ce type de travail est réalisé sur des bassins versants), nous a conduits à mesurer l'importance de la connaissance des conditions aux limites.
- Les sols sont caractérisés par une forte variabilité latérale qui s'exprime sur de courtes distances.
- Les relevés piézométriques soulignent l'importance et la rapidité des fluctuations de la nappe sur l'ensemble de l'interfluve.

Sur le plan des résultats, un certain nombre d'acquis se dégagent de ce travail. Nous nous étions posé quatre questions précises, auxquelles nous sommes maintenant en mesure de répondre.

Dans la première question, nous nous interrogeons sur le rôle joué par la pluviométrie et sur l'isolement hydraulique de l'interfluve, c'est à dire sur l'existence d'une alimentation latérale éventuelle. La réponse apportée à cette question est claire. L'isolement hydraulique est bien démontré: l'alimentation souterraine amont est peu importante et seule la pluviométrie, 40 % au maximum, contribue à la recharge de la nappe sur l'interfluve.

Les deux questions suivantes avaient pour but de mettre en évidence les déterminants de la forme de la nappe.

La réponse à la deuxième question (...les unités pédologiques décrites ont-elles une signification en termes de fonctionnement hydrique ?...) est nuancée. Une valeur de recharge distincte ne peut être attribuée à chaque unité pédologique. Les sols interviennent cependant, de manière indirecte, à travers leurs caractéristiques physiques, qui s'expriment entre autres par une hétérogénéité spatiale marquée de la conductivité hydraulique à saturation. La structure spatiale mise en évidence ne peut toutefois être directement reliée aux différents types de sols. Seuls les sols ferrallitiques s'individualisent nettement que ce soit en surface ou en profondeur. *intéressant !*

A la troisième question (...quelles sont les relations entre les zones de recharge et le relief d'une part, les sols d'autre part ?...), nous apportons une réponse plus précise. La modélisation met en évidence une hétérogénéité spatiale marquée de la recharge, pouvant être reliée essentiellement au modèle topographique et aux principaux types de sols lors des épisodes d'écoulement en régime transitoire.

A travers ce travail nous cherchions également à répondre à une dernière interrogation concernant l'importance du ruissellement induit par la dénivellée. Le terme de ruissellement, employé dans ce travail, est un terme générique qui cache en fait une réalité plus complexe. Il regroupe différents processus tels que le ruissellement de type hortonien, l'écoulement rapide interne et l'écoulement sur surface saturée. L'utilisation d'un modèle de simulation des transferts des eaux souterraines ne nous a pas permis d'analyser les processus hydrologiques de surface. En revanche, l'évaluation ponctuelle (sur six stations de mesure) du bilan hydrique dans la zone non saturée, a permis d'effectuer une estimation globale du ruissellement, mais de façon très approximative faute de mesures de flux à l'exutoire. Cette estimation, compte tenu des incertitudes existant sur les principaux termes du bilan hydrique, permet cependant de confirmer la validité des valeurs de conductivité mesurées, et souligne l'importance du ruissellement. Ce dernier affecte principalement les sols pour lesquels la recharge est faible (podzols et planosols), et semble dépendre de la pluie et du taux de saturation des horizons de surface (70 % de la variance du ruissellement est ainsi expliquée).

Un schéma théorique précisant les chemins d'écoulement sur les versants de la barre est proposé. Une expérimentation, associant l'utilisation de pièges à ruissellement et de traceurs, permettrait de préciser l'existence et la localisation de ces différents processus sur le terrain.

En résumé, les principales caractéristiques du site étudié sont les suivantes:

- il est fortement hétérogène, tant du point de vue de la morphologie des sols que de leurs propriétés physiques;
- la capacité d'emmagasinement de l'aquifère est faible, et la dynamique de la nappe est déterminée par la variabilité de la recharge et l'hétérogénéité spatiale des conductivités hydrauliques à saturation.

Deux prolongements directs de ce travail sur une barre pré littorale représentative de la plaine côtière sont envisageables.

D'abord une tentative d'extrapolation des principaux résultats obtenus sur notre site, à l'ensemble des barres. L'utilisation et la "validation" d'un modèle de type déterministe, même si certaines approximations l'éloignent de la réalité terrain, fournissent des informations sur les modalités de fonctionnement de la barre pré littorale étudiée. Ces modalités, mêmes si elles ne sont pas quantitativement transposables, peuvent permettre de prévoir les grandes tendances du fonctionnement d'autres barres similaires.

Il est pour cela, nécessaire de rattacher le critère de zonage identifié sur notre site, la courbe altitudinale de 6 m, à un critère morpho-pédologique lié à l'intensité de la participation de la pluie à la recharge, qui puisse être transposé à d'autres barres analogues. Bien que non détaillée dans ce travail, l'utilisation d'un indice topographique (indice de Kirkby), formalisé par BEVEN et KIRKBY (1979), a donné des résultats peu satisfaisants (collaboration C. DEPRAETERE, Hydrologie - ORSTOM - Montpellier). Cette approche mérite cependant d'être poursuivie. Il nous semblerait plus judicieux d'utiliser un indice, tel que l'indice de Beven (QUINN et BEVEN, 1989), faisant intervenir la conductivité hydraulique des horizons de surface.

L'extrapolation des résultats obtenus sur notre site, sous réserve que les objectifs soient identiques à ceux que nous nous sommes fixés ici, reposerait dès lors, sur:

- une carte topographique, et si possible un MNT (modèle numérique de terrain) nécessaire au calcul de l'indice de Beven;
- une carte pédologique simplifiée permettant, de localiser avec précision les sols ferrallitiques lorsqu'ils sont présents, et de confirmer la relation sol-topographie;
- des relevés piézométriques sur des stations situées sur les principales zones topographiques, notamment à l'exutoire et dans les thalwegs pour s'assurer de la bonne connaissance des conditions aux limites;
- des mesures de la conductivité hydraulique à saturation, en nombre élevé en surface (dans le premier mètre), en nombre plus réduit en profondeur.

L'autre prolongement, a trait à la conception des travaux de mise en valeur agricole. L'identification des principales zones de recharge de la nappe, permet en effet de raisonner le problème de la gestion de l'eau agricole à l'échelle de la barre pré littorale, de façon relativement satisfaisante.

Nous sommes amenés à distinguer, les sols à forte et à faible contrainte excès d'eau, en relation avec les conditions de mise en valeur. Le premier groupe de sols, caractérisé par des fortes valeurs de recharge, rassemble la plupart des sols ferrallitiques; il s'agit de sols à potentialités importantes, pour lesquels, sous réserve que les contraintes d'ordre chimique soient levées, il est possible d'envisager une intensification agricole.

Le second groupe rassemble des sols à recharge faible ou nulle et à écoulements de surface importants; il s'agit des planosols, des podzols et des sols hydromorphes alluviaux, les sols les plus largement représentés. Pour ceux-ci, une part relativement faible des entrées pluviométriques (< 30 %) suffit à entraîner d'importantes fluctuations du niveau piézométrique, et ils sont affectés par la nappe dans les deux premiers mètres, durant plus de 85 % des relevés effectués pendant trois années de mesures consécutives.

Cette dynamique de nappe à l'échelle de la barre conduit pour ce deuxième groupe de sols à un excès d'eau préjudiciable pour leur mise en valeur. En conséquence, une maîtrise de cette nappe par le recours au drainage, à une profondeur compatible avec les productions

agricoles locales, s'impose. Les différentes techniques envisageables: fossés à ciel ouvert, technique à priori peu onéreuse bien que nécessitant la mise en place de clôtures de protection et des frais d'entretien coûteux, drains enterrés, doivent être définies en fonction des caractéristiques intrinsèques des sols, mais également en fonction du contexte socio-économique local. Le choix parmi ces techniques ne pourra être effectué que sur les bases d'une expérimentation au champ. A cet égard, une première recommandation consisterait à recomposer le parcellaire, en s'attachant à créer des parcelles pour lesquelles la gestion de l'eau peut être appréhendée de façon homogène. Ce découpage devrait être effectué en tenant compte d'une part de l'importance des écoulements de surface, et d'autre part en prenant en compte la recharge potentielle de la nappe. L'objectif étant de créer des parcelles homogènes sur le plan topographique et pédologique, et par conséquent homogènes en termes de potentialités agronomiques. Signalons de plus, que le recreusement de l'émissaire assurant l'évacuation des eaux dans la crique Toussaint, permettrait, en diminuant le niveau piézométrique à l'exutoire, de réduire dans le temps le problème de l'excès d'eau sur la barre.

Nous ne saurions achever ce mémoire sans souligner que seul un contrôle expérimental sous la forme de mesures de flux, essentiellement un contrôle des flux de sortie sur les limites aval et latérales, permettrait de valider pleinement les résultats obtenus. Ces mesures complémentaires autoriseraient dès lors l'établissement du bilan hydrologique complet de l'interfluve étudié.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIEUX P., CABIDOUCHE Y.M., 1987 - Eléments sur les propriétés consécutives aux fonctionnements hydriques de sols de Guyane française plantés en prairies artificielles. in : Systèmes d'élevage herbager en milieu équatorial. 9-10 décembre 1985, Cayenne. INRA, Paris, pp. 117-141.
- ANDRIEUX P., CABIDOUCHE Y.M., JAILLARD B., LUCAS Y., BOULET R., 1986 - Dynamique de l'eau dans un système de sols à forte différenciation latérale (Plaine côtière ancienne, Guyane française). *Sci. Sol*, 24 (3) : 285-299.
- ATLAS DES DEPARTEMENTS D'OUTRE-MER, 4. LA GUYANE, 1979 - 36 planches avec notices explicatives et orientations bibliographiques. Ed. CNRS-ORSTOM, Bordeaux-Talence.
- BAIZE D., 1988 - Planosols. in : Le Référentiel Pédologique français. AFES-INRA (AIP n°11 "Thématisation des données sols et climat"), Paris, pp. 129-132.
- BERTUZZI P., BRUCKLER L., GROS C., 1987 - Régression linéaire avec erreur sur les variables: application à l'étalonnage d'un gammadensimètre à transmission et d'un humidimètre à neutrons. *Agronomie*, 7 (7) : 507-515.
- BEVEN K., KIRKBY M.J., 1979 - A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24 (1-3) : 43-69.
- BICKI T.J., FENTON T.E., HARVEY D.L., DEWITT T.A., 1988 - Comparison of percolation test results and estimated hydraulic conductivities for mollisols and alfisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52 : 1708-1714.
- BOERSMA L., 1965a - Field measurement of hydraulic conductivity below a water table. in : Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Black C.A. ed. Series Agronomy n° 9. American Society of Agronomy inc. Publ., Madison, Wisconsin, USA, pp. 222-233.
- BOERSMA L., 1965b - Field measurement of hydraulic conductivity above a water table. in : Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Black C.A. ed. Series Agronomy n° 9. American Society of Agronomy inc. Publ., Madison, Wisconsin, USA, pp. 234-252.
- BOULET R., 1978 - Existence de systèmes à forte différenciation latérale en milieu ferrallitique guyanais: un nouvel exemple de couvertures pédologiques en déséquilibre. *Sci. Sol*, 2 : 75-82.
- BOULET R., BRUGIERE J.M., HUMBEL F.X., 1979a - Relations entre caractères hydrodynamiques et organisation des systèmes de sols en Guyane française. Rôle de la tectonique dans l'évolution de la couverture pédologique. Conséquences agronomiques. *Sci. Sol*, 1 : 3-18.
- BOULET R., FRITSCH E., HUMBEL F.X., 1979b - Les sols des terres hautes et de la plaine côtière ancienne en Guyane française septentrionale: organisation en systèmes et dynamique actuelle de l'eau. ORSTOM, Pédologie, Cayenne, P182, dact. 160 pp.

- BOULET R., HUMBEL F.X., LUCAS Y., 1982a** - Analyse structurale et cartographie en pédologie. 2. Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 19 (4) : 323-339.
- BOULET R., HUMBEL F.X., LUCAS Y., 1982b** - Analyse structurale et cartographie en pédologie. 3. Passage de la phase analytique à une cartographie générale synthétique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 19 (4) : 341-351.
- BOULET R., CHAUVEL R., LUCAS Y., 1984** - Les systèmes de transformation en pédologie. in : Livre Jubilaire du Cinquantenaire de l'AFES. AFES éd., Paris, pp. 167-179.
- BOUMA J., 1971** - Evaluation of the field percolation test and an alternative procedure to test soil potential for disposal of septic tank effluent. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35 : 871-875.
- BOUMA J., 1983a** - Hydrology and soil genesis of soils with aquic moisture regimes. in : Pedogenesis and Soil Taxonomy. 1. Concepts and interactions. Wilding L.P., Smeck N.E., Hall G.F. eds. Elsevier Science Publ., Amsterdam, pp. 253-281.
- BOUMA J., 1983b** - Use soil survey data to select measurement techniques for hydraulic conductivity. *Agricultural Water Management*, 6 (2-3) : 177-190.
- BOUMA J., 1986** - Using soil survey information to characterize the soil-water state. *J. Soil Sci.*, 37 : 1-7.
- BOUWER H., 1961** - A double tube method for measuring hydraulic conductivity of soil in situ above a water table. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 25 : 334-342.
- BOYE M., 1963** - La géologie des plaines basses, entre Organabo et le Maroni (Guyane française). Mémoires pour servir à l'explication de la carte géologique détaillée de la France. Département de la Guyane française. Imprimerie Nationale, Paris, 148 pp.
- BRATNEY Mc A.B., WEBSTER R., 1986** - Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, 37 : 617-639.
- BURT T.P., BUTCHER D.P., 1985** - Topographic controls of soil moisture distributions. *J. Soil Sci.*, 36 : 469-486.
- CABIDOUCHE Y.M., 1981** - Etudes agro-pédologiques des fermes de Guyane, 3. Fermes Martin, Mornand (Macouria) et Poupart (Sinnamary). INRA, Science du sol, Guadeloupe, carte 1/5.000, dact. 20 pp.
- CABIDOUCHE Y.M., 1984** - Une approche cartographique du fonctionnement des sols de Guyane comme support des productions fourragères. in : Prairies Guyanaises et Elevage Bovin. 15-16 décembre 1981, Cayenne. Les colloques de l'INRA n° 24, Ed. INRA Publ., Paris, pp. 127-163.
- CABIDOUCHE Y.M., 1985** - Stratégie de recherche sur la mise en valeur par la production herbagère de sols tropicaux défrichés. Exemple de la Guyane française. Colloque inaugural du réseau "Défrichement et mise en valeur" de l'I.B.S.R.A.M. 26 août - 3 septembre 1985, Jakarta, Indonésie, 19 fig., 20 pp..
- CABIDOUCHE Y.M., SERVANT J., 1980** - Etudes agro-pédologiques des fermes de Guyane, 1. Fermes de Combi et St-Elie. INRA, Science du sol, Guadeloupe, carte 1/5.000, dact. 16 pp.
- CASTANY G., 1966** - Traité pratique des eaux souterraines. Dunod éd., Paris, 661 pp.

- CATTAN P., 1982 - Détermination de l'humidité et de la densité des sols par les sondes nucléaires SOLO 20, CAMPBELL 501B, TROXLER 3411, TROXLER 3205. DAA Science du Sol et Aménagement. ENSA de Montpellier, 71 pp.
- CHAVENT G., 1979 - Identification of distributed parameter systems : about the output least square method, its implementation, and identifiability. in : Identification and System Parameter Estimation. Iserman R. ed., vol. 1. Pergamon, New York, pp. 85-97.
- CHEVALLIER P., 1988 - Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 342 pp.
- CHORLEY R.J., 1978 - The hillslope hydrological cycle. in : Hillslope Hydrology. Kirkby M.J. ed. John Wiley & Sons, pp. 1-41.
- CHOSSAT J.C., 1985 - La porosité de drainage. Sa mesure in situ et sa relation avec la conductivité hydraulique des sols. Thèse de doct. de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 167 pp. et annexes.
- CHOUBERT B., 1957 - Essai sur la morphologie de la Guyane (photoécologie). BRGM (Mémoires pour servir à l'explication de la carte géologique de la France. Département de la Guyane française), 48 pp.
- COLOMBANI J., LAMAGAT J.P., THIEBAUX J., 1972 - Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode Müntz. Une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 9 (3) : 15-46.
- COOLEY R.L., 1977 - A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady state groundwater flow. 1. Theory and numerical properties. *Water Resour. Res.*, 13 (2) : 318-324.
- COOLEY R.L., 1979 - A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady state groundwater flow. 2. Application of statistical analysis. *Water Resour. Res.*, 15 (3) : 603-617.
- COOLEY R.L., 1982 - Incorporation of prior information on parameters into nonlinear regression groundwater flow models. 1. Theory. *Water Resour. Res.*, 18 (4) : 965-976.
- DAGAN G., 1985 - Stochastic modeling of groundwater flow by unconditional probabilities : the inverse problem. *Water Resour. Res.*, 21 (1) : 65-72.
- DELHOMME J.P., 1984 - La distribution spatiale des perméabilités dans les milieux poreux souterrains: moyens d'étude et modélisation. *Annales des Mines*, mai-juin 1984, 113-126.
- DiSTEFANO N., RATH A., 1975 - An identification approach to subsurface hydrological systems. *Water Resour. Res.*, 11 (6) : 1005-1012.
- DUNNE T., 1978 - Field studies of hillslope flow processes. in : Hillslope Hydrology. Kirkby M.J. ed. John Wiley & Sons, pp. 227-293.
- DUNNE T., 1983 - Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff. in : Scale problems in Hydrology. Rodriguez-Iturbe I. and Gupta V.K. eds. *J. Hydrol.*, 65 : 25-48.
- EMSELLEM Y., MARSILY de G., 1971 - An automatic solution for the inverse problem. *Water Resour. Res.*, 7 (5) : 1264-1283.

- FAVROT J.C., DEVILLERS J.L., 1976** - Evaluation des besoins en drainage des terres agricoles. Colloque "L'eau et les activités agricoles", CENECA, Paris.
- FAVROT J.C., LAGACHERIE P., BOUZIGUES R., ANDRIEUX P., BARTHES B., VINCENT B., 1987** - Etude des sols du Secteur de Référence de la Savane guyanaise (plaine côtière ancienne) en vue de l'assainissement drainage. Rapport général (rapport de synthèse et 3 cartes 1/5.000). INRA, Science du Sol, Montpellier, n° 581, 412 pp.
- FOUGEROUZE J., 1966** - Quelques problèmes de bioclimatologie en Guyane française. *L'Agron. Trop.*, 21 (3) : 291-346.
- FREEZE R.A., 1975** - A stochastic-Conceptual analysis of One-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media. *Water Resour. Res.*, 11 (5) : 725-741.
- GASCUEL-ODOUX C., 1984** - Applications de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. Thèse doct. Ing., ENSM de Paris, 235 pp.
- GELHAR L.W., 1984** - Stochastic analysis of flow in heterogeneous porous media. in : *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. Bear J. and Corapcioglu M.Y. eds. Martinus Nijhoff Publ., Dordrecht, The Netherlands, 673-720.
- GODON P., 1981** - Zonage agroclimatique : application à la riziculture pluviale. IRAT, Cayenne, dact. 13 pp.
- GONZALEZ CASILLAS A., 1984** - Variabilité spatiale de la conductivité hydraulique saturée horizontale mesurée au champ. Thèse de doct. Ing., ENSA de Rennes, 178 pp.
- GRIMALDI M., VEILLON L., BOULET R., 1986** - Etude pédologique de la ferme de St-Elie. Opération CORDET. Rapport de travail. ORSTOM, Pédologie, Cayenne, P241, dact. 20 fig., 37 pp.
- GRIMALDI M., VEILLON L., BOULET R., 1987** - Etude pédologique de la ferme de St-Elie. Rapport de travail. ORSTOM, Pédologie, Cayenne, P242, dact. 17 fig., 13 pp.
- GRIMALDI M., GRIMALDI C., ANDRIEUX P., 1989** - Etude des relations entre l'organisation des couvertures pédologiques à différentes échelles et les transferts hydriques et minéraux. in : ATP "Influence des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux du sol". Vachaud G. éd., IMG, Grenoble, pp. 241-259.
- GUEHL J.M., 1984** - Dynamique de l'eau dans le sol en forêt tropicale humide guyanaise. Influence de la couverture pédologique. *Ann. Sci. For.*, 41 (2) : 195-236.
- GUILLOBEZ S., 1979** - Région côtière de la Guyane. Esquisse physiographique. Carte au 1/500.000. IRAT.
- GUTJAHR A.L., GELHAR L.W., BAKR A.A., MILLAN MC J.R., 1978** - Stochastic analysis of spatial variability in subsurface flows. 2. Evaluation and application. *Water Resour. Res.*, 14 (5) : 953-959.
- HALL G.F., 1983** - Pedology and geomorphology. in : *Pedogenesis and Soil Taxonomy. 1. Concepts and interactions*. Wilding L.P., Smeck N.E., Hall G.F. eds. Elsevier Science Publ., Amsterdam, pp. 117-140.
- HAVERKAMP R., VAUCLIN M., VACHAUD G., 1984** - Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. Local standpoint. *Soil Science*, 137 (2) : 78-90.

- HEYLIGERS P.C., 1963 - Vegetation and soil of a white-sand savannah in Surinam. The vegetation of Surinam, 3, Amsterdam, 148 pp.
- HOEKSEMA R.J., KITANIDIS P.K., 1984 - An application of the geostatistical approach to the inverse problem in two-dimensional groundwater modeling. *Water Resour. Res.*, 20 (7) : 1003-1020.
- HOEKSEMA R.J., KITANIDIS P.K., 1985 - Analysis of the spatial structure of properties of selected aquifers. *Water Resour. Res.*, 21 (4) : 563-572.
- HOOCK J., 1971 - Les savanes guyanaises : Kourou. Mémoire ORSTOM, n° 44, Paris, 251 pp.
- HUMBEL F.X., 1978 - Caractérisation par des mesures physiques, hydriques et d'enracinement de sols de Guyane française à dynamique de l'eau superficielle. *Sci. Sol*, 2 : 83-94.
- HUMBERT P., 1984 - Application de la méthode des éléments finis aux écoulements en milieu poreux. *Bull. liaison Labo P. et Ch.*, 132, juil.-août 1984, 21-37.
 - KAUFFMANN C., 1990 - Méthodologie d'application des techniques d'estimation de paramètres au calage de modèles de polluant dans les aquifères et optimisation des stratégies de dépollution. Thèse de Doctorat, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 164 pp.
- KILIAN J., 1974 - Etude du milieu physique en vue de son aménagement. Conceptions de travail. Méthodes cartographiques. *L'Agron. Trop.*, 29 (2-3) : 141-153.
- KIRKBY M.J., 1988 - Hillslope runoff processes and models. *J. Hydrol.*, 100 : 315-339.
- KLUTE A., 1965 - Laboratory measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling.* Black C.A. ed. Series Agronomy n° 9. American Society of Agronomy inc. Publ., Madison, Wisconsin, USA, pp. 210-221.
- LATY R., VACHAUD G., 1986 - AIDHYS 2 (AIDe au traitement de mesures HYdriques du Sol). Logiciel de saisie et de traitement des mesures d'humidité neutronique. IMG, Grenoble, dact. 13 fig. et tab., 49 pp.
- LINDEMANN J.C., 1953 - The vegetation of the Coastal region of Surinam. The Vegetation of Surinam, vol.1, part 1. Van Eedefonds, Amsterdam.
- LUCAS Y., BOULET R., ANDRIEUX P., 1986 - Un système pédologique aval en Guyane française. Organisation et fonctionnement hydrodynamique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 22 (1) : 3-16.
- MARIUS C., 1965 - Les sols de la savane Matiti. ORSTOM, Pédologie, Cayenne, dact. 19 pp.
- MARSILY de G., 1981 - Hydrogéologie quantitative. Collection Sciences de la terre. Masson éd., Paris, 215 pp.
- MATHERON G., 1967 - Eléments pour une théorie des milieux poreux. Masson éd., Paris, 166 pp.
- MATHERON G., 1984 - L'émergence de la loi de Darcy. *Annales des Mines*, mai-juin 1984, 11-16.
- NEUMAN S.P., 1973 - Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under certainty. *Water Resour. Res.*, 9 (4) : 1006-1021.

- NEUMAN S.P., 1980 - A statistical approach to the inverse problem of aquifer hydrology.3. Improved solution method and added perspective. *Water Resour. Res.*, 16 (2) : 331-346.
- NEUMAN S.P., YAKOWITZ S., 1979 - A statistical approach to the inverse problem of aquifer hydrology.1. Theory. *Water Resour. Res.*, 15 (4) : 845-860.
- NIELSEN D.R., BIGGAR J.W., ERH T., 1973 - Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia*, 42 (7): 215-259.
- OLLIER CH., POIREE M., 1981 - Assainissement agricole. Drainage par tuyaux ou fossés. Aménagement des cours d'eau et émissaires. Bibliothèque de l'Institut de Topométrie du Conservatoire National des Arts et Métiers. Eyrolles éd., Paris, 539 pp.
- PECK A.J., 1983 - Spatial variation of hydraulic conductivity of deeply weathered soils in western australia. *Agricultural Water Management*, 6 (2-3) : 291-296.
- PLANCHON O., 1989 - Le relief, le paysage et les formes d'érosion linéaire: leur importance dans le fonctionnement d'un petit bassin versant (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire) Thèse de Doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 305 pp.
- QUINN P., BEVEN K., 1989 - TOPMODEL : document provisoire de présentation. (Traduction libre en français de P. Chevallier). ORSTOM, Hydrologie, Montpellier, dact. 15 pp.
- ROCHE M.A., 1982 - Evapotranspiration réelle de la forêt amazonienne en Guyane. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 19 (1) : 37-44.
- SAUTY J.P., VANDENBEUSCH M., 1984 - Quelques réflexions sur l'apport des modèles dans l'étude des systèmes hydrogéologiques. *Annales des Mines*, mai-juin 1984, 127-134.
- S.E.S., 1972 - Les sols dans le paysage et leurs aménagements. Méthodologie et Cartographie. INRA, Science du Sol, Montpellier, n° 175, 152 pp.
- SOELS T., 1983 - Essai d'approche de la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique à saturation. Rapport de stage. INRA, Science du Sol, Montpellier, 50 pp.
- SOGREAH, 1979 - Etude de factibilité d'assainissement. Zone de Sinnamary. Avant projet sommaire et étude économique. DDAF, Cayenne.
- SOURDAT M., 1965 - Notice de la carte provisoire au 1/50 000 des sols du littoral guyanais entre Kourou et Sinnamary (Guyane française). ORSTOM, Pédologie, Cayenne, P71, dact. 90 pp.
- SOURDAT M., DELAUNE M., 1970 - Contribution à l'étude des sédiments meubles grossiers du littoral guyanais. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 8 (1) : 81-97.
- STEPHENS D.B., NEUMAN S.P., 1982 - Vadose zone permeability tests: summary. *Journal of the Hydraulics Division*. ASCE, 108, HY5, Proc. Paper 17058, may 1982, 623-639.
- TOMASSONE R., LESQUOY E., MILLIER C., 1983 - La régression. Nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique. Actualités scientifiques et agronomiques de l'INRA. Masson éd., Paris, 180 pp.
- TRICART J., KILIAN J., 1979 - Ecogéographie et aménagement du milieu naturel. Maspero éd., collect. Hérodote, Paris, 286 pp.
- TURENNE J.F., 1977 - Modes d'humification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. Mémoire ORSTOM n° 84. Ed. ORSTOM Publ., Paris, 167 pp.

- TURENNE J.F., 1979a - Pédologie (Plaines côtières). in : Atlas des départements d'outre-mer. 4. La Guyane. Ed. CNRS-ORSTOM, Bordeaux-Talence.
- TURENNE J.F., 1979b - Sédimentologie (Plaines côtières). in : Atlas des départements d'outre-mer. 4. la Guyane. Ed. CNRS-ORSTOM, Bordeaux-Talence.
- VACHAUD G., 1982 - Soils physics research and water management. 12ème Congrès International de Science du Sol, New-Delhi (Inde).
- VACHAUD G., VAUCLIN M., IMBERNON J., PIERI C., DANCETTE C., DIATTA S., 1982 : Etude des pertes en eau et en matière minérales sous culture considérant la variabilité spatiale du sol. 12ème Congrès International de Science du Sol, New-Delhi (Inde).
- VAUCLIN M., 1982 - Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. in : Variabilité Spatiale des Processus de Transferts dans les Sols, 24-25 juin 1982, Avignon (France). Ed. INRA Publ. : Les colloques de l'INRA n° 15, pp. 9-43.
- VAUCLIN M., KHANJI D., VACHAUD G., 1976 - Etude expérimentale et numérique du drainage et de la recharge des nappes à surface libre, avec prise en compte de la zone non saturée. *Journal de Mécanique*, 15 (2) : 307-348.
- VAUCLIN M., IMBERNON J., VACHAUD G., DANCETTE C., 1983 - Description expérimentale et modélisation stochastique des transferts par la mise en échelle des propriétés hydrodynamiques des sols. Actes du colloque I.A.E.A. 18-22 avril 1983, Aix-en-Provence (France). in : Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies 1983, IAEA Vienne, IAEA-SM 267/25, pp. 103-124.
- VEEN A.W.L., 1970 - On geogenesis and pedogenesis in the old coastal plain of Surinam (South America). Thèse, Univ. Amsterdam, 178 pp.
- VIZIER J.F., 1974 - Contribution à l'étude des phénomènes d'hydromorphie. Recherche de relations morphogénétiques existant dans un type de séquence de sols hydromorphes peu humifères au Tchad. 2. Dynamique de l'eau et du fer *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 12 (3-4) : 211-266.
- VIZIER J.F., 1984 - Les phénomènes d'hydromorphie en régions tropicales à saisons contrastées. Application à une meilleure caractérisation des concepts de gley et de pseudogley. *Sci. Sol*, 3 : 225-238.
- VOLTZ M., BORNAND M., GOULARD M., 1989 - Estimation spatiale des paramètres hydrodynamiques du sol à l'échelle d'une plaine alluviale. in : ATP "Influence des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux du sol". Vachaud G. éd., IMG, Grenoble, pp. 81-109.
- WARRICK A.W., NIELSEN D.R., 1980 - Spatial variability of soil physical properties in the field. in : Applications of Soil Physics. Hillel D. ed. Academic Press, inc., New York, pp. 319-344.
- WILDING L.P., DREES L.R., 1983 - Spatial variability and pedology in : Pedogenesis and Soil Taxonomy. 1. Concepts and interactions. Wilding L.P., Smeck N.E., Hall G.F. eds. Elsevier Science Publ., Amsterdam, pp. 83-116.
- WOLSACK J., 1977 - Exploitation et protection des eaux souterraines. *Bulletin technique de génie rural*. CEMAGREF, Antony, 41 pp.
- WOLSACK J., 1982 - Programme WATASI, version 5. Centre Technique du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Division Hydraulique Souterraine et Drainage, Antony, 26 pp.

- **YEH W. W-G., 1986 - Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: the inverse problem. *Water Resour. Res.*, 22 (2) : 95-108.**
- YEH W. W-G., YOON Y.S., 1976 - A systematic optimization procedure for the identification of inhomogeneous aquifer parameters. in : *Advances in Groundwater Hydrology*. Saleem Z.A. ed. American Water Resources Association, Minneapolis, Minn., pp. 72-82.**
- **YOON Y.S., YEH W. W-G., 1976 - Parameter identification in an inhomogeneous medium with the finite-element method. *Soc. Pet. Eng. J.*, 217-226.**
- ZIMMER D., 1988 - Comparaison de mesures de hauteurs de nappe par tensiomètres et piézomètres. *Bull. Groupe fr. Humidité neutronique*, n° 23, 53-75.**

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 - LA PLAINE COTIERE ANCIENNE DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES	7
INTRODUCTION	7
1. CLIMATOLOGIE	7
1.1. Pluviosité	8
1.2. Evapotranspiration	9
1.3. Conclusion	10
2. GEOMORPHOLOGIE ET GEOLOGIE	11
2.1. Géomorphologie et stratigraphie.	11
2.2. Sédimentologie et minéralogie	12
2.2.1. Les sables Coswine	13
2.2.2. L'argile Coswine	13
3. HYDROLOGIE	13
4. PEDOLOGIE	15
4.1. Présentation générale	15
4.2. Les sols dans le paysage	16
4.3. Les systèmes de transformation	16
5. CONCLUSION	18
Chapitre 2 - LE SITE EXPERIMENTAL: CHOIX DU SITE ET REPRESENTATIVITE	23
INTRODUCTION	23
1. CHOIX DU SITE ET REPRESENTATIVITE	23
2. LE RELIEF	26
3. LES MATERIAUX EN PLACE	27
4. LA DIFFERENCIATION PEDOLOGIQUE	30
4.1. Texture et porosité	33
4.2. Expression morphologique de l'hydromorphie	35
4.3. Caractéristiques spécifiques des principaux sols	36
4.3.1. Les sols ferrallitiques (station SE4)	37
4.3.2. Les podzols (station SE7)	38
4.3.3. Les planosols (station SE10)	40
4.3.4. Les sols hydromorphes alluviaux	43
4.4. Conclusion	43
5. CONCLUSION	44
Chapitre 3 - CARACTERISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRIQUE	47
INTRODUCTION	47
1. METHODES EXPERIMENTALES ET DISPOSITIF DE MESURE	47
1.1. Pluie et ETP	47
1.2. La piézométrie	48
1.3. Humidimétrie neutronique.	49
1.3.1. Corrections des comptages de terrain	51
1.3.2. Etalonnage	51
1.3.3. Validité des mesures	52
1.4. Test d'infiltration	52
1.5. Le dispositif piézo-humidimétrique	53
2. RESULTATS	54
2.1. Suivis à l'échelle décadaire	56
2.1.1. Périodicité des fluctuations de la nappe	56
2.1.2. Typologie générale des stations à l'échelle annuelle	58
2.1.3. Typologie des stations à l'échelle d'épisodes climatiques particuliers	61

2.1.3.1. En régime permanent de basses et hautes eaux	61
2.1.3.2. En régime transitoire	62
2.1.4. Conclusion des observations à l'échelle décadaire	68
2.2. Suivis à l'échelle journalière	69
2.2.1. Suivis piézométriques journaliers	69
2.2.2. Test d'infiltration sur podzol (SE7)	71
2.2.3. Conclusion des observations à l'échelle journalière	73
3. CONCLUSION	73
Chapitre 4 - PRINCIPES DU MODELE UTILISE ET ACQUISITION DES PARAMETRES	79
INTRODUCTION	79
1. PRESENTATION DU MODELE DE TRANSFERTS HYDRIQUES	80
1.1. Enoncé du problème général	80
1.1.1. Principales hypothèses	81
1.1.2. Equations de base	81
1.2. Résolution numérique	83
1.2.1. Le code informatique utilisé WATASI 5 (WOLSACK, 1982)	83
1.2.2. Discrétisation	84
1.2.3. Choix des conditions aux limites	85
1.2.4. Choix de la condition initiale	85
2. MISE EN OEUVRE DU MODELE: acquisition des paramètres	85
2.1. Paramètres géométriques	86
2.2. Paramètres hydrodynamiques	88
2.2.1. Conductivité hydraulique à saturation	88
2.2.1.1. Méthode d'acquisition	89
2.2.1.2. Acquisition et analyse des résultats	90
2.2.1.3. Interpolation des données ponctuelles	92
2.2.2. Porosité de drainage μ et Coefficient d'emmagasinement S	96
2.2.2.1. porosité de drainage	96
2.2.2.2. Coefficient d'emmagasinement	97
2.2.2.3. Conclusion	98
2.2.3. Recharge par unité de surface q_s	98
2.3. Les conditions aux limites	99
2.3.1. Condition aval	99
2.3.2. Condition amont	99
2.3.3. Conditions latérales	101
2.4. Conclusion	101
Chapitre 5 - RESULTATS DE LA MODELISATION	105
1. PRINCIPES DE L'IDENTIFICATION	105
1.1. Représentativité des mailles et stations de contrôle.	105
1.2. Critère d'optimisation de l'identification.	106
1.3. Précision de calcul des flux et potentiels.	107
2. ESTIMATION DES FLUX EN REGIME PERMANENT	107
2.1. Jeu de données et épisode d'identification choisi.	107
2.2. Identification de la pluie efficace en régime permanent	108
2.2.1. Identification avec une pluie efficace uniforme	109
2.2.2. Identification avec une valeur de pluie efficace par zone	111
2.3. Analyse de sensibilité	112
2.3.1. Les conductivités	113
2.3.1.1. Analyse de sensibilité à l'amplitude de l'hétérogénéité spatiale des conductivités K_s .	113
2.3.1.2. Analyse de sensibilité à l'ordre de grandeur des valeurs de K_s	115
2.3.2. Profondeur du niveau imperméable (simulation F).	116
2.3.3. Sensibilité au flux amont q_{am}	118
2.4. Contrôle expérimental lors d'un épisode indépendant.	119
2.5. Conclusion de l'identification en régime permanent.	120
3. ESTIMATION DES FLUX EN RÉGIME TRANSITOIRE	121

	177
3.1. Jeu de données et épisodes d'identification choisis.	121
3.2. Identification de la pluie efficace en régime transitoire.	123
3.2.1. Identification sur l'épisode 23/05 au 20/08/85.	123
3.2.2. Identification sur SE7 et SE15 (épisode 15/05 au 21/05/86).	128
3.3. Contrôle expérimental	133
3.3.1. Episode du 20/05/86 au 12/09/86	133
3.3.2. Episode du 11/01/84 au 15/02/84	142
3.4. Conclusion de l'identification en régime transitoire.	144
Chapitre 6 - SYNTHESE ET DISCUSSION	149
1. CONSIDERATIONS METHODOLOGIQUES	149
1.1. Sur l'approche de modélisation choisie	149
1.2. Sur la procédure d'optimisation choisie	151
1.3. Sur la paramétrisation	151
2. CONSIDERATIONS SUR LES RESULTATS	152
3. ESTIMATION DU RUISSELLEMENT	153
CONCLUSION GENERALE	161
BIBLIOGRAPHIE	167
TABLE DES MATIERES	175
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	178
ANNEXES	183

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1 : Pluviométrie de la plaine côtière ancienne. Station de Sinnamary (moyenne 1956-1985 et années 1984, 1985 et 1986).	8
Tableau 1-2 : Nombre de mois aux seuils de 100 et 30 mm de pluies mensuelles (période de 12 ans), d'après TURENNE, 1977.	8
Tableau 1-3 : Nombre moyen de jours de pluie > 0 mm/j et > 5 mm/j. Station de Sinnamary (période 1956-1984) - d'après FAVROT et al., 1987.	9
Tableau 1-4 : Evapotranspiration mensuelle à Kourou et Sinnamary (en mm).	10
Tableau 1-5 : Stratigraphie simplifiée de la plaine côtière, d'après TURENNE, 1977.	11
Tableau 1-6 : Caractéristiques principales de la série Coswine, d'après LUCAS et al., 1986.	11
Tableau 2-1 : Types de paysages et unités hydro-géomorphologiques des barres pré littorales hautes de la savane de Corossony et de la ferme de St-Elie, d'après FAVROT et al., 1987.	24
Tableau 3-1 : Récapitulatif des épisodes et stations de mesure	55
Tableau 3-2 : Temps de présence (en jours) de la nappe par tranche de profondeur sur cinq stations (SE1, SE2, SE4, SE7 et SE10). Comparaison des altitudes et de leur distance par rapport à l'exutoire aval (station SE0). Durées observées sur la période 09/12/83 à 12/09/86 (1000 jours).	60
Tableau 4-1 : Liste des symboles utilisés.	81
Tableau 4-2 : Variables et paramètres du modèle	86
Tableau 4-3 : Paramètres statistiques des conductivités hydrauliques mesurées (10^{-6} ms^{-1})	90
Tableau 4-4 : Paramètres statistiques des conductivités hydrauliques estimées par krigeage normal (K_n) et krigeage log-normal (K_{Ln}) [10^{-6} ms^{-1}]	93
Tableau 4-5 : Porosité de drainage μ mesurée sur deux types de sols de la savane de Corossony, avec la méthode "Puits et piézomètres", d'après FAVROT et al., 1987.	97
Tableau 4-6 : Porosité de drainage μ estimée à l'aide de mesures d'humidité neutroniques. Valeurs moyennes calculées sur n épisodes.	97
Tableau 5-1 : Mailles prises en compte pour l'ajustement des piézométries, mesurées et calculées.	105
Tableau 5-2 : Valeurs du critère d'ajustement M pour les trois modalités considérées.	108
Tableau 5-3 : Comparaison des erreurs moyennes et des critères des moindres carrés pour différents jeux de conductivités.	114
Tableau 5-4 : Erreur moyenne et écart-type calculés pour chaque pas de temps de calcul. Régime transitoire du 23/05/85 au 20/08/85.	124
Tableau 5-5 : Pluie totale (P) et pluie efficace (Pe) par zone de recharge. Régime transitoire du 23/05/85 au 20/08/85 (en mmj^{-1} et en % de P).	126
Tableau 5-6 : Comparaison du flux amont q_{am} et de la pluie efficace Pe calculée pour la totalité de la barre (en $\text{m}^3 \text{ j}^{-1}$). Régime transitoire du 23/05/85 au 20/08/85	126
Tableau 5-7 : Pluie totale (P) et pluie efficace (Pe) par zone de recharge. Régime transitoire du 15/05/86 au 21/05/86 (en mmj^{-1} et en % de P).	130
Tableau 5-8 : Comparaison du flux amont q_{am} et de la pluie efficace Pe calculée pour la totalité de la barre (en $\text{m}^3 \text{ j}^{-1}$). Régime transitoire du 15/05/86 au 21/05/86	131
Tableau 5-9 : Influence du coefficient de drainance sur les critères relatifs d'ajustement	

de la couche C2 calculés pour chaque pas de temps de calcul. Régime transitoire du 23/05/85 au 20/08/85.	132
Tableau 5-10 : Critères d'ajustement relatifs (sans valeur absolue) pour la couche C2 et erreur moyenne calculés pour chaque pas de temps de calcul. Régime transitoire du 20/05/86 au 12/09/86 (contrôle expérimental).	135
Tableau 5-11 : Pluie totale (P) et pluie efficace (Pe) par zone de recharge. Régime transitoire du 20/05/86 au 12/09/96 (en mmj ⁻¹ et en % de P).	140
Tableau 5-12 : Comparaison du flux amont q _{am} et de la pluie efficace. Pe calculés pour la totalité de la barre (en m ³ j ⁻¹). Régime transitoire du 22/05/86 au 12/09/96 (contrôle expérimental).	140
Tableau 5-13 : Critères d'ajustement pour la couche C2 et erreur moyenne calculés pour chaque pas de temps de calcul. Régime transitoire du 11/01/84 au 15/02/84 (contrôle expérimental).	142
Tableau 5-14 : Pluie totale (P) et pluie efficace (Pe) par zone de recharge. Régime transitoire du 11/01/84 au 15/02/84 (en mmj ⁻¹ et en % de P).	144
Tableau 5-15 : Comparaison du flux amont q _{am} et de la pluie efficace Pe calculés pour la totalité de la barre (en m ³ j ⁻¹). Régime transitoire du 11/01/84 au 15/02/84. (contrôle expérimental).	144
Tableau 6-1 : Mise en évidence de la relation entre la conductivité hydraulique et la recharge. Régime permanent du 06/06/86.	150
Tableau 6-2 : Synthèse des valeurs estimées de ruissellement (en % de la pluie totale) pour six stations (SE1, SE2, SE4, SE5, SE7 et SE10) et pour 5 épisodes de calcul.	155

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : La Guyane française.	6
Figure 1-2 : Cadre géomorphologique et localisation du site d'étude (d'après l'esquisse physio-graphique au 1/500.000 de GUILLOBEZ, 1979).	6
Figure 1-3 : Coupe schématique de la plaine côtière entre Kourou et Sinnamary, d'après TURENNE, 1979b.	12
Figure 1-4 : Coupes schématiques des trois grandes classes de sol de la plaine côtière ancienne: a) Sols ferrallitiques, b) Podzol de nappe, c) Sols hydromorphes.	17
Figure 1-5 : Les systèmes de transformation de la plaine côtière ancienne. Stades d'évolution des barres pré littorales. Séquence A : barre pré littorale à sommet arrondi. Séquence B : barre large à sommet plat horizontal.	19
Figure 2-1 : Plan de situation de la Savane de Corossony et localisation du site expérimental.	22
Figure 2-2 : Localisation du site d'étude au sein de la Savane de Corossony. Axes de drainage et lignes d'écoulement.	25
Figure 2-3a : Courbes de niveau et limites du domaine de modélisation des transferts hydriques.	26
Figure 2-3b : Classes de pente : pentes calculées à partir des cotes déterminées au centre de chaque maille par interpolation linéaire des relevés topographiques.	26
Figure 2-3c : Chemins préférentiels des écoulements de surface.	27
Figure 2-4 : Coupes schématiques des principaux matériaux sur trois transects. T1 : transect axial, T2 et T3 : transects secondaires perpendiculaires.	27

Figure 2-5 : Courbes d'isovaleurs de la fraction argile ($\% < 2 \mu\text{m}$). Coupes transversales.	28
Figure 2-6 : Courbes granulométriques cumulées d'échantillons prélevés sur la station SE4 entre 50 et 400 cm de profondeur.	29
Figure 2-7 : Extrait de la carte des sols au 1/5.000ème de la savane de Corossony et de la ferme AMVA de St-Elie, d'après FAVROT et al., 1987.	31
Figure 2-8 : Carte des sols et surface topographique.	32
Figure 2-9 : Profils caractéristiques : des sols ferrallitiques conservés (station SE4) ; des podzols (station SE7) ; des planosols jaune (station SE10).	39
Figure 3-1 : Schémas des deux types de piézomètres utilisés.	48
Figure 3-2 : Comparaison des piézomètres "manuels" et "automatiques" (piézomètres profonds. a) Station SE7 sur podzol, b) Station SE15 sur planosol, c) Pluviométrie journalière.	50
Figure 3-3 : Test d'infiltration sur podzol (station SE7) - Dispositif de mesure.	53
Figure 3-4 : Localisation des stations de mesures hydriques.	54
Figure 3-5 : Relevés piézométriques manuels sur quatre stations (SE1, SE4, SE7, SE10) et pluviométrie journalière (P), couvrant trois cycles climatiques. a) année 1983-84: 1.10.83 au 1.10.84 ; b) année 1984-85: 1.10.84 au 1.10.85 ; c) année 1985-86: 1.10.85 au 1.10.86.	57
Figure 3-6 : Fréquence d'occurrence de la nappe au-dessus d'une profondeur donnée. Courbes établies pour chaque station à partir d'estimations des hauteurs piézométriques décennales, calculées par interpolation linéaire des relevés piézométriques manuels.	59
Figure 3-7 : Pluviométrie journalière du 01.10.83 au 01.01.84.	62
Figure 3-8 : Evolution des niveaux piézométriques sur les trois transects de mesure (T1, T2 et T3) en période de remontée de nappe (9.12.83 au 27.01.84).	63
Figure 3-9 : Evolution des profils de teneur en eau volumique en période de réhumectation (15/12/83 au 27/01/84), sur six stations du transect T1.	64
Figure 3-10 : Pluviométrie journalière: a) du 1.01.84 au 1.04.84. b) du 1.06.87 au 1.10.87.	65
Figure 3-11 : Evolution des niveaux piézométriques en période de rabattement de nappe sur les transects T1 et T3 (saison sèche 1987 : 22.06 au 22.09).	66
Figure 3-12 : Evolution des profils de teneur en eau volumique en période de rabattement de nappe (petit été de mars 1984: 27.01 au 1.03) sur 6 stations du transect T1.	67
Figure 3-13 : Relevés piézométriques journaliers : comparaison des relevés du piézomètre profond et du piézomètre de moyenne profondeur. Station SE15 (planosol). Relevés du 01.05.86 au 18.09.86.	69
Figure 3-14 : Mise en évidence du phénomène de drainance sur la station SE7 (planosol).	70
Figure 3-15a : Test d'infiltration sur podzol (station SE7). Profils de teneur en eau volumique	71
Figure 3-15b : Test d'infiltration sur podzol (station SE7). Profils tensiométriques - charge hydraulique calculée.	72
Figure 4-1 : Schématisation des échanges hydriques entre le milieu extérieur et l'aquifère.	79
Figure 4-2 : Discrétisation de l'aquifère modélisé. Domaine de surface : a) couche C_T ; b) couche C_1 c) couche C_2 .	87
Figure 4-3 : Maillage vu en coupe. Transect (T1) passant par les stations de mesure.	88
Figure 4-4 : Histogrammes expérimentaux des valeurs de conductivités hydrauliques à saturation.	91

Figure 4-5 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des conductivités hydrauliques à saturation. a) $K1_{sup}$; b) $K1_{inf}$; c) $K2$	92
Figure 4-6 : Comparaison de la carte des sols et des cartes des valeurs de conductivités hydrauliques krigées (krigeage normal). a) carte des sols ; b) carte des conductivités ; c) carte des écarts-types d'erreur.	94
Figure 4-7 : Comparaison de la carte des sols et des cartes des valeurs de conductivités hydrauliques krigées (krigeage log-normal).	95
Figure 4-8 : Schéma montrant les principaux flux échangés entre l'extérieur et les trois couches C1, C2, CT.	98
Figure 4-9 : Estimation des flux amont souterrains q_{am} pour les couches C_1 et C_2 .	100
Figure 5-1 : Piézomètres et piézométries calculées. Régime permanent du 06.06.86. Simulation A (transects T1 et T2).	109
Figure 5-2 : Zonage pédo-topographique (c) issu du croisement de la carte des sols (a) et de la carte en classes de pente (b).	110
Figure 5-3 : Piézométries mesurées et calculées. Régime permanent du 06.06.86. Simulations B, C, et D (transect T1).	111
Figure 5-4 : Modifications du zonage initial au cours de l'identification de la Recharge en régime permanent (06.06.86). a) Simulation B, C, D. b) Simulation E.	112
Figure 5-5 : Piézométrie mesurée et piézométries calculées. Régime permanent du 06.06.86. Simulation E et K (transect T1).	113
Figure 5-6 : Piézométrie mesurée et piézométries calculées. Régime permanent du 06.06.86. Simulation L et M (transect T1).	115
Figure 5-7 : Piézométrie mesurée et piézométries calculées. Régime permanent du 06.06.86. Simulation F, H et J (transects T1 et T3).	117
Figure 5-8 : Comparaison des piézométries mesurées et calculées. Régime permanent.	118
Figure 5-9 : Piézométrie mesurée et piézométrie calculée. Régime permanent du 12-27.02.85. Contrôle expérimental (transect T1).	119
Figure 5-10 : Piézométrie et pluviométrie journalières sur podzol (SE7) et sur planosol (SE15). Episode du 05.05.86 au 27.05.86.	122
Figure 5-11 : Comparaison des piézométries mesurées et calculées pour l'ensemble des 9 pas de temps de calcul. Régime transitoire du 23.05.85 au 20.08.85.	123
Figure 5-12 : Comparaison des erreurs d'ajustement par station et par pas de temps de calcul. Régime transitoire du 23.05.85 au 20.08.85.	124
Figure 5-13 : Piézométrie mesurée et piézométrie calculée. Régime transitoire du 23.05.85 au 20.08.85. a) Exemples de stations caractérisées par un bon ajustement (SE4 et SE10). b) Exemples de stations caractérisées par un mauvais ajustement (SE1 et SE17).	125
Figure 5-14 : Pluviométrie journalière moyenne et pluie efficace par zone de recharge. Régime transitoire du 23/05 au 20/08/85.	127
Figure 5-15 : Piézométries mesurées et piézométries calculées sur podzol (SE7) et planosol (SE15) pour les couches C_1 et C_2 . Influence du coefficient de drainage D. Régime transitoire du 15.05.86 au 21.05.86.	128
Figure 5-16 : Schéma précisant l'implantation des piézomètres automatiques des stations SE7 (podzol) et SE15 (planosol) par rapport aux mailles des couches C_1 et C_2 .	129
Figure 5-17 : Pluviométrie journalière et pluie efficace par zone de recharge. Régime transitoire du 15 au 21.05.86.	131

Figure 5-18 : Modification du zonage de la Recharge en régime transitoire. a) Zonage initial (régime permanent). b) Zonage définitivement adopté.	134
Figure 5-19 : Comparaison des piézométries mesurées et calculées pour l'ensemble des 15 pas de temps de calcul. Régime transitoire du 22.05.86 au 12.09.86.	136
Figure 5-20 : Comparaison des erreurs d'ajustement par station et par pas de temps de calcul. Régime transitoire du 22.05.86 au 12.09.86.	136
Figure 5-21 : Piézométrie mesurée et piézométrie calculée. Régime transitoire du 20.05.86 au 12.09.86. a) Exemples de stations caractérisées par un bon ajustement (SE7 et SE10). b) Exemples de stations caractérisées par un mauvais ajustement (SE2 et SE17).	137
Figure 5-22 : Valeurs des paramètres du modèle calés en régime transitoire. a) Coefficient de drainage: D. b) Porosité de drainage: μ et coefficient d'emménagement : S.	138
Figure 5-23 : Pluviométrie journalière moyenne et pluie efficace par zone de recharge. Régime transitoire du 22/05 au 12/09/86 (Contrôle expérimental).	139
Figure 5-24 : Comparaison des piézométries mesurées et calculées pour l'ensemble des 5 pas de temps de calcul. Régime transitoire du 11.01.84 au 15.02.84.	141
Figure 5-25 : Comparaison des erreurs d'ajustement par station et par pas de temps de calcul. Régime transitoire du 11.01.84 au 15.02.84.	141
Figure 5-26 : Pluviométrie journalière du 01.01.84 au 01.03.84.	143
Figure 6-1 : Schématisation des calculs effectués pour estimer le ruissellement (pour chaque station de mesure et pour chaque épisode), en tenant compte des incertitudes sur les différents termes du bilan hydrique.	154
Figure 6-2 : Ruissellement estimé sur six épisodes, et pour chaque station, en fonction de la pluie journalière moyenne et du taux de saturation moyen du sol (à 30 cm de profondeur).	156
Figure 6-3 : Représentation schématique proposée des chemins de l'eau sur les versants de la barre pré littorale, en fonction des zone de recharge (q_1 , q_2 , q_3 et q_4) a) coupe longitudinale (transect T ₂) b) coupe transversale (transect T ₂ et T ₃).	157

LISTE DES PLANCHES

Planche 1	34
Planche 2	41

ANNEXE 1

Représentations cartographiques du site expérimental

Carte 1 : Courbes de niveau ; limites de sols ; stations de mesure.

Carte 2 : Limites de sols ; stations de mesure ; parcellaire ; sondages et profils ; sites de mesure des conductivités hydrauliques (tests de Porchet).

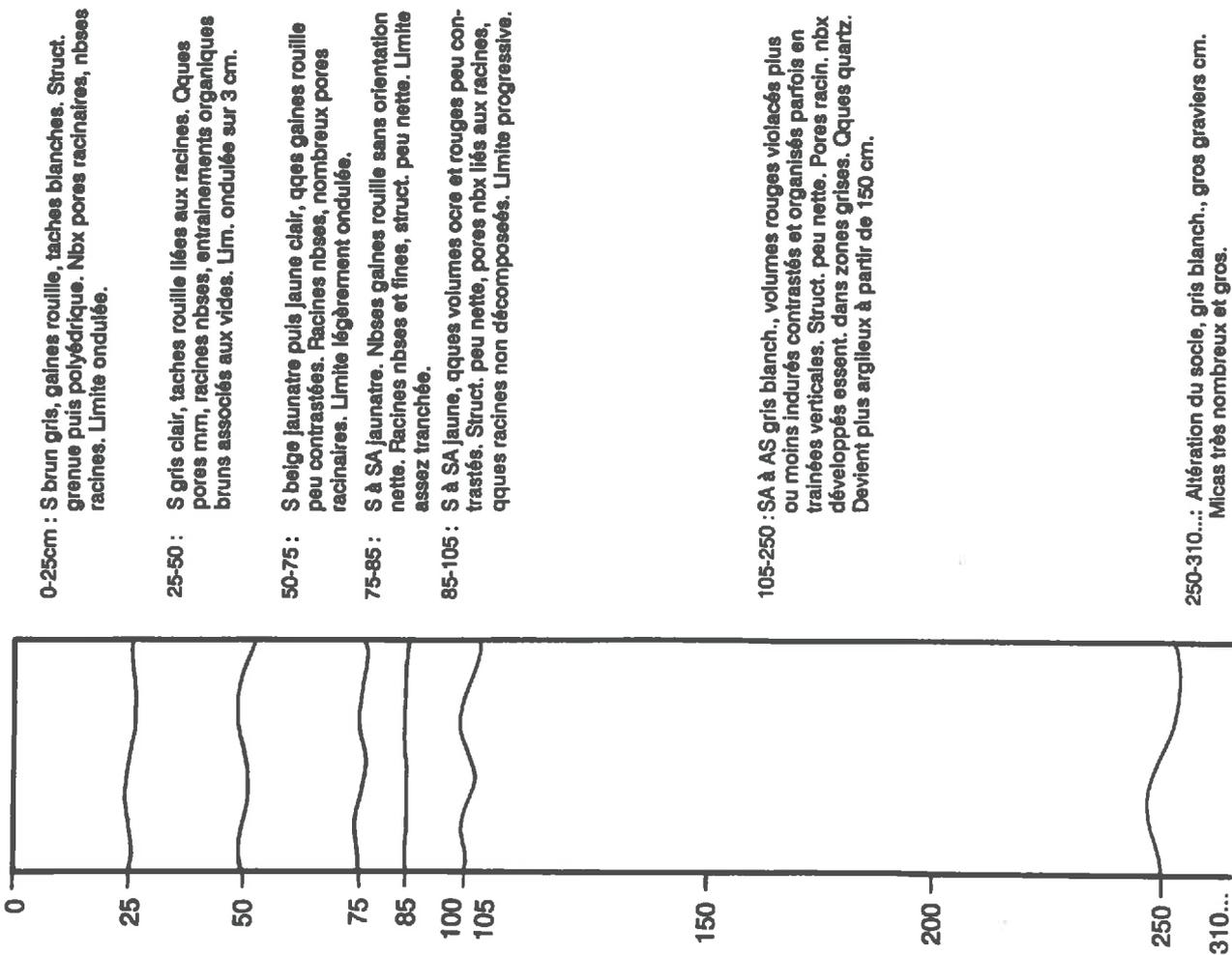
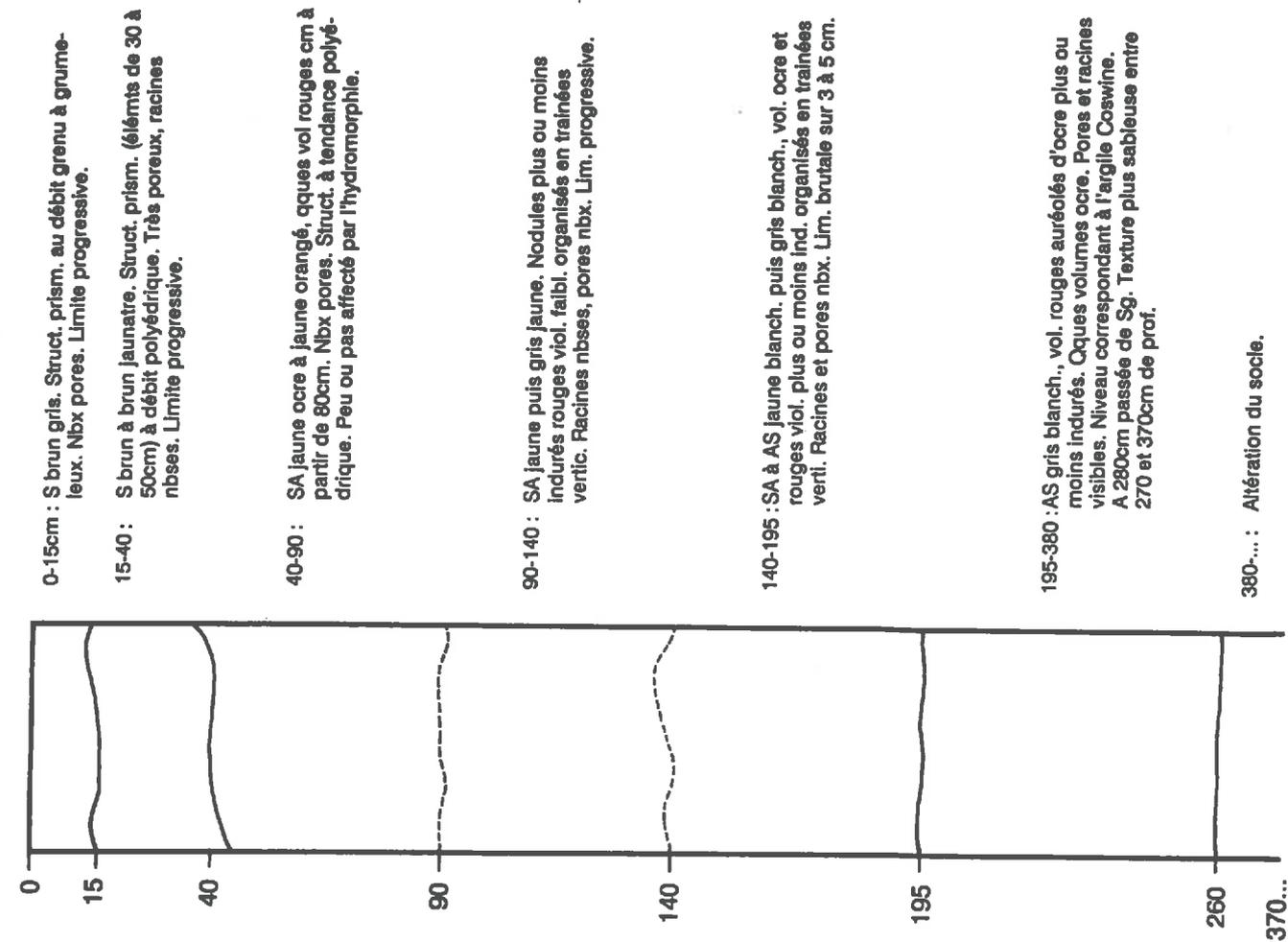
ANNEXE 2

Caractérisation des sols : profils et analyses.

- 1- Description de profils : stations SE1, SE2, SE3, SE5, SE6, SE8 et SE9
(pour les stations SE4, SE7 et SE10, voir Chapitre 2).**
- 2- Analyses "complètes" : stations SE4, SE7 et SE10.**
- 3- Granulométries effectuées sur les transects T1, T2 et T3.**
- 4- Densités.**
- 5- Matière organique.**

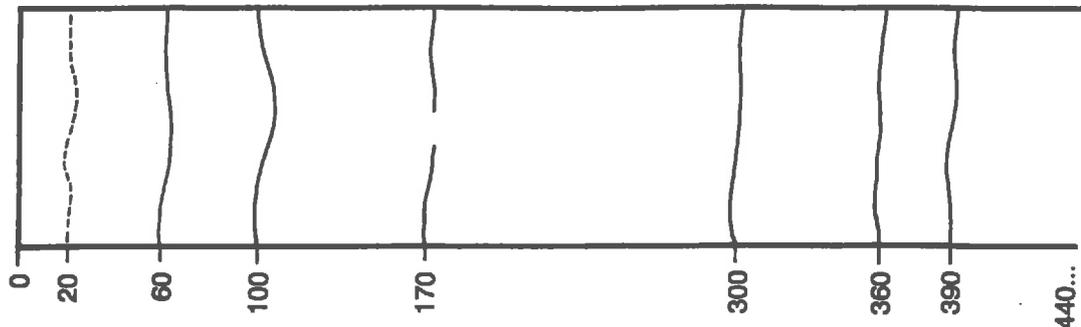
1- Description de profils

Station SE2 - Ferrallitique appauvri (altitude: 4,15 m)



Station SE3 - Ferrallitique (altitude: 5,04 m)

- 0-20cm : SA brun gris. Très nbx pores mm. Struct. prismatique soulignée par des microfissures (2mm) distantes de 50cm. Association d'une struct grenue et grumeleuse. Racines très nombreuses. Limite progressive.
- 20-60 : SA brun clair. Struct prismat. et polyédrique angulaire.
- 60-100 : SA jaune, revêtements brun organ. continus sur les faces des prismes distants ≈ 50 cm. Très poreux (galeries de vers, racines). Sous-struct. peu nette à tendance polyédrique. Limite prog. sur 10 cm.
- 100-170 : SA jaune ocre et rougeâtre avec qqes passées jaunes Très poreux avec entr. organ. et légères zones de décolor. autour des racines. Structure peu nette. Vol. rouges indiv. à partir de 130cm.



- 170-300 : SA jaune ocre clair, trainées rougeâtres violacées ± abondantes et verticales, sans struct. nette. Très poreux, nbres racines avec entrainem. organ. S'éclaircit en profondeur.

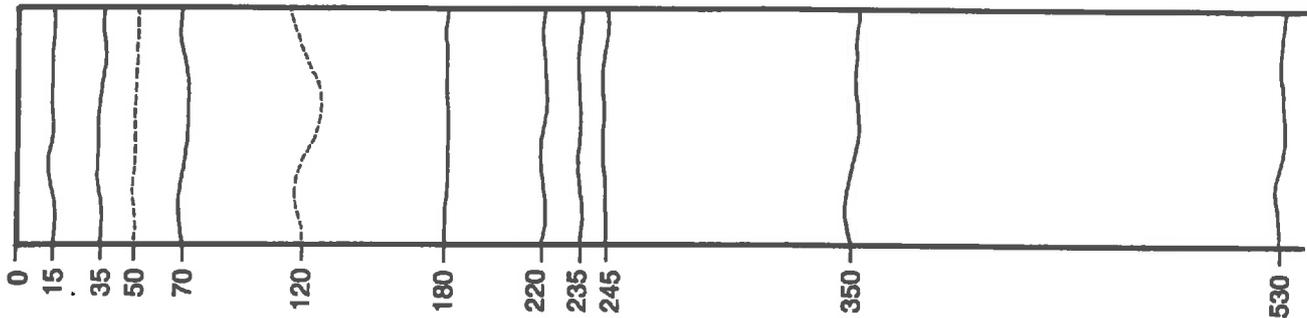
- 300-360 : AS jaune blanchâtre puis gris bleu à vol rges viol. ± indurés. Racines (Argile Coswine).

- 360-390 : As/A gris bleu dominant devenant ocre.

- 390-440 : S gris blanch. Altérat. socle avec gros quartz et graviers anguleux.

Station SE5 - Planosol jaune (altitude: 6,62 m)

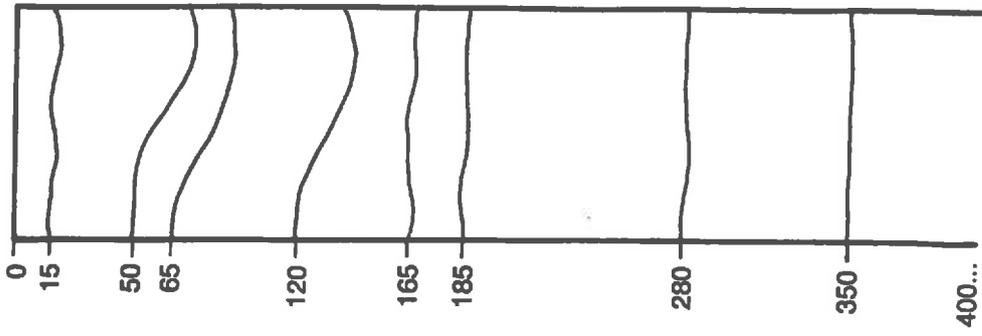
- 0-15 cm : S gris brun. Racines nbsees. Limite nette sur 5 cm.
- 15-35 : S gris brun clair. Très poreux, racines nbsees.
- 35-50 : S plus clair. Volumes jaunâtres cm nbx. Très poreux.
- 50-70 : S jaunâtre, vol. gris brun. Très poreux. Limite ondul.
- 70-120 : S beige jaune, vol. rges peu indur (mm à cm). Très poreux, rac nbsees. Lrm. prog. et ondulée sur 5-10cm.
- 120-180 : SA jaune blanch, trainées et nodules cm rges viol. ± indur à orga verticale. Pores mm, racines nbsees, plus sableux à la base, limite très nette, qqes gros quartz.
- 180-220 : S moyen à grossier, nbx micas, jaune gris à vol. ocre et rges pâle (3 à 10 cm), nbx graviers.
- 220-235 : S ocre grisâtre, pores peu nbx.
- 235-245 : SA bariolé ocre, gris blanch. et rge. Traversé par racl.



- 245-350 : S ocre à vol gris blanch. et rge.

- 350-530 : S à SA gris bleu type vase.

- 530-...: Altération du socle.



0-15cm : S gris très clair, bcp racines, poreux.

15-50 : S gris à blanc. Racines et pores nbx.

50-65 : S beige, très poreux. Racines nbsees limite très ondul.

65-120 : S (Bh₂) foncé "humifère" jaune à ocre. Dépôts organ. répartis irrég. induré localement. Nbsees racines. Qqs Vol rges peu constrastés. Poreux. Limite très ondulée.

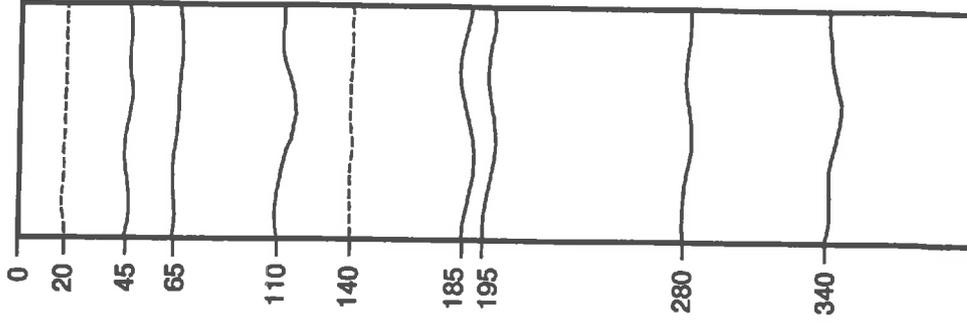
120-165 : S ocre à vol. rouges peu indurés. Poreux, racines. Qq nodules ocres peu indurés.

165-185 : S (s grossiers) à micas. Qques quartz cm roulés. Poches légèrement + orga au centre de l'horizon.

185-280 : Sa (sf) bariolé: jaune grisâtre, ocre et rougeâtre. Vol rges et ocre non indur, trainées grises. Racines. Fond s'éclaircit progress. Gris jaunâtre à 230, vol. rouges auréolées d'ocre. Fond rougeâtre, micas et quartz.

280-350 : Sg ocre puis sf gris à 340cm de prof.

350-400 : "vase" grise à gris bleu.



0-20cm : S gris brunâtre, peu contrasté. Racines nbsees, poreux. Limite peu nette.

20-45 : S gris clair. Racines nbsees, très nbx pores mm vertic.

45-65 : S jaune pâle, très poreux (1 à 2 mm), porosité racin. Nbsees racines verticales. Limite progr sur 4 à 5 cm.

65-110 : S jaune ocre.

110-140 : S à SA jaune ocre à vol cm ocre (et brun au centre) ± indur, qqs vol rges moins indur. Très poreux. Nbsees racines, limite progr. sur 5 à 7 cm.

140-185 : SA jaune ocre à vol rges violacés ± indur. tendant à s'organ. verticalement, qq trainées jaunes + clairs. Très poreux et nbsees racines. Discontinuité brutale.

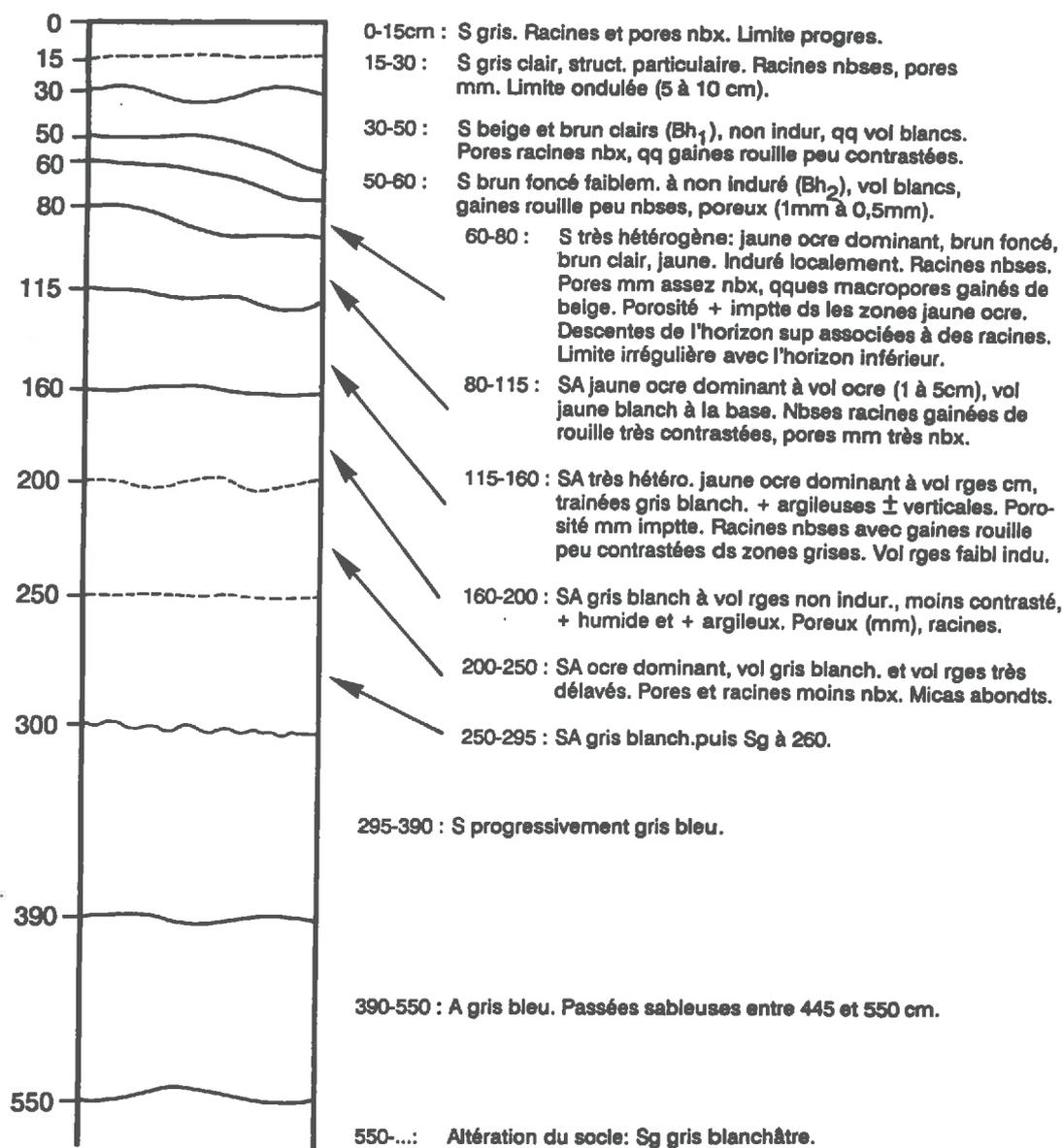
185-195 : Vol rouges et gris blanch ± indur. Très poreux, nbsees racines gainées de rouille.

195-280 : S rougeâtre à vol ocre et gris, s'éclaircissant en prof. Très nbsees racines mais peu de pores visibles.

280-340 : S à SA gris blanch. à vol rges.

340-... : "vase" grise.

Station SE9 - Podzol (altitude: 6,72m).



2- Analyses complètes: Stations SE4, SE7 et SE10.

PROFONDEURS SE.4		***** GRANULOMETRIE (EN %) *****									REFUS A 2 MM	TEXTURE
		A.	LF.	LG.	SF.	SF.	SG.	SG.	SG.			
20	40	17.2	4.6	7.2	56.2	11.1	2.0	1.1	0.6		SA	
50	115	19.1	4.4	6.9	49.2	17.3	1.8	0.8	0.5		SA	
170	VR	17.3	5.2	5.2	58.1	10.1	1.9	1.2	1.0		SA	
170	VG	17.4	5.5	5.0	52.9	14.0	2.5	1.7	1.0		SA	
200	NOD (nodule)	12.7	4.0	5.2	51.9	11.9	3.8	3.4	7.1		SA	
240		9.6	1.0	4.6	64.6	16.7	1.8	1.1	0.6		S	
270		11.1	4.5	6.9	64.8	9.4	2.1	0.9	0.3		S	
360	400	54.2	18.2	5.5	20.3		0.9	0.6	0.3		A	
CALCAIRE		PH	MAT. ORG.	AZOTE	C/N	***CATIONS ECHANGEABLES (MEQ)***				S	CAPACITE ECHANGE	S/T
TOT. %	ACT. %	(EAU)	EN %	P 1000		CA	MG	K	NA			
		4.8		0.58	15.60	0.10	0.07	0.03	0.03	0.23	4.70	4
		4.8		0.35	13.70	0.05	0.31	0.02	0.01	0.39	2.70	14
		4.9				0.10	0.07	0.02	0.03	0.22	2.70	8
		5.0				0.10	0.10	0.02	0.03	0.25	2.70	9
		5.0				0.05	0.13	0.03	0.02	0.23	3.00	7
		4.9				0.05	0.13	0.05	0.03	0.26	3.80	6
		5.0				0.05	0.18	0.05	0.03	0.31	4.30	7
		4.4				0.90	2.50	0.36	0.15	3.91	14.10	27
FER (EN %)		LIB/TOT	P205 (PPM)		ALUMINIUM	DENSITE	***HUMIDITE EN %**			PH	AL	
TOTAL	LIBRE		TOTAL	ASSIM.	ECHANG. LIBRE	APPARENT	C.	R.	H.E.	P. F.	(KCL)	
2.7	2.3	0.8			6.1						4.1	3.0
3.5	2.7	0.7			7.6						4.2	3.4
3.9	3.3	0.8			7.5						4.3	3.4
3.2	2.4	0.7			6.6						4.3	3.6
6.4	6.0	0.9			10.6						4.3	3.9
4.5	3.8	0.8			6.9						4.2	4.4
3.2	2.5	0.7			5.2						4.1	4.9
3.9	2.5	0.6			3.5						3.6	9.9

PROFONDEURS SE.7		***** GRANULOMETRIE (EN %) *****							REFUS	TEXTURE	
		A.	LF.	LG.	SF.	SF.	SG.	SG.	SG.	A 2 MM	
0	20	1.3	0.2	6.9	69.6	15.8	5.0	1.0	0.2		SS
45	65	2.5	0.7	6.1	65.6	16.0	7.1	1.0	1.0		SS
65	70	16.1	10.1	4.0	50.4	14.1	4.9	0.4			SA
70	90	7.6	6.5	6.6	50.4	20.5	7.4	0.8	0.2		S
90	115	19.6	5.0	4.4	47.5	14.8	7.3	1.1	0.3		SA
100	140	14.9	4.8	3.7	43.3	24.3	7.6	1.4			SA
GRI	150	16.0	5.4	4.0	43.9	16.1	8.1	5.4	1.1		SA
RGE	150	10.7	6.2	3.4	40.3	19.4	10.3	7.4	2.3		S
165	180	6.9	2.7	1.4	16.2	14.1	31.8	18.8	8.1		SS
180	190	18.6	15.7	10.1	37.0	9.8	4.0	2.9	1.9		SS
SJE	210	5.5	7.0	3.6	61.9	20.8	0.8	0.2	0.2		SAL
GRI	210	9.9	6.3	6.8	56.6	12.5	3.8	2.8	1.3		SS
200	220	10.7	8.9	6.5	55.2	17.4	1.0	0.3			S

CALCAIRE	PH	MAT.ORG.	AZOTE	C/N	**CATIONS	ECHANGEABLES	(MEQ)**	S	CAPACITE	S/T	
TOT. %	ACT. %	(EAU)	EN %	P 1000	CA	MG	K	NA	ECHANGE		
	5.5				0.50	0.13	0.04	0.02	0.69	0.70	98
	7.1				0.40	0.05	0.02	0.01	0.48	0.50	96
	5.5				0.10	0.04	0.09	0.04	0.27	1.30	20
	5.3				0.01	0.01	0.06	0.03	0.11	3.20	3
	5.0				0.01	0.18	0.04	0.10	0.33	3.40	9
	4.8				0.10	0.23	0.04	0.03	0.40	2.80	14
	4.9				0.01	0.37	0.05	0.04	0.47	3.00	15
	4.9				0.10	0.28	0.04	0.04	0.46	2.30	20
	5.1				0.01	0.15	0.02	0.02	0.20	1.30	15
	5.1				0.01	0.69	0.11	0.06	0.87	5.00	17
	5.1				0.01	0.57	0.08	0.03	0.69	4.30	16
	5.1				0.10	0.50	0.07	0.05	0.72	3.60	20
	5.1				0.10	0.62	0.09	0.04	0.85	4.60	18

FER (EN %)	LIB/TOT	P205 (PPM)	ALUMINIUM	DENSITE	****HUMIDITE EN % **			PH	
TOTAL	LIBRE	TOTAL	ECHANG. LIBRE	APPARENT	C. R.	H.E.	P. F.	(KCL)	AL
0.1	0.1	1.0		0.1				4.5	0.1
0.1	0.1	1.0	20	0.1				6.9	0.1
0.2	0.1	0.5		0.6				4.5	0.6
0.5	0.1	0.2		0.6				4.6	2.7
2.3	1.2	0.5		5.0				4.2	3.9
0.5	0.1	0.2		1.1				4.1	2.9
0.8	0.3	0.3		1.5				4.0	3.6
2.8	1.9	0.6		3.7				4.1	3.2
0.9	0.8	0.8		1.4				4.1	1.4
1.2	0.4	0.3		1.5				3.9	5.6
4.4	3.8	0.8		4.2				4.0	4.3
1.0	4.1	4.1		1.3				4.0	3.8
1.2	0.4	0.3		1.5				4.0	4.7

PROFONDEURS SE.10		***** GRANULOMETRIE (EN %) *****							REFUS	TEXTURE	
		A.	LF.	LG.	SF.	SF.	SG.	SG.	SG.	A 2 MM	
30	70	1.5	1.5	6.2	80.2	9.6	0.8	0.1	0.1		SS
70	90	5.8	3.5	5.1	76.5	7.9	0.8	0.2	0.2		SS
90	100	18.8	5.9	4.2	61.9	8.6	0.5	0.1			SA
100	150	25.3	6.2	4.7	56.9	6.1	0.7	0.1			AS
190	220	23.5	9.5	5.8	52.2	8.1	0.7	0.2			AS

PH	MAT.ORG.	AZOTE	C/N	**CATIONS	ECHANGEABLES	(MEQ)**	S	CAPACITE	S/T	
(EAU)	EN %	P 1000		CA	MG	K	NA	ECHANGE		
6.2	0.50	0.19	15.20	0.30	0.02	0.09	0.03	0.44	0.50	88
5.3	0.31	0.14	12.80	0.10	0.02	0.03	0.02	0.17	0.80	21
4.9	0.22	0.14	9.20	0.10	0.09	0.05	0.04	0.28	3.10	9
5.1				0.20	0.11	0.08	0.09	0.48	4.90	9
5.1				0.20	1.30	0.11	0.15	1.76	5.80	30

FER (EN %)	LIB/TOT	P205 (PPM)	ALUMINIUM	DENSITE	****HUMIDITE EN % **			PH	
TOTAL	LIBRE	TOTAL	ECHANG. LIBRE	APPARENT	C. R.	H.E.	P. F.	(KCL)	AL
0.1	0.1	1.0		0.6				5.4	0.3
0.3	0.1	0.3		1.1				4.7	1.0
1.8	1.3	0.7		2.8				4.0	3.0
6.3	5.6	0.8		6.4				4.0	4.5
4.3	3.6	0.8		4.3				4.0	4.7

SE8 6,55

110	5,50	17,3	12,3	68,4	2,0
130	5,30	15,3	13,6	66,1	5,0
150	5,10	14,4	13,0	61,6	11,0
170	4,90	13,0	13,9	61,5	11,6
200	4,60	9,2	13,6	71,0	6,2
240	4,20	5,9	9,9	56,2	28,0
280	3,80	7,5	11,5	61,8	19,2
320	3,40	15,0	15,9	63,4	5,7
360	3,00	18,0	17,4	60,1	4,5

Planosol faine

30	6,25	1,6	4,8	71,1	22,5
50	6,05	1,4	5,9	69,1	23,6
70	5,85	4,4	8,8	58,4	28,4
90	5,65	10,1	8,7	56,8	24,4
110	5,45	12,0	9,5	61,0	17,5
130	5,25	12,0	12,0	67,9	8,1
150	5,05	11,5	13,1	69,2	6,2
170	4,85	16,1	17,7	62,5	3,7
200	4,55	8,8	12,3	77,3	1,6
240	4,15	5,6	10,1	81,3	3,0
280	3,75	11,8	12,8	72,4	3,0
330	3,25	9,5	14,5	74,2	1,8

SE5 6,62

Planosol faine

30	6,32	3,8	8,1	83,1	5,0
50	6,12	4,4	8,8	82,7	4,1
70	5,92	4,9	9,4	82,2	3,5
90	5,72	7,4	11,3	78,4	2,9
110	5,52	12,4	15,1	70,1	2,4
130	5,32	22,2	10,9	61,2	5,7
150	5,12	16,8	10,7	62,9	9,6
170	4,92	8,2	9,9	57,0	24,9
200	4,62	4,4	5,5	48,8	41,3
240	4,22	6,7	8,9	72,9	11,5
280	3,82	8,2	12,3	66,5	13,0
320	3,42	7,4	13,4	73,6	5,6
360	3,02	12,0	14,1	62,6	11,3

SE9 6,72

Podzol

30	6,42	0,5	4,1	75,4	20,0
50	6,22	2,3	6,4	72,9	18,4
70	6,02	2,1	6,5	74,8	16,6
90	5,82	8,0	13,6	72,0	6,4
110	5,62	11,3	14,9	70,0	3,8
130	5,42	18,2	12,4	66,2	3,2
150	5,22	17,4	11,0	68,7	2,9
170	5,02	19,1	12,5	67,0	1,4
200	4,72	17,8	13,7	67,5	1,0
240	4,32	17,6	13,8	67,4	1,2
300	3,72	16,0	13,3	68,8	1,9
360	3,12	10,8	16,1	72,5	0,6

SE6 6,67

Podzol

30	6,37	1,8	7,6	86,8	3,8
50	6,17	3,2	7,8	83,8	5,2
80	5,87	6,8	13,6	73,8	5,8
100	5,67	11,8	14,0	69,2	5,0
120	5,47	12,8	11,8	67,1	8,3
150	5,17	6,8	10,2	77,3	5,7
180	4,87	2,8	2,5	51,7	43,0
200	4,67	6,3	8,0	76,0	9,7
230	4,37	5,3	11,3	79,4	4,0
250	4,17	5,8	12,7	77,9	3,6
280	3,87	6,5	15,3	73,6	4,6
300	3,67	7,6	11,5	76,6	4,3

S9-10 6,80

30	6,50	0,3	4,1	82,0	13,6
50	6,30	1,0	4,3	84,4	10,3
70	6,10	1,7	7,4	85,1	5,8
90	5,90	8,6	9,7	78,8	2,9
110	5,70	15,7	7,4	74,8	2,1
130	5,50	20,9	8,6	69,6	0,9
150	5,30	20,9	9,2	67,6	2,3
170	5,10	19,9	8,4	70,1	1,6
200	4,80	12,1	15,2	71,6	1,1
240	4,40	20,9	12,4	65,1	1,6
280	4,00	10,4	13,8	74,9	0,9
320	3,60	11,5	13,4	73,6	1,5
340	3,40	10,8	16,1	72,5	0,6

SE7 6,62

SE10 6,86

15	6,47	1,3	7,1	85,4	6,2
30	6,32	0,6	5,5	85,3	8,6
50	6,12	2,5	6,8	81,6	9,1
65	5,97	16,1	14,1	64,5	5,3
80	5,82	7,6	13,1	70,9	8,4
105	5,57	19,6	9,4	62,3	8,7
120	5,42	14,9	8,5	67,6	9,0
140	5,22	16,0	9,4	60,0	14,6
170	4,92	6,9	4,1	30,3	58,7
185	4,77	18,6	25,8	46,8	8,8
210	4,52	9,9	13,1	69,1	7,9
240	4,22	10,0	13,8	69,4	6,8
280	3,82	5,4	9,4	80,1	5,1
320	3,42	11,2	13,3	67,6	7,9
370	2,92	10,7	14,7	70,8	3,8

30	6,56	0,0	3,7	89,0	7,3
50	6,36	0,1	4,6	88,9	6,4
70	6,16	2,8	6,0	85,8	5,4
90	5,96	5,3	7,2	83,8	3,7
110	5,76	17,1	8,6	71,8	2,5
130	5,56	20,8	10,0	67,4	1,8
150	5,36	20,4	9,3	67,8	2,5
170	5,16	19,8	10,1	67,1	3,0
200	4,86	25,6	11,8	60,6	2,0
240	4,46	23,1	12,3	63,2	1,4
280	4,06	19,9	12,9	66,3	0,9
320	3,66	16,8	14,1	67,8	1,3
360	3,26	12,1	13,0	74,0	0,9

GRANULOMETRIE (%)						Transect T2					
Sondage/ Alt.		Arg.	Lim.	Sf	Sg	Sondage/ Alt.		Arg.	Lim.	Sf	Sg
prof(cm) abs.(m)						prof(cm) abs(m)					
<u>S17-T</u>	3,10										
20	2,90	32,0	24,3	42,5	1,2						
40	2,70	16,3	18,0	64,5	1,2	170	4,40	6,1	11,6	71,9	10,4
60	2,50	1,6	7,7	87,6	3,1	200	4,10	8,8	10,7	77,0	3,5
80	2,30	5,3	8,2	83,1	3,4	240	3,70	7,9	10,0	78,3	3,8
100	2,10	7,4	5,0	83,3	4,3	280	3,30	30,2	19,3	48,5	2,0
120	1,90	7,7	4,3	81,5	6,5	320	2,90	21,7	16,9	60,0	1,4
150	1,60	20,0	7,6	46,9	25,5	360	2,50	19,6	15,9	62,6	1,9
160	1,50	35,8	17,7	40,5	6,0						
180	1,30	43,1	18,7	33,5	4,7	<u>SE7</u>	6,62				
200	1,10	51,8	23,5	19,9	4,8	cf transect T1					
220	0,90	46,3	24,9	22,1	6,7						
240	0,70	6,8	13,4	64,2	15,6	<u>SE13</u>	6,54				
<u>SE17</u>	4,28					30	6,24	4,0	6,9	85,2	3,9
30	3,98	2,5	8,0	87,4	2,1	50	6,04	4,9	7,2	84,0	3,9
50	3,78	2,6	7,7	85,6	4,1	70	5,84	7,8	14,0	74,9	3,3
70	3,58	2,3	8,6	85,4	3,7	90	5,64	13,1	12,8	72,2	1,9
90	3,38	7,0	10,1	77,9	5,0	110	5,44	17,1	10,9	69,7	2,3
110	3,18	12,3	10,6	72,5	4,6	130	5,24	12,2	8,8	73,7	5,3
130	2,98	21,1	10,9	64,0	4,0	150	5,04	11,5	11,3	72,8	4,4
150	2,78	34,2	17,0	46,5	2,3	170	4,84	16,1	10,6	68,4	4,9
170	2,58	25,8	14,4	58,7	1,1	200	4,54	17,4	11,7	66,0	4,9
200	2,28	26,4	16,0	56,8	0,8	240	4,14	14,1	10,8	57,6	17,5
240	1,88	61,2	27,5	9,0	2,3	280	3,74	10,9	13,5	69,6	6,0
280	1,48	45,1	22,4	31,5	1,0	320	3,34	11,1	13,7	71,9	3,3
320	1,08	45,7	22,3	29,4	2,6	360	2,94	11,1	13,8	7,2	3,1
360	0,68	29,9	16,5	18,8	34,8	<u>SE14</u>	5,31				
<u>SE18</u>	5,36					30	5,01	6,2	5,1	84,0	4,7
30	5,06	3,0	4,7	89,6	2,7	50	4,81	5,2	5,1	84,4	5,3
50	4,86	4,2	5,2	86,5	4,1	70	4,61	6,8	5,2	82,8	5,2
70	4,66	4,6	7,0	83,0	5,4	90	4,41	11,9	6,6	78,1	3,4
90	4,46	7,9	10,5	77,1	4,5	110	4,21	22,3	8,8	67,3	1,6
110	4,26	6,1	11,3	79,9	2,7	130	4,01	23,2	11,7	63,1	2,0
130	4,06	4,7	11,4	81,9	2,0	150	3,81	24,5	12,4	59,5	3,6
150	3,86	6,1	11,1	82,4	0,5	170	3,61	19,8	15,8	63,5	0,9
170	3,66	4,9	9,9	84,5	0,7	200	3,31	21,2	18,6	59,9	0,3
200	3,36	4,6	8,1	86,9	0,4	240	2,91	34,3	19,9	45,4	0,4
240	2,96	4,9	9,5	84,7	0,9	280	2,51	67,0	25,2	7,7	0,1
280	2,56	5,1	8,3	85,3	1,3	320	2,11	56,8	24,9	17,5	0,8
320	2,16	7,9	8,9	82,5	0,7	360	1,71	30,2	18,8	17,5	33,5
360	1,76	18,4	17,0	63,4	1,2	<u>S14-T</u>	4,00				
<u>S7-18</u>	6,10					20	3,80	36,0	22,6	40,9	0,5
30	5,80	7,4	8,5	80,9	3,2	40	3,60	20,4	15,4	62,4	1,8
50	5,60	9,5	9,5	79,3	1,7	60	3,40	4,8	11,0	82,8	1,4
70	5,40	11,9	10,3	75,8	2,0	80	3,20	17,6	12,9	67,8	1,7
90	5,20	15,2	13,6	69,5	1,7	100	3,00	41,0	15,4	43,1	0,5
110	5,00	13,2	13,0	70,8	3,0	120	2,80	38,2	21,1	39,4	1,3
130	4,80	12,0	13,5	70,9	3,6	140	2,60	49,4	21,6	27,9	1,1
150	4,60	9,5	13,7	69,2	7,6	160	2,40	14,7	30,7	28,9	25,7
						220	1,80	11,0	31,5	22,5	35,0

GRANULOMETRIE (%)						Transect T3					
Sondage/ Alt. Arg.		Lim.	Sf	Sg		Sondage/ Alt. Arg.		Lim.	Sf	Sg	
prof(cm)	abs.(m)					prof(cm)	abs(m)				
<u>S16-T</u>	4,35					200	4,40	12,9	14,6	67,3	5,2
20	4,15	35,7	32,5	31,1	7,0	240	4,00	9,2	15,5	71,2	4,1
40	3,95	26,3	23,2	48,0	2,5	280	3,60	17,0	16,2	62,4	4,4
60	3,75	43,3	18,1	34,3	4,3	320	3,20	9,2	14,2	74,3	2,3
80	3,55	53,3	17,7	24,9	4,1	360	2,80	13,5	15,7	67,7	3,1
100	3,35	60,3	17,7	19,7	2,3						
120	3,15	63,7	18,5	16,3	1,5	<u>S10-15-1</u>	6,80				
140	2,95	63,8	21,5	14,2	0,5	30	6,50	0,4	4,7	80,3	14,6
160	2,75	60,2	22,5	16,3	1,0	50	6,30	1,5	4,7	71,0	22,8
180	2,55	72,4	22,4	4,9	0,3	70	6,10	4,6	6,1	59,7	29,6
200	2,35	66,1	31,4	2,4	0,1	90	5,90	3,8	6,0	47,6	42,6
240	1,95	4,9	6,4	87,4	1,3	110	5,70	2,0	3,6	37,9	56,5
						130	5,50	0,8	3,3	11,7	84,2
<u>SE16</u>	4,70					150	5,30	0,7	2,7	90,0	6,6
30	4,40	0,1	5,9	92,1	1,9	170	5,10	8,9	13,9	72,8	4,4
50	4,20	1,0	4,6	87,9	6,5	200	4,80	6,3	15,6	74,4	3,7
70	4,00	4,1	5,7	85,8	4,4	240	4,40	6,0	15,6	75,9	2,5
90	3,80	29,6	10,8	58,1	1,5	280	4,00	5,9	15,4	76,4	2,3
110	3,60	38,6	12,1	46,5	2,8	320	3,60	6,2	17,2	75,1	1,5
130	3,40	42,6	11,9	43,4	2,1	360	3,20	5,8	14,8	77,3	2,1
150	3,20	27,2	11,5	59,5	1,8						
170	3,00	35,6	12,4	50,0	2,0	<u>SE10</u>	6,86				
200	2,70	41,9	14,2	41,5	2,4	cf. Transect T1					
240	2,30	50,5	23,2	26,0	0,3						
280	1,90	63,1	26,8	8,8	1,3	<u>SE11</u>	6,56				
320	1,50	41,7	24,5	30,2	3,6	30	6,26	1,8	6,0	83,0	9,2
360	1,10	50,0	28,3	18,1	3,6	50	6,06	4,1	5,4	70,9	19,6
						70	5,86	6,8	5,7	61,5	26,0
<u>SE15</u>	6,17					90	5,66	14,1	8,4	56,9	20,6
30	5,87	1,2	5,8	88,0	5,0	110	5,46	23,1	13,9	59,1	3,9
50	5,67	1,8	4,5	85,5	8,2	130	5,26	29,8	16,3	50,6	3,3
70	5,47	3,8	5,6	77,5	13,1	150	5,06	19,0	15,9	63,8	1,3
90	5,27	8,8	5,5	71,0	14,7	170	4,86	19,9	15,2	63,2	1,7
110	5,07	18,8	7,1	64,1	10,0	200	4,56	18,7	18,4	61,7	1,2
130	4,87	22,4	9,3	61,8	6,5	240	4,16	18,2	16,7	63,4	1,7
150	4,67	21,7	10,2	62,6	5,5	280	3,76	14,8	17,7	66,4	1,1
170	4,47	18,4	10,7	64,2	6,7	320	3,36	10,5	19,0	69,7	0,8
200	4,17	15,5	14,2	67,2	31,0	360	2,96	12,8	17,2	69,2	0,8
240	3,77	15,5	13,6	68,7	2,2						
280	3,37	15,5	14,4	68,8	1,3	<u>SE12</u>	5,75				
320	2,97	21,5	16,8	59,5	2,2	30	5,45	5,9	7,3	84,4	2,4
360	2,57	22,7	17,4	57,7	2,2	50	5,25	6,6	7,8	83,5	2,1
						70	5,05	9,2	11,3	77,4	2,1
<u>S10-15-2</u>	6,40					90	4,85	24,7	13,3	59,6	2,4
30	6,10	4,3	7,4	86,8	1,5	110	4,65	28,0	14,1	51,9	6,0
50	5,90	5,7	7,8	84,9	1,6	130	4,45	27,0	13,7	51,2	8,1
70	5,70	7,8	7,9	82,9	1,4	150	4,25	29,3	13,6	51,0	6,1
90	5,50	13,9	10,3	71,3	4,5	170	4,05	28,1	14,9	55,2	1,8
110	5,30	14,4	12,4	70,6	2,6	200	3,75	24,8	15,1	59,8	0,3
130	5,10	11,8	14,7	69,5	4,0	240	3,35	53,6	28,2	16,2	2,0
150	4,90	12,0	14,9	68,1	5,0	280	2,95	54,1	26,6	16,6	2,7
170	4,70	13,2	14,3	66,2	6,3	320	2,55	43,3	33,1	22,5	1,1
80	4,20	31,3	24,8	43,5	0,4	360	2,15	58,2	30,0	9,2	2,6
100	4,00	24,1	21,0	53,9	1,0						
120	3,80	18,8	22,6	57,6	1,4	<u>S12-T</u>	5,00				
140	3,60	19,9	20,1	59,3	0,7	20	4,80	32,3	28,7	38,5	0,5
160	3,40	10,0	12,4	75,2	2,4	40	4,60	27,9	21,1	50,2	0,8
180	3,20	30,7	20,3	45,6	3,4	60	4,40	26,9	21,9	50,4	0,8

4- Densités.

Densité apparente:

Prof.	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8	SE9	SE10
10-15	1,50	1,35		1,35	1,36	1,30	1,35	1,46	1,42	1,40
25-45	1,55	1,40	1,40	1,52	1,43	1,40	1,47	1,51	1,53	1,47
55-75	1,58	1,42	1,42	1,49	1,49	1,35/1,5	1,69	1,58	1,62/1,75	1,59
85-105	1,51	1,47	1,45	1,51	1,45		1,52	1,51	1,48	1,48
110-140	1,66	1,52	1,53		1,45	1,45	1,61	1,45	1,52	1,42
160-180		1,55		1,55	1,5/1,54	1,54	1,64/1,7	1,39	1,46	1,40
200-230		1,42	1,54	1,51	1,48	1,41	1,34		1,29	
240-260				1,49	1,37			1,38		1,32

Densité réelle:

Prof.	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8	SE9	SE10
10-20	2,59	2,64		2,64	2,63		2,64			2,64
20-40	2,65	2,66		2,65	2,65		2,66	2,66	2,65	2,64
55-75	2,66			2,70	2,65		2,69	2,67	2,66	2,65
80-105	2,70	2,69	2,69	2,71	2,72		2,64/2,7	2,72	2,69	2,67/2,7
110-140	2,69	2,72	2,70	2,71			2,70	2,71	2,72	2,73
160-180		2,75		2,71	2,69	2,67	2,69	2,72	2,70	2,74
200-230		2,75	2,70	2,74	2,71	2,72	2,67			2,67
240-260				2,69	2,69			2,72	2,68	2,65

5- Matières organiques et Carbone organique* -meth. Anne (valeurs exprimées en %).

Prof.	SE1	SE2	SE3	SE4	SE7	SE9	SE10
0-20	1,80(1,05*)	1,90(1,11)	4,23(2,46)	4,4(2,6)	0,70	1,97(1,15)	1,18(0,7)
20-40	0,63(0,37)	1,03(0,6)	1,95(1,13)	2,4(1,4)	0,81	0,44(0,26)	0,55(0,3)
50-60	0,34(0,2)	0,8(0,47)	0,96(0,56)	1,3(0,75)	0,67	1,08(0,63)	0,55(0,3)
70-80	0,36(0,21)	0,58(0,34)	0,77(0,45)	0,77(0,45)	0,53	1,13(0,66)	0,37(0,2)
90-100	0,37(0,22)	0,49(0,29)	0,56(0,33)	0,63(0,37)	2,78	0,51(0,3)	0,24(0,14)
100-120	0,34(0,2)	0,43(0,25)	0,58(0,34)	0,61(0,36)	0,31	0,34(0,2)	0,29(0,17)
120-140		0,37(0,22)	0,58(0,34)	0,48(0,28)		0,29(0,17)	0,25(0,15)
140-160		0,27(0,16)	0,44(0,26)	0,61(0,36)			0,3(0,18)

ANNEXE 3

**Humidimétrie neutronique : droites d'étalonnage.
méthodes gravimétrique et CEA-Cadarache**

Droites d'étalonnage

Ecarts-types sur l'estimation de la pente (b) et de l'ordonnée à l'origine (a)

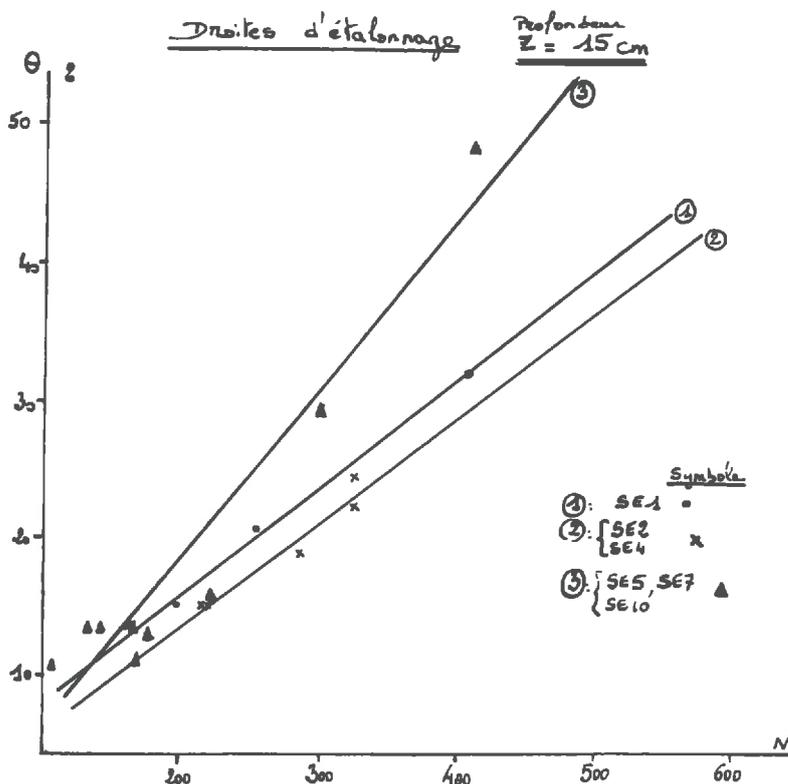
$$\theta = a + b.N$$

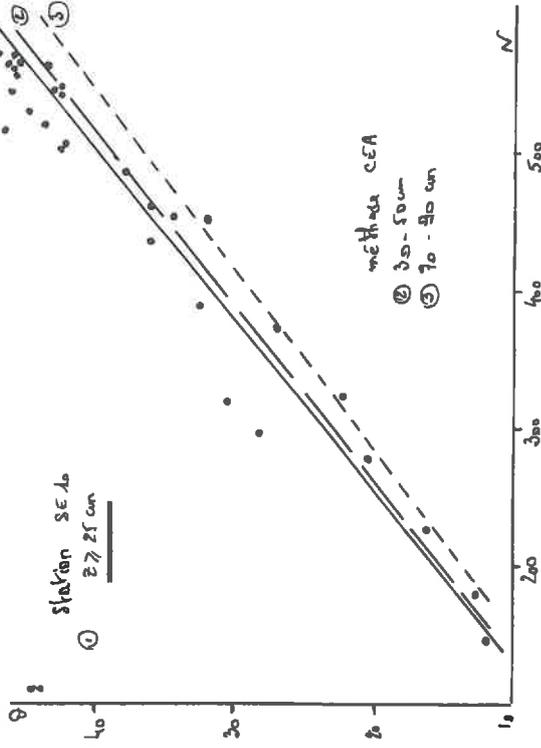
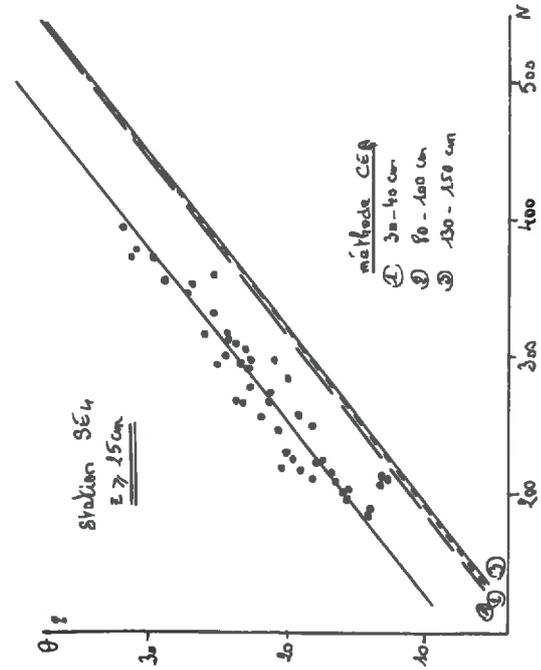
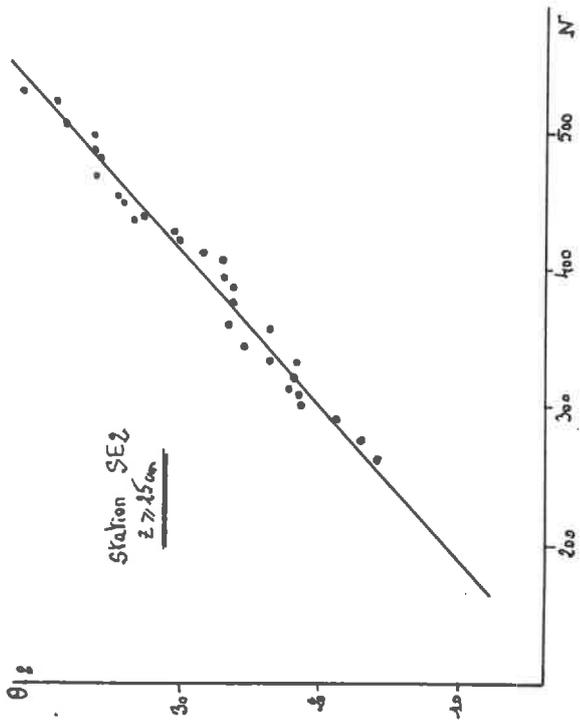
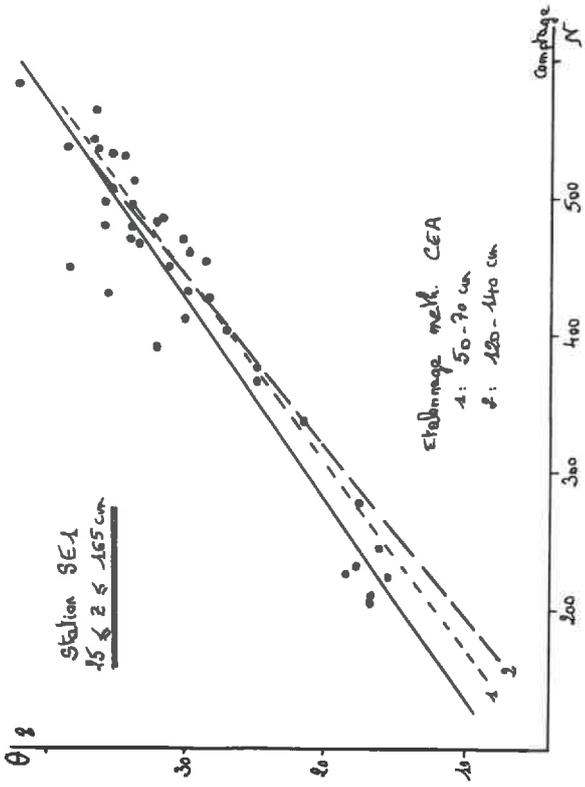
1) Horizons de surface : z = 15 cm

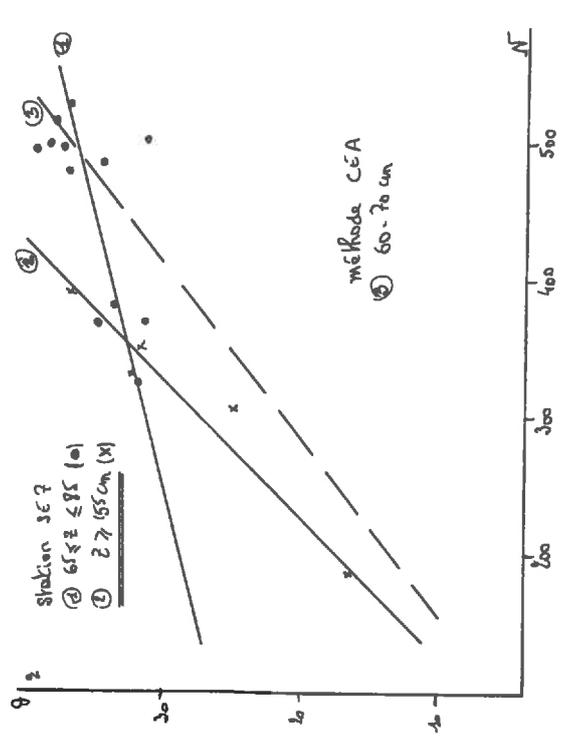
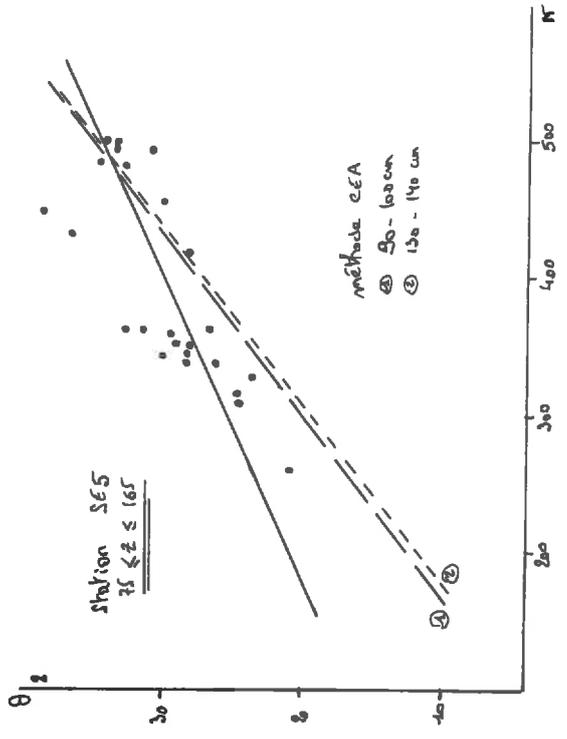
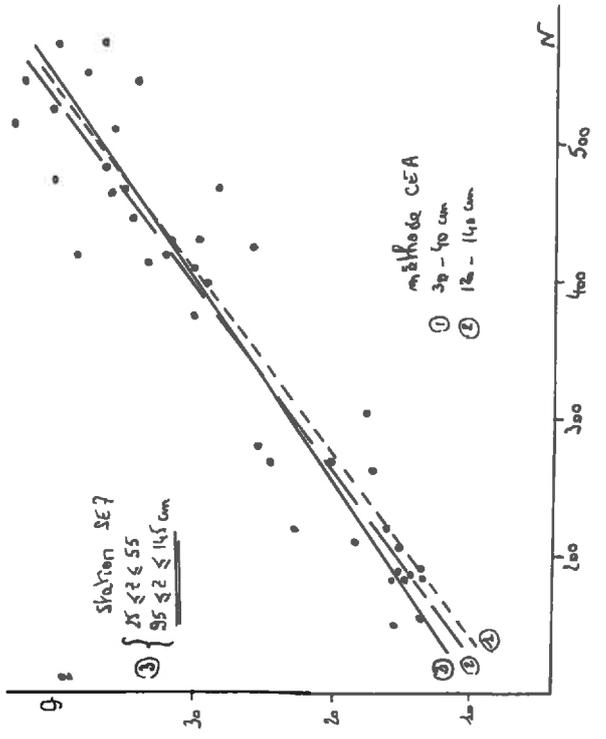
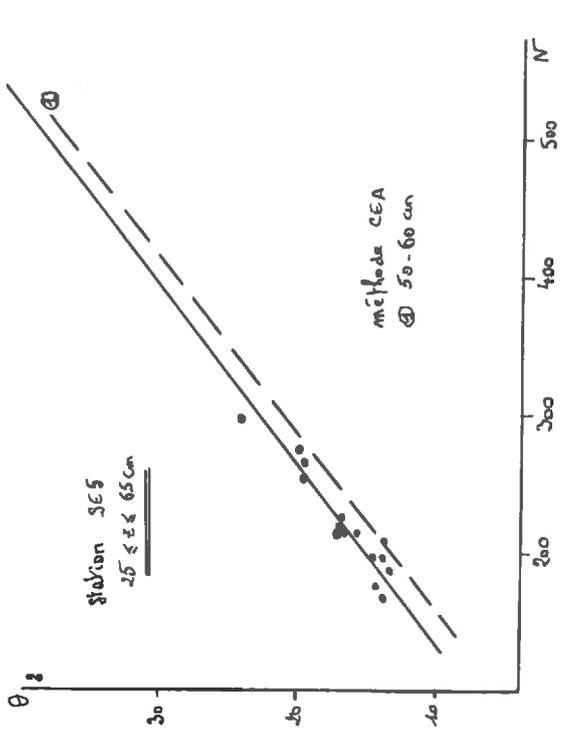
Station	n	a	σ_a	b	σ_b
SE1	3	0,028	1,293	0,0784	0,0043
SE2 SE4	5	-1,520	3,178	0,0750	0,0114
SE5 SE7 SE10	10	-6,445	2,658	0,1241	0,0123

2) Profondeurs > à z = 15 cm

Station	n	a	σ_a	b	σ_b
SE1 (z > 25 cm)	40	0,715	1,725	0,0696	0,0039
SE2 (z > 25 cm)	30	-6,620	1,090	0,0890	0,0027
SE4 (z > 25 cm)	45	0,144	1,158	0,0784	0,0041
SE5 (25 ≤ z ≤ 65)	15	-0,274	1,620	0,0770	0,0073
(75 ≤ z ≤ 165)	25	11,801	2,962	0,0461	0,0074
SE7 (25 ≤ z ≤ 65)	40	2,788	1,411	0,0686	0,0037
(25 ≤ z ≤ 65)					
(25 ≤ z ≤ 65)	12	23,618	4,418	0,0256	0,0097
(25 ≤ z ≤ 65)	5	-2,465	4,405	0,0991	0,0138
SE10 (z > 25 cm)	31	-0,302	1,606	0,0806	0,0034







ANNEXE 4

Relevés pluviométriques et piézométriques.

**Pluviométrie
(mm)**

Année 1983

jour P

01oct83	0	22nov83	0.2	16jan84	5.5	14mar84	0.2	11may84	55
02oct83	0	23nov83	0	17jan84	34.5	15mar84	0	12may84	17
03oct83	0	24nov83	0	18jan84	55.8	16mar84	0	13may84	0.9
04oct83	0.5	25nov83	0	19jan84	33.8	17mar84	0	14may84	122
05oct83	0	26nov83	0.2	20jan84	8.5	18mar84	3.4	15may84	5.5
06oct83	0.7	27nov83	0.2	21jan84	29.5	19mar84	0.5	16may84	4.6
07oct83	0	28nov83	0	22jan84	10.8	20mar84	0	17may84	5.8
08oct83	0	29nov83	10	23jan84	53	21mar84	0	18may84	14
09oct83	0	30nov83	5.6	24jan84	8.5	22mar84	0.4	19may84	3.2
10oct83	0	01dec83	4.3	25jan84	0.6	23mar84	9.5	20may84	1.3
11oct83	0	02dec83	1.7	26jan84	49.8	24mar84	58	21may84	7.3
12oct83	0	03dec83	0	27jan84	119	25mar84	206	22may84	7.5
13oct83	0	04dec83	1.8	28jan84	4.8	26mar84	16	23may84	70
14oct83	0	05dec83	11.2	29jan84	7	27mar84	4.5	24may84	16
15oct83	5.5	06dec83	10.8	30jan84	3.7	28mar84	10.2	25may84	30
16oct83	0	07dec83	7.3	31jan84	0.2	29mar84	8	26may84	43
17oct83	0.8	08dec83	18.5	01feb84	2.8	30mar84	12	27may84	13
18oct83	7.4	09dec83	1.5	02feb84	0.3	31mar84	1.5	28may84	4.2
19oct83	0.3	10dec83	0	03feb84	6	01apr84	0.4	29may84	29
20oct83	0.2	11dec83	0	04feb84	1.5	02apr84	0	30may84	1.5
21oct83	0	12dec83	0.2	05feb84	2	03apr84	4.3	31may84	51
22oct83	0	13dec83	1.8	06feb84	0.4	04apr84	0	01jun84	1.3
23oct83	0	14dec83	6	07feb84	1	05apr84	0	02jun84	31
24oct83	10.3	15dec83	1.6	08feb84	0.3	06apr84	0.5	03jun84	41
25oct83	3	16dec83	18.6	09feb84	2	07apr84	0	04jun84	36
26oct83	0.3	17dec83	0	10feb84	8	08apr84	0.2	05jun84	38
27oct83	0.2	18dec83	0.4	11feb84	32	09apr84	11	06jun84	2.5
28oct83	0	19dec83	11	12feb84	0.5	10apr84	0	07jun84	0
29oct83	0	20dec83	1.4	13feb84	0.2	11apr84	10.8	08jun84	9
30oct83	0.2	21dec83	17.5	14feb84	0	12apr84	3.5	09jun84	0.5
31oct83	0.3	22dec83	0.4	15feb84	1	13apr84	19	10jun84	5
01nov83	0	23dec83	1.5	16feb84	7.3	14apr84	50	11jun84	1.5
02nov83	0.6	24dec83	6	17feb84	6.5	15apr84	5.5	12jun84	26
03nov83	5	25dec83	24	18feb84	0	16apr84	4	13jun84	10.3
04nov83	0	26dec83	6	19feb84	1.5	17apr84	7.5	14jun84	0.6
05nov83	3.8	27dec83	18	20feb84	0	18apr84	4.5	15jun84	0
06nov83	0	28dec83	57	21feb84	1.5	19apr84	4.3	16jun84	0
07nov83	1.3	29dec83	7.3	22feb84	0.4	20apr84	3.4	17jun84	2.4
08nov83	0	30dec83	1.8	23feb84	0	21apr84	4.5	18jun84	43
09nov83	0.2	31dec83	9.8	24feb84	0.5	22apr84	5.5	19jun84	3
10nov83	0			25feb84	0	23apr84	7.5	20jun84	54
11nov83	0			26feb84	0.5	24apr84	17.3	21jun84	0.5
12nov83	0			27feb84	5.7	25apr84	0.5	22jun84	6.5
13nov83	2.5			28feb84	1.2	26apr84	1.4	23jun84	21
14nov83	0			29feb84	0	27apr84	91	24jun84	2.5
15nov83	0.3			01mar84	1	28apr84	68	25jun84	18
16nov83	0			02mar84	1	29apr84	12	26jun84	1.3
17nov83	0.4			03mar84	2	30apr84	0.5	27jun84	18
18nov83	0			04mar84	0.9	01may84	0	28jun84	13.7
19nov83	0			05mar84	1.5	02may84	0	29jun84	1.4
20nov83	0			06mar84	0.4	03may84	0	30jun84	15.8
21nov83	0.3			07mar84	0.4	04may84	6.5	01jul84	2.8
				08mar84	0	05may84	7.8	02jul84	7
				09mar84	0	06may84	6.5	03jul84	2.8
				10mar84	0.5	07may84	2	04jul84	2.5
				11mar84	1.2	08may84	69	05jul84	0.7
				12mar84	4.5	09may84	59	06jul84	5
				13mar84	0.8	10may84	63	07jul84	8.5

Année 1984

08jul84	15	04sep84	4	01nov84	75	29dec84	19.5	22feb85	5.5
09jul84	1	05sep84	7.5	02nov84	42.5	30dec84	2.5	23feb85	1.9
10jul84	6.5	06sep84	21	03nov84	0	31dec84	1.5	24feb85	3.4
11jul84	0.3	07sep84	0	04nov84	8			25feb85	19.6
12jul84	15	08sep84	0	05nov84	0			26feb85	15.1
13jul84	0.5	09sep84	0	06nov84	0			27feb85	17
14jul84	1.9	10sep84	13	07nov84	1.5			28feb85	0.9
15jul84	2.1	11sep84	0	08nov84	0	01jan85	0	01mar85	2.7
16jul84	5.6	12sep84	5	09nov84	2.2	02jan85	0	02mar85	17.3
17jul84	35	13sep84	10	10nov84	0	03jan85	2	03mar85	1
18jul84	1.7	14sep84	0	11nov84	0	04jan85	1.5	04mar85	2
19jul84	0.7	15sep84	0	12nov84	0	05jan85	25	05mar85	0.5
20jul84	4.5	16sep84	20	13nov84	0	06jan85	4	06mar85	10
21jul84	3.5	17sep84	0	14nov84	3.3	07jan85	2.5	07mar85	1
22jul84	0.3	18sep84	2	15nov84	0.5	08jan85	2.5	08mar85	3.5
23jul84	27	19sep84	0	16nov84	14.2	09jan85	0	09mar85	1
24jul84	3.5	20sep84	7.6	17nov84	0	10jan85	36.5	10mar85	14
25jul84	6.5	21sep84	0	18nov84	9	11jan85	9	11mar85	27
26jul84	8.5	22sep84	0	19nov84	15.5	12jan85	3.5	12mar85	17
27jul84	0.8	23sep84	2	20nov84	0	13jan85	1.5	13mar85	0.6
28jul84	3	24sep84	0	21nov84	1	14jan85	0	14mar85	0.5
29jul84	0	25sep84	0	22nov84	5.5	15jan85	0	15mar85	35
30jul84	15.8	26sep84	26	23nov84	1	16jan85	9	16mar85	9.5
31jul84	0.5	27sep84	1.7	24nov84	38.5	17jan85	1.5	17mar85	0.4
01aug84	0	28sep84	0	25nov84	0	18jan85	0	18mar85	6.7
02aug84	3	29sep84	0	26nov84	9	19jan85	2	19mar85	0
03aug84	0	30sep84	0	27nov84	22	20jan85	3	20mar85	0
04aug84	11.5	01oct84	0.5	28nov84	0	21jan85	1.2	21mar85	0
05aug84	4.5	02oct84	6.5	29nov84	4	22jan85	1	22mar85	0
06aug84	0	03oct84	3.5	30nov84	10	23jan85	0	23mar85	16.7
07aug84	10.5	04oct84	29	01dec84	37.5	24jan85	0.5	24mar85	53.9
08aug84	0.7	05oct84	0	02dec84	0.5	25jan85	0	25mar85	1.8
09aug84	0.3	06oct84	0	03dec84	13	26jan85	1	26mar85	16.5
10aug84	0	07oct84	4.8	04dec84	15.5	27jan85	0	27mar85	0
11aug84	0	08oct84	11	05dec84	42.2	28jan85	0	28mar85	8.3
12aug84	3.6	09oct84	2.5	06dec84	49	29jan85	0	29mar85	13.2
13aug84	0.3	10oct84	2.3	07dec84	40.5	30jan85	0	30mar85	1.9
14aug84	26	11oct84	11.5	08dec84	28.5	31jan85	3.3	31mar85	0
15aug84	3.2	12oct84	0.5	09dec84	3	01feb85	1.8	01apr85	0
16aug84	0	13oct84	1	10dec84	4	02feb85	0.8	02apr85	0
17aug84	0	14oct84	22.5	11dec84	0.5	03feb85	0	03apr85	9.5
18aug84	0.3	15oct84	4	12dec84	27	04feb85	0	04apr85	22.5
19aug84	2	16oct84	3.5	13dec84	16.5	05feb85	2	05apr85	8.1
20aug84	3.4	17oct84	0	14dec84	11	06feb85	12.7	06apr85	0
21aug84	0	18oct84	0	15dec84	22.5	07feb85	1	07apr85	6.9
22aug84	18.7	19oct84	0	16dec84	0	08feb85	0	08apr85	0.5
23aug84	1.3	20oct84	0	17dec84	0	09feb85	0	09apr85	12.5
24aug84	0	21oct84	0	18dec84	0	10feb85	0	10apr85	7.5
25aug84	0	22oct84	4.4	19dec84	24	11feb85	0	11apr85	9.5
26aug84	1.4	23oct84	4	20dec84	69	12feb85	5.1	12apr85	88.5
27aug84	25	24oct84	6	21dec84	27	13feb85	5.3	13apr85	2
28aug84	10.3	25oct84	2.7	22dec84	0	14feb85	3	14apr85	11
29aug84	0.2	26oct84	2.5	23dec84	0	15feb85	4.1	15apr85	3.6
30aug84	0.8	27oct84	20.5	24dec84	1.5	16feb85	0	16apr85	5
31aug84	0	28oct84	19	25dec84	0.5	17feb85	0	17apr85	2.5
01sep84	0	29oct84	10	26dec84	0	18feb85	1	18apr85	2.5
02sep84	22.5	30oct84	5	27dec84	10	19feb85	6.4	19apr85	0.3
03sep84	21	31oct84	2.5	28dec84	31	20feb85	10.3	20apr85	6
						21feb85	0.7		

Année 1985

21apr85	0	18jun85	2	15aug85	3	12oct85	0	09dec85	40
22apr85	0.5	19jun85	4	16aug85	0	13oct85	0	10dec85	8
23apr85	2	20jun85	25.2	17aug85	2.9	14oct85	30	11dec85	20
24apr85	2	21jun85	5.5	18aug85	2.9	15oct85	0	12dec85	8
25apr85	1	22jun85	7.8	19aug85	0	16oct85	0.4	13dec85	30
26apr85	0.6	23jun85	6.5	20aug85	2.1	17oct85	0.4	14dec85	10
27apr85	0	24jun85	44.1	21aug85	3.5	18oct85	0	15dec85	20
28apr85	1.2	25jun85	14	22aug85	0	19oct85	1.4	16dec85	3
29apr85	0.5	26jun85	52.8	23aug85	0	20oct85	10.2	17dec85	8
30apr85	1	27jun85	4.8	24aug85	11	21oct85	5.1	18dec85	3
01may85	0	28jun85	0.4	25aug85	0.3	22oct85	25.5	19dec85	0.8
02may85	0	29jun85	11.9	26aug85	0	23oct85	24.5	20dec85	2
03may85	4	30jun85	21.7	27aug85	7.2	24oct85	0	21dec85	20
04may85	15	01jul85	20	28aug85	0.4	25oct85	2.0	22dec85	8
05may85	1.5	02jul85	3.1	29aug85	0	26oct85	22	23dec85	0.8
06may85	2	03jul85	12.3	30aug85	0	27oct85	0	24dec85	2
07may85	2	04jul85	0.4	31aug85	0	28oct85	0	25dec85	8
08may85	1	05jul85	5	01sep85	0	29oct85	0	26dec85	0.8
09may85	3.5	06jul85	14	02sep85	0	30oct85	0	27dec85	0.6
10may85	0	07jul85	0	03sep85	1	31oct85	0	28dec85	60
11may85	0	08jul85	0	04sep85	1.2	01nov85	0.6	29dec85	8
12may85	2.3	09jul85	0	05sep85	1.6	02nov85	0.3	30dec85	8
13may85	1	10jul85	0.5	06sep85	0	03nov85	2	31dec85	20
14may85	27.6	11jul85	6.4	07sep85	1.3	04nov85	0.8		
15may85	35.6	12jul85	1.8	08sep85	0.4	05nov85	3		
16may85	8.4	13jul85	12.5	09sep85	1.6	06nov85	10		
17may85	5.7	14jul85	19	10sep85	0	07nov85	0.3	01jan86	0.6
18may85	2.5	15jul85	31.7	11sep85	0	08nov85	8	02jan86	0.5
19may85	5.3	16jul85	0	12sep85	0	09nov85	3	03jan86	0.4
20may85	27.2	17jul85	0.3	13sep85	0	10nov85	0.8	04jan86	2.7
21may85	68.3	18jul85	0.4	14sep85	0	11nov85	0.3	05jan86	0.4
22may85	14.5	19jul85	0.2	15sep85	0	12nov85	0.7	06jan86	11
23may85	38	20jul85	0	16sep85	3	13nov85	0.2	07jan86	3.1
24may85	28	21jul85	2.3	17sep85	0	14nov85	0.3	08jan86	3.1
25may85	10	22jul85	27.5	18sep85	0	15nov85	0.4	09jan86	3
26may85	8.9	23jul85	4.5	19sep85	0	16nov85	2	10jan86	7
27may85	6.5	24jul85	1.1	20sep85	0	17nov85	0.3	11jan86	13.5
28may85	13.6	25jul85	14.2	21sep85	0	18nov85	0.8	12jan86	5
29may85	70	26jul85	0.3	22sep85	0	19nov85	2	13jan86	0
30may85	18.5	27jul85	15	23sep85	0	20nov85	0.2	14jan86	5
31may85	27.6	28jul85	3.8	24sep85	0	21nov85	0.3	15jan86	10
01jun85	14	29jul85	0.4	25sep85	0	22nov85	0.4	16jan86	3
02jun85	34.5	30jul85	0.5	26sep85	0	23nov85	10	17jan86	1.5
03jun85	5	31jul85	0.4	27sep85	0.7	24nov85	10	18jan86	40.1
04jun85	3	01aug85	37.5	28sep85	0	25nov85	20	19jan86	48.5
05jun85	8.8	02aug85	13	29sep85	2.2	26nov85	4	20jan86	13.4
06jun85	23	03aug85	0	30sep85	0	27nov85	0.4	21jan86	2.2
07jun85	37.8	04aug85	0	01oct85	0	28nov85	8	22jan86	9.6
08jun85	30.6	05aug85	0.2	02oct85	0.4	29nov85	20	23jan86	10.1
09jun85	12.4	06aug85	24.7	03oct85	1	30nov85	50	24jan86	14.2
10jun85	0.9	07aug85	1.1	04oct85	0	01dec85	30	25jan86	51.1
11jun85	15	08aug85	17.8	05oct85	0	02dec85	20	26jan86	8.5
12jun85	2.1	09aug85	2.5	06oct85	3.3	03dec85	0.9	27jan86	0.9
13jun85	2.7	10aug85	60.1	07oct85	0	04dec85	70	28jan86	0.5
14jun85	5	11aug85	7.4	08oct85	0	05dec85	20	29jan86	0
15jun85	2.5	12aug85	25.7	09oct85	0	06dec85	60	30jan86	3.7
16jun85	29.5	13aug85	0	10oct85	0	07dec85	2	31jan86	0
17jun85	0	14aug85	42.5	11oct85	0	08dec85	90	01feb86	14

Année 1986

02feb86	2	01apr86	2	29may86	18.6	26jul86	7.0	22sep86	0
03feb86	27	02apr86	0.7	30may86	5.5	27jul86	2.0	23sep86	0
04feb86	20.7	03apr86	0.7	31may86	51.8	28jul86	1.5	24sep86	0
05feb86	27	04apr86	0	01jun86	14.0	29jul86	2.0	25sep86	0
06feb86	15.5	05apr86	1.7	02jun86	23.8	30jul86	11.5	26sep86	7
07feb86	26.3	06apr86	0.9	03jun86	12.6	31jul86	1.5	27sep86	0.5
08feb86	0.4	07apr86	0.5	04jun86	115.0	01aug86	5.0	28sep86	0.5
09feb86	4.5	08apr86	9.3	05jun86	4.6	02aug86	0	29sep86	8.5
10feb86	0	09apr86	4.5	06jun86	74.6	03aug86	0	30sep86	1
11feb86	9.6	10apr86	2.1	07jun86	10.2	04aug86	1.0	01oct86	1
12feb86	4.1	11apr86	0	08jun86	12.3	05aug86	3.5	02oct86	1
13feb86	1	12apr86	8.1	09jun86	1.1	06aug86	0.5	03oct86	0
14feb86	3.5	13apr86	4.5	10jun86	0	07aug86	0	04oct86	1
15feb86	1.8	14apr86	3.6	11jun86	2.8	08aug86	6.0	05oct86	0
16feb86	0.5	15apr86	6.4	12jun86	13.2	09aug86	8.0	06oct86	0
17feb86	0	16apr86	0	13jun86	0.5	10aug86	8.0	07oct86	0
18feb86	7	17apr86	7.5	14jun86	9.0	11aug86	2.5	08oct86	1
19feb86	2	18apr86	1.6	15jun86	43.5	12aug86	7.5	09oct86	0
20feb86	2.2	19apr86	1.5	16jun86	3.3	13aug86	16.0	10oct86	29.5
21feb86	4	20apr86	0.4	17jun86	2.2	14aug86	22.5	11oct86	0.5
22feb86	0	21apr86	1.4	18jun86	12.3	15aug86	8.5	12oct86	0
23feb86	4.6	22apr86	2	19jun86	12.7	16aug86	2.0	13oct86	0
24feb86	45.8	23apr86	0.4	20jun86	23.8	17aug86	0.5	14oct86	0
25feb86	6.7	24apr86	1	21jun86	8.0	18aug86	0.5	15oct86	0
26feb86	2.9	25apr86	0	22jun86	4.9	19aug86	6.5	16oct86	0
27feb86	4.4	26apr86	0	23jun86	17.6	20aug86	14.0	17oct86	0
28feb86	1.7	27apr86	0	24jun86	18.4	21aug86	0.5	18oct86	0
01mar86	0	28apr86	1.5	25jun86	12.3	22aug86	0	19oct86	0
02mar86	0.5	29apr86	3	26jun86	6.0	23aug86	0	20oct86	0
03mar86	0	30apr86	0	27jun86	12.5	24aug86	7.5	21oct86	0
04mar86	9.6	01may86	16.5	28jun86	8.4	25aug86	0	22oct86	0
05mar86	5	02may86	8.7	29jun86	49.6	26aug86	0	23oct86	0
06mar86	0	03may86	1.8	30jun86	30.7	27aug86	0.5	24oct86	0
07mar86	0.4	04may86	4.8	01jul86	0	28aug86	0	25oct86	0
08mar86	3.2	05may86	3.2	02jul86	7.0	29aug86	0	26oct86	0
09mar86	1.3	06may86	22.0	03jul86	12.3	30aug86	0.5	27oct86	0
10mar86	0	07may86	2.0	04jul86	2.3	31aug86	0	28oct86	0
11mar86	0	08may86	0	05jul86	2.0	01sep86	0	29oct86	0
12mar86	0	09may86	2.7	06jul86	0	02sep86	0	30oct86	0
13mar86	31.5	10may86	18.0	07jul86	8.3	03sep86	0	31oct86	9.5
14mar86	68	11may86	11.1	08jul86	27.3	04sep86	0	01nov86	0.5
15mar86	10.8	12may86	0	09jul86	1.4	05sep86	1.5	02nov86	0.5
16mar86	1.4	13may86	0	10jul86	14.3	06sep86	0.5	03nov86	0
17mar86	0.4	14may86	0.4	11jul86	0.5	07sep86	0	04nov86	6.5
18mar86	3.7	15may86	21.3	12jul86	2.0	08sep86	0	05nov86	0
19mar86	0	16may86	51.2	13jul86	1.1	09sep86	1.0	06nov86	0
20mar86	13.5	17may86	5.8	14jul86	0.5	10sep86	0	07nov86	1
21mar86	3.7	18may86	63.5	15jul86	0.6	11sep86	0.5	08nov86	1
22mar86	0.4	19may86	0	16jul86	53.6	12sep86	0	09nov86	0.5
23mar86	0.6	20may86	21.0	17jul86	0	13sep86	0	10nov86	1
24mar86	0	21may86	7.5	18jul86	25.5	14sep86	1.0	11nov86	0
25mar86	2.3	22may86	6.9	19jul86	26.3	15sep86	0	12nov86	0.5
26mar86	7.7	23may86	6.2	20jul86	0	16sep86	0	13nov86	7.5
27mar86	0.4	24may86	80.0	21jul86	2.4	17sep86	0	14nov86	22.5
28mar86	0.7	25may86	16.6	22jul86	1.3	18sep86	0	15nov86	0
29mar86	4.6	26may86	2.6	23jul86	2.5	19sep86	0	16nov86	5
30mar86	4.6	27may86	11.6	24jul86	2.8	20sep86	0	17nov86	6
31mar86	13.4	28may86	14.0	25jul86	8.0	21sep86	1	18nov86	4

Piezométrie (cotes absolues en cm) . : eau absente; ? : donnée manquante

Années 1983 et 1984

jour	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8	SE9	SE10	SE11	SE12	SE13	SE14	SE15	SE16	SE17	SE18
09dec83	125	150	195	.	378	383	387	389	424	436	427	382	397	303	.	.	.	.
13dec83	130	136	.	.	.	.	385	400	443	456	427	391	.	312	.	.	.	.
20dec83	134	138	.	.	.	.	388	.	461	473	419	402	399	316	404	279	243	287
23dec83	134	138	.	.	.	.	388	414	463	476	425	405	.	316	410	314	257	287
31dec83	223	206	203	.	.	.	415	530	582	618	579	491	414	404	533	448	379	377
04jan84	224	222	213	.	382	424	471	538	587	620	575	485	486	408	527	423	364	403
11jan84	265	251	229	378	408	457	504	578	658	670	640	515	509	429	581	458	410	431
16jan84	277	293	300	406	479	552	597	620	659	674	648	515	590	448	586	454	413	479
27jan84	308	398	398	544	656	648	663	651	669	682	655	566	649	513	608	459	427	535
02feb84	283	331	405	551	608	642	649	631	650	669	647	517	612	456	579	449	404	516
08feb84	236	278	347	502	558	579	577	568	589	626	576	485	556	428	522	385	352	452
15feb84	227	258	317	474	538	564	565	558	579	610	564	478	540	420	516	381	345	441
27feb84	206	231	282	433	506	533	541	534	555	585	543	463	513	404	498	360	325	416
09mar84	189	210	257	401	481	509	521	514	537	558	524	453	491	391	479	343	308	394
28mar84	282	325	381	474	591	627	626	624	654	669	646	514	594	454	577	446	413	511
19apr84	235	259	317	435	528	566	581	581	625	654	605	500	549	429	542	419	375	455
02may84	251	304	398	504	574	602	603	593	612	646	617	502	577	443	543	417	384	488
16may84	297	377	474	578	642	663	658	640	661	669	648	535	639	483	596	459	428	533
04jun84	290	332	428	553	637	666	663	646	669	674	653	541	640	470	598	462	430	536
13jun84	254	298	394	515	569	594	607	595	631	655	625	511	568	442	551	435	393	487
19jul84	240	274	354	473	540	567	575	569	613	647	586	497	545	432	543	428	381	475
10aug84	221	254	333	444	517	546	553	544	572	618	564	480	522	422	520	392	356	445
30aug84	240	261	315	414	512	561	590	596	641	666	635	510	541	433	574	447	410	478
18sep84	241	263	314	.	503	557	584	594	632	659	635	511	541	431	564	442	391	467
09nov84	233	273	342	418	515	567	576	568	587	631	585	490	547	428	523	398	359	451
26nov84	256	276	319	399	517	590	633	633	654	669	644	520	585	445	589	452	416	502
17dec84	293	366	458	571	636	659	657	639	665	672	647	532	637	480	596	457	429	533

Année 1985

jour	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8	SE9	SE10	SE11	SE12	SE13	SE14	SE15	SE16	SE17	SE18
08jan85	261	307	342	485	564	606	641	630	648	664	641	516	582	450	579	448	413	513
24jan85	232	280	314	457	530	560	564	552	574	603	561	487	535	428	510	390	357	449
12feb85	208	240	277	407	479	510	524	517	539	557	525	459	490	405	480	349	313	405
27feb85	257	252	266	380	455	501	526	543	570	622	562	497	484	427	518	441	393	441
13mar85	262	265	274	378	461	516	546	578	622	661	628	517	503	439	572	458	420	482
26mar85	256	272	282	389	479	536	577	604	659	670	645	523	532	440	599	455	420	493
03apr85	224	256	284	398	483	528	554	556	583	613	567	489	518	421	523	401	349	437
04apr85	255	256	284	396	481	527	554	589	658	677	637	530	518	437	599	454	410	487
05apr85	264	281	287	396	482	541	589	620	665	669	646	526	542	445	597	458	421	499
09apr85	241	281	290	401	497	551	584	596	637	660	628	507	545	436	573	444	395	473
10apr85	243	278	291	403	496	547	585	618	659	676	647	527	543	438	598	447	410	494
12apr85	255	281	291	403	497	555	598	624	666	674	648	527	556	446	600	460	422	499
17apr85	244	286	307	422	522	583	613	628	646	671	635	517	577	446	593	450	409	502
18apr85	242	285	306	422	520	580	608	611	635	661	619	510	568	443	572	449	400	489
22apr85	233	275	297	418	510	567	587	581	627	651	600	500	552	435	557	446	387	470
26apr85	226	268	288	410	502	552	571	563	582	629	575	491	537	429	527	416	361	451
30apr85	220	261	281	401	492	541	559	551	571	605	557	481	524	423	515	389	347	438
06may85	227	254	275	388	478	525	545	550	564	666	597	483	506	421	562	416	375	497
13may85	213	238	264	374	468	520	542	536	559	586	543	469	501	411	504	380	334	418
15may85	224	238	262	372	466	517	541	542	565	626	558	481	498	416	522	427	368	433
17may85	264	259	270	374	473	548	601	621	664	671	646	523	533	443	599	458	421	501

21may85	264	270	282	388	502	578	626	648	668	678	652	536	577	454	609	459	425	527
23may85	293	312	324	407	553	649	661	645	669	674	652	542	641	483	604	462	428	534
31may85	295	337	381	481	644	668	663	649	667	677	650	547	645	496	605	462	430	535
06jun85	287	315	403	506	635	665	663	649	668	677	653	546	641	481	606	459	428	535
10jun85	298	349	416	549	645	666	662	645	668	674	652	537	643	487	602	462	430	536
14jun85	279	315	377	524	613	656	659	644	665	674	650	533	623	470	602	460	427	534
24jun85	267	297	347	495	584	636	652	643	663	677	650	531	602	458	602	459	426	532
08jul85	255	286	334	486	558	583	597	587	614	655	599	508	562	443	546	440	391	487
15jul85	243	267	313	458	532	559	568	557	584	627	574	492	538	432	521	420	363	449
29jul85	244	258	294	418	504	541	556	555	587	629	567	494	521	427	535	439	379	454
05aug85	250	267	285	411	513	563	588	598	631	660	621	508	547	433	568	442	400	530
14aug85	248	289	309	435	548	625	652	639	658	670	644	524	607	459	594	459	424	531
20aug85	236	?	?	424	?	?	625	?	?	652	?	?	?	?	?	?	?	?
09sep85	222	246	267	388	479	525	543	540	566	601	604	483	508	415	512	397	351	435
19sep85	202	233	255	374	460	403	523	518	544	563	525	458	488	402	490	358	320	409
30sep85	186	211	239	376	440	480	501	496	521	543	503	444	468	386	471	342	307	390
07oct85	177	202	229	.	430	470	490	486	511	527	492	435	458	376	458	330	297	376
15oct85	210	210	226	.	416	458	481	493	518	563	492	451	446	384	478	373	342	416
25oct85	225	225	224	.	408	461	498	524	554	593	528	469	457	398	498	417	367	418
31oct85	214	237	246	372	447	513	541	547	577	604	556	473	505	406	508	393	349	425
06nov85	215	227	243	377	450	503	536	548	582	628	559	474	496	401	523	442	371	429
13nov85	200	220	235	372	439	493	523	525	550	572	531	458	488	394	492	374	329	404
04dec85	258	?	?	.	424	497	545	614	664	671	660	568	500	413	586	460	415	472
19dec85	?	?	?	374	?	?	588	?	?	630	?	?	?	?	?	?	369	?
20dec85	224	.	.	376	?	?	585	?	?	622	?	?	?	?	?	?	363	?
24dec85	216	?	?	406	?	?	574	?	?	607	?	?	?	?	?	?	347	?

Année 1986

jour	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8	SE9	SE10	SE11	SE12	SE13	SE14	SE15	SE16	SE17	SE18
07jan86	?	?	?	424	?	?	641	?	?	.	?	?	?	?	?	?	421	?
08jan86	243	269	295	423	543	594	623	618	642	666	638	?	572	449	580	451	407	504
09jan86	?	?	?	422	538	586	610	607	634	665	629	?	?	?	574	?	403	?
15jan86	237	?	?	412	563	569	582	579	?	636	616	?	?	?	?	?	378	?
17jan86	?	?	?	409	?	?	588	?	?	?	?	?	?	?	?	?	390	?
22jan86	274	313	338	455	632	666	667	651	672	679	664	?	642	493	609	460	428	538
23jan86	275	314	341	460	612	661	663	643	670	675	660	?	637	482	602	463	428	538
24jan86	273	308	341	464	624	665	663	650	671	680	664	?	638	489	609	463	428	539
04feb86	258	279	323	463	564	603	626	618	652	674	656	?	572	459	595	461	421	525
17feb86	242	283	334	482	555	577	587	576	613	651	610	?	552	444	549	440	390	478
25feb86	252	266	306	451	537	570	577	581	618	663	621	?	538	450	563	444	406	500
04mar86	221	255	293	433	512	539	550	542	567	594	562	?	514	422	509	381	344	442
21mar86	235	263	292	440	522	567	587	582	619	652	616	?	544	436	549	436	379	465
24mar86	227	307	287	430	524	556	571	566	594	636	596	?	533	430	531	416	360	448
04apr86	215	242	269	436	484	524	543	539	565	589	557	?	504	416	504	370	333	425
16apr86	211	231	255	419	460	500	524	533	565	631	564	?	484	415	526	415	371	434
18apr86	213	223	253	419	456	497	524	534	570	608	560	?	483	416	519	410	357	428
22apr86	204	227	250	418	451	493	519	521	552	580	544	?	480	405	502	373	335	425
29apr86	192	217	243	419	441	482	508	507	538	561	530	?	469	394	487	355	319	401
02may86	189	213	239	419	436	477	503	503	534	562	527	406	464	390	484	355	317	397
06may86	192	210	234	418	430	471	498	501	534	564	533	412	458	390	488	358	322	400
12may86	220	218	229	418	422	465	496	525	562	586	559	448	453	410	503	431	378	425
16may86	234	221	248	418	418	473	503	523	559	656	577	455	459	410	562	450	401	442
20may86	263	287	269	418	486	573	617	631	660	670	643	532	575	458	592	457	418	501
23may86	262	287	287	419	515	594	641	642	668	674	649	538	600	471	600	462	426	524
27may86	273	319	332	457	565	635	655	643	667	673	649	538	620	485	600	462	426	534
30may86	284	337	359	504	615	663	663	646	670	674	651	540	640	498	606	465	430	538

06jun86	293	360	399	559	653	664	663	648	667	678	663	545	642	506	608	462	430	538
17jun86	285	343	388	582	642	659	661	643	668	672	648	538	635	490	601	462	428	539
27jun86	289	334	392	590	646	664	663	644	668	674	650	538	644	495	606	463	430	540
08jul86	289	339	398	592	646	666	662	644	668	673	650	536	643	509	605	463	429	540
15jul86	261	308	366	557	584	610	635	626	652	660	621	512	593	460	581	453	417	527
22jul86	243	288	344	533	556	575	579	570	594	614	575	497	554	444	553	416	380	483
29jul86	244	279	323	508	545	571	579	576	609	634	582	505	549	443	569	443	399	495
01aug86	243	274	315	499	538	570	576	579	614	643	580	502	544	444	572	446	400	496
05aug86	235	267	305	486	525	551	563	558	585	601	560	492	530	435	532	418	373	464
15aug86	287	316	322	482	567	641	659	630	668	666	598	509	567	446	550	434	394	487
22aug86	253	293	346	485	542	581	597	579	622	628	598	507	567	447	550	434	394	487
29aug86	228	262	296	467	516	550	561	552	575	585	560	492	534	432	515	383	348	449
05sep86	214	248	283	452	497	529	542	531	555	566	536	477	512	417	495	358	326	426
12sep86	207	245	298	434	479	511	526	514	539	553	519	463	494	404	479	343	313	409

ANNEXE 5

Modélisation : Cotes Mur et Toit pour chaque maille des couches CT, C1 et C2.

ECH. 2500

COTES MUR Cote C4

4.2	4.2	5.1	5.70	5.86	5.85	5.51	5.3	4.0	4.0	4.0	4.0
4.3	4.3	5.2	5.81	5.85	5.60	5.30	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
4.4	4.4	5.3	5.81	5.85	5.60	5.30	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
4.5	4.5	5.4	5.81	5.85	5.60	5.30	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
4.6	4.6	5.5	5.81	5.85	5.60	5.30	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
4.7	4.7	5.6	5.81	5.85	5.60	5.30	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
4.8	4.8	5.7	5.81	5.85	5.60	5.30	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
4.9	4.9	5.8	5.81	5.85	5.60	5.30	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
5.0	5.0	5.9	5.81	5.85	5.60	5.30	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
5.1	5.1	6.0	5.81	5.85	5.60	5.30	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
5.2	5.2	6.1	5.81	5.85	5.60	5.30	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
5.3	5.3	6.2	5.81	5.85	5.60	5.30	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
5.4	5.4	6.3	5.81	5.85	5.60	5.30	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
5.5	5.5	6.4	5.81	5.85	5.60	5.30	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
5.6	5.6	6.5	5.81	5.85	5.60	5.30	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
5.7	5.7	6.6	5.81	5.85	5.60	5.30	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
5.8	5.8	6.7	5.81	5.85	5.60	5.30	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
5.9	5.9	6.8	5.81	5.85	5.60	5.30	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
6.0	6.0	6.9	5.81	5.85	5.60	5.30	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
6.1	6.1	7.0	5.81	5.85	5.60	5.30	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
6.2	6.2	7.1	5.81	5.85	5.60	5.30	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
6.3	6.3	7.2	5.81	5.85	5.60	5.30	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
6.4	6.4	7.3	5.81	5.85	5.60	5.30	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
6.5	6.5	7.4	5.81	5.85	5.60	5.30	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
6.6	6.6	7.5	5.81	5.85	5.60	5.30	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
6.7	6.7	7.6	5.81	5.85	5.60	5.30	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
6.8	6.8	7.7	5.81	5.85	5.60	5.30	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
6.9	6.9	7.8	5.81	5.85	5.60	5.30	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
7.0	7.0	7.9	5.81	5.85	5.60	5.30	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
7.1	7.1	8.0	5.81	5.85	5.60	5.30	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
7.2	7.2	8.1	5.81	5.85	5.60	5.30	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
7.3	7.3	8.2	5.81	5.85	5.60	5.30	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
7.4	7.4	8.3	5.81	5.85	5.60	5.30	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
7.5	7.5	8.4	5.81	5.85	5.60	5.30	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
7.6	7.6	8.5	5.81	5.85	5.60	5.30	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
7.7	7.7	8.6	5.81	5.85	5.60	5.30	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
7.8	7.8	8.7	5.81	5.85	5.60	5.30	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
7.9	7.9	8.8	5.81	5.85	5.60	5.30	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
8.0	8.0	8.9	5.81	5.85	5.60	5.30	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
8.1	8.1	9.0	5.81	5.85	5.60	5.30	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
8.2	8.2	9.1	5.81	5.85	5.60	5.30	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
8.3	8.3	9.2	5.81	5.85	5.60	5.30	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
8.4	8.4	9.3	5.81	5.85	5.60	5.30	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2
8.5	8.5	9.4	5.81	5.85	5.60	5.30	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
8.6	8.6	9.5	5.81	5.85	5.60	5.30	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4
8.7	8.7	9.6	5.81	5.85	5.60	5.30	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
8.8	8.8	9.7	5.81	5.85	5.60	5.30	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
8.9	8.9	9.8	5.81	5.85	5.60	5.30	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7
9.0	9.0	9.9	5.81	5.85	5.60	5.30	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
9.1	9.1	10.0	5.81	5.85	5.60	5.30	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9
9.2	9.2	10.1	5.81	5.85	5.60	5.30	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
9.3	9.3	10.2	5.81	5.85	5.60	5.30	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
9.4	9.4	10.3	5.81	5.85	5.60	5.30	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2
9.5	9.5	10.4	5.81	5.85	5.60	5.30	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3
9.6	9.6	10.5	5.81	5.85	5.60	5.30	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4
9.7	9.7	10.6	5.81	5.85	5.60	5.30	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
9.8	9.8	10.7	5.81	5.85	5.60	5.30	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6
9.9	9.9	10.8	5.81	5.85	5.60	5.30	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7
10.0	10.0	10.9	5.81	5.85	5.60	5.30	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
10.1	10.1	11.0	5.81	5.85	5.60	5.30	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9
10.2	10.2	11.1	5.81	5.85	5.60	5.30	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
10.3	10.3	11.2	5.81	5.85	5.60	5.30	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1
10.4	10.4	11.3	5.81	5.85	5.60	5.30	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
10.5	10.5	11.4	5.81	5.85	5.60	5.30	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3
10.6	10.6	11.5	5.81	5.85	5.60	5.30	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4
10.7	10.7	11.6	5.81	5.85	5.60	5.30	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5
10.8	10.8	11.7	5.81	5.85	5.60	5.30	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
10.9	10.9	11.8	5.81	5.85	5.60	5.30	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7
11.0	11.0	11.9	5.81	5.85	5.60	5.30	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8
11.1	11.1	12.0	5.81	5.85	5.60	5.30	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
11.2	11.2	12.1	5.81	5.85	5.60	5.30	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
11.3	11.3	12.2	5.81	5.85	5.60	5.30	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1
11.4	11.4	12.3	5.81	5.85	5.60	5.30	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2
11.5	11.5	12.4	5.81	5.85	5.60	5.30	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
11.6	11.6	12.5	5.81	5.85	5.60	5.30	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4
11.7	11.7	12.6	5.81	5.85	5.60	5.30	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
11.8	11.8	12.7	5.81	5.85	5.60	5.30	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6
11.9	11.9	12.8	5.81	5.85	5.60	5.30	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7
12.0	12.0	12.9	5.81	5.85	5.60	5.30	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
12.1	12.1	13.0	5.81	5.85	5.60	5.30	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
12.2	12.2	13.1	5.81	5.85	5.60	5.30	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
12.3	12.3	13.2	5.81	5.85	5.60	5.30	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
12.4	12.4	13.3	5.81	5.85	5.60	5.30	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2
12.5	12.5	13.4	5.81	5.85	5.60	5.30	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3
12.6	12.6	13.5	5.81	5.85	5.60	5.30	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
12.7	12.7	13.6	5.81	5.85	5.60	5.30	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
12.8	12.8	13.7	5.81	5.85	5.60	5.30	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6
12.9	12.9	13.8	5.81	5.85	5.60	5.30	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7
13.0	13.0	13.9	5.81	5.85	5.60	5.30	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
13.1	13.1	14.0	5.81	5.85	5.60	5.30	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9
13.2	13.2	14.1	5.81	5.85	5.60	5.30	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
13.3	13.3	14.2	5.81	5.85	5.60	5.30	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
13.4	13.4	14.3	5.81	5.85	5.60	5.30	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
13.5	13.5	14.4	5.81	5.85	5.60	5.30	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3
13.6	13.6	14.5	5.81	5.85	5.60	5.30	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4
13.7	13.7	14.6	5.81	5.85	5.60	5.30	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
13.8	13.8	14.7	5.81	5.85	5.60	5.30	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6
13.9	13.9	14.8	5.81	5.85	5.60	5.30	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7
14.0	14.0	14.9	5.81	5.85	5.60	5.30	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
14.1	14.1	15.0	5.81	5.85	5.60	5.30	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9
14.2	14.2	15.1	5.81	5.85	5.60	5.30	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0
14.3	14.3	15.2	5.81	5.85	5.60	5.30	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1
14.4	14.4	15.3	5.81	5.85	5.60	5.30	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2
14.5	14.5	15.4	5.81	5.85	5.60	5.30	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
14.6	14.6	15.5	5.81	5.85	5.60	5.30	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4
14.7	14.7	15.6	5.81	5.85	5.60	5.30	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5
14.8	14.8	15.7	5.81	5.85	5.60	5.30	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6
14.9	14.9	15.8	5.81	5.85	5.60	5.30	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
15.0	15.0	15.9	5.81	5.85	5.60	5.30	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8
15.1	15.1	16.0	5.81	5.85	5.60	5.30	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9
15.2	15.2	16.1	5.81	5.85	5.60	5.30	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
15.3	15.3	16.2	5.81	5.85	5.60	5.30	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1
15.4	15.4	16.3	5.81	5.85	5.60	5.30	15.2	15.2	15.2	15.2	1

ANNEXE 6

**Programme de dépouillement des mesures de conductivités hydrauliques à saturation
(langage FORTRAN).**


```

C
C
C CALCUL DE K POUR LES COUCHES SUPERIEURES
C -----

```

```

CO=K(1)*(LF+R/2)
CN(1)=CO
N=N-1
NU(1)=N
U=2
DO 300 NB=1,1000
C CONDITION POUR LE CALCUL
N=N-1
CALL TEST(OK,N,U,M)
IF(M.EQ.1) GOTO 320
NU(U)=N
L=(H(NU(U))-H(NU(U-1)))*1E-2
TP=T(NU(U-1))-T(NU(U))
IF(U.EQ.1) THEN
  PROF(U)=HTOT
  K(1)=(R/2)*(1/TP)*LOG((L+LF+R/2)/(LF+R/2))
ELSE

```

```

C CALCUL DE CO
CO=CN(U-1)+K(U-1)*(H(NU(U-1))-H(NU(U-2)))*1E-2
CN(U)=CO
CO=CN(U)
PROF(U)=HTOT-H(NU(U-1))
write(*,*) 'CO=',CO,'L=',L,'TP=',tp
write(*,*) 'NHAUT=',N,'NBAS=',NU(U-1)
K(U)=RACDIC()
ENDIF
WRITE(*,*) U,K(U)
IF(NU(U).EQ.1)GOTO 320
U=U+1
CONTINUE
300
C

```

```

C ECRITURE DES ENREGISTREMENTS
C -----
320 WRITE(2,'(A45)',ATTENTION CONDUCTIVITES EN m/s *1E6'
WRITE(2,'(A45)',PROFONDEURS EN cm,
WRITE(2,'(A45)',SITE 1',SITE
WRITE(2,'(A45)',REPETITION No 1',1
N1=PROF(U)
ZS=INT(HTOT-H(N))
LS=ZS
DO 400 ZS=LS,N1
FORMAT(I5,1X,F7.2)
WRITE(2,350)ZS,K(U)*1E6
DO 500 KT=U-1,1,-1
ZT=INT(PROF(KT+1)+1)
ZU=INT(PROF(KT))
DO 600 ZS=ZT,ZU
WRITE(2,350)ZS,K(KT)*1E6
500 CONTINUE
CLOSE(2)
CPT1=1
1000 CONTINUE
CLOSE(1)
STOP
C

```

```

C
C
C MESSAGES D'ERREURS
C -----
998 WRITE(*,*)'ERREUR FICHIER SITE'
999 WRITE(*,*)'ERREUR FICHIER CONDUCTIVITE'
CLOSE(2)
CLOSE(1)
STOP
END

```

```

C RECHERCHE DE RACINE PAR LA METHODE DICHOTOMIQUE
C -----
C DEFINITION DES FONCTIONS Y ET Z
C -----

```

```

REAL FUNCTION Y(ABSZ)
REAL L,TP,CO
PARAMETER(R=0.04)
COMMON/VAR/L,TP,CO
REAL ABSZ
Y=LOG((ABSZ*L+CO)/CO)
RETURN
END

```

```

C
REAL FUNCTION Z(ABSZ)
REAL L,TP,CO
PARAMETER(R=0.04)
COMMON/VAR/L,TP,CO
REAL ABSZ
Z=2/R*ABSZ*TP
RETURN
END

```

```

C
REAL FUNCTION RACDIC()
REAL A,B,XNEG,XPOS,RACINE
A=1E-9
B=1E-1
E=1E-4
IF(Y(A)-Z(A))50,10,20
RACDIC=A
RETURN
WRITE(*,*)'ERREUR SUR LA VALEUR DE A=1E-9'
STOP
IF(Y(B)-Z(B))40,30,60
RACDIC=B
RETURN
WRITE(*,*)'ERREUR SUR LA VALEUR DE B=1E-1'
STOP
XNEG=B
XPOS=A
RACINE=(XPOS+XNEG)*0.5
AA=Y(RACINE)
BB=Z(RACINE)
IF(ABS(AA-BB).LE.E) THEN
  RACDIC=RACINE
RETURN
ENDIF
IF(Y(RACINE)-Z(RACINE))140,130,150
RACDIC=RACINE
XNEG=RACINE
GOTO 100
XPOS=RACINE
GOTO 100
END

```

```

10
50
20
30
60
40
100
110
130
140
150

```

```

C CAS OU LES 3 TESTS SONT FAUX : RECHERCHE DU PRECEDENT
C -----
11 WRITE(*,*)'RETOUR AU U PRECEDENT'
U=U-1
WRITE(*,*)'U=' U, ' NBR=' NBR(U)
DO 1 P=1,40
IF (NBR(U).LE.3.OR.U.EQ.1) THEN
N=NU(U)-1
IF (N.EQ.1) THEN
M=1
STOP
RETURN
ENDIF
DO 3, I=U+1,50
NBR(I)=0
CONTINUE
WRITE(*,*)'AVEC N=' N
GOTO 10
ENDIF
WRITE(*,*)'LE TEST A DEJA ETE CALCULE 3 FOIS'
U=U-1
CONTINUE
WRITE(*,*)'ATTENTION CE K A ETE CALCULE SUR + DE 40 REFERENCES'
END

```

```

C SOUS-PROGRAMME DE TESTS SUR LA VALEUR DE K
C -----
C RECOIT N ET U PRECEDENTMENT CALCULES
C RETOURNE N ET U A CALCULER
C -----
SUBROUTINE TEST(OK,N,U,M)
INTEGER I,P,N,U,NBR(50),NU(50)
REAL L,TP,CO,K(50),T(50),H(50)
LOGICAL OK
PARAMETER(R=0.04)
SAVE NBR
COMMON/VAR2/K,T,H,NU
COMMON/VAR/L,TP,CO
DATA NBR/50*0/
M=0
IF (OK) THEN
DO 111 J=1,50
NBR(J)=0
ENDIF
NBR(U)=NBR(U)+1
IF (U.NE.1.AND.NBR(U).GT.3) THEN
WRITE(*,*)'calcule 3 fois'
GOTO 11
ENDIF
OK=.FALSE.
L=(H(NU(U-1))-H(NU(U-2)))*1E-2
TP=T(NU(U-2))-T(NU(U-1))
WRITE(*,*)
WRITE(*,*)'test pour U=' U
WRITE(*,*)'avec L=' L, ' et TP=' TP
WRITE(*,*)'TEST1 ENTRE: ',N, ' ET', NU(U-1)
IF ((H(N)-H(NU(U-1)))/(T(NU(U-1))-T(N)))*1E-2.GE.(L/TP)+(2/R)*K
&*L) THEN
WRITE(*,*)'TEST OK!!'
RETURN
ENDIF
IF (N.EQ.1.AND.U.NE.1) THEN
U=U-1
RETURN
ENDIF
NBR(U)=NBR(U)+1
IF (U.NE.1.AND.NBR(U).GT.3) THEN
WRITE(*,*)'calcule 3 fois'
GOTO 11
ENDIF
IF (NBR(U).GT.3) GOTO 11
WRITE(*,*)'TEST2 ENTRE: ',N-1, ' ET', NU(U-1)
IF ((H(N-1)-H(NU(U-1)))/(T(NU(U-1))-T(N-1)))*1E-2.GE.(L/TP)+(2/R)*K
&U-1)*L) THEN
WRITE(*,*)'TEST OK!!'
N=N-1
RETURN
ENDIF
IF (N.EQ.2.AND.U.NE.1) THEN
U=U-1
RETURN
ENDIF
NBR(U)=NBR(U)+1
IF (U.NE.1.AND.NBR(U).GT.3) THEN
WRITE(*,*)'calcule 3 fois'
GOTO 11
ENDIF

```

ANNEXE 7

**Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation par maille élémentaire des couches
C1 et C2.**

- 1) Valeurs issues du krigeage normal;**
- 2) Valeurs issues du krigeage log-normal.**

1

3.05	3.45	3.63					9.02	11.90	11.97	11.97	12.16					
3.16	3.42	3.82	4.44	3.74	3.08	5.29	7.36	9.95	9.36	9.00	8.76					
2.85	3.50	4.57					5.54	6.49	7.13	6.04	6.40					
2.76	3.50	4.06	7.08	6.13	3.21	3.43	6.55	7.61	7.50	4.78	4.16					
2.26	2.85	3.44	7.13	5.10					8.14	10.10	5.09	3.54	2.36			
1.84	2.78	3.77	7.21	4.23	3.92	4.61	5.24	6.32	7.99	5.91	2.63	0.87				
	2.54	3.43	3.70	3.85					6.62	7.90	6.13	2.51	0.76			
		1.72	1.51	3.17	5.64	4.76	4.10	6.69	7.40	6.24	2.64	0.87				
			1.47	2.40	3.34	5.78	8.37	7.35	6.33	5.65	2.80	1.01				
			2.75	3.26	4.03	9.58	13.40	5.77	5.47	4.40	1.88	0.94				
				3.30	3.78	9.01	15.41	10.06	8.09	4.47	3.58	5.55	5.15	2.85	1.52	0.67
				3.31	3.62	6.02	9.69	10.00	6.55	3.04	3.21	4.76	7.19	3.76	0.91	0.53
					4.34	3.75	6.54	6.37	4.08	2.55	1.60	4.92	6.05	2.68	1.51	0.47
					3.83	4.74	4.58	4.11	3.67	4.46	5.92	6.21	4.25	3.37	1.90	0.61
						4.85	3.47	3.35	2.45	4.55	11.67	4.77	3.68	4.08	1.55	0.49
						2.92	2.92	2.93	2.77	4.67	10.11	6.84	2.70	2.92	1.26	0.39
							4.32	3.49	3.85	3.85	2.51	1.16	1.12	0.80	0.54	
								3.87	3.15	2.88	1.67	1.80	0.54	0.74	0.52	
									1.64	1.99	1.08	0.79	0.65	0.54		
										1.14	0.67	1.12	0.89			
											0.63					

CONDUCTIVITES "NORMALES"
Couche C1 ($\times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$)

0.32	0.36	0.43					0.39	0.37	1.16	1.47	0.27	0.10	0.09		
0.26	0.31	0.37					0.35	0.44	0.30	1.22	0.87	0.54	0.13	0.10	
0.19					0.35	0.44	0.30	1.22	0.87	0.54	0.13	0.07			
0.19					0.35	0.44	0.30	1.22	0.87	0.54	0.13	0.06			
0.15					0.52	0.85	0.61	0.72	1.06	0.63	0.27	0.06			
0.15					0.52	0.85	0.61	0.72	1.06	0.63	0.27	0.14			
	0.32	0.43					0.98	1.02	2.06	2.78	1.90	0.22	0.18		
	0.25					0.98	1.02	2.06	2.78	1.90	0.22	0.21			
	0.11					0.21	1.35	1.51	1.73	2.32	0.61	0.19			
	0.09					0.21	1.35	1.51	1.73	2.32	0.61	0.24			
					0.55	2.36	1.85	2.82	4.73	2.01	0.19				
	1.41					0.55	2.36	1.85	2.82	4.73	2.01	0.32			
	1.00					1.89	2.00	1.75	3.65	1.84	0.18				
		1.41					1.89	2.00	1.75	3.65	1.84	0.06			
			1.25					0.90	1.45	1.80	1.00	0.39			
				1.25					0.90	1.45	1.80	1.00	0.41		
					1.13	0.77					0.47	0.28	0.26	0.25	
						1.04					0.47	0.28	0.26	0.25	
							0.13	0.12	0.10					0.16	0.43
								0.11					0.16	0.22	
													0.09		

CONDUCTIVITES "NORMALES"
Couche C2 ($\times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$)

2

2.91	3.16	3.48					7.73	9.96	10.34	9.89	10.04			
2.95	3.16	3.52	4.07	3.11	2.50	4.42	6.45	7.95	8.39	8.20	6.72			
2.72	3.31	4.08					5.18	6.85	6.19	5.41	4.75			
2.50	3.89	4.48	6.23	4.73	2.68	2.61	4.85	6.38	5.87	2.80	2.26			
2.00	2.42	4.74	5.77	3.58					6.37	8.89	3.92	1.47	0.85	
1.89	2.84	3.57	4.48	2.82	3.22	3.98	3.58	7.40	7.86	4.04	1.13	0.46		
	1.75	1.93	1.80	2.64					5.94	6.82	4.13	0.95	0.30	
		1.42	1.26	2.64	4.86	3.62	3.21	4.38	6.68	3.89	0.33	0.36		
	1.28	1.89	2.30	4.15	6.00					6.15	5.63	3.63	1.34	0.58
	2.13	2.55	2.87	5.23	10.49	5.55	3.49	4.96	4.73	2.86	1.88	0.68		
		2.53	2.72	5.12	7.10	9.21	6.35	3.84	2.71	5.10	4.50	1.88	0.76	0.46
		2.71	2.86	4.12	7.26	8.41	5.40	2.49	1.39	2.58	6.83	2.11	0.57	0.40
			3.31	4.39	5.19	5.21	3.89	1.43	0.92	2.72	3.94	1.83	0.81	0.28
			2.33	3.64	3.84	3.56	3.38	2.29	1.86	2.61	2.87	2.80	0.93	0.25
				3.35	2.88	2.49	1.92	2.10	5.10	2.84	1.94	2.46	0.55	0.21
				2.41	2.39	2.32	2.04	2.58	5.15	3.94	1.67	1.46	0.46	0.24
					2.89	2.42	2.43	2.71	1.76	0.92	0.61	0.37	0.35	
						2.49	2.20	1.73	1.37	0.74	0.42	0.49	0.41	
							1.32	1.26	0.73	0.53	0.52	0.44		
								0.78	0.45	0.71	0.47			
									0.46					

CONDUCTIVITES "LOG-NORMALES"
Couche C1 ($\times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$)

0.33	0.33	0.49					0.32	0.31	0.85	0.97	0.17	0.08	0.07	
0.25	0.26	0.34					0.32	0.31	0.85	0.97	0.17	0.08	0.06	
0.17					0.27	0.35	0.26	0.94	0.67	0.31	0.09	0.05		
0.14					0.27	0.35	0.26	0.94	0.67	0.31	0.09	0.04		
0.12					0.34	0.65	0.43	0.44	0.54	0.27	0.18	0.05		
0.12					0.34	0.65	0.43	0.44	0.54	0.27	0.18	0.09		
	0.29	0.35					0.53	0.82	1.59	2.41	0.93	0.17	0.12	
		0.14					0.53	0.82	1.59	2.41	0.93	0.17	0.16	
	0.05					0.08	0.56	0.63	1.20	1.38	0.25	0.15		
	0.03					0.08	0.56	0.63	1.20	1.38	0.25	0.11		
					0.17	2.06	1.50	2.04	4.36	0.66	0.11			
	0.00					0.17	2.06	1.50	2.04	4.36	0.66	0.09		
	0.47					1.62	1.53	1.40	2.81	0.45	0.05			
		0.47					1.62	1.53	1.40	2.81	0.45	0.05		
			0.70					0.36	0.62	1.14	0.52	0.12		
				0.70					0.36	0.62	1.14	0.52	0.21	
					0.35	0.24					0.18	0.11	0.11	0.14
						0.29					0.18	0.11	0.11	0.12
							0.10	0.07	0.08					0.16
								0.09					0.11	0.15
													0.08	

CONDUCTIVITES "LOG-NORMALES"
Couche C2 ($\times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$)