

Université des Sciences et Technologies de Lille
UFR de Géographie et d'Aménagement
59650 Villeneuve d'Ascq

Laboratoire d'Hydrogéologie, Structure et
Matériaux des Milieux Carbonatés
Université des Sciences et Technologies de Lille

D.E.A. de Géographie
Option 2 : Géographie physique,
Ressources et Risques Naturels, Préhistoire.

**ANALYSE HYDROGEOLOGIQUE MULTICRITERE
DES LANDES HUMIDES DE VERSIGNY**

**MISE EN EVIDENCE DE L'IMPORTANCE DU FACTEUR EAU DANS LA
GESTION DES MILIEUX NATURELS.**

Présenté par : Olivier CARON

Sous la direction de Messieurs:

**N. CRAMPON
J.P. COLBEAUX
T. BONNET**

date de soutenance : 14/11/1997

**Université des Sciences et Technologies de Lille
UFR de Géographie et d'Aménagement
59650 Villeneuve d'Ascq**

**Laboratoire d'Hydrogéologie, Structure et
Matériaux des Milieux Carbonatés
Université des Sciences et Technologies de Lille**

**D.E.A. de Géographie
Option 2 : Géographie physique,
Ressources et Risques Naturels, Préhistoire.**

**ANALYSE HYDROGEOLOGIQUE MULTICRITERE
DES LANDES HUMIDES DE VERSIGNY**

**MISE EN EVIDENCE DE L'IMPORTANCE DU FACTEUR EAU DANS LA
GESTION DES MILIEUX NATURELS.**

Présenté par : Olivier CARON

Sous la direction de Messieurs:

**N. CRAMPON
J.P. COLBEAUX
T. BONNET**

date de soutenance : 14/11/1997

REMERCIEMENTS

A l'issue de ce travail, il m'est agréable de remercier tout ceux qui ont participé, directement ou indirectement à son élaboration.

N. CRAMPON, Directeur du Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université des Sciences et Techniques de Lille I, pour m'avoir accueilli et confié ce sujet.

J.P.COLBEAUX et T.BONNET pour le temps, les conseils, et le suivi qu'ils n'ont jamais hésité à m'accorder.

Je remercie également les membres du Conservatoire des Sites Naturels de Picardie MM E. DAS GRACAS, G. RIVIERE J.C. HAUGUEL et plus particulièrement M. AMIREAUX, géomètre, sans qui la topographie et les études qui en dépendent n'auraient pu être réalisées.

Merci à J.EL KHATABI et L.ZOUHRI, chercheurs au Laboratoire d'Hydrogéologie et amis de tous les instants de détente et de réflexion.

Merci à A.S BRUNIN pour ses précieux conseils en informatique.

Les chercheurs et ingénieurs ayant apporté leur savoir et leurs informations au cours de l'année MM D.COMON (BRGM), J MAUCORPS (INRA), F. GREGOIRE (ENS Fontenay-Saint-Cloud) et M.J.GAUDEFFROY (BRGM).

Je tiens également à remercier pour sa gratitude, Monsieur LAPLACE, ingénieur de Météo France.

Avec un grand plaisir, j'adresse mes remerciements à M ROUSE et MME CUNAT.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	8
Chapitre I : DONNEES REGIONALES	10
I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	10
1. Régions naturelles.....	10
2. Hydrographie.....	10
3. Climatologie.....	12
4. Couvert végétal.....	12
II. CONTEXTE GEOLOGIQUE	13
1. Paléogéographie.....	13
2. Lithostratigraphie.....	16
a) Le Crétacé.....	16
b) Le Paléocène.....	16
c) L'Eocène.....	18
3. Tectonique.....	19
III. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	21
1. Les principaux aquifères.....	21
2. Hydrochimie.....	22
Chapitre II : DONNEES LOCALES	25
I. LOCALISATION, PRESENTATION	25
II. CLIMATOLOGIE	25
1. Température.....	25
a) Températures annuelles.....	26
b) Températures mensuelles.....	27
2. Pluviométrie.....	27
a) Régime annuel.....	27
b) Régime saisonnier.....	40
c) Régime mensuel.....	47
3. Evapotranspiration.....	48
4. CONCLUSION	51
III. GEOLOGIE	51
1. Lithostratigraphie.....	52
2. Tectonique.....	52
3. Morphostructure.....	54
IV. HYDROGEOLOGIE	59
1. Les facteurs d'interférence.....	59
a) Paramètres géologiques et débits.....	62
2. Paramètres morphostructuraux et débits.....	64
3. Piézométrie.....	64
CHAPITRE III : DONNEES DU SITE	67
I. RAPPEL	67
II. LOCALISATION ET PRESENTATION DU SITE	67
III. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES	71
1. La richesse du site : une flore remarquable.....	71
2. Pédologie.....	73

3. Géologie.....	73
a) Lithologie.....	73
b) Tectonique.....	78
4. Hydrogéologie.....	84
a) Identification des aquifères.....	84
b) La piézométrie.....	84
c) Superposition de la topographie et de la piézométrie.....	90
d) Interprétation du fonctionnement hydrogéologique.....	90
5. Hydrologie.....	94
a) Descriptif technique des stations de jaugeage et définition des techniques de mesures de débit.....	97
b) Les débits.....	99
c) Bilan hydrologique.....	104
d) Bilan hydrogéologique.....	108
e) Interprétation du fonctionnement hydrologique.....	111
6. Hydrochimie.....	111
a) La nécessité d'un protocole de mesures.....	111
b) Qualité physico-chimique des eaux de la mare à Zouzou.....	114

CONCLUSION.....	133
-----------------	-----

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

LISTE DES FIGURES

FIG. 1 : LOCALISATION DE LA REGION ETUDIEE	11
FIG. 2 : CARTE GEOLOGIQUE (SIMPLIFIEE)	11
FIG. 3 : PALEOGEOGRAPHIE DANS LE BASSIN PARISIEN ET BELGE DU PALEOCENE A L'EOCENE SUPERIEUR (D'APRES POMEROL, 1973)	14
FIG. 4 : LOG STRATIGRAPHIQUE (D'APRES LA CARTE GEOLOGIQUE A 1/50 000 DE LA FERRE)	17
FIG. 5 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA TECTONIQUE DU NORD DE LA FRANCE	20
FIG. 6 : CLASSIFICATION DES EAUX (SELON LA METHODE DE PIPER)	24
FIG. 7 : LOCALISATION DES STATIONS METEOROLOGIQUES	26
FIG. 8 : AJUSTEMENT DES PRECIPITATIONS ANNUELLES A LA LOI DE GAUSS POUR LES STATIONS DE ROGECOURT ET AULNOY-SOUS-LAON	34
FIG. 9 : AJUSTEMENT DES PRECIPITATIONS ANNUELLES A LA LOI DE GAUSS POUR LES STATIONS DE LAON ET POUILLY-SUR-SERRE	35
FIG. 10 : PRECIPITATIONS ANNUELLES A POUILLY-SUR-SERRE DE 1972 A 1996 (EN MM)	38
FIG. 11 : PRECIPITATIONS ANNUELLES EN MOYENNE MOBILE A TROIS ANS A POUILLY-SUR-SERRE DE 1972 A 1996 (EN MM)	39
FIG. 12 : COMPARAISON DES PRECIPITATIONS PRINTEMPS-ETE ET HIVER-AUTOMNE A POUILLY-SUR-SERRE DE 1972 A 1996	42
FIG. 13 : AJUSTEMENT DES PRECIPITATIONS SAISONNIERES A LA LOI DE GAUSS A LA STATION D'AULNOY-SOUS-LAON	46
FIG. 14 : STRUCTURE DE LA REGION DE LA FERRE	53
FIG. 15 : SUPERPOSITION DE LA STRUCTURE ET DES ROSACES DE FRACTURATION	55
FIG. 16 : SUPERPOSITION DES THALWEGS ET DES ROSACES DE FRACTURATION	57
FIG. 17 : SUPERPOSITION DES LINEAMENTS MORPHOLOGIQUES ET DES ROSACES DE FRACTURATION	58
FIG. 18 : MORPHOSTRUCTURE DE LA REGION DE LA FERRE, ISSUE DE DONNEES DE TERRAINS DE SONDAGES ET DE LA MORPHOLOGIE	60
FIG. 19 : SUPERPOSITION DE LA MORPHOSTRUCTURE DE LA REGION DE LA FERRE (CARTE A) ET CELLE DE LA CARTE DE DUPRAT (CARTE B, 1996)	61
FIG. 20 : SUPERPOSITION DE LA STRUCTURE DE LA REGION DE LA FERRE ET DES DEBITS SPECIFIQUES DE L'AQUIFERE CRAYEUX	63
FIG. 21 : SUPERPOSITION DE LA MORPHOSTRUCTURE DE LA REGION DE LA FERRE ET DES DEBITS SPECIFIQUES DE L'AQUIFERE CRAYEUX	65
FIG. 22 : PIEZOMETRIE GENERALE	66
FIG. 23 : LOCALISATION DE LA RESERVE NATURELLE DE VERSIGNY (CARTE IGN, 1/25 000)	68
FIG. 24 : DESCRIPTION DE LA RESERVE	70
FIG. 25 : REPARTITION DES GROUPEMENTS VEGETAUX DE LA RESERVE DE VERSIGNY (D'APRES HAUGUEL, 1996)	72
FIG. 26 : VEGETATION DE LA MARE A ZOUZOU (D'APRES HAUGUEL, 1996)	74
FIG. 27 : LES DIFFERENTS TYPES DE SOLS DE LA RESERVE (D'APRES MAUCORPS, 1983)	75
FIG. 28 : EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE A 1/50 000 DE LA FERRE	76
FIG. 29 : INDICATIONS PONCTUELLES DE LA LITHOLOGIE DES DEPOTS RENCONTRES DANS LA RESERVE	77
FIG. 30 : COUPES GEOLOGIQUES A-B ET C-D	79
FIG. 31 : EXTRAIT DE LA CARTE TOPOGRAPHIQUE AU 1/25 000	80
FIG. 32 : CONSEQUENCES DE LA TECTONIQUE SUR L'HYDROGEOLOGIE (LA FAILLE DE FRESSANCOURT)	81
FIG. 33 : MORPHOSTRUCTURE DE LA RESERVE	83
FIG. 34 : LOCALISATION DES PIEZOMETRES	85
FIG. 35 : PIEZOMETRIE HAUTES EAUX	87
FIG. 36 : PIEZOMETRIE BASSES EAUX	88
FIG. 37 : RELATION PLUIE-NIVEAU PIEZOMETRIQUE	89
FIG. 38 : SUPERPOSITION DE LA TOPOGRAPHIE ET DE LA PIEZOMETRIE EN HAUTES EAUX	91
FIG. 39 : SUPERPOSITION DE LA TOPOGRAPHIE ET DE LA PIEZOMETRIE EN BASSES EAUX	92
FIG. 40 : TRANSECT A	93
FIG. 41 : SUPERPOSITION DE LA PIEZOMETRIE ET DU RESEAU DE DRAINS ARTIFICIELS	95
FIG. 42 : TRANSECT B	96

FIG. 43 : LOCALISATION DES STATIONS DE JAUGEAGE	97
FIG. 44 : DESCRIPTIF TECHNIQUE DES STATIONS DE JAUGEAGE	98
FIG. 45 : SCHEMA D'APPLICATION DE LA LOI DE BERNOULLI	99
FIG. 46 : COURBE DE TARAGE D'APRES LES MESURES AU SEAU	101
FIG. 47 : COURBE DE TARAGE D'APRES LA LOI DE BERNOULLI	101
FIG. 48 : RELATION PLUIE-DEBIT	103
FIG. 49 : RELATION DEBIT-NIVEAU PIEZOMETRIQUE	105
FIG. 50 : LIMITE DU BASSIN VERSANT TOPOGRAPHIQUE DE LA MARE A ZOUZOU	109
FIG. 51 : LIMITE DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE DE LA MARE A ZOUZOU	110
FIG. 52 : LOCALISATION DES SITES DE MESURES DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DE LA MARE A ZOUZO	113
FIG. 53 : CLASSIFICATION DES EAUX DE LA MARE A ZOUZOU	119
FIG. 54 : EVOLUTION DU PH DE DECEMBRE 1996 A JUILLET 1997, DES EAUX DE LA MARE A ZOUZOU	122
FIG. 55 : EVOLUTION DE CONDUCTIVITE DE DECEMBRE 1996 A JUILLET 1997, DES EAUX DE LA MARE A ZOUZOU	124
FIG. 56 : LOCALISATION DES SOURCES ETUDIEES	125
FIG. 57 : EVOLUTION DU PH DES SOURCES ETUDIEES	126
FIG. 58 : EVOLUTION DE CONDUCTIVITE DES SOURCES ETUDIEES	129
FIG. 59 : SCHEMA THEORIQUE DES MECANISMES REGULATEURS DE LA PHYSICO-CHIMIE DES EAUX DE LA MARE A ZOUZOU	135

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I : BILAN STATISTIQUE DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES (D'APRES LA QUERIERE (DE), 1972)	23
TABLEAU II : TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES DE POUILLY-SUR-SERRE ET AULNOY-SOUS-LAON DE 1989 A 1996 (EN °C).	26
TABLEAU III : TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES A POUILLY-SUR-SERRE DE 1961 A 1996 ET DE 1989 A 1996 ET A AULNOY-SOUS-LAON DE 1989 A 1996.(EN°C).	27
TABLEAU IV : INTERVALLES DE CONFIANCE DES MOYENNES DES DIFFERENTES POPULATIONS DE HAUTEUR DE PLUIE.	29
TABLEAU V : PARAMETRES DE LA REGRESSION ENTRE LES MODULES PLUVIOMETRIQUES DE CHAQUE STATION.	30
TABLEAU VI: COEFFICIENTS DE CORRELATION DES PLUIES ANNUELLES DES STATIONS METEOROLOGIQUES DE ROGECOURT, AULNOY-SOUS-LAON, POUILLY-SUR-SERRE ET LAON	30
TABLEAU VII: ANNEES EXCEPTIONNELLEMENT PLUVIEUSES ET SECHES, AVEC LES PRECIPITATIONS CORRESPONDANTES (EN MM).	36
TABLEAU VIII : MOYENNES POUR LES DIFFERENTES PERIODES D'ETUDES CONSIDEREES.(EN MM)	37
TABLEAU IX: PRECIPITATIONS SAISONNIERES POUR CHAQUE STATION (EN MM).	40
TABLEAU X : PARAMETRES DES DROITES DE REGRESSION ENTRE CHAQUE STATION	43
TABLEAU XI : COEFFICIENT DE CORRELATION DES PLUIES AUTOMNE-HIVER DES STATIONS METEOROLOGIQUES DE ROGECOURT, AULNOY-SOUS-LAON, POUILLY-SUR-SERRE ET LAON	43
TABLEAU XII : INTERVALLES DE CONFIANCE DES DIFFERENTES POPULATIONS DE HAUTEURS DE PLUIE AUTOMNE-HIVER	44
TABLEAU XIII : PRECIPITATIONS AUTOMNE-HIVER REMARQUABLES SUR LA PERIODE 1971-1972 A 1996-1997	45
TABLEAU XIV : PRECIPITATIONS MENSUELLES MOYENNES POUR LES 4 STATIONS ETUDIES (EN MM).	47
TABLEAU XV : VARIABILITE DES PRECIPITATIONS MENSUELLES	49
TABLEAU XVI: COMPARAISON ENTRE LES ETP DE PENMAN ET THORNTHWAITE EN 1992 ET 1993.(EN MM)	50
TABLEAU XVII : ETP MOYENNE MENSUELLE A AULNOY-SOUS-LAON DE 1992 A 1996. (EN MM)	50
TABLEAU XVIII : DEBITS MENSUELS ESTIMES POUR LA STATION DE JAUGEAGE S4 DE FEVRIER 1997 A JUILLET 1997.	102
TABLEAU XIX : BILAN HYDROLOGIQUE POUR UNE RFU EGALE A 70 MM, DE FEVRIER 1997 A JUILLET 1997	106
TABLEAU XX : BILAN HYDROLOGIQUE POUR UNE RFU EGALE A 50 MM, DE FEVRIER 1997 A JUILLET 1997	106
TABLEAU XXI : BILAN HYDROLOGIQUE POUR UNE RFU EGALE A 25 MM, DE FEVRIER 1997 A JUILLET 1997.	106
TABLEAU XXII : COMPARAISON ENTRE LES VOLUMES D'EAU PRECIPITES ET ECOULES.	107
TABLEAU XXIII : COMPARAISON ENTRE VOLUMES D'EAU ECOULES ET PRECIPITES SUR LE BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE.	108
TABLEAU XXIV : RESULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES.	117
TABLEAU XXV: SYNTHESÉS DES MESURES REALISEES SUR 14 SITES	127
TABLEAU XXVI : DESCRIPTIF DE CHAQUE SOURCE	128

RESUME

Afin de mieux comprendre le rôle de l'eau sur la régulation et la répartition des groupements végétaux de la Réserve Naturelle de Versigny (Aisne), une étude géologique, hydrogéologique, hydrologique et hydrochimique a été menée sur la Réserve et ses alentours immédiats.

L'étude géologique de la région de la Fère montre que la Réserve Naturelle de Versigny est installée sur un réseau faillé d'extension régionale, contrôlé par des failles de directions principales N30°, N60°-80°, N110° et N140°-150°. Cette dépression d'origine tectonique, a été creusée dans les sables thanétiens et localement jusqu'à la craie.

Des sondages géologiques réalisés au sein de la Réserve, ont permis de mettre en évidence trois aquifères potentiels :

- sables argileux quaternaires ;*
- sables thanétiens ;*
- craie d'âge sénonien.*

Les relations hydrogéologiques entre ces trois aquifères, n'ont pu être mises en évidence par les moyens dont on dispose. Toutefois, des mesures de la qualité physico-chimique des eaux superficielles, réalisées au niveau de la "mare à Zouzou" ont montré des fluctuations significatives du pH (de 4,5 à 6,8) et de la conductivité (de 120 $\mu\text{S cm}^{-1}$ à 350 $\mu\text{S cm}^{-1}$) en fonction des saisons. Ces variations seraient induites par la combinaison de facteurs lithologiques, pédologiques et biologiques.

Par ailleurs, la piézométrie attribuée à une seule nappe, indique que les niveaux d'eau observés (mare à Zouzou, drains, zones humides ...) sont en fait l'affleurement de cette nappe et que le recoupement de ce niveau piézométrique avec la topographie contrôle directement la position des zones humides de la Réserve. De même, on constate que le réseau de drainage d'origine anthropique, qui affecte ce niveau piézométrique, n'est fonctionnel que pour la partie sud-ouest de la Réserve, où il contribue à l'accélération de l'assèchement du site.

Mots clés : *Réserve Naturelle de Versigny, Tectonique, Hydrogéologie, Hydrologie, écoulements naturels, physico-chimie.*

Key-words : *Versigny Natural Reserve, Tectonic, Hydrogeology, Hydrology, natural run-off, physico-chemistry.*

ABSTRACT

To understand, better as possible, the importance of water upon regulation and distribution of plants groups in Versigny's Natural Reserve (Aisne), a geological, hydrogeological and hydrological study was effected in the Reserve and its surroundings.

Geological examen in the La Feres' area shows that Versigny's Reserve lays on a regional extended systeme, controlled by faults of principal direction N30°, N60°-N80°, N110° et N140°-150°. This tectonical depression was digging in thanetien sands and locally until the chalk.

Geological soundinds made in the Reserve, allow to define three potential aquifer :

- the quaternary muddy sands ;*
- the thanetien sands ;*
- the senonian chalk.*

Hydrogeological links between these three aquifer weren't clearly shown by our test. But some measures on the physico-chemical superficial waters quality, made on "Zouzou pond" give significant variations of pH (4,5 to 6,8) and conductivity (120 $\mu\text{S cm}^{-1}$ to 350 $\mu\text{S cm}^{-1}$)

according to the seasons. These variations may be the result of the combination of lithological, pedological and biological factors.

Moreover, piezometry ascribe to an unique groundwater table show that all wet areas, drains, "Zouzou pond" correspond to outcrops of this saturation level and that intersection piezometry-topographie control the position of wet sites in the Reserve. We note too, anthropical drains network, which affect this saturation level is operating only for the southwestern part of the Reserve, where it conduces to the increasing of the drying of the site.

INTRODUCTION

Les zones humides en raison de leurs richesses faunistiques et floristiques sont intégrées dans la politique de préservation des milieux naturels fragiles, menée par les organismes gestionnaires et les associations privées. La pérennité et par la même la préservation de ces zones passent par une gestion rationnelle de l'espace (entretien, réglementation), basée classiquement sur une approche naturaliste et non sur la compréhension des facteurs régulateurs de la répartition spatiale des groupements végétaux, par exemple l'eau.

Parmi ces zones humides, les landes de Versigny dont la richesse floristique est reconnue depuis le début du siècle (Jouanne, 1925), feront l'objet de ce mémoire. Un suivi constant (Bournérias, 1953, 1955, 1975), puis un soutien scientifique et technique sous l'impulsion du Conservatoire des Sites Naturels de Picardie, ont conduit la commune de Versigny à solliciter le classement en Réserve Naturelle volontaire du site, ce qui lui fut attribué par décret ministériel le 10 Mai 1995.

Les derniers relevés floristiques, Bournérias (1975), Boulet (1991), Hauguel (1996) ont montré une diminution, voire la disparition d'espèces végétales remarquables de la Réserve. Parallèlement, certaines observations effectuées ponctuellement, semblent indiquer un assèchement progressif de la lande tourbeuse ainsi que des variations saisonnières des conditions physiques du milieu (pH), néfastes pour la survie de certaines espèces.

De ce fait, dans le cadre d'une convention de recherche, le Conservatoire des Sites Naturels de Picardie, gestionnaire de la Réserve Naturelle de Versigny, a demandé au laboratoire d'hydrogéologie de travailler sur quelques aspects hydrogéologiques et hydrologiques du site, afin de mieux comprendre son fonctionnement. Par la suite, un programme de gestion des eaux dont les perspectives seront le maintien d'un niveau d'eau suffisant toute l'année pour permettre le développement d'espèces remarquables, le maintien d'une eau acide oligotrophe et la lutte contre un début d'eutrophisation, devrait voir le jour.

Ce travail de recherche, basé sur un protocole de mesures et de relevés de terrain, tentera de déterminer les entrées et les sorties d'eau du système, à tenter d'identifier la présence de différents aquifères, les transferts latéraux et verticaux et leurs relations avec les eaux superficielles. Dans un premier temps, la valeur qualitative des données recueillies sera évaluée puis ces données seront traitées en conséquence et combinées afin d'essayer de cerner les fonctionnements hydrologique et hydrogéologique du site. Ces connaissances serviront dans l'avenir à mieux gérer les réalisations d'aménagement hydraulique.

Chapitre I : DONNEES REGIONALES

I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

1. Régions naturelles

La Réserve Naturelle de Versigny se localise à l'est de la Picardie, dans le département de l'Aisne, à mi-chemin entre Saint-Quentin au nord-est et Laon au sud-ouest (Fig.1). Elle se situe à la limite de deux régions naturelles :

- le Vermandois au nord : il se présente dans le prolongement du plateau picard à l'est, et se caractérise par de vastes étendues de terres cultivées, entaillées par d'assez nombreuses vallées sèches et quelques vallées humides encaissées (l'Oise et la Somme) ;

- le Laonnois : il est essentiellement constitué d'une assise tabulaire formée de terrains tertiaires. Il apparaît comme une butte aux marges profondément disséquées par des vallées sèches et humides. Le démantèlement de ces formations tertiaires (sables, argiles et calcaires) au cours du Quaternaire, a provoqué de larges épandages tapissant les versants et les fonds de vallées.

2. Hydrographie

Le département de l'Aisne chevauche les deux bassins hydrographiques de la Seine au sud et de la Somme au nord.

La Somme prend sa source dans le département à Fonsommes (+ 83 NGF) et s'écoule sur ses alluvions et des loess, ce qui lui confère un régime très régulier. A Artemps, près de la sortie du département, son débit moyen annuel est de $2,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ($Q_s = 7,5 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$), pour un coefficient de ruissellement annuel évalué à 5,3 % seulement.

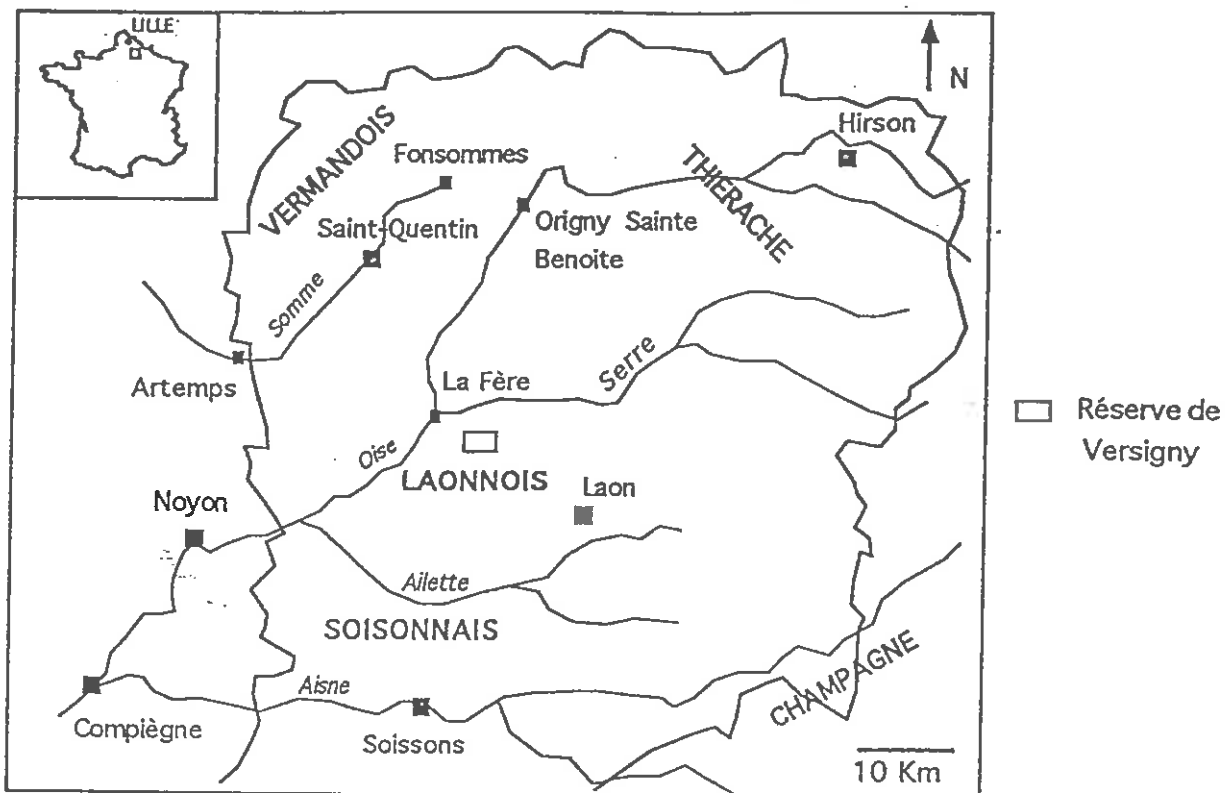


Fig. 1 : Localisation de la région étudiée

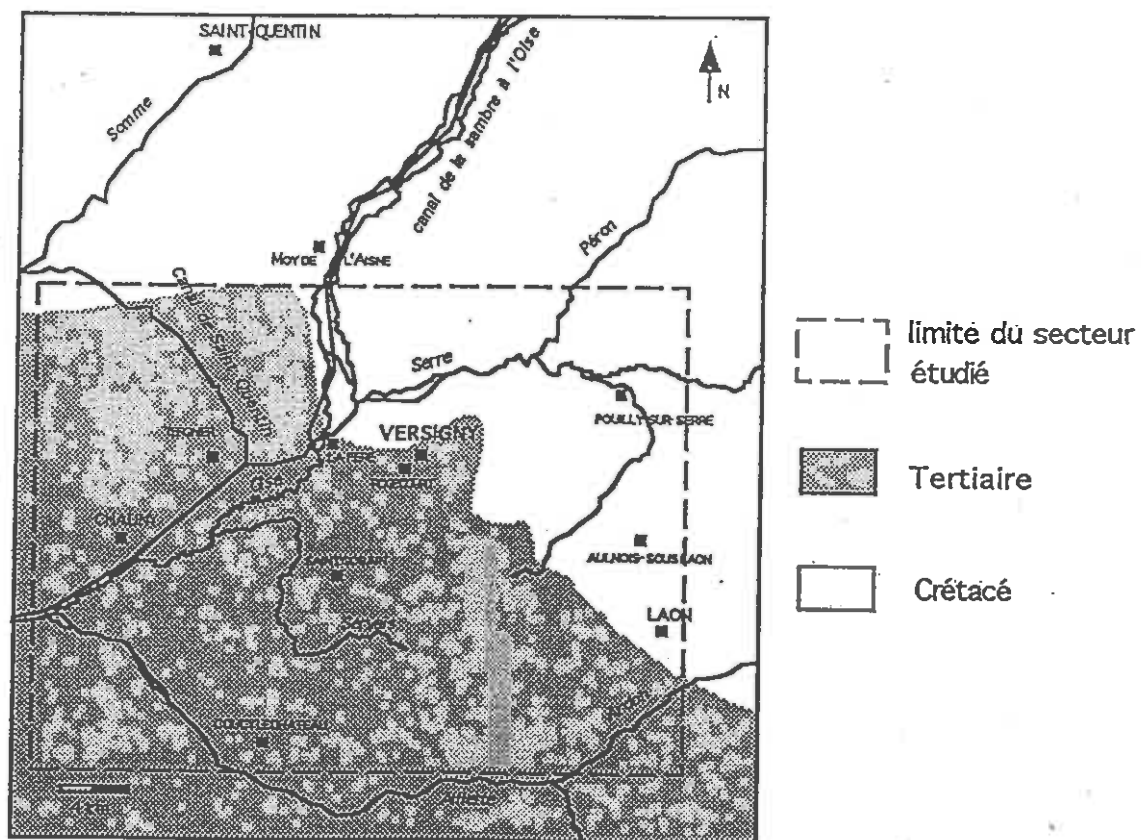


Fig. 2 : Carte géologique (simplifiée)

L'Oise prend sa source dans les Ardennes belges. A Hirson, son débit moyen annuel est de $4,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ($Q_s = 15,51 \text{ s}^{-1}\text{km}^{-2}$). Le coefficient de ruissellement y est très élevé, environ 50 %. A Origny-S^{te} Benoite, l'Oise voit son débit moyen annuel passer à $10,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ($Q_s = 8,8 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) et son coefficient de ruissellement descend à 26 % du fait de la traversée de la plaine crayeuse.

La Serre, qui prend également sa source dans les Ardennes, conflue avec l'Oise aux environs de la Fère. Son débit annuel y est en moyenne de $12,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ($Q_s = 7,5 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) et son coefficient de ruissellement n'est que de 7,2 %.

L'Oise, en aval de la Fère traverse les terrains tertiaires. La superposition de niveaux perméables-imperméables ainsi que des sous-bassins versants à fortes dénivellations induisent une augmentation du ruissellement. Près de Noyon, après avoir reçue l'Ailette ($1,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) en rive gauche, elle présente un débit moyen annuel de $34 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ($Q_s = 8,57 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) et un coefficient moyen de ruissellement de 8,2 %.

Remarque : - Q_s représente le débit spécifique du cours d'eau et il correspond au rapport débit moyen annuel sur la surface du bassin versant ; il permet ainsi de comparer les débits de cours d'eau aux dimensions totalement différentes.

- le coefficient de ruissellement annuel est le rapport entre lame d'eau annuelle écoulée sur lame d'eau annuelle précipitée, multiplié par 100. Cet indice indique les capacités d'infiltration du bassin versant, et par la même reflète l'influence de la lithologie et de la topographie sur l'écoulement de l'eau.

3. Climatologie

Le climat est de type semi-continentale, caractérisé par une température moyenne annuelle de 10°C , et une précipitation annuelle moyenne de l'ordre de 650 à 700 mm. Le nombre moyen de jours de pluie dépasse 180 à Saint-Quentin pour 150 à Pouilly-sur-Serre, tandis que les jours de gel atteignent respectivement 60 et 70 par an. Les vents dominants sont de secteurs sud-ouest et nord-est.

4. Couvert végétal

La qualité des sols (horizon B-textural loessique), ainsi que la topographie régulière rencontrée en domaine crayeux sont favorables au développement d'une culture intensive. Le couvert végétal représente 90% du territoire de l'Aisne, dont 70% sous forme de surfaces agricoles utilisées et 20% en surface boisée.

Les principales cultures sont les betteraves industrielles (18,4%), les légumes secs et protéagineux (9,4%), les oléagineux (6%), les pommes de terre (4,8%) et les céréales qui représentent à elles seules la moitié des espaces cultivés.

Les zones boisées, soient 136 000 ha, se développent en bordure de vallées ou dans les zones les plus escarpées comme dans le Laonnois avec la forêt de Saint-Gobain et Coucy-le-Chateau (8 500 ha).

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Les renseignements concernant la géologie du Laonnois, du Saint-Quentinois et des régions naturelles avoisinantes proviennent entre autres de la consultation des cartes géologiques à 1/50 000° de La Fère, S^t-Quentin, Chauny et Ham (Fig.2).

La géologie du secteur a notamment été étudiée par Pomerol et *al.* (1963, 1977, 1997), Feugueur (1963), La Quèrrière (de) (1972). Les renseignements utilisés pour ce paragraphe sont tirés de la synthèse géologique du Bassin de Paris effectuées par Mégnièn en 1980.

1. Paléogéographie

La limite Crétacé-Tertiaire se caractérise par une période de continentalisation avec une érosion du substratum crayeux. Les transgressions marines reprennent leur cours au Thanétien moyen. La mer thanétienne envahit pour la première fois depuis le Crétacé supérieur la quasi-totalité du Bassin de Paris. Sa progression s'effectue sur une surface aplanie, tout en remaniant les produits d'érosion, puis elle s'affirme par le dépôt de sédiments marins conséquents vers 55 Ma BP (Fig.3).

Remarque : les informations géographiques telles que la localisation des cours d'eau, des limites côtières (détroit du Pas de Calais) ne sont représentées ici que pour mieux situer ces événements paléogéographiques dans le contexte actuel (Colbeaux et *al.* (1980)).

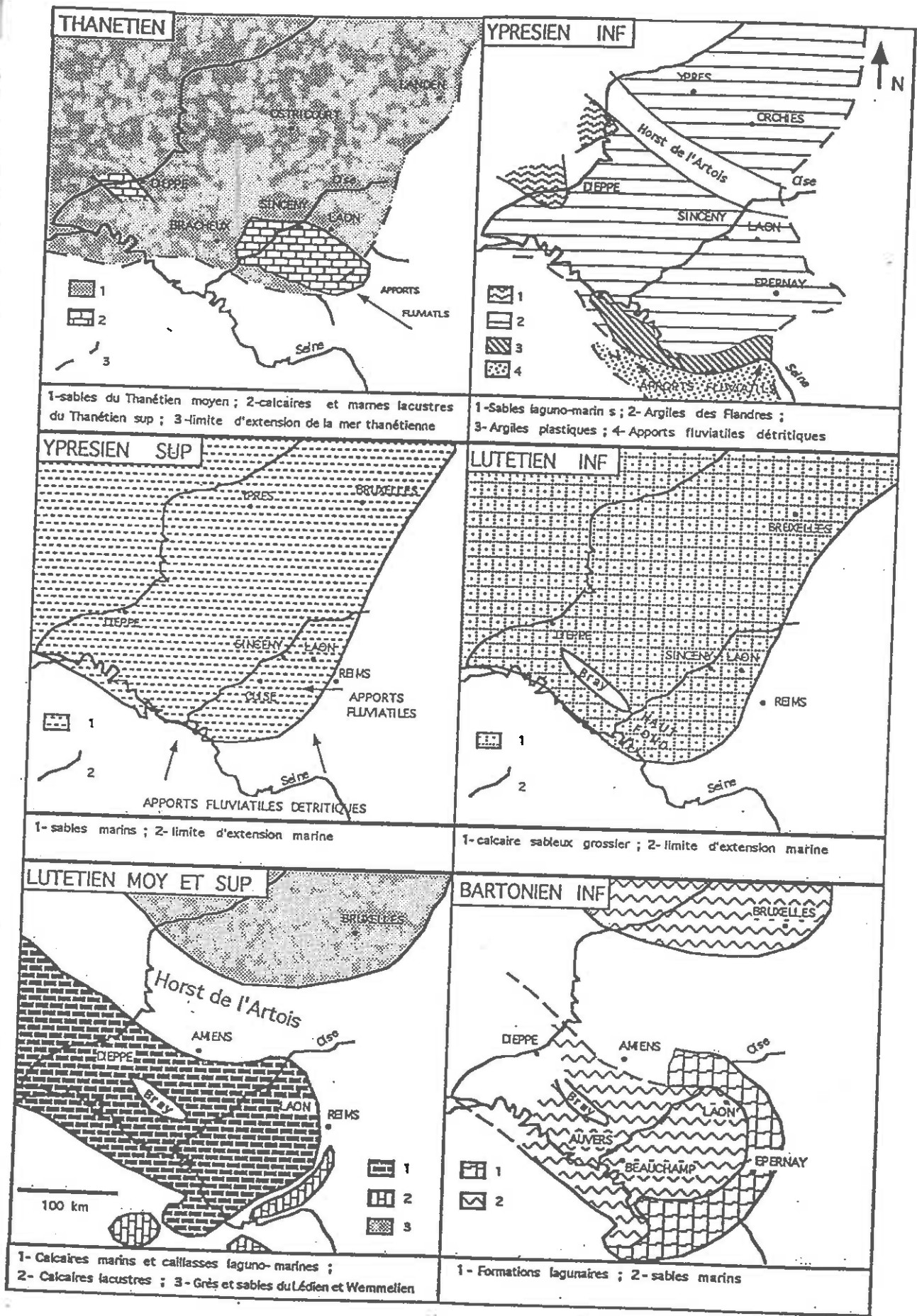


Fig. 3 : Paléogéographie dans le Bassin parisien et belge du Paléocène à l'Eocène supérieur (d'après Pomerol, 1973)

La régression se fait sentir en périphérie du bassin par l'amorce d'une continentalisation.

L'Yprésien inférieur s'accompagne d'une nouvelle transgression venant du nord-ouest (vers 52 Ma BP). Ce bassin semi ouvert vers l'ouest se caractérise par un domaine laguno-lacustre à laguno-marin, de tranche d'eau et de salinité variable donnant les faciès typiques de l'Yprésien inférieur (faciès Sparnacien).

Suite à l'émersion généralisée à la fin de l'Yprésien inférieur, la mer envahit de nouveau le Bassin Parisien à l'Yprésien supérieur et dépose des sables marins sableux (faciès Cuisien). Au cours de cette période, le climat se modifie : la température des eaux s'élève sans toutefois dépasser 22° C, la profondeur de la tranche d'eau diminue et ne dépasse guère 20m. A la fin de l'Yprésien supérieur, le nord-est du golfe parisien émerge et des lagunes s'installent.

Les dépôts du Lutétien inférieur transgressent des formations yprésiennes variées. Les apports détritiques importants mais d'origine locale cessent progressivement et on assiste à une colonisation par des nummulites aboutissant à l'installation de calcaires construits (vers 45 Ma BP). La mer est relativement profonde (50m maximum), la salinité normale et la température estimée à 25°C.

Au Lutétien moyen, la mer tropicale progresse. Apparaissent dès lors des milieux calmes et protégés, favorables à une sédimentation calcaire. La tranche d'eau demeure inférieure à 20m, la température reste constante et la salinité marque des variations avec tendance à la sursalinité.

Au Lutétien supérieur, la communication avec la Manche s'interrompt, entraînant une évolution de la sédimentation vers un milieu confiné. Les phénomènes de sédimentation chimique l'emportent sur les phénomènes organiques. On trouve dès lors des dépôts de nature magnésienne (dolomie, argile) et des dépôts évaporitiques. La tranche d'eau est inférieure à 10m et la salinité varie fortement.

Au Bartonien inférieur, une transgression franche mais d'extension mal connue envahit le bassin (vers 40 Ma). La mer peu profonde de type épicontinentale (40m de profondeur

maximum), y dépose des sables de plage dont la mise en place s'effectue sous le contrôle des courants de marées.

2. Lithostratigraphie

Les éléments ayant permis de reconstituer les anciens milieux de sédimentation sont tirés de l'étude des faciès de terrain. Le log stratigraphique résume le détail des terrains composant le sous-sol du Laonnois et du Saint-Quentinois (Fig.4).

a) *Le Crétacé*

Il est représenté en surface par le Coniacien, le Santonien, le Campanien, caractérisé par une craie blanche sans silex et contenant quelques bélemnites.

b) *Le Paléocène*

Il débute au Thanétien moyen par des dépôts détritiques marins caractérisés par des variations latérales de faciès. Il s'agit :

- de l'Argile de Vaux-sous-Laon (0 à 2m d'épaisseur); argile à montmorillonite gris-verdâtre, glauconieuse.
- du Tuffeau de la Fère (2 à 3m); marno-calcaire consolidé à grains de sables très fins et de la glauconie, présent au sud-est de la Fère.

Ces dépôts sont surmontés par la principale formation du Thanétien : les sables de Bracheux (30 m); blancs légèrement glauconieux, non fossilifères et riches en pyrite.

Le Paléocène se termine par un épisode continental avec installation de lacs à sédimentation marno-calcaire (Marnes de Sinceny, 6 à 7m) et des grésifications locales des sables supérieurs (grès de Molinchart (1 à 15m)).

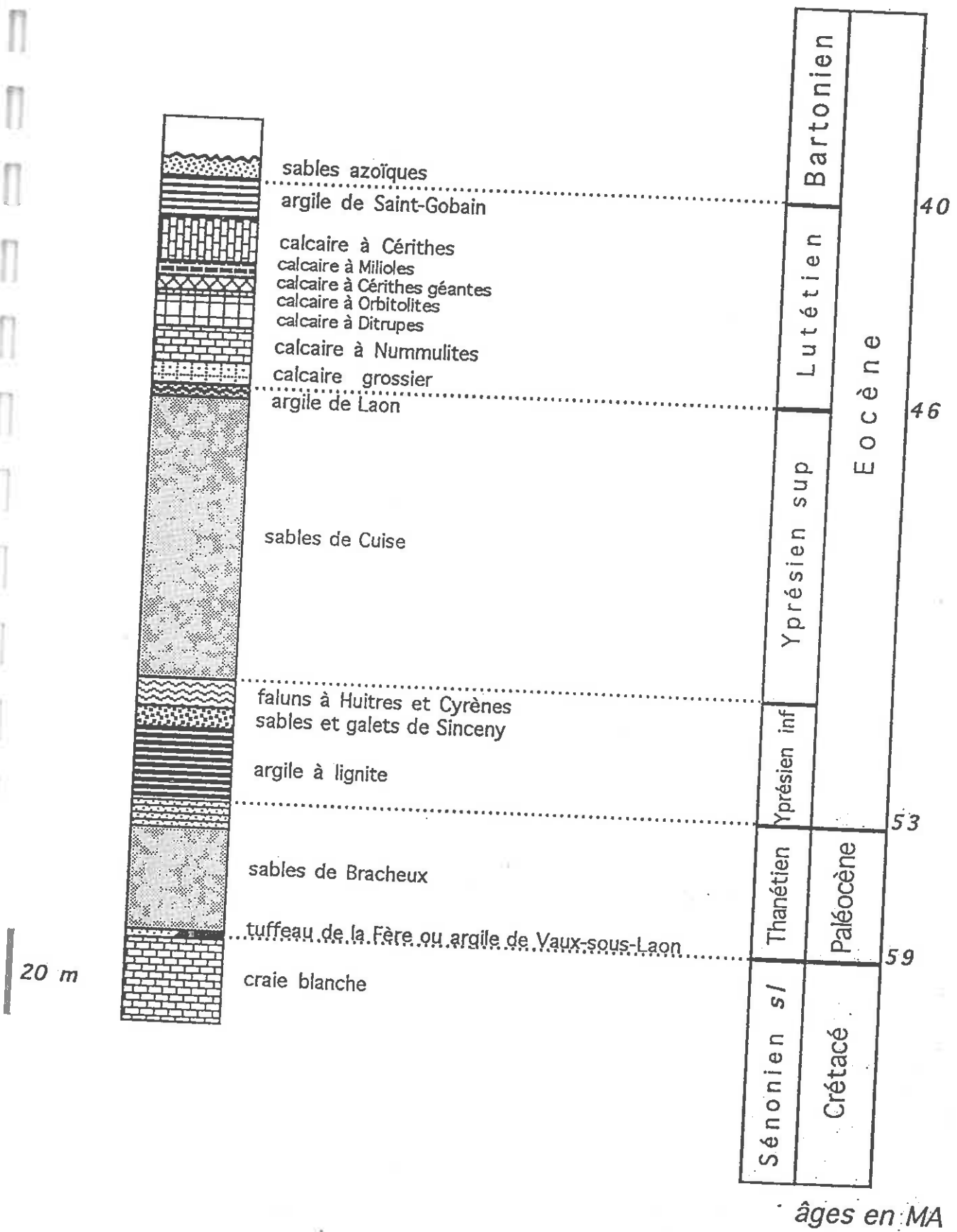


Fig. 4 : Log stratigraphique (d'après la carte géologique à 1/50 000 de La Fère)

c) L'Eocène

(1)Eocène inférieur : Yprésien

A l'Yprésien inférieur, le Bassin de Paris connaît une sédimentation alternativement laguno-lacustre et laguno-marine. Ces dépôts caractéristiques, ont donné naissance aux faciès Sparnacien (20 à 30m), représentés à leur base par les argiles à lignite du Soissonnais. Elles sont surmontées par les sables et galets de Sinceny, formations laguno-marines très fossilifères à stratifications obliques. La fin de l'épisode Sparnacien est marquée par un régime à dominante lagunaire où se déposent des faluns à huîtres et à cyrènes.

L'Yprésien supérieur contraste avec les dépôts précédents et devient franchement marin : les sables de Cuise (60m); fins, argileux, glauconieux et micacés. En se retirant, la mer dépose vers le nord-est les argiles de Laon dans des lagunes (0 à 3m d'épaisseur); grises-verdâtres azoïques, à montmorillonite prédominante et renfermant parfois des niveaux glauconieux et des lentilles de sable.

(2)Eocène moyen : Lutétien

Le Lutétien inférieur annonce le retour d'une sédimentation marine avec le passage progressif d'une glauconie grossière fossilifère (1 à 2m) à un calcaire sableux peu cohérent : le calcaire à *Nummulites laevigatus et variolarius* (ou Pierre à liards) (10m).

Au Lutétien moyen, cette tendance se confirme avec une succession de calcaires organogènes (Banc Royal), souvent dolomitisées.

On trouve de haut en bas, des :

- calcaires à Miliolites (3 à 5m);
- calcaires à *Cerithium gigantum* (3 à 4m);
- calcaires à *Orbitolites complanatus* (1m);

- calcaires à *Ditrupa strangulata* (6 à 7m).

Le Lutétien supérieur s'accompagne d'une sédimentation de type chimique et organique : les marnes et caillasses à Cérithes (3 à 15m). Il se termine par un épisode laguno-lacustre avec les argiles de Saint Gobain (2 à 15m) ; grises-vertes, plastiques et azoïques à base de montmorillonite calcaïque mêlée d'un peu d'illite.

(3) Eocène supérieur

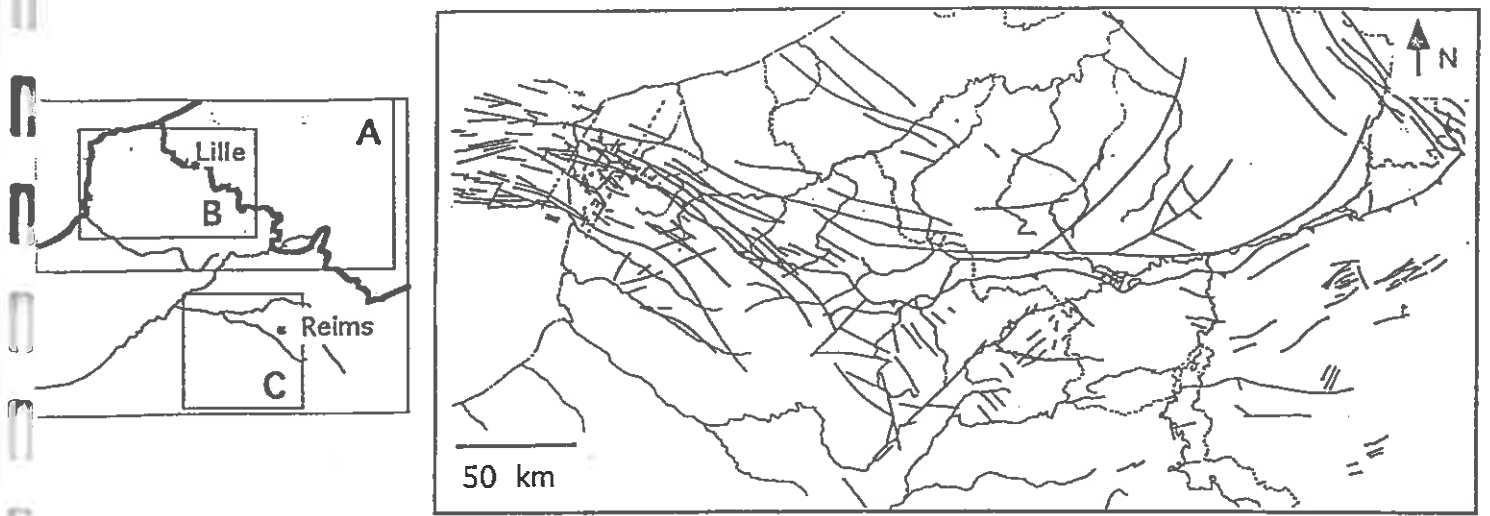
Il marque la dernière invasion marine majeure connue en région et se caractérise par des faciès de plage très développés; chenaux sableux à stratifications entrecroisées : ce sont les sables du Bartonien inférieur, jaunâtres et azoïques.

3. Tectonique

Le secteur étudié n'ayant fait l'objet d'aucune étude structurale approfondie, il a fallu étendre nos recherches aux régions avoisinantes, c'est à dire le Nord-Pas de Calais et la Champagne berrichonne.

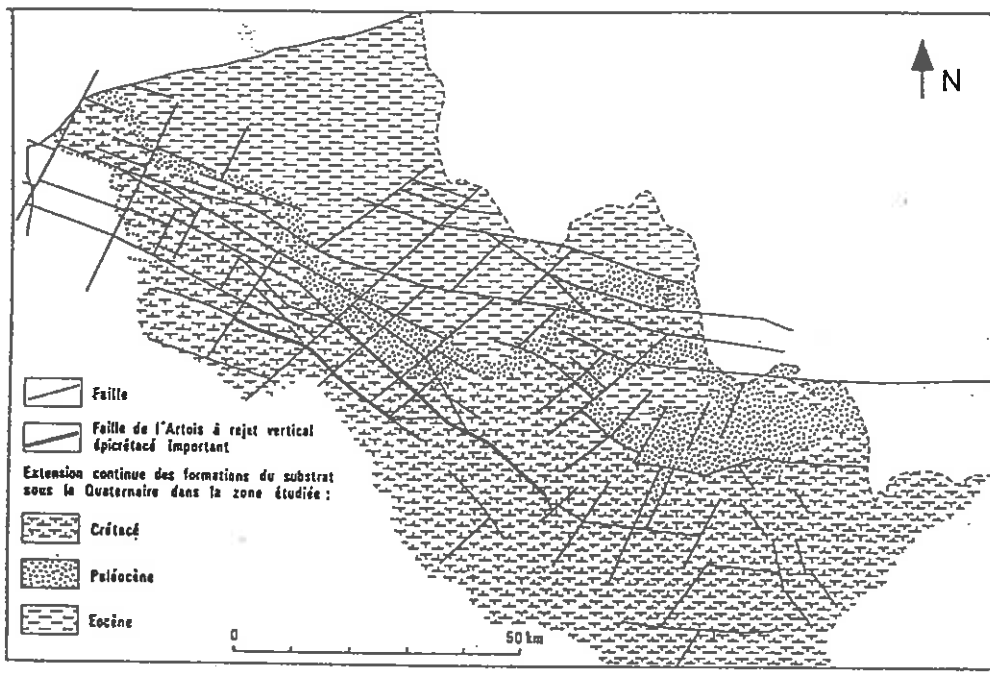
L'analyse structurale du Nord-Pas de Calais (Colbeaux et *al.* (1974, 1975, 1977, 1980, 1982, 1983)) révèle l'existence de 5 familles de failles de directions principales N170°, N110-130°, N90°, N60°, N30.

L'analyse morphostructurale de la Champagne berrichonne (Duprat, (1996)) dont le but est la reconstitution du jeu synsédimentaire de failles affectant le toit de la craie durant le Paléogène, indique 4 familles de failles ou flexures de directions principales N160°, N120°, N60° et N20°. Ces résultats démontrent une nette correspondance entre la structure du Nord-Pas de Calais et la Champagne berrichonne mais l'influence des failles de directions N110°, prédominantes dans le Nord diminue peu à peu vers la Champagne au profit de failles de direction N130°-N150° et N60°, comme en témoignent d'ailleurs les changements de directions du réseau hydrographique (Fig.5).



Carte A : Tectonique du Nord de la France et du Sud de la Belgique (d'après Colbeaux, 1977).

Trait noir bordé de triangles : faille du Midi. — Trait fort : faille sub-verticale affectant au moins les terrains secondaires. — Trait fin : faille sub-verticale connue comme n'affectant que les terrains primaires.



Carte B : Tectonique du Nord de la France (d'après Sommé, 1978).

Carte C : Morphostructure de la Champagne Berrichonne (d'après Duprat, 1996).

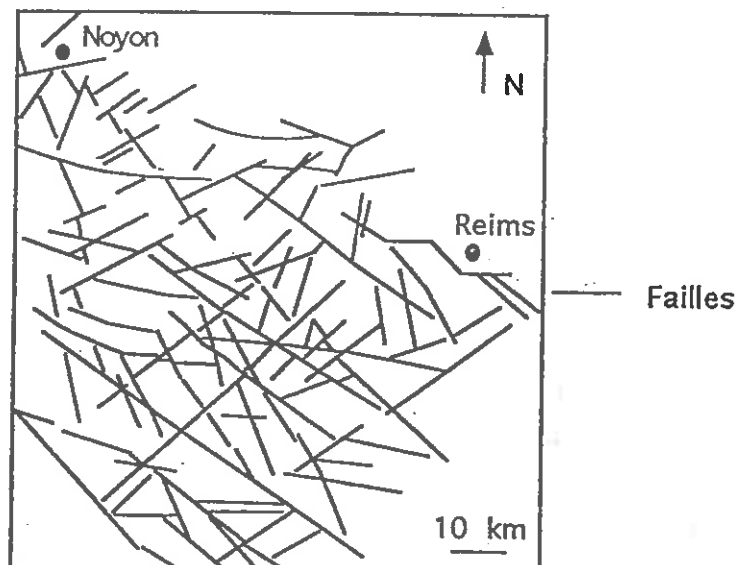


Fig. 5 : Synthèse bibliographique de la tectonique du Nord de la France

III. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Les données hydrogéologiques sont tirées des travaux de La Quèrièrè (de) (1972), sur les relations entre nappes perchées d'âge éocène et la nappe de la craie.

1. Les principaux aquifères

La succession des dépôts tertiaires de nature lithologique différente a donné naissance à une superposition de nappes perchées. On rencontre de haut en bas :

- l'aquifère des sables du Bartonien inférieur, présents sporadiquement au niveau de buttes sableuses préservées de l'érosion ;

- l'aquifère des calcaires grossiers lutétiens dont le niveau imperméable est constitué par les argiles de Laon parfois absentes, permet des relations continues avec les formations sous jacentes ;

- l'aquifère des sables cuisiers (Yprésien supérieur), homogène, présentant localement des sous-unités limitées par des niveaux plus argileux. Son substratum est formé par les dépôts sparnaciens argilo-sableux ;

- l'aquifère des sables thanétiens dont le niveau imperméable est constitué par l'argile de Vaux-sous-Laon. Cette dernière, répartie de manière éparse et limitée (2m maximum) suppose une continuité avec l'aquifère crayeux ;

- l'aquifère crayeux d'âge Coniacien, Santonien, utilisé comme réservoir d'alimentation en eau potable par les collectivités.

Les principaux aquifères sont les calcaires lutétiens, les sables cuisiers et l'ensemble sablo-crayeux sénò-thanétièn. Les deux premiers sont captifs et perchés tandis que la nappe de la craie est continue, captive sous les plateaux éocènes et libre en vallée.

Les argiles de Laon et les argiles sparnaciennes forment les niveaux imperméables qui séparent ces 3 nappes.

Les fluctuations de la nappe de la craie en vallée sont assez lentes et continues. Les amplitudes sont de l'ordre du mètre. La nappe des sables cuisiers en régime libre, varie beaucoup plus brutalement à chaque événement pluvieux, avec plusieurs mètres d'amplitude, mais sous le Lutétien, elle semble plus stable avec des réactions de quelques centimètres aux événements pluvieux (La Quèrièrè (de) (1972)).

Une étude sur les anisotropies de perméabilité verticale et horizontale entre Lutétien-Yprésien sup. et Yprésien inf-Crétacé, a permis de mettre en évidence des échanges entre le Lutétien et la craie. La perméabilité verticale de l'ensemble Lutétien-Yprésien est estimée à 10^{-9}ms^{-1} (ce chiffre est très influencé par l'épaisseur des argiles sparnaciennes), et la perméabilité de la craie en plateau de 10^{-9}ms^{-1} à 10^{-8}ms^{-1} (La Quèrièrè (de) (1972)).

2. Hydrochimie

Les caractéristiques hydrochimiques de chaque nappe ont été déterminées à partir de travaux d'évaluation de ressources hydrauliques du BRGM et sont recensées dans le tableau I (La Quèrièrè (de) (1972)).

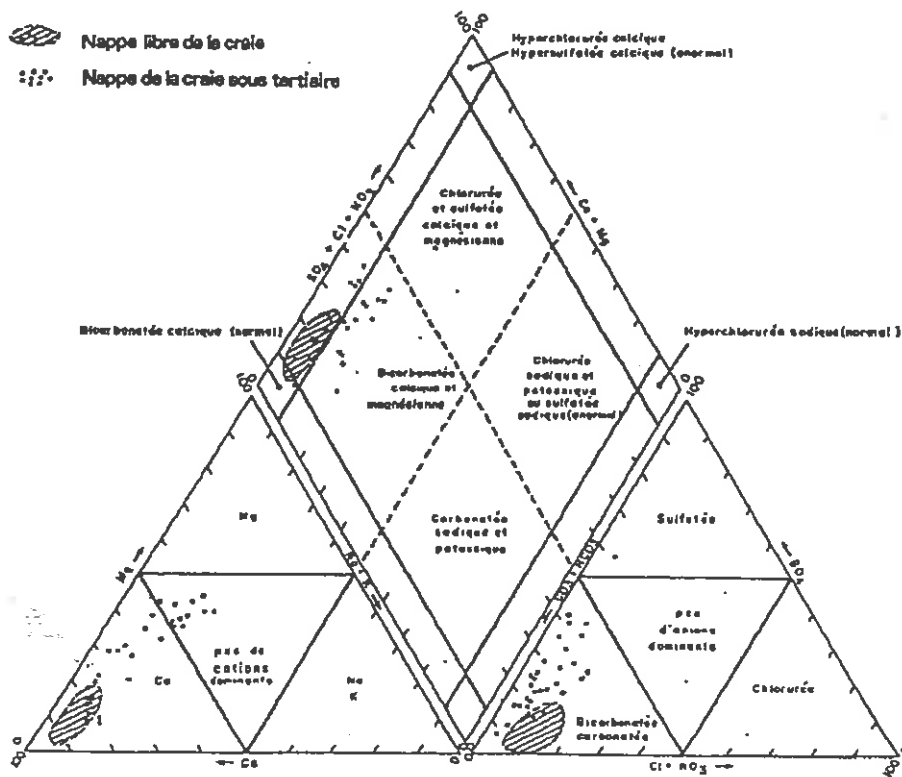
Toutes les eaux souterraines étudiées sont froides ($10,5^{\circ} \text{C}$ à $11,5^{\circ} \text{C}$), neutres ou légèrement basiques. (pH de 7,1 à 7,3). Elles sont dures de 30 à 40° français. La résistivité de l'ordre de 1800 ohms par centimètre (ou $555 \mu\text{S cm}^{-1}$) pour les calcaires lutétiens et les sables cuisiers, ainsi que la craie en affleurement, diminue pour les sables thanétiens et la craie (1500 ohms par centimètre ou $665 \mu\text{S cm}^{-1}$) sous l'Eocène, ce qui indique une augmentation de la minéralisation en contexte captif.

Les eaux de ces nappes sont du type bicarbonaté calcique et magnésien selon la terminologie utilisée dans la classification de Piper (BRGM, 1979).(Fig.6). Cependant, certains ions secondaires peuvent modifier légèrement cet équilibre, en particulier les sulfates importants dans la nappe de l'ensemble Crétacé-Thanétien (Pfefer (1959)), et les nitrates et chlorures abondants dans la nappe du Lutétien et de la craie (ces derniers proviendraient d'une pollution agricole diffuse (La Quèrièrè (de), 1972)).

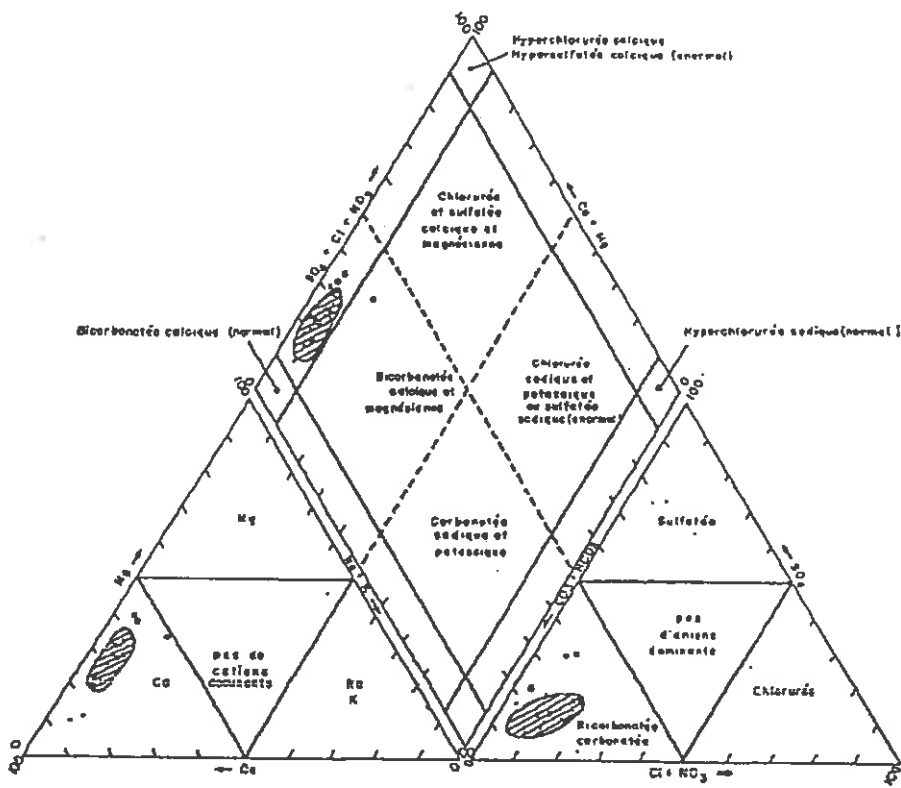
Répartition statistique des ions en milliéquivalents

		Nombre d'échantillons	Médiane	Intervalle interquartile		Valeurs extrêmes		
Lutétien	t°	41	10,5	9	11	8	13,5	
	pH	28	7,4	7	7,4	6,2	7,8	
	dH (°F)	33	36	31	40	22,7	45	
	ρ 18 (Ocm ⁻¹)	50	1800	1676	1885	895	2176	
	rCl	58	0,62	0,50	0,88	0,16	2,50	
	rSO ₄	10	0,60	0,50	0,79	0,24	0,84	
	rNO ₃	57	0,36	0,27	0,67	0	1,40 ¹	
1. 20 % de l'échantillon est non potable par suite d'une trop forte teneur NO ₃ (limite 44 mg/l = 0,70 mg)								
Cuisien	t	16	10,7	10	12	7	15	
	pH	9	7,2	7,2	7,5	7,15	7,6	
	dH	17	31,5	28,5	35	22,5	48,8	
	ρ 18	23	1864	1594	2041	843	2354	
	rCl	32	0,51	0,34	0,64	0,03	3,27	
	rSO ₄	11	0,68	0,35	1,09	0,29	6,50	
	rNO ₃	31	0,24	0,09	0,50	0	1,31 ²	
2. 10. % de l'échantillon est non potable par suite d'une forte teneur en NO ₃ .								
Ensemble Craie-Thunétien	t	16	11,2	10,4	12,1	9	13,3	
	pH	17	7,05	7	7,15	6,8	7,38	
	dH	22	40,5	34,7	41,6	22	57	
	ρ 18	23	1494	1341	1648	1108	1919	
	Ca	21	6,40	5,47	7,55	0,22	10	
	Mg	19	1,07	0,70	1,81	0,18	2,77	
	Na	17	0,52	0,39	0,69	0,35	1,00	
	K	17	0,12	0,07	0,18	0,05	2,38	
	CO ₃ H	16	6,43	6,00	7,25	2,95	8,16	
	Cl ⁻	25	0,62	0,42	0,73	0,25	2,31	
	SO ₄	21	1,27	0,92	1,66	0,21	3,40	
	NO ₃	28	0,03	t	0,23	0	2,57	
	Craie sous Eocène	t	9	12,1	11,4	12,8	11	14,5
		pH	24	7,30	7,17	7,50	6,90	8,0
		dH	25	38,4	31,5	42,0	25,2	42
		ρ 18	10	1500	1250	1631	899	2050
		Ca	19	5,05	3,55	5,75	2,50	7,90
		Mg	19	3,11	1,65	3,51	0,88	5,34
		Na	19	0,67	0,43	0,78	0,35	1,78
		K	19	0,18	0,11	0,26	0,04	0,41
		CO ₃ H	19	5,76	5,44	6,77	4,16	9,33
Cl ⁻		19	0,45	0,37	0,85	0,28	3,69	
Craie en affleurement ou sous alluvions	pH	21	7,3	7,1	7,5	6,8	10,3	
	dH	21	36,8	32,2	48,4	5,1	66,8	
	Ca	21	5,45	4,75	7,00	0,25	11,25	
	Mg	21	1,89	1,17	2,33	0,11	4,22	
	Na	21	0,57	0,35	0,78	0,13	4,35	
	K	21	0,11	0,03	0,23	0,01	5,02	
	CO ₃ H	21	6,16	5,36	6,42	0,32	10,40	
	Cl ⁻	21	0,60	0,40	0,84	0,28	4,40	
	SO ₄	21	0,52	0,31	1,56	0,02	5,35	
	NO ₃	21	0,27	0,16	0,47	0,00	2,81	

**Tableau I : Bilan statistique de la qualité physico-chimique des eaux souterraines
(d'après La Quérière (de), 1972)**



Caractéristiques des eaux de la nappe de la craie



Caractéristiques des nappes du Lutétien et du Cuisien

Fig. 6 : Classification des eaux (selon la méthode de Piper)

Chapitre II : DONNEES LOCALES

I. LOCALISATION, PRESENTATION

La Réserve de Versigny s'inscrit dans des contextes climatologique, géologique, géomorphologique et hydrogéologique de plus grande échelle qui conditionnent directement le microclimat ainsi que la géomorphologie. Le travail de recherche, à cette échelle a donc été menées sur un secteur englobant la carte géologique à 1/50 000° de la Fère, la moitié est de la carte géologique à 1/50 000° de Chauny et la moitié sud de la carte géologique à 1/50 000° de Saint-Quentin. La majorité de ces travaux, réalisées dans la région naturelle du Laonnois, à la jonction entre pays crayeux au nord et pays tertiaire au sud, tente de déterminer les caractéristiques physiques du milieu, ainsi que leurs répercussions éventuelles sur le fonctionnement global de la Réserve.

II. CLIMATOLOGIE

Sachant que le fonctionnement des hydrosystèmes naturels est étroitement conditionné par l'action conjuguée des facteurs climatiques (température, précipitation, évapotranspiration...) une étude climatique a été réalisée. Elle vise d'une part à quantifier chaque paramètre sur différentes périodes de temps (année, saison, mois) et d'autre part à apprécier la variabilité temporelle de chacun d'entre eux. Ces informations serviront par la suite au niveau du site, à expliciter la variabilité saisonnière des écoulements observés.

1. Température

Le site de la Réserve Naturelle de Versigny n'étant pas encore équipé d'appareils de mesures climatologiques, on a utilisé les températures issues des deux stations météorologiques les plus proches : Pouilly-sur-Serre et Aulnoy-sous-Laon, situées respectivement à 10 km au nord-est et 12 km au sud-est de Versigny.(Fig.7). Cependant il faut noter que les seules valeurs

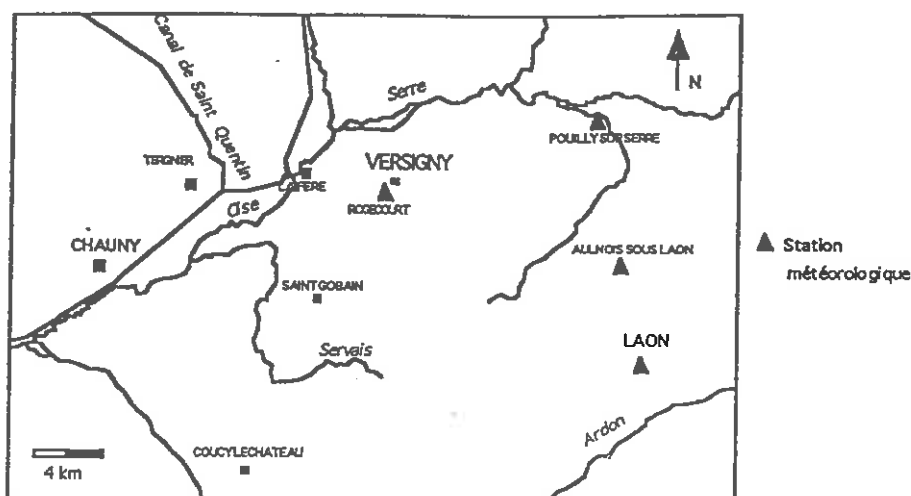


Fig. 7 : Localisation des stations météorologiques

de pluviosité ne permettent pas d'apprécier le microclimat du marais, étroitement conditionné par les caractéristiques physiques et hydriques des sols en présence. Ce phénomène n'a pas fait ici l'objet d'une étude particulière mais il a été étudié dans les marais proches de Cessières-Montbavin. (Grégoire & Merkachi, 1986).

a) *Températures annuelles*

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	moyenne
Pouilly	10,9°	11,0°	9,8°	10,6°	10,1°	11,5°	11,4°	9,6°	10,5°
Aulnoy	10,8°	11,1°	9,9°	10,6°	10,1°	11,4°	11,1°	9,3°	10,5°

Tableau II : Températures moyennes annuelles de Pouilly-sur-Serre et Aulnoy-sous-Laon de 1989 à 1996 (en °C).

Les températures annuelles moyennes s'échelonnent pour les huit dernières années entre 9,6°C et 11,5°C pour Pouilly et entre 9,3°C et 11,4°C pour Aulnoy. Elles fluctuent de façon similaire sauf pour les années 95 et 96 où l'on note des variations de l'ordre de 0,3°C par an.

Les moyennes identiques, 10,5°C, indiquent des conditions climatiques sensiblement homogènes et témoignent également d'une légère hausse de la température moyenne pluriannuelle des huit dernières années, 10,5°C, alors qu'elle est de 10,1°C sur la période 1961-1996.

b) Températures mensuelles

Pouilly 61-96	2,4°	3,2°	6,0°	9,0°	13,0°	16,1°	18,1°	18,0°	14,8°	10,8°	5,9°	3,1°
Pouilly 89-96	3,8°	3,8°	7,3°	9,1°	13,6°	16,0°	19,3°	18,9°	14,5°	11,3°	6,4°	3,5°
Aulnoy 89-96	4,1°	4,0°	7,5°	9,1°	13,4°	15,4°	18,8°	18,4°	14,4°	11,2°	6,5°	3,6°

Tableau III : Températures moyennes mensuelles à Pouilly-sur-Serre de 1961 à 1996 et de 1989 à 1996 et à Aulnoy-sous-Laon de 1989 à 1996.(en°C).

Sur la période 1989-1996, les stations de Pouilly et d'Aulnoy enregistrent des températures moyennes mensuelles sensiblement identiques mais avec quelques nuances saisonnières. Aulnoy présente des contrastes thermiques moins importants qu'à Pouilly avec des hivers et des étés plus doux.

A Pouilly, sur la période 1961-1996, le mois le plus froid est Janvier (2,4°C) et le plus chaud Juillet (18,1°C). L'amplitude thermique moyenne est égale à 15,8°C, et le nombre de jours de gel atteint 70 par an. Ces résultats traduisent une diminution de l'influence océanique et un passage progressif vers un climat plus continental.

2. Pluviométrie

Nous essaierons d'estimer à partir de plusieurs stations météorologiques, la répartition temporelle et spatiale des hauteurs de pluie à différentes échelles afin d'estimer les périodes favorables aux réalimentations des nappes souterraines.

a) Régime annuel

(1)Corrélation annuelle

L'analyse de la corrélation entre les valeurs pluviométriques annuelles des stations de Pouilly-sur-Serre, Aulnoy-sous-Laon, Rogécourt et Laon, permet de mesurer le degré de correspondance entre chaque station.

Dans le cas de corrélation linéaire simple, la variable *précipitation*, caractéristique de deux échantillons (x et y), représentés chacun par n observations (x_1, \dots, x_n et y_1, \dots, y_n), montre une concentration autour d'une courbe lorsque l'on reporte toutes ces valeurs sur un

diagramme rectangulaire. Ce nuage de points peut être ajusté par une droite de régression. Soient 2 séries de valeurs appartenant respectivement aux variables x et y, la droite de régression de y en x est définie par une droite donnant la meilleure estimation de y pour une valeur de x.

Son équation s'écrit :

$$* y = ax + b$$

où a est le coefficient de régression de y en x et b l'ordonnée à l'origine.

a peut être défini par la formule :

$$* a = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot \Delta y_i}{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2} \quad \text{avec } \Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad \text{et} \quad \Delta y_i = y_i - \bar{y}$$

et b par :

$$* b = \bar{y} - a\bar{x}$$

\bar{x} et \bar{y} représentent les moyennes respectives de chaque échantillon.

On détermine de la même façon les paramètres de la régression de x en y en remplaçant x par y dans les équations ci-dessus.

Le degré d'association entre deux variables linéairement dépendantes se mesure grâce au coefficient de corrélation noté r.

$$* r = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot \Delta y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2}}$$

Dans un premier temps, on cherchera à savoir dans quel intervalle de confiance noté S peut se trouver la moyenne \bar{X} de la population dont proviennent les échantillons relevés de moyenne \bar{x} et d'écart-type s.

On choisit un degré de liberté égal à N-1 avec une probabilité de 0,05 soit 95% pour que cette moyenne \bar{X} se trouve à l'intérieur

$$* S = \frac{t_o \cdot s}{\sqrt{N}} \quad \text{et} \quad \bar{X} = \bar{x} \pm \frac{t_o \cdot s}{\sqrt{N}}$$

t_o est donné par la table de Student- Fischer pour P = 0,05 et N-1 degré de liberté. Les valeurs de ces intervalles sont répertoriées dans le tableau IV.

P = 0,05	V = N-1	t_o	$t_o \frac{s}{\sqrt{N}}$	$\bar{X} = \bar{x} \pm t_o \frac{s}{\sqrt{N}}$
Aulnois-sous-Laon	7	2,37	74	$570 < \bar{X} < 718$
Rogécourt	29	2,045	43	$625 < \bar{X} < 711$
Laon	35	2,030	40	$646 < \bar{X} < 726$
Pouilly-sur-Serre	35	2,030	37	$631 < \bar{X} < 705$

Tableau IV : Intervalles de confiance des moyennes des différentes populations de hauteur de pluie.

Le tableau V fournit les paramètres des droites de régression entre les modules pluviométriques de chaque station.

$\rightarrow x$ $\downarrow y$	Aulnois-sous-Laon	Rogécourt	Pouilly-sur-Serre	Laon
Aulnois-sous-Laon	a: b:	0,967 -6,8	0,972 -7,54	0,891 19,6
Rogécourt	0,938 66,3		0,919 56,3	0,852 87,1
Pouilly-sur-Serre	0,972 44,3	0,903 62,4		1,019 5,3
Laon	1,073 9,2	0,960 40,5	0,901 50,0	

Tableau V : Paramètres de la régression entre les modules pluviométriques de chaque station.

Le tableau VI indique les coefficients de corrélation respectifs entre chaque station. Ils fluctuent entre 0,90 et 0,97. De plus tous les coefficients sont significatifs au seuil de 1%, ce qui signifie qu'il y a moins d'une chance sur cent pour que les coefficients soient le fait du hasard (test de Student). Ces considérations démontrent que les stations pluviométriques situées aux environs de Versigny sont bien corrélées et donc qu'il existe une homogénéité des précipitations à l'échelle annuelle sur cet espace.

	Aulnois	Rogécourt	Pouilly	Laon
Aulnois	1 4	0,97 8	0,97 8	0,97 8
Rogécourt		1 30	0,91 30	0,90 30
Pouilly			1 36	0,95 36
Laon				1

Tableau VI: Coefficients de corrélation des pluies annuelles des stations météorologiques de Rogécourt, Aulnoy-sous-laon, Pouilly-sur-Serre et Laon

Cette démarche suppose que les échantillons des hauteurs de pluie annuelles de chaque station puissent s'ajuster par une loi de répartition comme nous le verrons ultérieurement. Afin de pouvoir établir une étude statistique sur une période commune (1967-1996) entre les 4 stations, il a été envisagé d'étendre les données d'Aulnoy et de Rogécourt en tenant compte de celles de Pouilly et de Laon. Les coefficients de corrélations relativement bons, respectivement de 0,97 et 0,97 pour Aulnoy et 0,91 et 0,90 pour Rogécourt ont permis cette opération.

Aulnoy-sous-Laon

Si on réalise une régression multiple entre Pouilly, Laon d'une part, Aulnoy d'autre part, on obtient un coefficient de corrélation supérieur à 0,98. La corrélation multiple améliore sensiblement l'estimation et l'extension des pluies annuelles d'Aulnoy se fera à partir du plan de régression linéaire multiple :

$$Z = 0,381 X + 0,552 Y + 1,06$$

Z: précipitation moyenne de l'année considérée à Aulnoy

X: précipitation moyenne de l'année considérée à Pouilly

Y: précipitation moyenne de l'année considérée à Laon

Cette équation peut s'écrire sous la forme : $Z = aX + bY + C$

$$\text{avec } a = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot \Delta z_i - \sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot \Delta y_i \cdot \sum_{i=1}^n \Delta y_i \cdot \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot \Delta y_i)^2}$$

$$\text{et } b = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n \Delta y_i \cdot \Delta z_i - \sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot \Delta y_i \cdot \sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot \Delta y_i)^2}$$

$$\text{et } c = \frac{\sum z - a \sum x - b \sum y}{n}$$

avec n : nombre d'observations communes

avec $\Delta x_i = (x - \bar{x})$, $\Delta y_i = (y - \bar{y})$, $\Delta z_i = (z - \bar{z})$

$$\text{et } r^2_{z,xy} = \frac{a \sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot \Delta z_i + b \sum_{i=1}^n \Delta y_i \cdot \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \Delta z_i^2}$$

On recherche à étendre k valeurs de y à l'aide de la longue série de Pouilly n valeurs de x, les deux étant liés par un coefficient de corrélation r . L'efficacité relative E de l'extension peut être calculée par la formule :

$$* E = 1 + \left(1 - \frac{k}{n}\right) \cdot \left(\frac{1 - (k-2)r^2}{k-3}\right)$$

Ce terme est plus explicite lorsqu'on l'exprime en nombres de valeurs fictivement observées k :

$$-* k' = \frac{k}{E}$$

Ainsi à partir des 36 observations de Pouilly, on obtient une séquence fictive de 30 ans.

Rogécourt.

On réalise la même démarche en corrélant d'une part Pouilly et Laon et d'autre part Rogécourt. On obtient ainsi un coefficient de corrélation de 0,91 qui n'améliore pas l'estimation. L'extension des données s'effectuera par l'équation suivante :

$$* Z = 0,569 X + 0,33 Y + 63,6$$

Z: précipitation moyenne de l'année considérée à Rogécourt

X: précipitation moyenne de l'année considérée à Pouilly

Y: précipitation moyenne de l'année considérée à Laon

(2) Etudes statistiques

Les échantillons constitués par les hauteurs de pluies annuelles peuvent s'ajuster par une loi de répartition : la loi de Gauss. Dans ce cas, la distribution des hauteurs de pluies annuelles

est définie par sa moyenne et son écart-type. Le diagramme de Gauss permet d'obtenir une représentation linéaire de cette loi de répartition. La comparaison de la droite d'ajustement et de la position des points observés permet de juger de l'adéquation de l'échantillon à la loi de Gauss. En rangeant les observations dans un ordre décroissant, on calcule leur probabilité au dépassement empirique par la formule :

$$* F_1(x_i) = \frac{i-0,5}{n}$$

où i est le rang, n le nombre d'observations communes dans l'échantillon et F_1 la probabilité au dépassement empirique. Les points sont placés en reportant en abscisse les probabilités au dépassement et en ordonnée arithmétique les valeurs correspondantes prises par la variable. Pour tracer l'équation d'ajustement, il suffit de prendre 3 valeurs de la variable de Gauss, de calculer les quantiles x_T correspondants et de joindre les 3 points ainsi obtenus pour juger de l'ajustement et donc de l'adéquation de la loi normale à l'échantillon.

L'équation de la droite d'ajustement s'écrit :

$$* x_T = s u + \bar{x}$$

x_T : quantile

s : écart type de l'échantillon

\bar{x} : moyenne de l'échantillon

u : variable réduite de Gauss

L'ajustement à la loi de Gauss des échantillons de hauteurs de pluie annuelle sur la période 1967-1996 s'avère correct, mais avec quelques nuances pour les valeurs extrêmes (Fig.8 et 9).

Le calcul des quantiles $P(T)$ des pluies annuelles se déduit de l'équation de Henry :

$$* P(T) = s u + \bar{x}$$

avec u : variable réduite correspondant à la probabilité au dépassement choisi

s : écart type de l'échantillon

\bar{x} : moyenne de l'échantillon

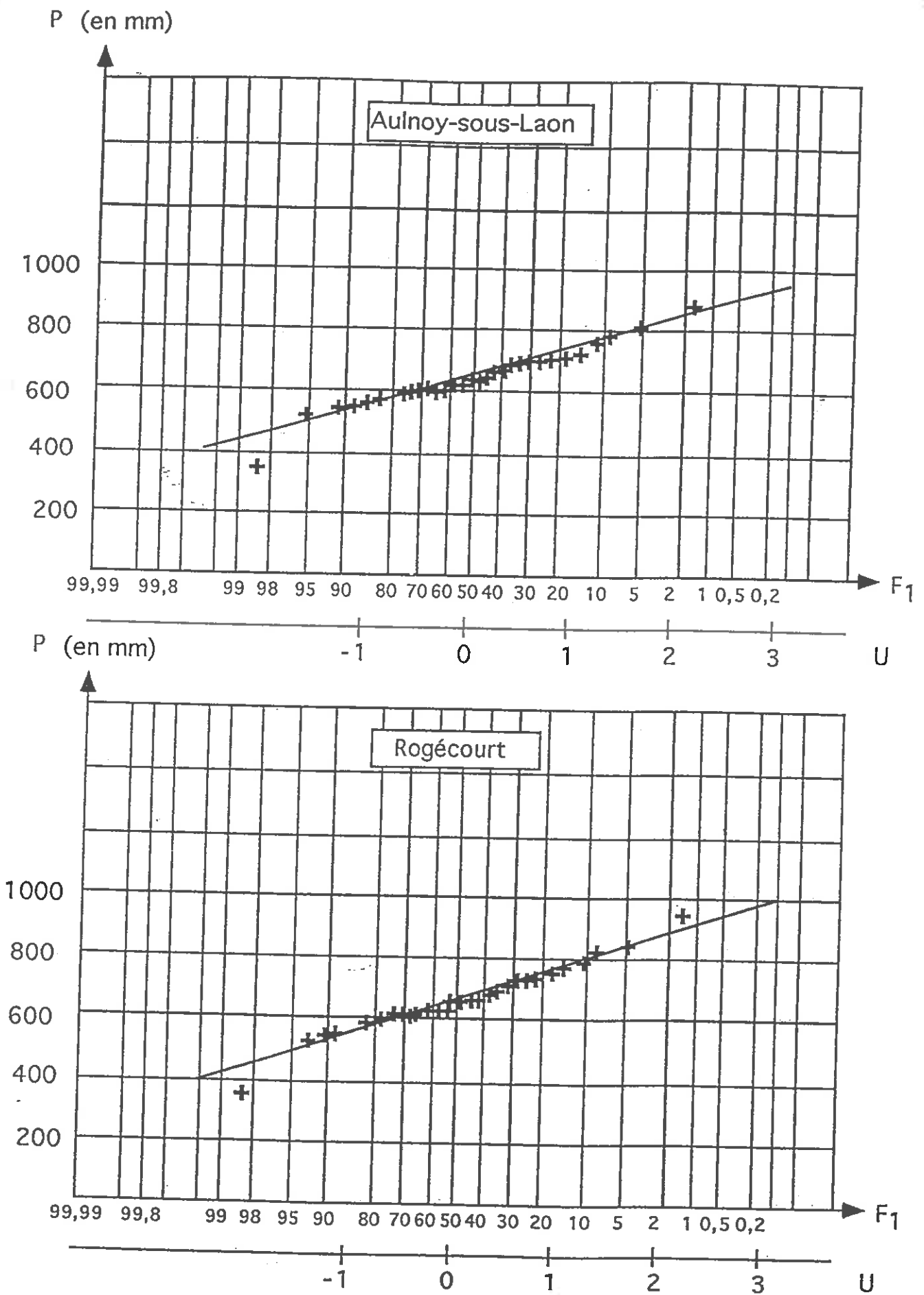


Fig. 8 : Ajustement des précipitations annuelles à la loi de Gauss pour les stations de Rogécourt et Aulnoy-sous-Laon

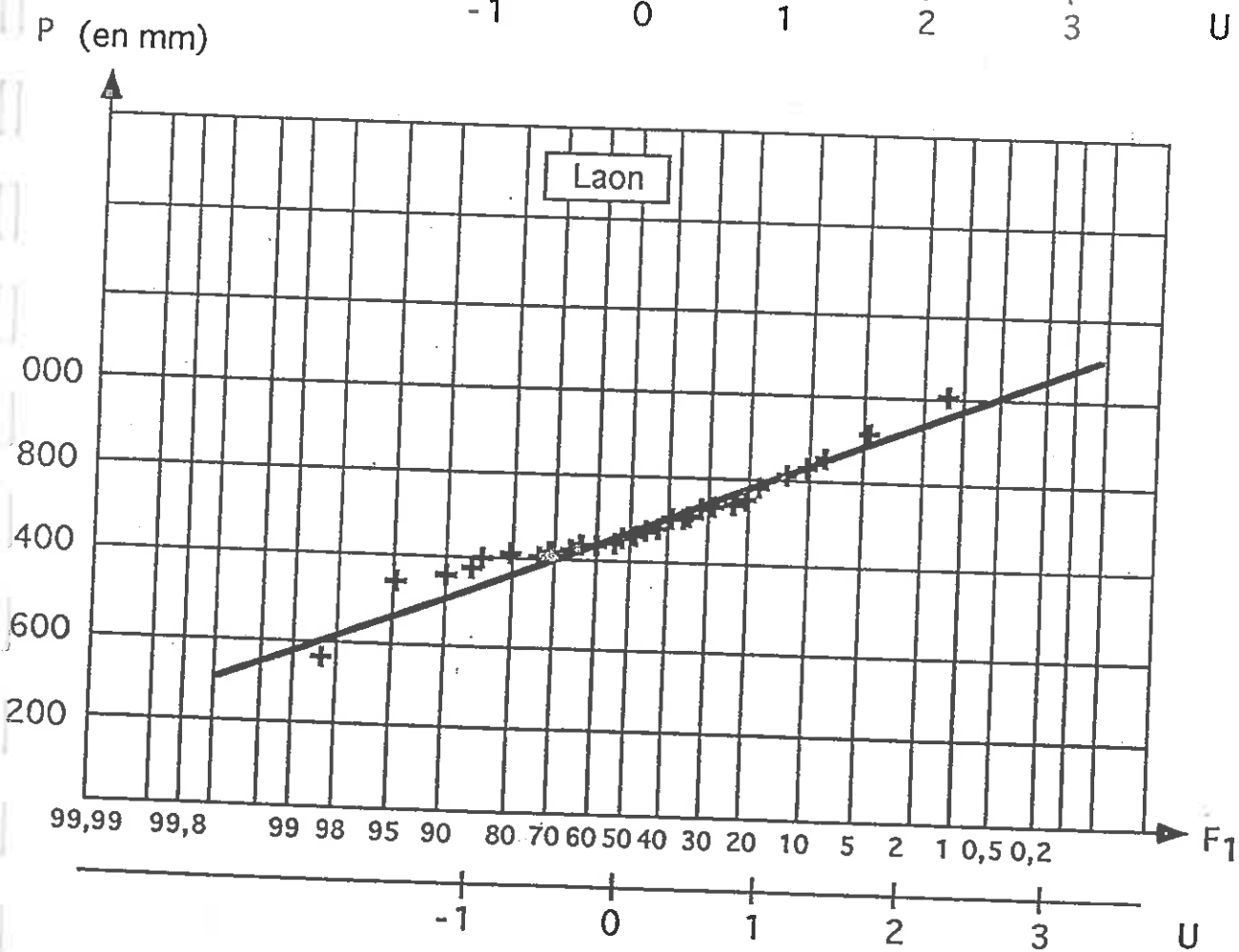
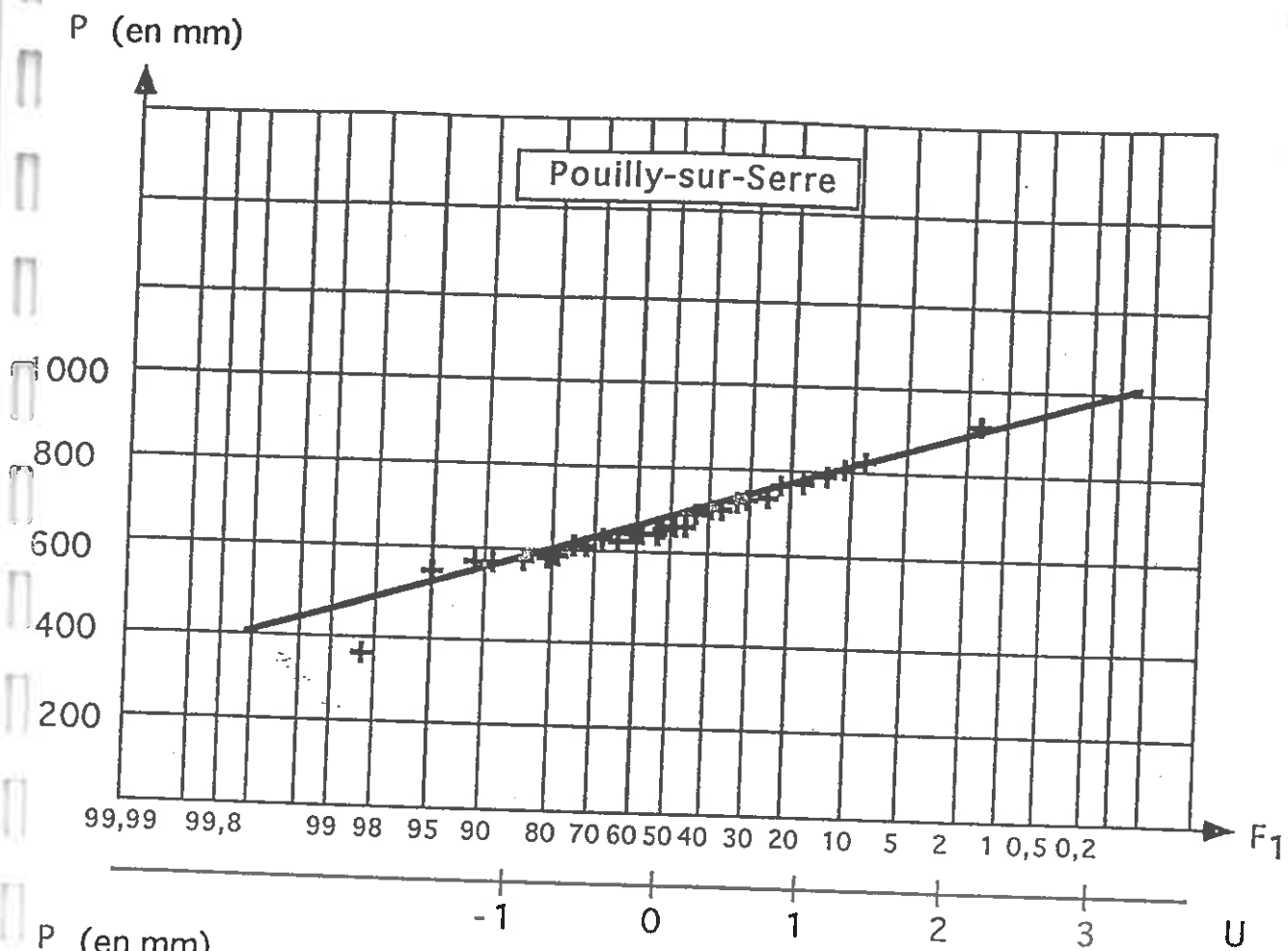


Fig. 9 : Ajustement des précipitations annuelles à la loi de Gauss pour les stations de Laon et Pouilly-sur-Serre

La table de Gauss fournit, pour des probabilités au dépassement choisi F_1 , la variable réduite u correspondante. Ainsi, la valeur d'une variable $P(T)$ dont la probabilité au dépassement $F_1 = \frac{1}{T}$, est le quantile P_T de période de retour T .

exemple : quantile P_{10} période de retour 10 ans. La table de Gauss fournit une valeur $u = 1,28$.
d'où $P_{10} = (1,28 * 107) + 667,3 = 804$

Le tableau VII ci-dessous fournit la fréquence d'années particulièrement sèches et humides pour les 4 stations, sur la période 1967-1996.

	Aulnois-sous-Laon	Rogécourt	Laon	Pouilly-sur-Serre
<u>Années humides</u>				
- centennale	1988 (899)	1988 (933)	1988 (996)	
- cinquantenale				1988 (912)
- vicennale	1981 (832)	1981 (844)	1981 (912)	1981 (857)
- décennale	1995 (780)	1995 (806)	1995 (851)	1995 (811)
<u>Années sèches</u>				
- centennale	1976 (335)	1976 (351)	1976 (356)	1976 (360)
- cinquantenale				
- vicennale				
- décennale				

Tableau VII: Années exceptionnellement pluvieuses et sèches, avec les précipitations correspondantes (en mm).

(3) Estimation de la lame d'eau moyenne sur l'aire de nos 4 stations

La lame moyenne est estimée par une simple moyenne arithmétique des 4 modules pluviométriques annuels calculés. Ce résultat peut paraître subjectif car il est déterminé à

partir de données estimées (Aulnoy et Rogécourt), mais vu d'une part les faibles variations du relief et d'autre part les faibles écarts entre chaque module pluviométrique, on peut considérer cette valeur comme significative.

Stations pluviométriques	Périodes d'observation	Pluie moyenne en mm	Pluie moyenne 1967-1996
Aulnois-sous-Laon	1989-1996	644	641
Rogécourt	1963-1992	668	662
Laon	1961-1996	686	692
Pouilly-sur-Serre	1961-1996	668	667
		Lame moyenne ⇒	665

Tableau VIII : Moyennes pour les différentes périodes d'études considérées.(en mm)

CONCLUSION

L'étude des pluies annuelles moyennes a permis de définir d'après les coefficients de corrélation un degré d'association entre chaque station très élevé ($0,90 < r < 0,97$), permettant par la suite d'étendre nos données sur 30 ans, période minimum pour bénéficier de précipitations annuelles moyennes considérées comme représentatives. Ces valeurs homogènes fournissent dès lors une lame annuelle moyenne de 665 mm sur le secteur considéré. De plus, une étude statistique montre que l'année 1988 fût exceptionnellement pluvieuse (période de retour > à 100 ans) avec une moyenne annuelle (sur nos 4 stations) de 935 mm. De même, l'année 1976 demeure la plus sèche (période de retour de 100 ans) avec en moyenne 350 mm.

Par ailleurs, la figure 11 montre une évolution cyclique de période 7 à 8 ans des modules pluviométriques annuels. L'analyse en pluie moyenne (à 3 ans) dont le but est de lisser les données brutes, permet de mieux visualiser cette évolution séquentielle des pluies moyennes annuelles. Ainsi depuis 1990, on se trouve dans une séquence ascendante dont le maximum fût l'année 1995 avec en moyenne 812 mm (Fig.12).

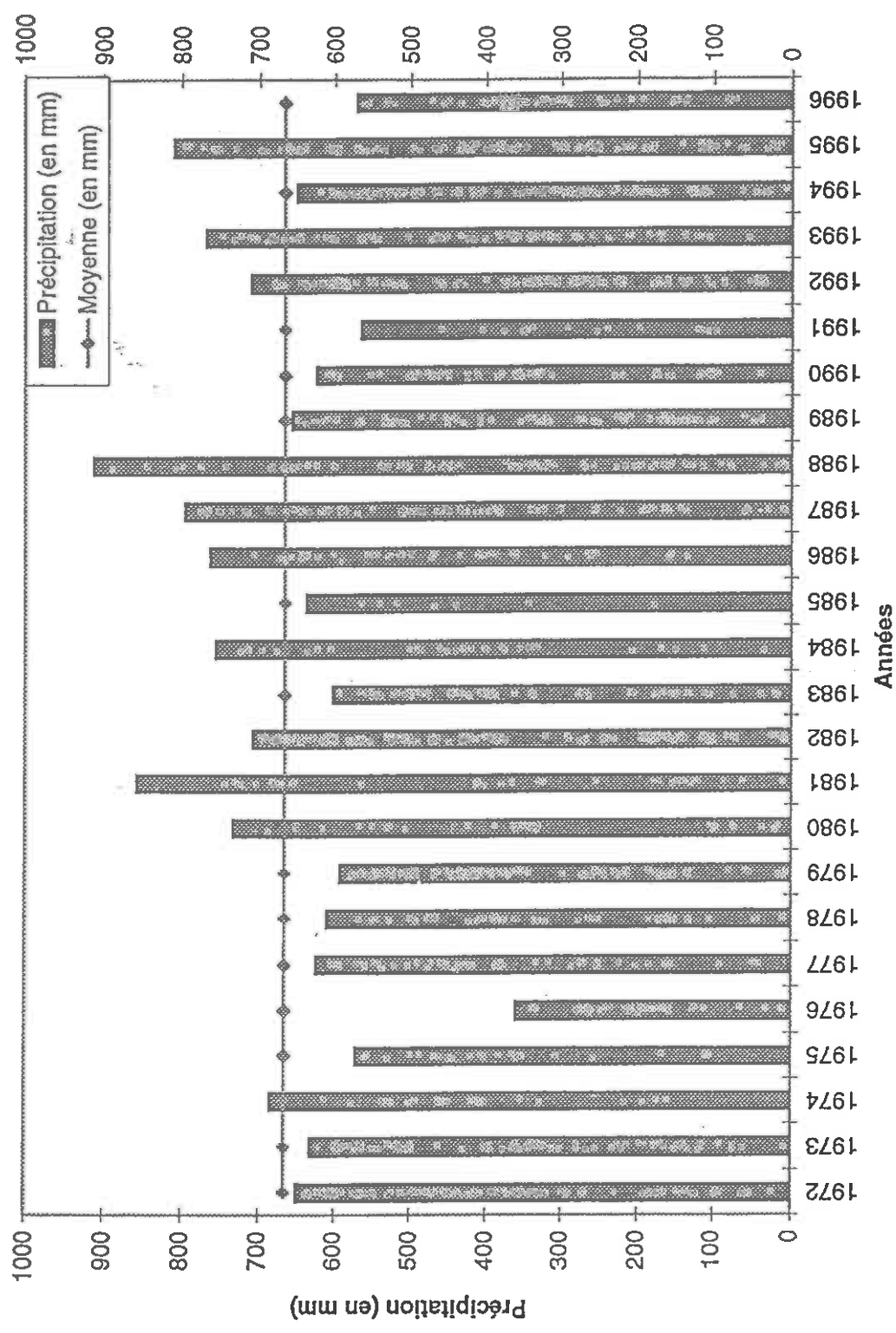


Fig. 10 : Précipitations annuelles à Pouilly-sur-Serre de 1972 à 1996 (en mm)



Fig. 11 : Précipitations annuelles en moyenne mobile à trois ans à Pouilly-sur-Serre de 1972 à 1996 (en mm)

b) Régime saisonnier

Ce paragraphe présentera la répartition des précipitations saisonnières dans le temps et l'espace, avec une étude plus précise sur la période Automne- Hiver.

(1)Caractéristiques des précipitations saisonnières moyennes

	Hiver (Janvier-Mars)	Printemps (Avril-Juin)	Été (Juillet- Septembre)	Automne (Octobre- Décembre)
Aulnoy-sous- Laon 1989-1996	<u>163</u>	158	141	<u>182</u>
Rogécourt 1963-1992	150	<u>172</u>	160	<u>179</u>
Laon 1961-1996	167	<u>169</u>	156	<u>192</u>
Pouilly-sur- Serre 1961-1996	160	<u>169</u>	162	<u>180</u>

Tableau IX: Précipitations saisonnières pour chaque station (en mm).

Le printemps et l'automne sont les saisons les plus arrosées et l'été et l'hiver les plus sèches pour la période 1961-1996. Depuis les 8 dernières années, on note que l'automne et l'hiver deviennent les saisons les plus pluvieuses. Cependant, on ne peut généraliser cette constatation car la moyenne arithmétique sur 8 ans ne permet pas de gommer les variabilités pluviométriques saisonnières.

(2)Analyse sur l'évolution des pluies Automne-Hiver et les pluies des années hydrologiques.

Les précipitations annuelles de chaque année hydrologique subissent des variations annuelles et pluriannuelles avec des maxima de pluie pour les années 82-83,87-88,94-95. Les rythmes saisonniers Automne-Hiver et Printemps-Eté bien qu'indépendants, peuvent toutefois s'organiser en séquences de précipitations excédentaires et déficitaires. Ainsi les années 72-73 à 78-79 se caractérisent par des précipitations annuelles déficitaires (Automne-

Hiver et Printemps-Eté) synonyme de sécheresse, alors que les années 79-80 à 87-88 se caractérisent au contraire par des précipitations élevées synonymes d'excès d'eau (Fig.12). Cependant depuis les années 88-89, ces séquences disparaissent au profit de séquences annuelles à bisannuelles, alternativement sèches et humides. De plus, les pluies Automne-Hiver largement déficitaires sauf pour les années 90-91, 93-94 et 95-96, ne sont que trop partiellement compensées par les pluies Printemps-Eté, ce qui accentue la diminution des réserves des nappes. Ce phénomène est bien visible pour les deux dernières années, où les précipitations Automne-Hiver ainsi que les précipitations Printemps-Eté sont largement inférieures à la normale et donc synonymes de sécheresses aggravées. Dès lors, seules des saisons Automne-Hiver très pluvieuses comme les années 93-94 et 94-95 peuvent être susceptibles de rétablir des réserves hydrogéologiques convenables.

(3) Etude des précipitations Automne-Hiver à Aulnoy-sous-Laon

Le site d'Aulnoy a été choisi comme site d'étude préférentiel des modules pluviométriques car les données d'évapotranspiration n'étaient disponibles que dans cette station météorologique.

** Corrélation saisonnière*

Les modules pluviométriques Automne-Hiver des stations de Pouilly-sur-Serre, Laon, Rogécourt, Aulnoy-sous-Laon ont fait l'objet d'une corrélation linéaire dont les paramètres des droites de régression et les coefficients de corrélation sont présentés dans les tableaux X et XI.

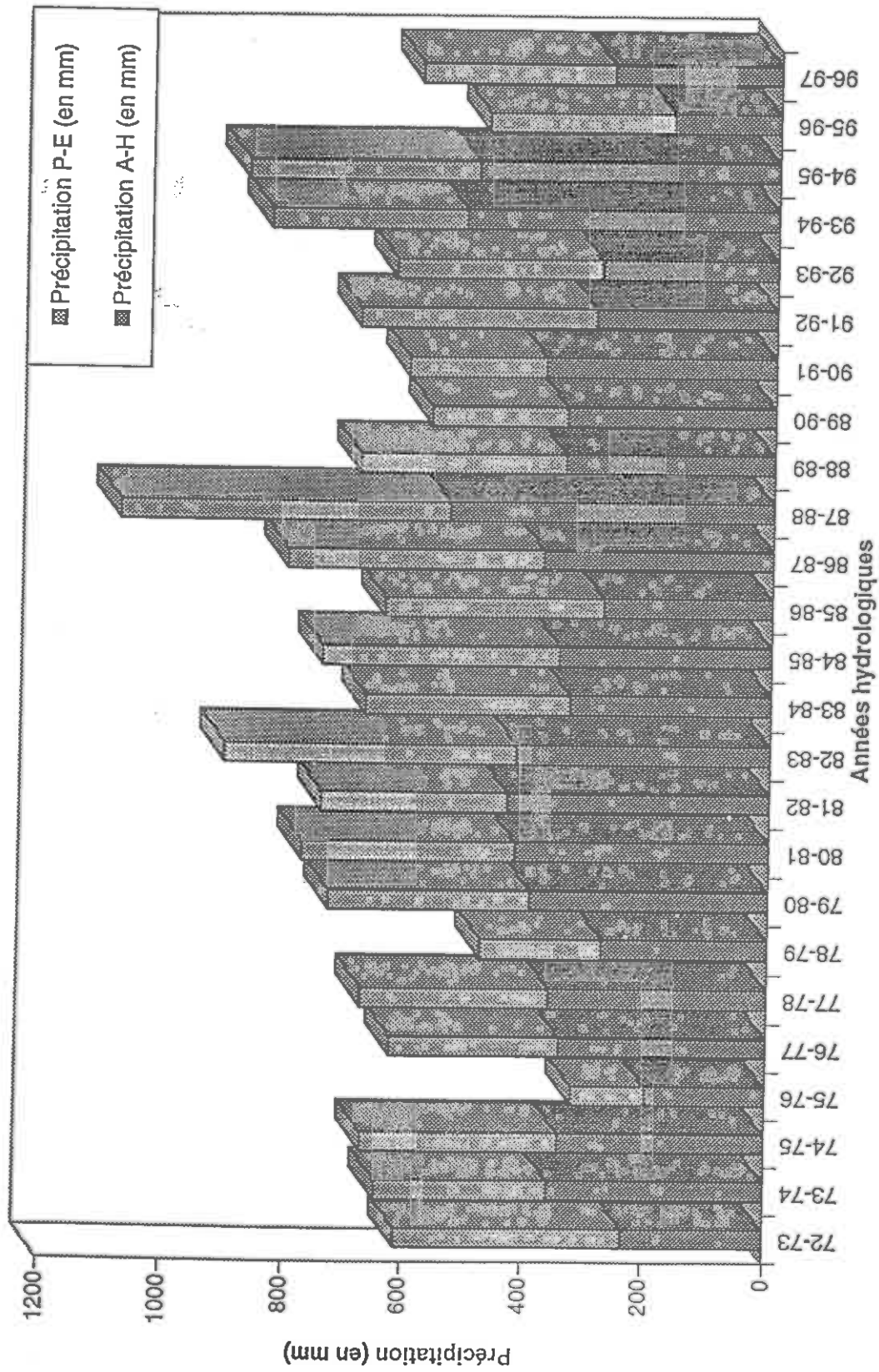


Fig. 12 : Comparaison des précipitations Printemps-Eté et Hiver-Automne à Pouilly-sur-Serre de 1972 à 1996

→ x ↓ y	Aulnoy-sous-Laon	Rogécourt	Pouilly-sur-Serre	Laon
Aulnoy-sous-Laon	a : b :	0,713 86	0,973 - 1,9	0,871 12,3
Rogécourt	1,402 - 120,5		0,994 - 5,9	0,839 31,8
Pouilly-sur-Serre	1,007 8,8	0,981 13,9		0,90 17,5
Laon	1,035 24,4	1,06 5,4	1,015 12,2	

Tableau X : Paramètres des droites de régression entre chaque station

	Aulnois	Rogécourt	Pouilly	Laon
Aulnois	1 4	0,99 7	0,99 7	0,95 7
Rogécourt		1 30	0,987 30	0,943 30
Pouilly			1 35	0,957 35
Laon				1

Tableau XI : Coefficient de corrélation des pluies Automne-Hiver des stations météorologiques de Rogécourt, Aulnoy-sous-Laon, Pouilly-sur-Serre et Laon

Les résultats montrent des coefficients de corrélation excellents qui fluctuent entre 0,94 et 0,99. Les bonnes corrélations déjà visibles avec les précipitations annuelles, se retrouvent également à l'échelle saisonnière avec encore plus de signification.

Le tableau XII fournit une estimation des intervalles de confiance S des populations de moyenne \bar{X} dont sont extraits les différents échantillons de moyenne \bar{x} et d'écart-type s.

P = 0,05	V = N - 1	t_o	$t_o \cdot \frac{s}{\sqrt{N}}$	$\bar{X} = \bar{x} \pm t_o \cdot \frac{s}{\sqrt{N}}$
Aulnoy-sous-Laon	7	2,37	93	246 < \bar{X} < 432
Rogécourt	29	2,045	28	301 < \bar{X} < 357
Laon	34	2,030	33	324 < \bar{X} < 390
Pouilly-sur-Serre	34	2,030	31	319 < \bar{X} < 361

Tableau XII : Intervalles de confiance des différentes populations de hauteurs de pluie Automne-Hiver

** Extension des pluies saisonnières à Aulnoy-sous-Laon.*

L'extension des données d'Aulnoy-sous-Laon a été réalisée à partir des stations de Pouilly-sur-Serre et Laon dont les coefficients de corrélation respectifs sont 0,99 et 0,95. On réalise une régression multiple entre d'une part Pouilly et Laon et d'autre part Aulnoy. Le coefficient de corrélation atteint 0,99 et témoigne d'un très fort degré d'association entre les différentes stations. Les données étendues sur la période 1971-72 et 1996-97 sont fournies par l'équation :

$$* Z = X - 0,026 Y - 1,6$$

Z : moyenne Automne-Hiver à Aulnoy

X : moyenne Automne-Hiver de l'année considérée à Pouilly

Y : moyenne Automne-Hiver de l'année considérée à Laon

** Etudes statistiques à Aulnoy*

Les valeurs des hauteurs de pluie Automne-Hiver peuvent être ajustées selon la loi de Gauss (Fig. 13). La distribution de cet échantillon est caractérisée par une moyenne égale à 336 mm et un écart-type égal à 89 mm. On peut vérifier que la moyenne calculée se trouve bien dans l'intervalle de confiance déterminé dans le tableau XII.

Toutefois, la valeur élevée de l'écart-type témoigne d'une grande variabilité des pluies moyennes Automne-Hiver et donc souligne les problèmes de prévision d'une année à l'autre des infiltrations efficaces.

Les valeurs de pluie Automne-Hiver exceptionnelles sont données dans le tableau XIII.

Ces valeurs remarquables expriment le caractère aléatoire des précipitations saisonnières avec pour témoins deux années 93-94 et 94-95 particulièrement pluvieuses suivies d'une année 95-96 très sèche.

Année	Hauteur de pluie	Période de retour
1987-1988	520 mm	50 ^{ème} humide
1993-1994	518 mm	50 ^{ème} humide
1994-1995	463 mm	10 ^{ème} humide
1995-1996	158 mm	20 ^{ème} sèche
1975-1976	192 mm	10 ^{ème} sèche

Tableau XIII : Précipitations Automne-Hiver remarquables sur la période 1971-1972 à 1996-1997.

CONCLUSION

Les précipitations saisonnières moyennes les plus fortes (sur les 4 stations), effectuées sur 30 ans sont rencontrées en Automne et au Printemps, avec respectivement 183 mm et 167 mm, et les plus faibles en Hiver et Eté avec 160 mm et 155 mm. Une analyse statistique des précipitations Automne-Hiver à la station d'Aulnoy-sous-Laon montre des pluies exceptionnellement élevées en 1987-1988, 1993-1994 et 1994-1995 avec respectivement 520, 518 et 463 mm et exceptionnellement faibles en 1995-1996 et 1975-1976 avec 158 et 192 mm.

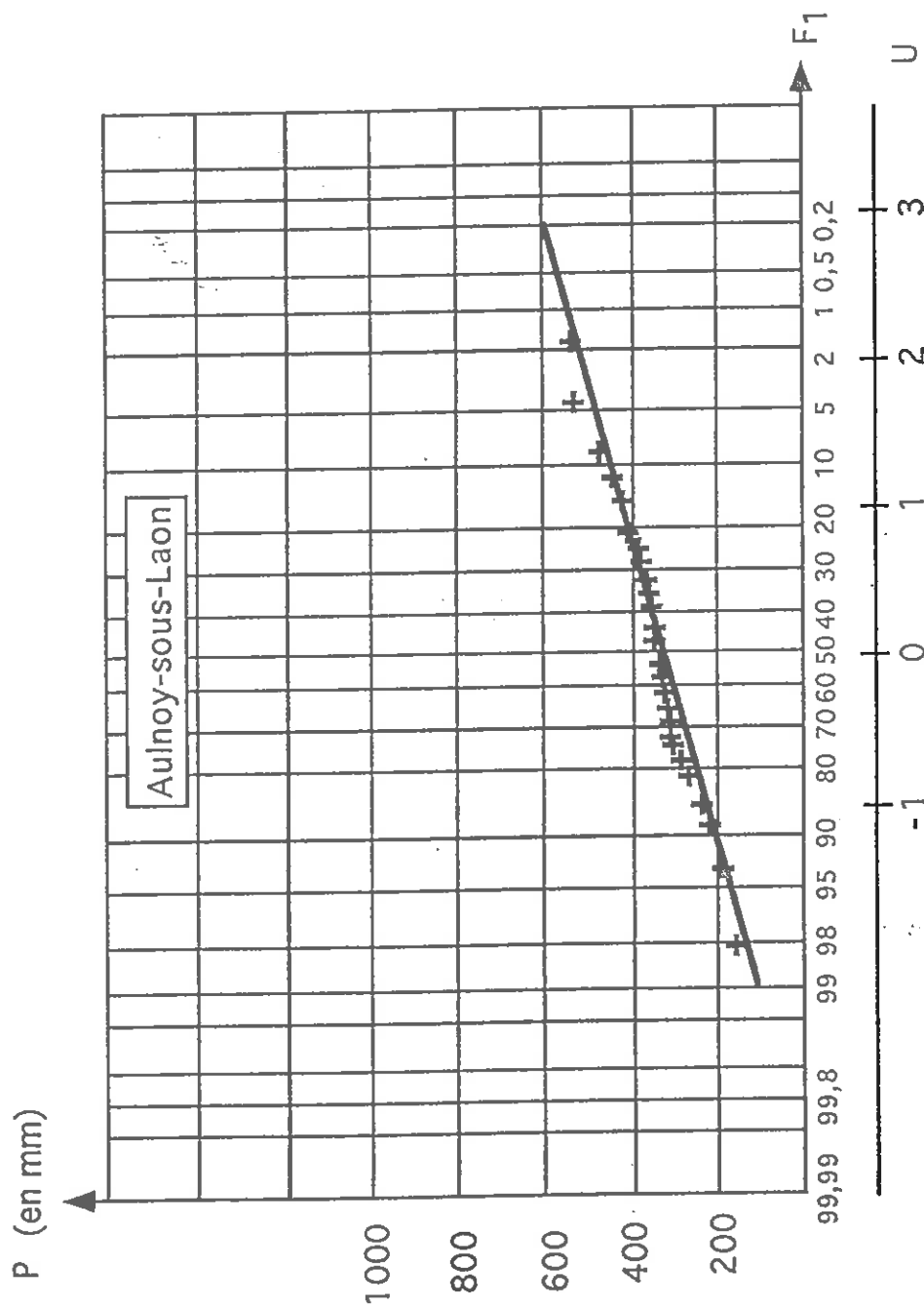


Fig. 13 : Ajustement des précipitations saisonnières à la loi de Gauss à la station d'Aulnoy-sous-Laon

c) Régime mensuel


Les précipitations moyennes mensuelles ne feront pas ici l'objet d'une étude statistique poussée, l'essentiel étant d'apprécier les mois pluvieux et secs ainsi que la variabilité des précipitations dans le temps et l'espace.


	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Aulnoy 89-96	63,5	46,4	53,0	58,7	46,4	52,6	38,4	51,2	51,1	51,8	52,8	77,8
Rogé- court 63-92	50,9	42,5	57,5	47,1	64,0	67,1	50,8	57,2	52,1	55,4	64,3	59,1
Pouilly 61-96	57,3	44,9	53,7	48,2	60,1	57,5	51,0	56,3	56,1	54,3	62,6	64,5
Laon 61-96	60,2	47,2	57,8	50,9	62,3	56,7	51,7	53,8	55,6	58,6	63,8	66,8

Tableau XIV : Précipitations mensuelles moyennes pour les 4 stations étudiés (en mm).

3 classes de précipitations mensuelles moyennes ont été définies arbitrairement :

 < 60 mm

 60 mm < < 64 mm

 > 64 mm

D'après ces résultats, les mois les plus pluvieux sont Décembre, Novembre et Mai et les plus secs Février, Avril et Juin.

On peut également calculer un indice de variabilité (rapport entre les hauteurs de pluies minimales et maximales), qui permet d'évaluer les fluctuations inter-annuelles des pluviosités mensuelles, ainsi qu'un indice r_i qui n'est autre que l'écart à la moyenne.

Le tableau XV permet les observations suivantes :

- les écarts à la moyenne des pluies mensuelles maximales varient entre 1,42 et 3,14.

Les plus fortes valeurs se situent aux mois de Décembre, Janvier et Juillet, et les plus faibles aux mois de Novembre et Mai ;

- les écarts à la moyenne des pluies mensuelles minimales varient entre 0,02 et 0,58.

Les plus faibles valeurs qui caractérisent dans ce cas une grande variabilité se situent aux mois d'Octobre et Juin, et les plus fortes valeurs en Juillet et Novembre ;

- les indices de variabilité possèdent des valeurs maximales en Juin, Octobre et Décembre et des valeurs minimales en Novembre et Juillet.

On en déduit que le régime pluvial est irrégulier en Octobre, Juin et Décembre et plus régulier en Juillet et Novembre.

3. Evapotranspiration

Le terme d'évapotranspiration désigne la quantité de vapeur d'eau rejetée dans l'atmosphère tant par évaporation directe au niveau du sol lui-même que par transpiration des organes aériens des plantes.

L'étude de l'évapotranspiration exige que soient définis deux concepts essentiels : l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

La notion d'évaporation potentielle apparaît en particulier avec les travaux de Thornthwaite et se définit comme représentant la quantité d'eau disponible qu'il faudrait pour que les plantes puissent maintenir leur taux de transpiration à un niveau maximal.

L'évapotranspiration réelle quant à elle, correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée au dessus de la surface étudiée.

Ces paramètres sont calculés à partir de formule empirique, dont celle de Thornthwaite, basées sur la corrélation entre la température moyenne de l'air et le taux de transpiration des plantes, et celle de Penman basée sur le bilan énergétique. Après avoir présentées ces deux formules (voir annexe n°2), nous verrons si les résultats obtenues à partir de ces deux modes de calcul sont significatifs.

Les calculs qui conduisent à évaluer l'ETP par cette méthode sont fastidieux, toutefois l'utilisation de tables et abaqués en facilite l'exploitation (Brochet & Gerbier, 1975).

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
A U L N O Y	hM	160	93	91	117	74	112	71	114	96	113	107	189
	date	95	90	92	89	96	92	93	96	95	93	96	93
	Δ_{moy}	2,33	2,00	1,71	1,99	1,59	2,13	1,83	2,22	1,88	2,18	2,02	2,33
	hm	4,2	11,8	4,8	10,2	14,8	30,4	20,6	11	25	9,6	11,2	44
Y	date	92	93	93	96	91	96	90	93	96	95	95	95
	Δ_{moy}	0,06	0,25	0,09	0,17	0,32	0,58	0,53	0,21	0,49	0,18	0,21	0,56
	Iv	13,1	7,88	13,9	11,5	5	3,7	3,4	10,4	3,8	11,8	9,5	4,3
P O U I L L Y	hM	174	114	113	122	106	140	146	130	116	143	102	203
	date	95	70	88	89	71	63	88	63	95	80	72	93
	Δ_{moy}	3,04	2,53	2,10	2,52	1,76	2,43	2,36	2,31	2,06	2,62	1,63	3,14
	hm	6,4	3,8	9,1	8,9	8,5	1,3	14,9	5,3	12	2,8	13,1	4,4
	date	92	86	61	96	90	76	79	76	76	69	95	71
	Δ_{moy}	0,11	0,08	0,17	0,18	0,14	0,02	0,29	0,09	0,21	0,05	0,21	0,06
R O G E C O U R T	hM	134	109	106	126	112	170	142	156	125	141	91	151
	date	88	70	88	89	88	63	66	63	73	81	72	65
	Δ_{moy}	2,6	2,55	1,84	2,68	1,75	2,53	2,79	2,72	2,4	2,54	1,42	2,55
	hm	5,6	5,6	8,8	10,3	4,1	2,4	9,7	5,2	6,4	1,8	12,1	4,5
	date	92	86	73	74	90	76	63	76	71	69	78	71
	Δ_{moy}	0,11	0,13	0,15	0,21	0,06	0,09		0,09	0,12	0,09	0,18	0,07
L A O N	hM	175	124	131	133	128	149	146	140	128	159	111	203
	date	95	70	88	89	69	92	88	63	73	81	96	93
	Δ_{moy}	2,39	2,62	2,26	2,61	2,05	2,62	2,82	2,60	2,30	2,71	1,74	2,04
	hm	4	6	6	7	8	2	10	6	4	2	11	8
	date	92	86	61	96	86	76	79	76	71	69	78	71
	Δ_{moy}	0,06	0,12	0,1	0,13	0,13	0,03	0,19	0,11	0,07	0,03	0,17	0,12
Y	Iv	13,7	20,6	21,8	19	16	14,5	14,6	23,3	32	29,5	10,1	25,4

Tableau XV : Variabilité des précipitations mensuelles (hm : pluie mensuelle minimum (en mm), Δ_{moy} : écart à la moyenne, Iv (indice de variabilité) : égal à hM/hm et la date : année correspondante).

commentaire : deux types de grisés ont été utilisés pour différencier les valeurs témoins d'une forte variabilité (gris-foncé) et d'une faible variabilité (gris-clair).

Remarque : Une comparaison des calculs d'ETP selon Penman et Thornthwaite a pu être réalisée sur les années 1992 et 1993, afin d'évaluer les variations induites ces 2 méthodes de calculs.

Les valeurs d'ETP utilisées pour ce bilan ont été calculées par les services de la météorologie nationale d'après la formule de Penman.

mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	total
ETP _{PEN} 1992	6	11	31	<u>78</u>	<u>128</u>	97	122	105	64	34	14	3	693
ETP _{THO} 1992	7	13	33	<u>45</u>	<u>90</u>	99	122	114	71	34	27	10	665
ETP _{PEN} 1993	10	13	<u>46</u>	<u>72</u>	95	108	108	101	57	32	7	12	641
ETP _{THO} 1993	19	6	<u>27</u>	<u>55</u>	88	106	112	95	64	41	9	18	660

Tableau XVI: Comparaison entre les ETP de Penman et Thornthwaite en 1992 et 1993.(en mm)

Les différences entre les ETP annuelles de 1992 et 1993, s'avèrent peu élevées (respectivement 4% et 3% de variation), et sont considérées comme négligeables.

Les différences entre les ETP mensuelles demeurent minimales sauf pour 4 cas (soulignées dans le tableau ci-dessus), et confirment une très faible variabilité entre ces 2 types de calcul.

Par ailleurs, on a calculé sur cinq ans et d'après la méthode de Thornthwaite, une ETP moyenne mensuelle pour estimer la variabilité des ETP de 1992 et 1993 calculées selon la méthode de Penman.

Les mesures effectuées de 1992 à 1996, sont fournies dans le tableau .

MOIS	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
ETP	12	11.6	28.2	47.2	81.8	99.8	124.8	108.9	67.2	44.2	22.8	10.6

Tableau XVII : ETP moyenne mensuelle à Aulnoy-sous-Laon de 1992 à 1996. (en mm)

Les valeurs mensuelles d'ETP de Penman présentent le même ordre de grandeur que celles de Thornthwaite, sauf pour les mois de Mars et Avril. Toutefois, ces résultats prouvent qu'il n'y a pas de grosses variations entre les valeurs d'ETP obtenues à partir des deux formules et donc,

on peut envisager que les valeurs d'ETP de Penman pour le début de l'année 1997 sont représentatives .

On note tout de même des extrêmes saisonniers avec 11.4 mm en hiver alors que l'ETP atteint 100 mm en été.

4. CONCLUSION

L'étude des températures donnent une température annuelle moyenne sur 30 ans de 10,1° C. L'amplitude thermique moyenne est égale à 15,8°C et le nombre de jours de gel atteint 70 par an. Ces résultats indique un climat de type semi-continentale.

Les précipitations mensuelles moyennes apparaissent les plus importantes en Novembre, Décembre et Mai et les plus faibles en Février, Avril et Juin.

Les précipitations saisonnières moyennes sont abondantes en Automne et au Printemps et plus limitées en Hiver et en Eté. Les précipitations Automne-Hiver et Printemps-Eté peuvent s'organiser en séquences pluviométriques déficitaires (années 1972-1973 à 1978-1979) ou excédentaires (années 1979-1980 à 1987-1988). Depuis, ces séquences homogènes disparaissent, et les pluies Automne-Hiver déficitaires sauf pour les 3 années hydrologiques 1990-1991, 1993-1994 et 1994-1995, sont trop partiellement compensées par les pluies Printemps-Eté. On note alors que malgré des statistiques qui montrent la saison Automne-Hiver comme la période la plus arrosée, le volume précipité saisonnier lui tend à diminuer.

Les précipitations annuelles moyennes sont estimées à 665 mm. Elles subissent des variations cycliques de périodes 7 à 8 ans. Depuis 1995, il semble que nous nous engagions dans une phase de déficit pluviométrique.

L'évapotranspiration est directement conditionnée par les facteurs thermiques et énergétiques. Ainsi, elle demeure discrète en Automne-Hiver puis devient conséquente au Printemps et en Eté. Ces valeurs d'ETP, antagonistes aux valeurs pluviométriques laissent supposer de fortes variations des ressources en eau du sol entre les saisons hivernales et estivales.

III. GEOLOGIE

Ce paragraphe vise d'une part à reconnaître les spécificités lithologiques locales induites par des variations latérales de faciés et d'autre part à préciser le contexte structural local et son imbrication dans le contexte structural régional.

1. Lithostratigraphie

La lithostratigraphie demeure identique à celle observée dans le chapitre 1, mais on note tout de même quelques particularités concernant la lithologie.

L'argile de Vaux-sous-Laon d'âge thanétien moyen est uniquement présente à l'est d'un méridien imaginaire passant par La Fère.

Les sables thanétiens grésifiés en partie à leur sommet possèdent également des caractéristiques lithologiques locales, comme les galets de Versigny. Il s'agit d'un niveau constitué d'un mélange de galets centimétriques et de sables (1 à 5m d'épaisseur), assimilés à un ancien cordon littoral. Cet ensemble grésifié forme d'une part des entablements qui protègent localement les buttes sableuses de l'érosion et d'autre part peut servir de bon repère lithostratigraphique.

Les calcaires lutétiens subissent au niveau de leur base une très forte dolomitisation et se transforment peu à peu en sables calcaires peu cohérents, facilement mobilisables par les agents d'érosion.

2. Tectonique

L'étude structurale des terrains s'effectue à partir des coupes géologiques réalisées lors de sondages géologiques ou forages de recherche en eau. Ces données, archivées dans le cadre de l'application du code minier, sont consultables à la banque de données du sous-sol du BRGM à Amiens. La carte structurale s'établit en se référant aux variations d'altitude existant entre des niveaux repères lithologiques fiables comme le toit du Turonien supérieur, le contact Crétacé-Tertiaire, et le contact Thanétien-Yprésien inférieur. L'exactitude du tracé des failles réalisé sur une carte à 1/50 000° dépend dès lors de la densité des sondages géologiques répertoriés, soit au total 154 coupes pour l'ensemble de la carte (Fig. 14).

Cette dernière fait apparaître 3 familles principales de failles de directions : N30-60°, N80-100°, N130-160°, ainsi que les déplacements relatifs de chaque bloc lorsque l'interprétation le permet.

Par ailleurs, des mesures de fracturation ont été effectuées en carrière sur l'ensemble de la carte à 1/50 000 de La Fère, avec néanmoins plus d'insistance sur la partie est de la feuille, où se situe la Réserve de Versigny. Ainsi, 6 carrières visitées ont permis de relever un nombre

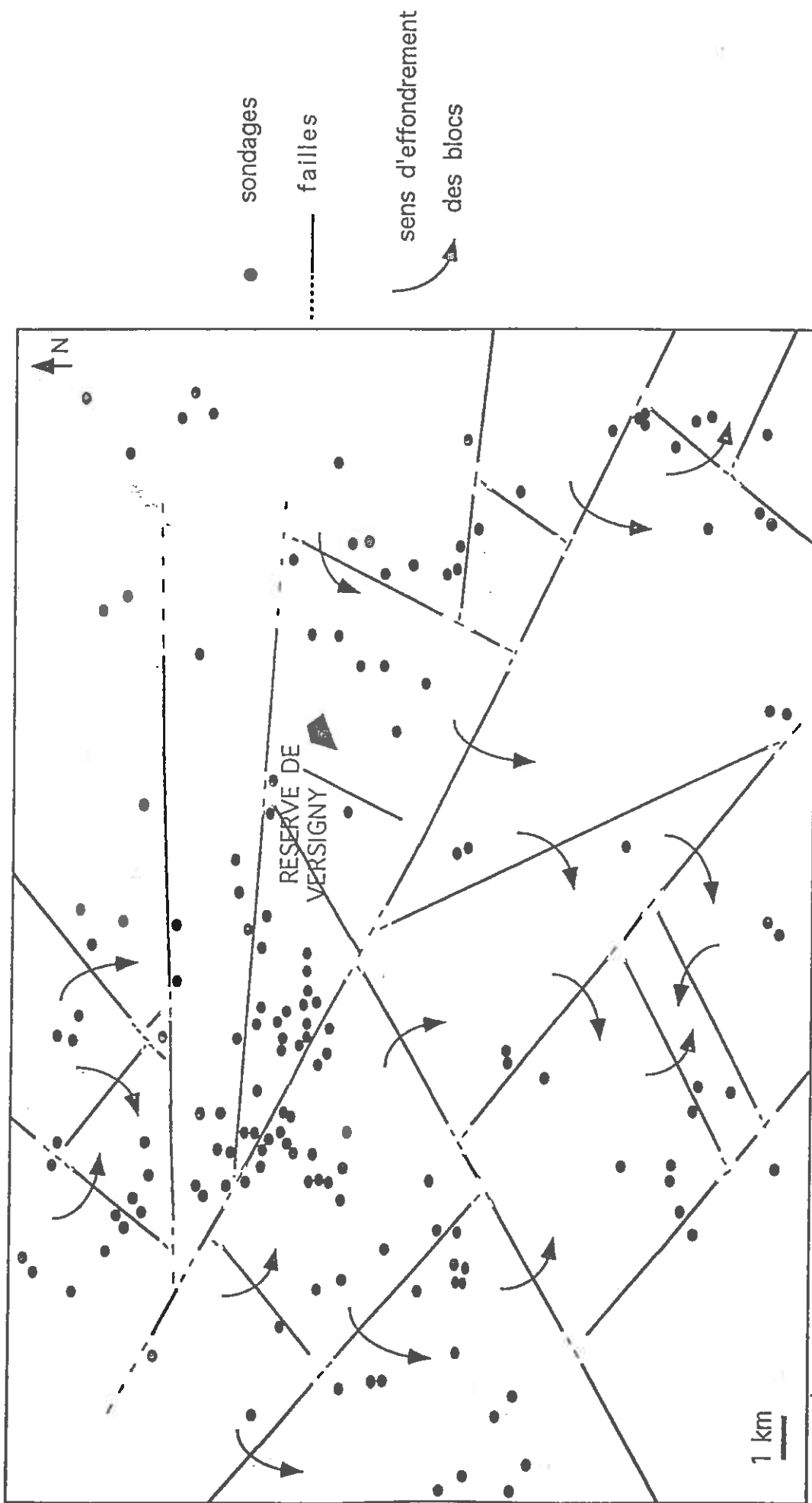


Fig. 14 : Structure de la région de La Fère

suffisant de fractures pour dresser des rosaces de fracturation. Au total, 300 fractures et failles ont été recensés, avec systématiquement une étude des directions, pendages et colmatages des plans de discontinuités tectoniques.

Les rosaces de fracturation, établies à partir d'histogrammes de fracturation par classes de 10° (Annexes 3) permettent de distinguer 4 familles principales de fracturation de directions : N30-50°, N60-80°, N100-120° et N140-160°.

Remarque : parmi ces directions de fracturation a été déterminée, dans la carrière de Fourdrain (carrière n°4) une faille néotectonique N92, pendage 82° N, affectant des dépôts de pentes quaternaires.

Ces directions s'avèrent sensiblement homothétiques aux directions des failles principales de la carte structurale, et les rosaces de fracturation des carrières n°1, 2 et 3 confirment l'existence sur le terrain de failles tracées à partir des sondages. (Fig. 15).

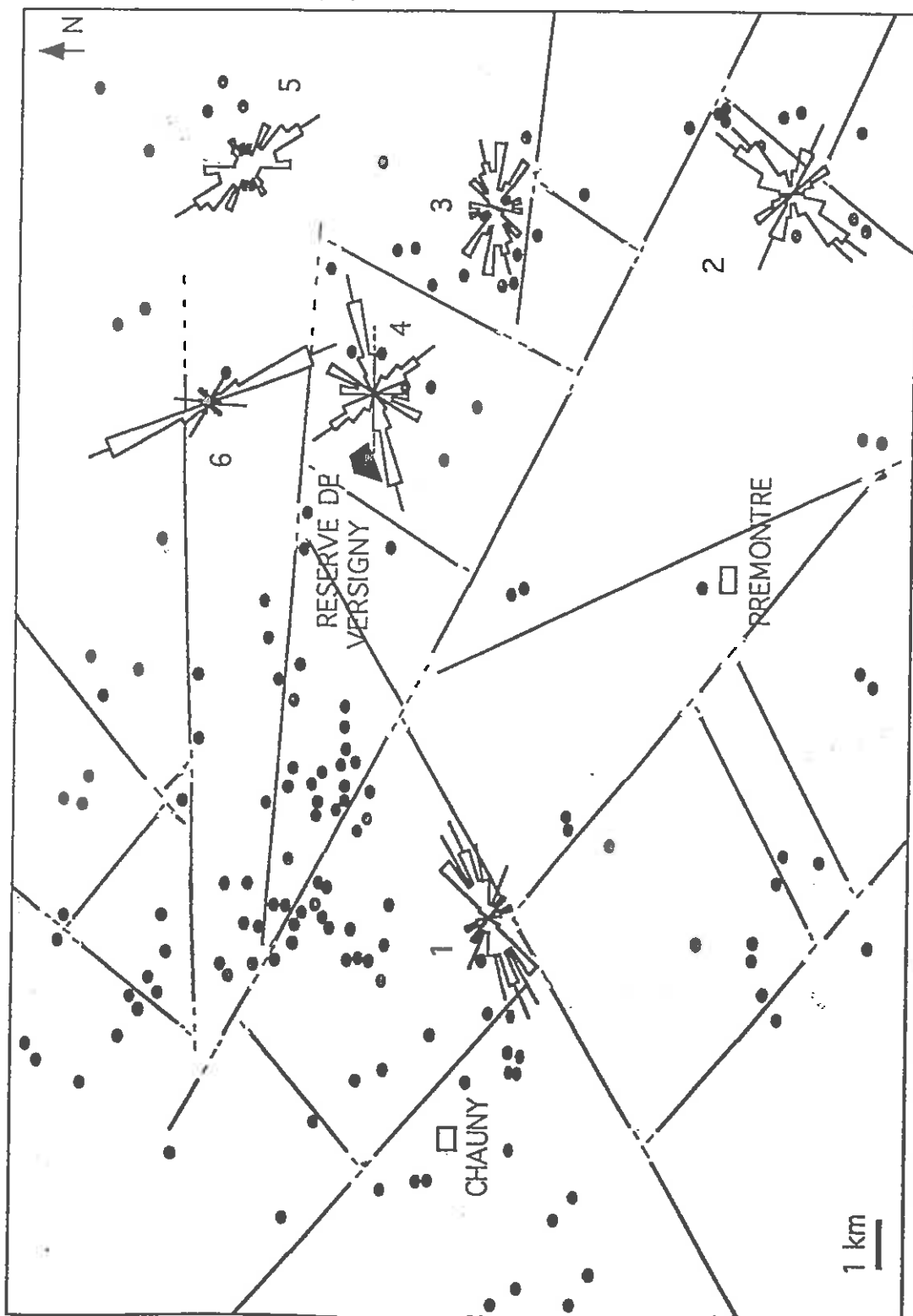
Il faut toutefois noter que les failles N60-80° n'apparaissent pas sur la carte structurale ; cette lacune peut être imputable soit au nombre insuffisant de sondages dans les zones concernées, soit au type d'accident en l'occurrence un cisaillement pur.

Afin de mieux cerner la structure du substratum crayeux, nous utiliserons une autre méthode d'analyse structurale basée sur une approche géomorphologique : l'analyse morphostructurale.

3. Morphostructure

L'utilisation des données du relief pour les études géologiques, remonte en France au siècle dernier avec les travaux de Daubrée (1879). L'observations des formes morphostructurales demeurent donc une méthode classique pour localiser et reconnaître des déformations souples ou cassantes, comme dans un matériau tel que la craie où toute direction de fracturations est fidèlement enregistrée (Colbeaux & Sommé (1981, 1985), Colbeaux et *al.* (1978, 1980, 1988).

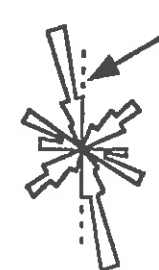
Colbeaux et Sommé (1981, 1985) ont montré qu'il existait une convergence entre les particularités hydrographiques et les données structurales tirées de l'interprétation des sondages et de la fracturation. Ces observations sont confirmées par Coque (1988), pour qui l'organisation hydrographique renseigne sur la nature et la structure des terrains environnants. Partant de ces considérations, nous utiliserons le thalweg comme éléments morphologiques susceptibles de souligner en profondeur une déformation cassante. Il se définit comme le



sondages
fautes

rosaces de directions de la fracturation
direction de

fautes observées en affleurement
6 n° d'identification de la carrière



direction de la faille d'activité néotectonique
N 92°, pendage 82° N
bloc nord effontré

Fig. 15: Superposition de la structure et des rosaces de fracturation

linéament matérialisé par le fond de vallée. Un linéament morphologique peut être considéré comme un alignement linéaire d'objets morphologiques identiques (vallons) sur plusieurs kilomètres ou dizaine de kilomètres. L'analyse de ce paramètre pourrait ainsi fournir des indications complémentaires sur la structure et la fracturation du matériau crayeux.

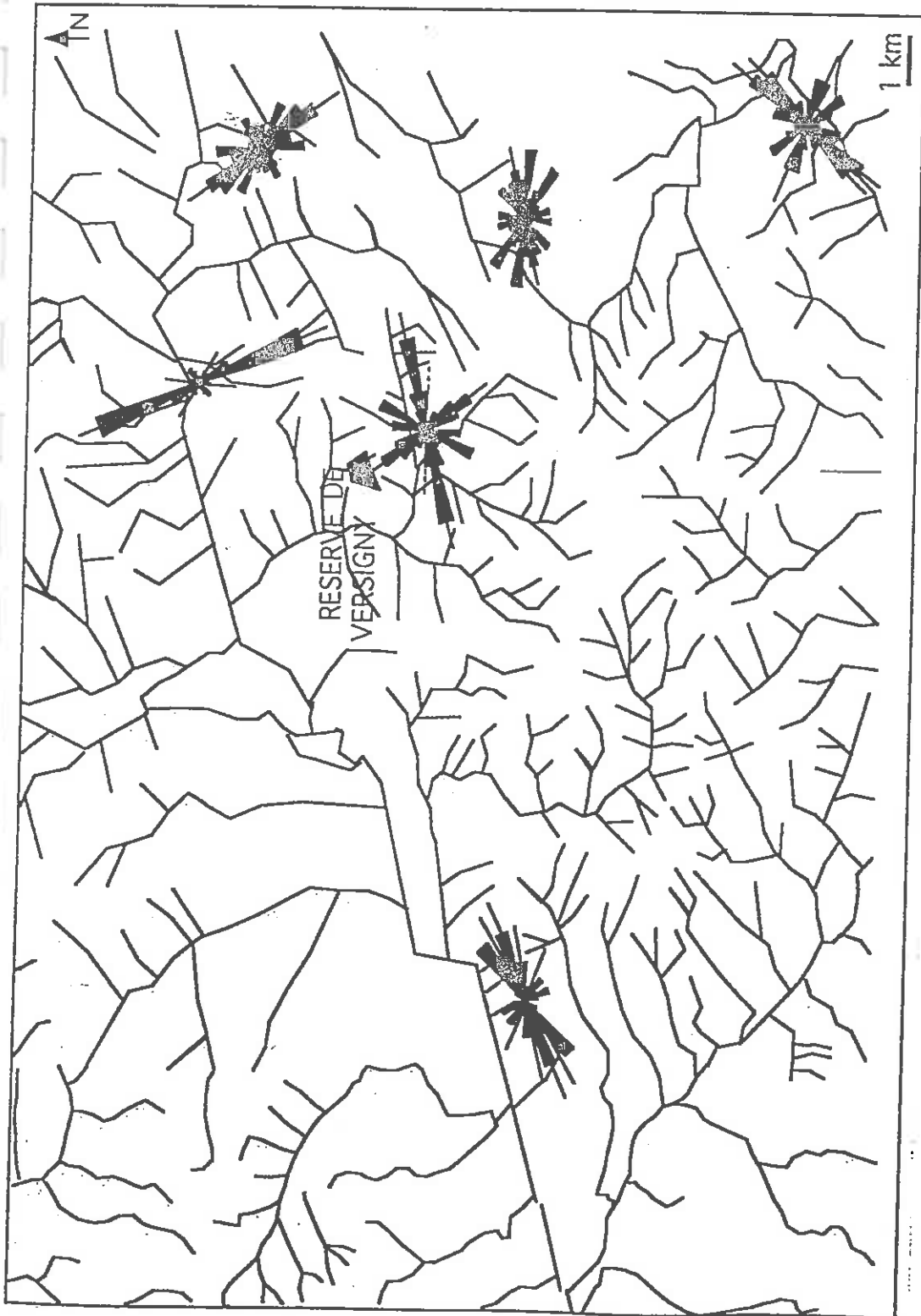
Remarque : Bracq (1994) a mis au point une méthode d'analyse morphostructurale basée sur un traitement informatique des objets morphologiques (rideaux et thalwegs), qui permet d'obtenir un traitement statistique de ceux-ci (directions d'objets par classes d'orientation, nombre d'objets, longueurs cumulées). L'acquisition des données se fait par digitalisation des cartes topographiques de l'IGN à 1/25 000. Ce procédé permet à l'utilisateur d'apprécier la signification des traits qu'il saisit, et par exemple, d'éviter de prendre comme rideau un élément qui provient de l'implantation d'un ouvrage de génie civil.

La méthode que j'ai utilisée repose sur un simple report manuel des thalwegs de longueur supérieure à 1 km, sur le territoire de la feuille géologique à 1/50 000^e de la Fère et sur les bordures respectivement est et sud des feuilles à 1/50 000^e de Chauny et Saint-Quentin.

La comparaison de la carte des thalwegs et des rosaces de direction de fracturation confirme classiquement qu'il existe une nette influence de la fracturation sur l'orientation préférentielle des vallées (Fig. 16).

Les linéaments morphologiques sont tracés en prolongeant des éléments identiques (même orientation) peu éloignés, matérialisés par des particularités du tracé de la vallée, par exemple de brusques changements d'orientation ou des divergences des fonds de vallées (ramifications). L'analyse des linéaments, dont l'extension varie de 4 à 21 km, fait apparaître 5 familles de directions principales : N20-30°, N40-60°, N70-80°, N110° et N140-160°. Deux familles s'individualisent de part leur extension géographique et leur densité de population : N70-80°; N140-160°. Par ailleurs, les directions de ces linéaments comparées aux rosaces de fracturation (N30-50°, N60-80°, N100-120° et N140-160°) mettent en évidence une correspondance possible entre linéaments et accidents tectoniques (Fig. 17).

Nous possédons dès lors 2 planches de travail, chacune intégrant des informations différentes sur la structure du substratum. La dernière opération vise à essayer de bâtir une carte morphostructurale, en superposant d'une part les linéaments morphologiques correspondant aux failles déduites des données de sondages, et d'autre part les linéaments assimilés aux failles vues sur le terrain. Cette démarche fait ressortir 12 failles communes et les rosaces de fracturation des carrières n°2, 4, 5 et 6 permettent d'assimiler 4 failles observées sur le terrain



thalwegs

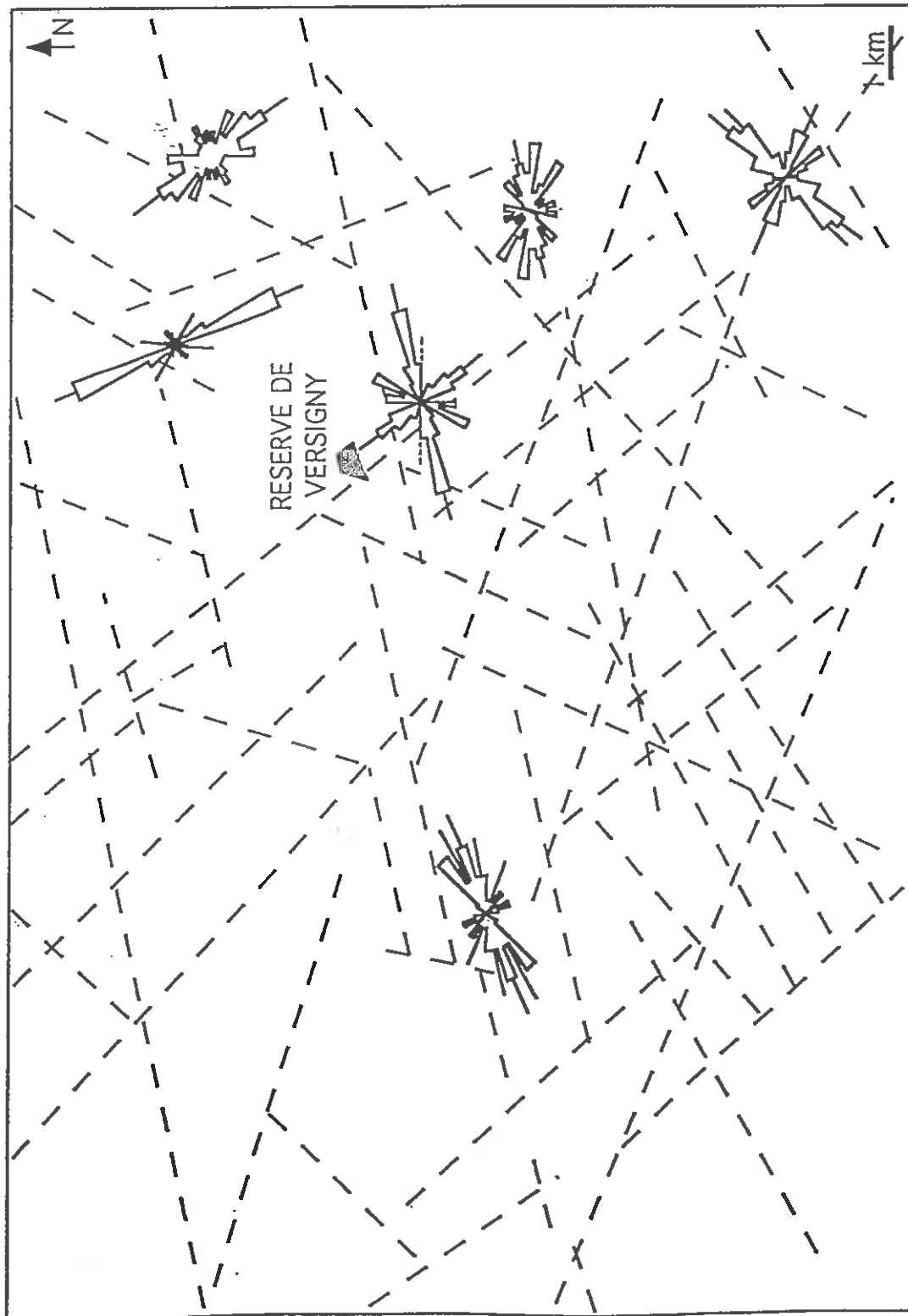
rosaces de
directions de
la fracturation

direction de
failles observées
en affleurement

direction de la
faille d'activité
néotectonique

N 92°, pendage 82° N
bloc nord effonfré

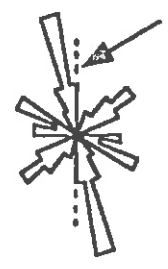
Fig. 16 : Superposition des thalwegs et des rosaces de fracturation



--- Linéaments
morphologiques

rosaces de
directions de
la fracturation

direction de
failles observées
en affleurement



direction de la
faille d'activité
néotectonique

N 92° , pendage 82° N
bloc nord effonfré

Fig. 17 : Superposition des linéaments morphologiques et des rosaces de fracturation

à 4 linéaments morphologiques (Fig. 18). Bien que restreinte, cette carte fait apparaître plusieurs grandes directions de fracturation N20-40°, N60-80°, N110° et N140-160° qui s'insèrent dans le contexte tectonique régional, mis en évidence par Colbeaux (1974, 1975, 1977, 1980, 1982, 1983) et Duprat (1996).

La superposition de cette carte à celle établie par Duprat (fondée sur des analyses morphostructurales (linéaments morphologiques décelés par imagerie satellitaire, failles identifiées par sondages, mesures de terrains)), corrobore et valide nos données acquises (Fig. 19).

IV. HYDROGEOLOGIE

L'hydrogéologie repose sur deux domaines d'études complémentaires l'hydrochimie et le fonctionnement hydraulique des aquifères. Les aquifères en présence ne présentant aucune modification lithologique majeure, l'hydrochimie ne se trouve pas modifiée et conserve ses caractéristiques précisées au chapitre 1. Le fonctionnement hydraulique d'un aquifère repose d'une part sur une étude de sa piézométrie générale et d'autre part sur les mécanismes susceptibles d'interférer cette piézométrie. En se basant sur les résultats de travaux récents nous essaierons tout d'abord de voir quels sont ces paramètres d'interférence et leurs influences sur l'hydrodynamique souterraine.

1. Les facteurs d'interférence

Depuis longtemps, est reconnue l'influence des structures des terrains sur les essais de débits (conditions aux limites de l'aquifère : Dupuit, 1963). Depuis peu, des études ont démontré l'influence de cette structure sur le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère :

- Bracq et *al.*(1992), attribuent une origine structurale à l'inadéquation entre les débits de la source de la Lys (Nord de la France) et son bassin versant topographique. Une étude structurale plus fine lui permet d'identifier un bloc structural crayeux délimité par des failles, comme étant le volume d'alimentation des débits de la source de la Lys ;

- Gaviglio et *al* (1993), montrent dans le Bassin de Mons, une réduction de la porosité et de la taille des pores du matériau crayeux, au droit d'une faille normale. La conséquence est la création d'une barrière hydraulique à perméabilité réduite ;

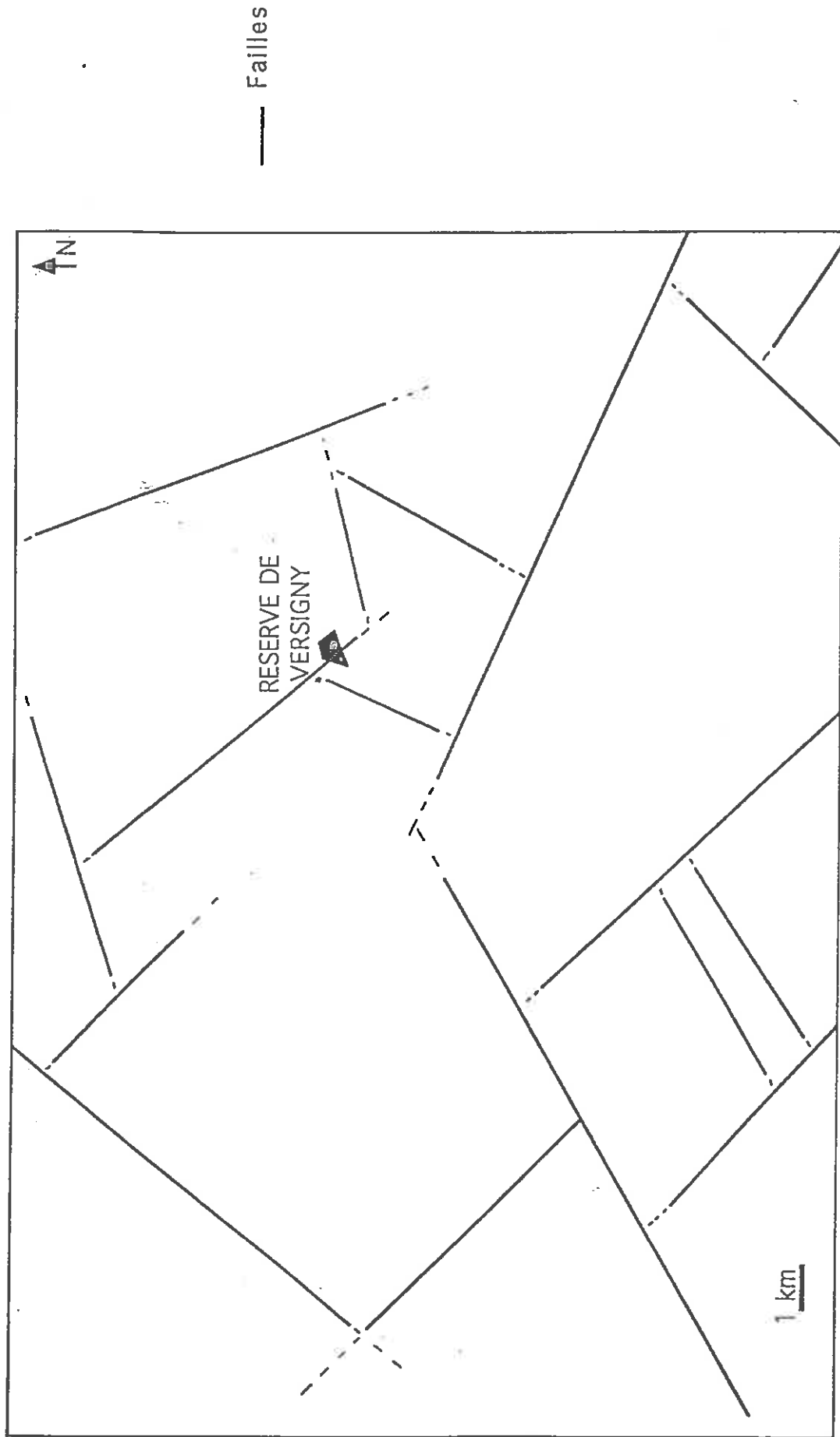


Fig. 18 : Morphostructure de la région de La Fère, issue de données de terrains de sondages et de la morphologie

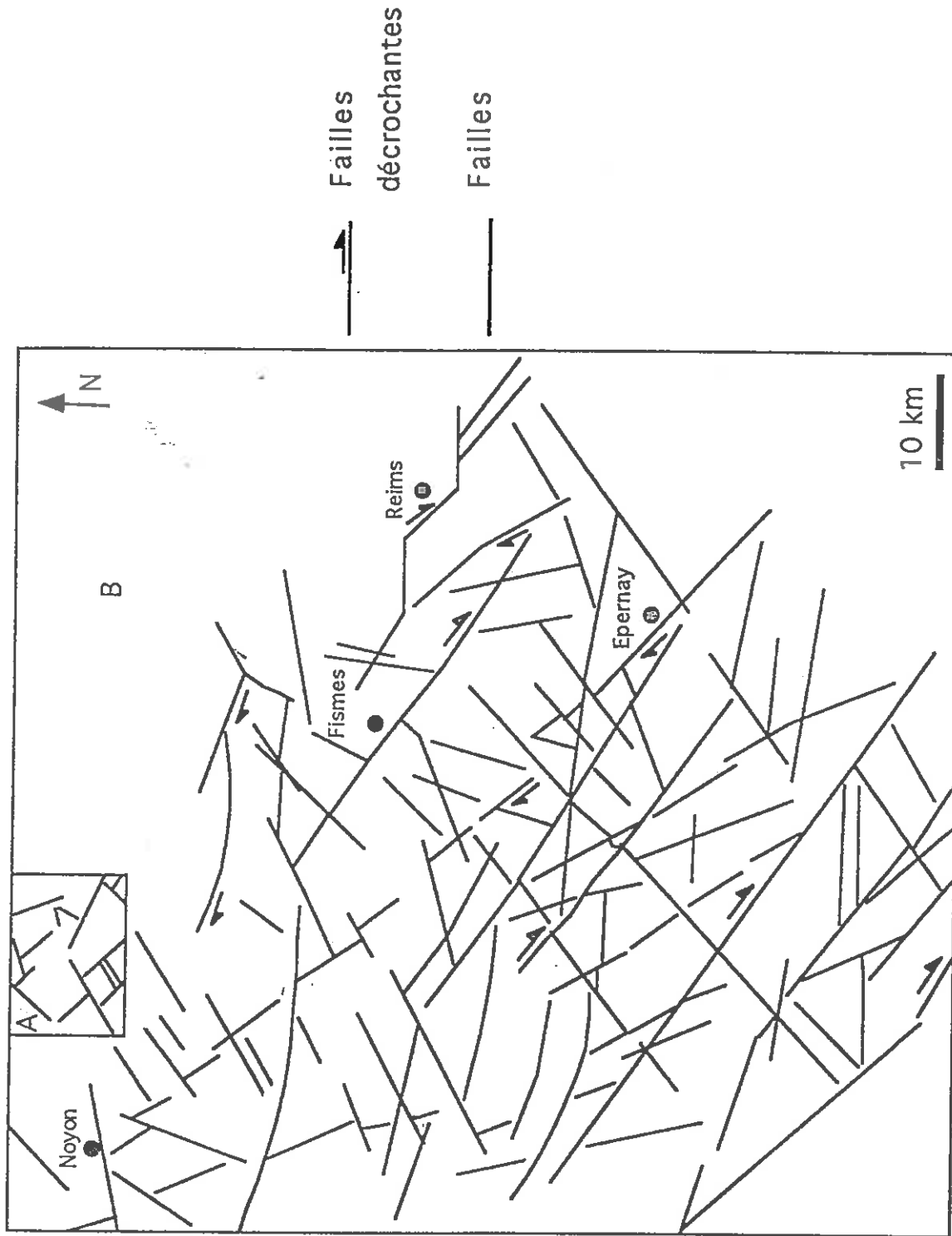


Fig. 19 : Superposition de la morphostucture de la région de La Fère (carte A) et celle de la carte de Duprat (carte B, 1996)

- Louche et al (1997), mettent en évidence sur le littoral crayeux du Nord-Pas de Calais, une hétérogénéité spatiale des valeurs de perméabilité ainsi qu'une répartition complexe des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère. Ces manifestations conduisent à ne plus considérer l'aquifère comme un système unique mais comme un pavage de compartiments séparés par de grands accidents tectoniques d'échelle plurikilométrique.

Au voisinage de ces accidents, on peut supposer deux types de fonctionnement hydrogéologique :

- le bloc structural, limité par des failles à perméabilité réduite, se comporte comme un bassin de retenue d'eau : le casier hydrogéologique (Bracq, 1994).

- les zones faillées du fait d'une fracturation intense, fonctionnent comme des axes de drainage privilégiés.

Parallèlement, Bonnet et al. (1996) développent, en pays crayeux, une méthode qui doit rendre compte à la fois des influences structurales sur le comportement hydraulique de l'aquifère (facteur représentatif, la productivité des captages en eau potable) et inversement. Cette méthode consiste donc à combiner un paramètre hydrogéologique, en l'occurrence le débit spécifique (débit / rabattement), représentatif de la productivité des ouvrages, avec les paramètres géologiques, morphostructuraux. Cette étude multicritère permet de montrer l'influence de ces paramètres sur les débits obtenus et plus précisément de révéler les particularités structurales de l'aquifère à l'origine des hétérogénéités de productivités rencontrées.

Nous allons essayer d'appliquer maintenant cette méthode à l'aquifère crayeux présent dans notre secteur d'étude.

a) Paramètres géologiques et débits

La figure 20 identifie les forages d'eau dont les débits spécifiques sont supérieurs à $45 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ aux abords de failles déterminées par sondages (Fig. 20). Toutefois, tous les forages situés à proximité des failles interprétées par sondages ne sont pas productifs ce qui confirme les affirmations faites par Bonnet (1996). Il faut également remarquer que tous les forages productifs sont localisés au niveau de l'aquifère crayeux libre, alors que tous les forages implantés dans l'aquifère crayeux sous recouvrement tertiaire donnent des débits spécifiques faibles ($< \text{à } 25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-1}$), à l'exception de deux d'entre eux.

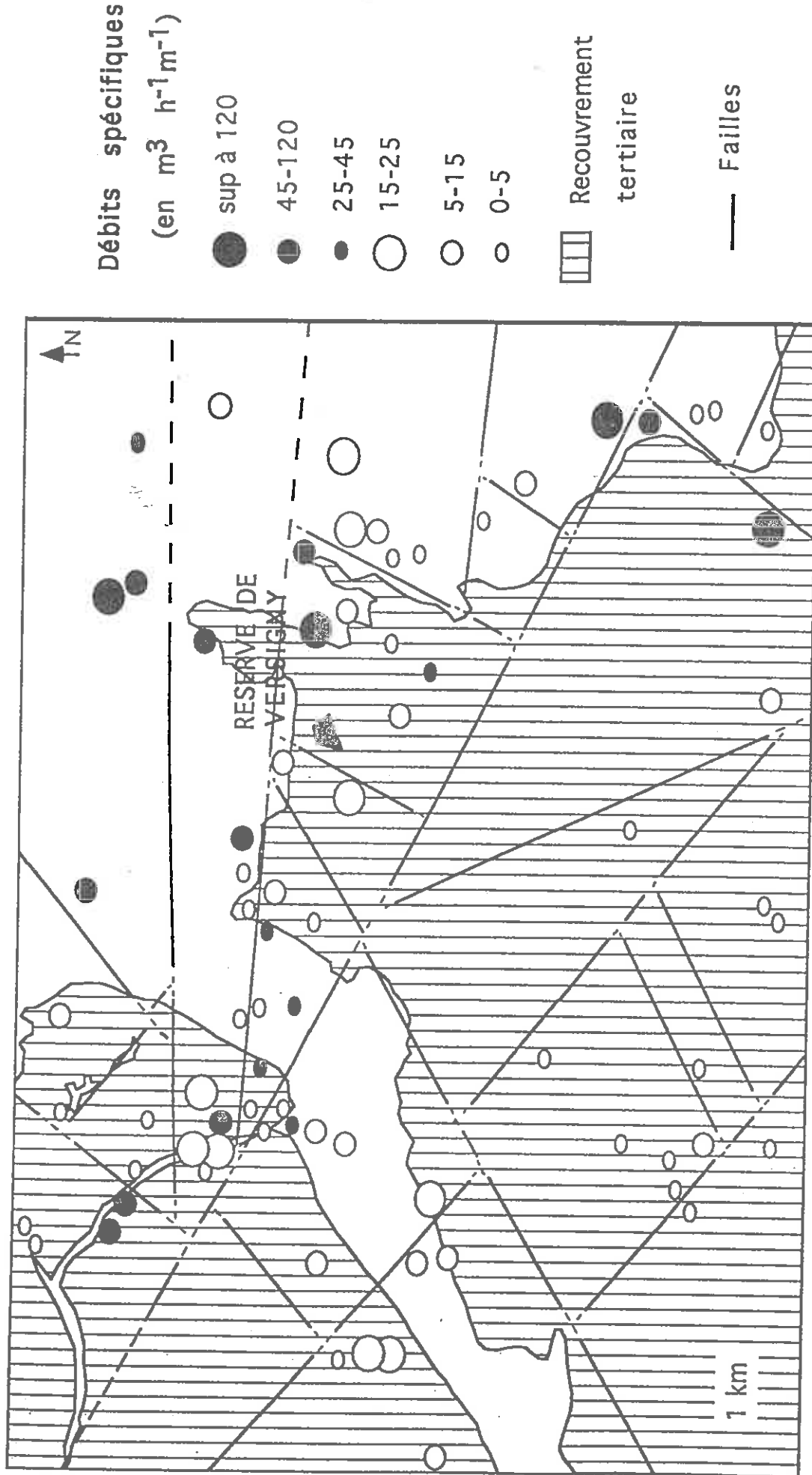


Fig. 20 : Superposition de la structure de la région de La Fère et des débits spécifiques de l'aquifère crayeux

Néanmoins, on peut hiérarchiser les débits spécifiques et s'apercevoir que leur répartition, pour ceux les plus élevés demeure influencée par la proximité d'axes de fracturation sous recouvrement tertiaire.

2. Paramètres morphostructuraux et débits

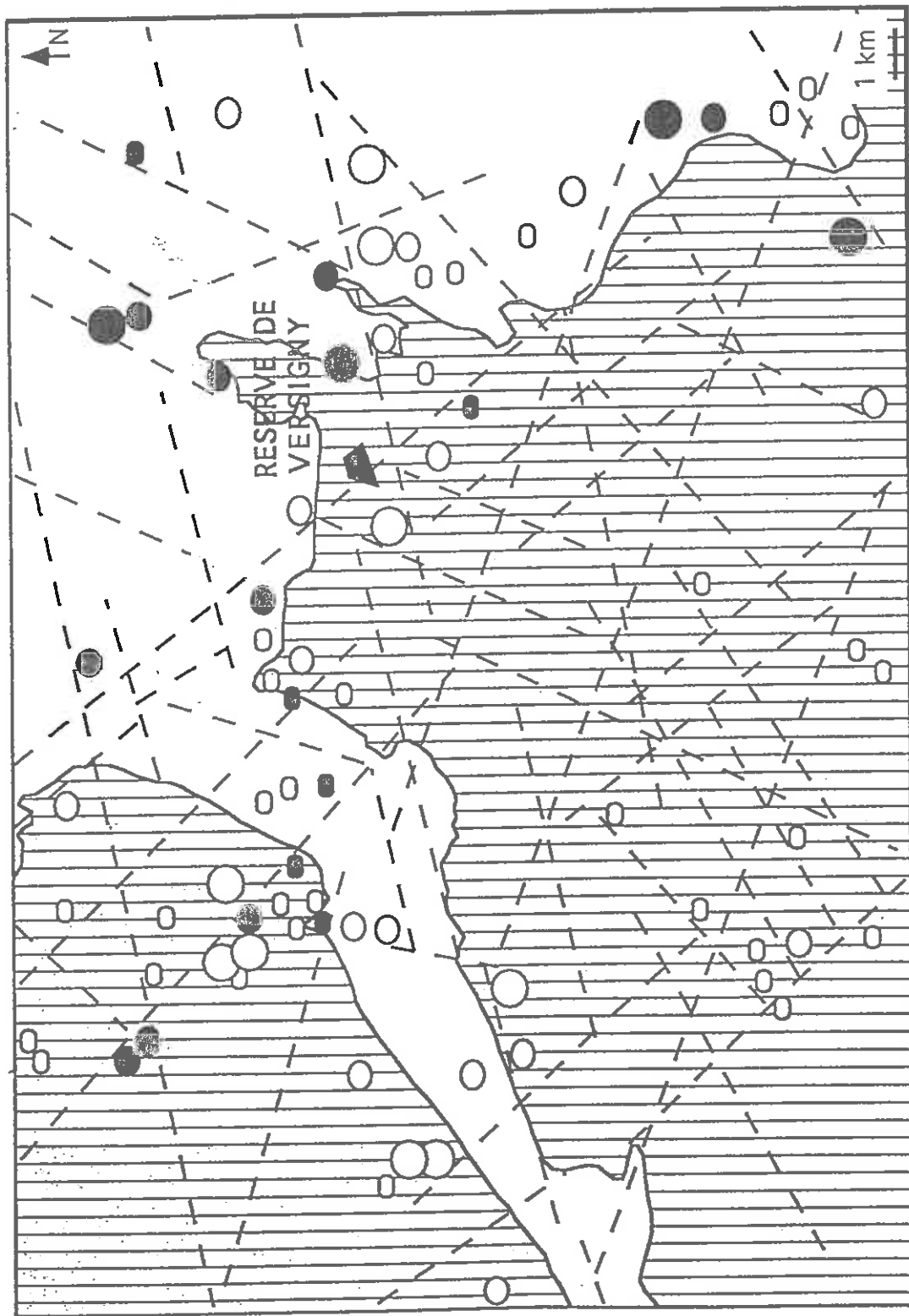
Pratiquement tous les débits spécifiques significatifs ($> 25 \text{ m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$) ont été mis en évidence à proximité immédiate des linéaments morphologiques (Fig. 21).

La combinaison des paramètres morphologiques et structuraux offre la possibilité de pouvoir étayer certaines hypothèses concernant la répartition spatiale des forages à forts débits spécifiques; l'organisation morphostructurale laisse apparaître des zones productives en eau le long de certains axes. Toutefois, il demeure impossible de déterminer le mode de circulation au voisinage de ces accidents, et seule une étude sur un secteur plus restreint permettrait d'élucider le rôle hydraulique de ces failles.

Remarque : Inversement, si ces observations se concrétisent, les zones où les informations hydrogéologiques (débits spécifiques élevés, hétérogénéité spatiale des perméabilités) seront suffisantes, pourront servir de test d'étude pour la localisation de failles potentielles où les données de sondages manquent. Ces applications fourniront peut-être par la suite des informations complémentaires sur la structure du substratum (Bonnet *et al.*, 1996).

3. Piézométrie

Une carte piézométrie réalisée uniquement en 1977 par les hydrogéologues du BRGM sur l'aquifère crayeux en régime libre, n'a apporté aucune information sur notre secteur d'étude. Ainsi, une campagne piézométrique réalisée le Juin sur 24 puits implantés dans les sables thanétiens et situés à l'extérieur de la Réserve, a permis d'établir une carte piézométrique calculée, basée sur la triangulation irrégulière sur surface quintique (Bonnet, en cours de publication). Elle indique un écoulement des eaux souterraines des buttes sableuses vers des exutoires situés à l'est, au nord et à l'est de la Réserve (Fig. 22).



Débits spécifiques
(en $\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)

- sup à 120
- ◐ 45-120
- ◑ 25-45
- 15-25
- 5-15
- 0-5

- ▨ Recouvrement tertiaire
- - - Linéaments morphologique

Fig. 21 : Superposition de la morphostructure de la région de La Fère et des débits spécifiques de l'aquifère craeyeux

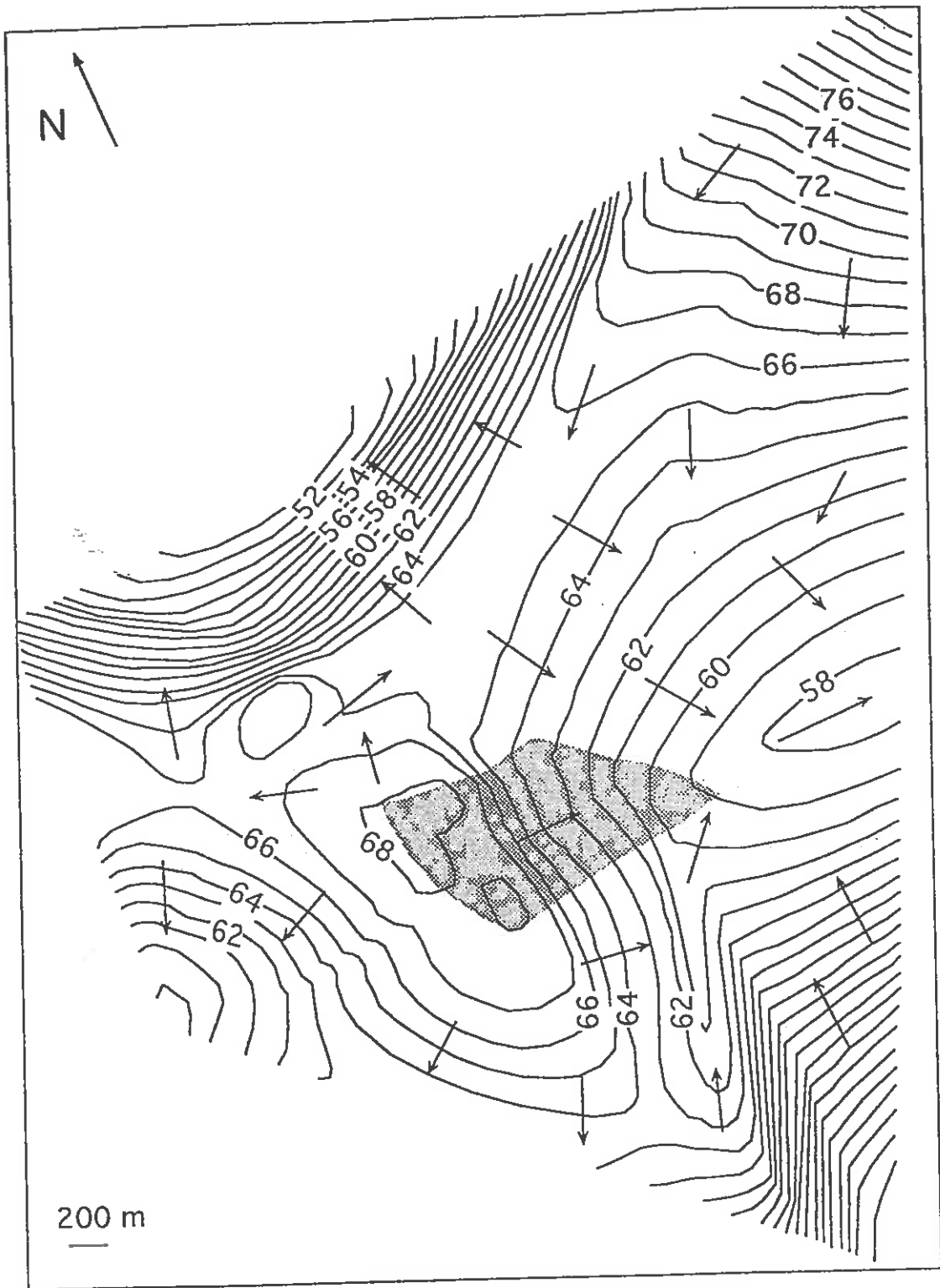


Fig. 22 : Piézométrie générale

Chapitre III : DONNEES DU SITE

Après avoir défini le cadre structural et le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère crayeux à petite échelle, nous allons voir les répercussions de la tectonique sur la géomorphologie de la Réserve, le fonctionnement hydrogéologique et hydrologique de la Réserve et les caractéristiques physico-chimique des eaux de la Réserve.

I. RAPPEL

Les objectifs du plan de gestion de la Réserve naturelle de Versigny sont doubles :

- le maintien d'un niveau d'eau suffisant toute l'année pour permettre le développement d'espèces végétales remarquables ;
- le maintien d'une eau acide oligotrophe ainsi que la lutte contre le début d'eutrophisation des eaux.

Face à l'absence d'informations sur le fonctionnement de l'hydrosystème, et notamment les caractéristiques physico-chimiques de l'eau, une étude globale a été réalisée. Elle s'organise autour de 4 grands axes :

- hydrologique : volumes et sens des écoulements superficiels ;
- hydrogéologique : identification des aquifères, relations et sens d'écoulement des eaux souterraines ;
- hydrochimique : caractérisations physico-chimique des eaux ;
- tectonique : contrôle morphologique et hydraulique.

Nous détaillerons tous ces points, dans ce chapitre. Puis nous essaierons d'en tirer les conclusions indispensables à la mise en oeuvre des différents programmes de gestion.

II. LOCALISATION ET PRESENTATION DU SITE

La Réserve Naturelle de Versigny est accessible par le hameau Le Riez de Versigny, en empruntant le chemin «des vaches». (Fig. 23).

Elle s'étend sur 92 ha, séparée en deux zones inégales par la voie de chemin de fer qui relie Tergnier et Laon. Elle forme une dépression limitée à l'ouest, au nord et au sud par un chapelet.

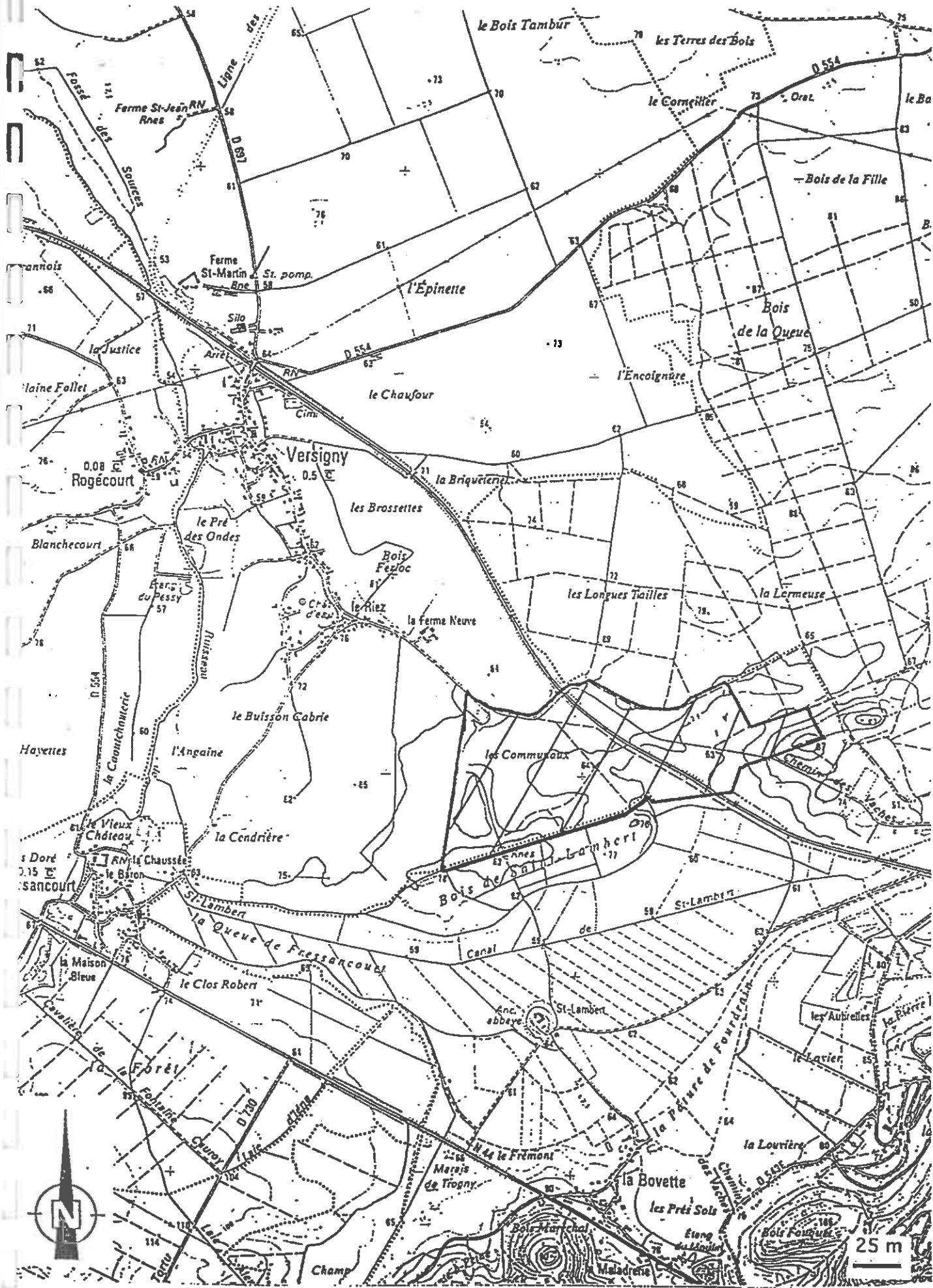


Fig. 23 : Localisation de la réserve naturelle de Versigny (carte IGN, 1/25 000)

de buttes sableuses d'une altitude moyenne de 75 m. cette altitude décroît progressivement vers l'est jusqu'à un point bas situé à 60 m d'altitude (Fig. 24).

Remarque : la carte topographique du site a été réalisée par nos soins, en compagnie d'un géomètre lors de campagnes de relevés topographiques. Ce travail s'est révélé indispensable compte tenu du peu d'informations fournies par la carte IGN à 1/25 000 et la micromorphologie complexe de la Réserve. Les mesures ont été effectuées avec un tachéomètre à visée laser. Nous avons recensé 910 points cotés. Ainsi, tous les piézomètres et sondages réalisés ont pu être précisément nivelés. Ce travail a débouché sur l'élaboration d'une carte topographique à 1/1500.

Les paragraphes suivant résument l'état des connaissances du milieu.

Les particularités topographique du site confère des conditions microclimatiques propres, globalement comparables à celles du marais de Cessières-Montbavin (Grégoire & Merkachi, 1986).

La dépression de la Réserve est affectée par plusieurs petits cours d'eau artificiels qui s'évacuent vers le domaine de Saint-Lambert au Sud. Le sens de circulation des eaux observé jusqu'à présent, montre une double circulation pour certains drains.

La mare à Zouzou, zone temporairement inondée, se présente sous la forme d'une cuvette ronde d'une dizaine de mètres de diamètre et de 1 m maximum de profondeur. Elle subit en fonction des saisons une vidange partielle qui nourrit en eau le drain principal. Elle abrite une végétation typique de milieux oligotrophes acides. Paradoxalement, des mesures de qualité des eaux, effectuées par les membres du Conservatoire des sites naturels de Picardie lors de l'été 1996 montre un pH voisin de 7, alors qu'il est présumé être plus acide.

Suite à cet états des lieux des connaissances initiales du site, nous allons maintenant présentés les données et les nouveaux résultats acquis lors de cette étude.

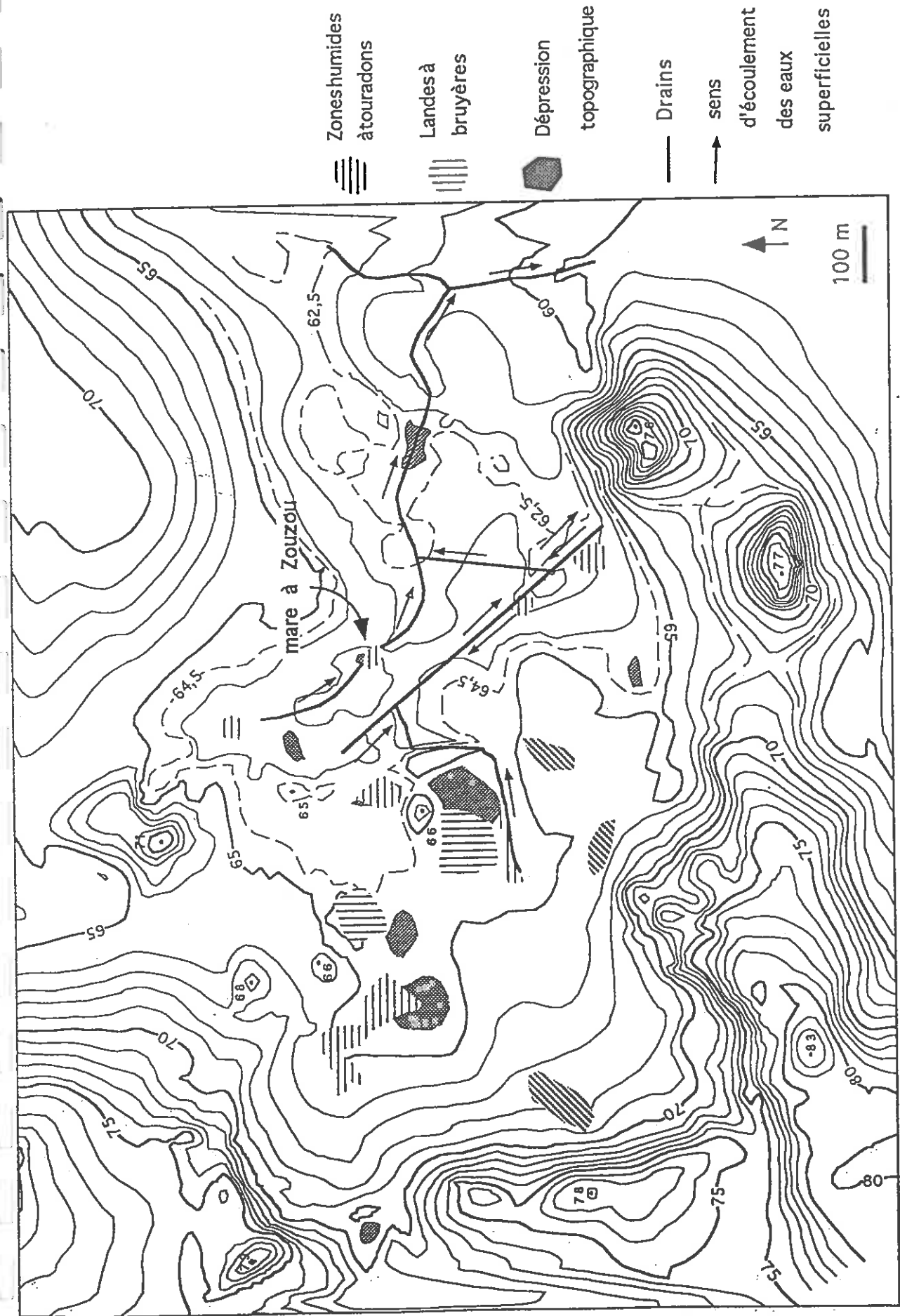


Fig. 24 : Description de la Réserve

III. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES

1. La richesse du site : une flore remarquable.

Le but de ce paragraphe n'est pas de faire un inventaire exhaustif de la flore mais plutôt de présenter les différents groupements végétaux et l'évolution de la flore remarquablement développée depuis 20 ans.

Ces résultats sont issus des travaux de J.C Hauguel, réalisés en 1996 sur l'ensemble de la Réserve. La méthode utilisée pour caractériser les groupements végétaux est basée sur une approche phytosociologique. L'analyse de ces relevés a permis de distinguer 4 types de systèmes écologiques, assimilés ici à des ensembles de groupements végétaux dont le fonctionnement et les caractéristiques physico-chimiques sont étroitement liés (Fig. 25).

On trouve :

- le système acidophile xérophile ;
- le système oligotrophe acidophile hygromorphe ;
- le système mésotrophe acidophile hydromorphe ;
- le système méso-eutrophe basicline.

L'annexe II présente les espèces remarquables des Landes de Versigny de 1975 à 1996, soient au total 56 espèces. (Hauguel, 1996).

De 1975 à 1996, on dénombre 6 espèces non revues. De 1991 à 1996, 10 autres espèces s'ajoutent à celles déjà disparues, et 5 autres ne sont représentées que par 1 à 5 pieds. Sur la même période, 2 plantes vasculaires (1 pied chacune) et 2 bryophytes sont réapparues et 4 lichens sont apparus. Ces résultats montrent bien la dégénérescence de certaines stations de phanérogames alors que parallèlement les cryptogames (bryophytes et lichens) s'implantent aisément.

Exemple : la mare à Zouzou

Elle abrite une végétation oligotrophe acidophile à potamot à feuilles de renouée (*Potamogeton polygonifolius*), véronique en épis (*Veronica scutellata*), laïche blanchâtre (*Carex canescens*) et

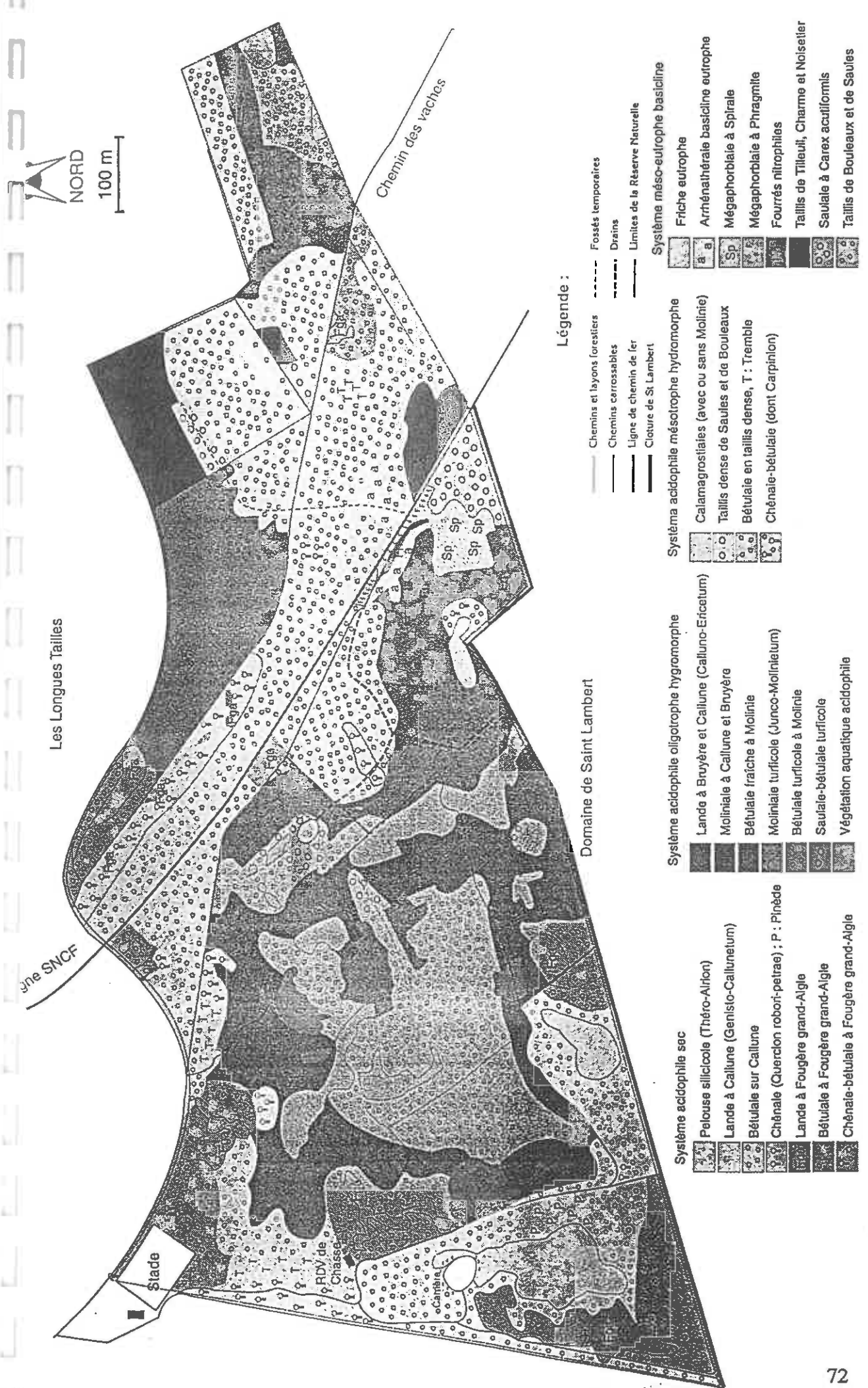


Fig. 25 : Répartition des groupements végétaux de la Réserve de Versigny (d'après Hauguel, 1996)

scirpe flottant (*Scirpus fluitans*). En 1989, le scirpe flottant occupait la moitié de la mare. Aujourd'hui, il n'est plus que relictuel aujourd'hui. Le potamot disparaît progressivement suite à un assèchement précoce de la mare et à une variabilité des conditions physiques du milieu, tout comme les sphaignes (*Sphagnum crassicaudum et imundatum*) situées dans la partie Nord de la mare (Fig. 26). Dans cette zone, l'herbier à renoncule pelté (*Ranunculus peltatus*) et callitriche stagnante a disparu sous les bauges des sangliers.

2. Pédologie

Les différents types de sol rencontrés sur le site de la Réserve sont conditionnés par les substrats (sables et sables argileux) et le degré d'hydromorphie. On peut établir, grâce aux nombreux sondages pédologiques réalisés sur le site (Maucorps, 1983), un transect longitudinal montrant l'évolution des sols des zones hautes sèches, aux zones basses plus humides. On choisira pour cela trois de ces sondages pédologiques, réalisés pour l'élaboration de la carte géologique de l'Aisne (Maucorps, 1983).

On trouve donc des zones hautes vers les zones basses : le podzol humoferrique, le podzol humique secondaire à gley sur sol lessivé et le sol lessivé acide hydromorphe (Fig. 27).

3. Géologie

a) Lithologie

La carte géologique à 1/50 000 montre que la Réserve est située dans une dépression creusée dans les sables thanétiens, et que le fond est tapissé de dépôts alluviaux quaternaires (Fig. 28). Des sondages complémentaires (tranchée à main et motorisée) d'une profondeur allant de 1,5 m à 6 m ont révélé la présence de terrains de nature variée (Fig. 29).

On trouve :

- des sables argileux plus ou moins organiques et une argile grise, organique et compacte d'âge quaternaire.

- les sables thanétiens, sous forme de buttes reliques ;

- la craie en place, tabulaire ;

Les sondages se sont avérés très utiles pour la suite de notre étude.

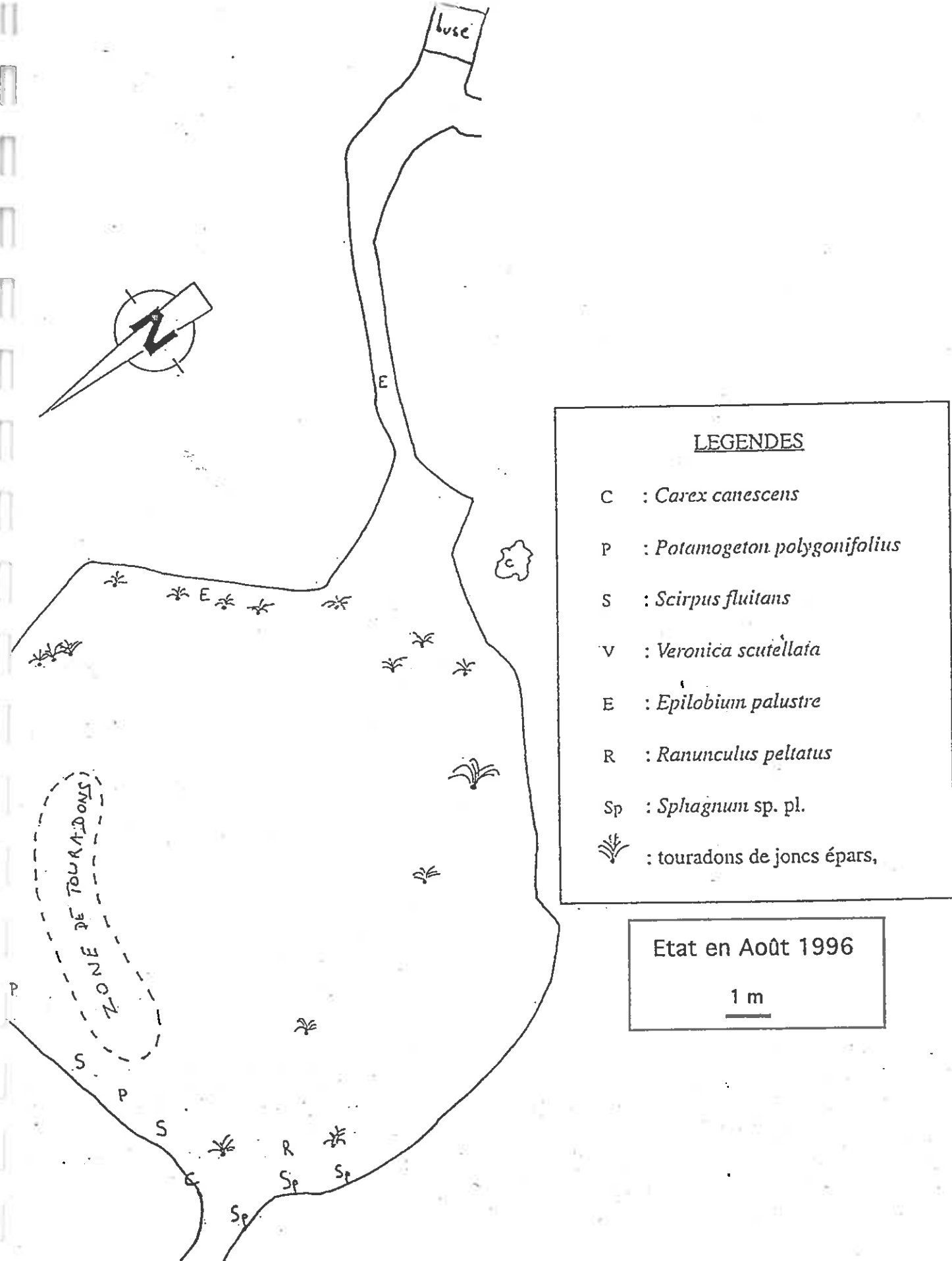


Fig. 26 : Végétation de la mare à Zouzou (d'après Hauguel, 1996)

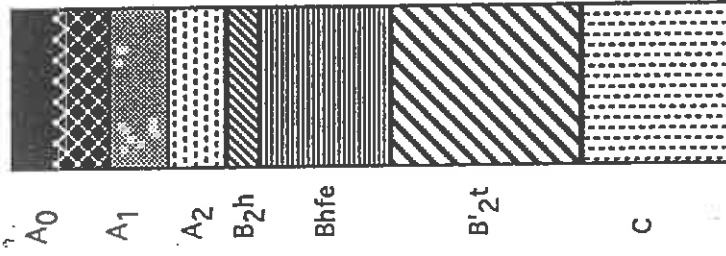
Podzol humoferrique alt + 83 m

Podzol humique secondaire à gley sur sol lessivé

alt + 75 m

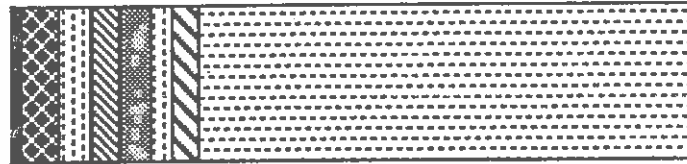
Sol lessivé acide hydromorphe à gley de profondeur

alt+ 63 m



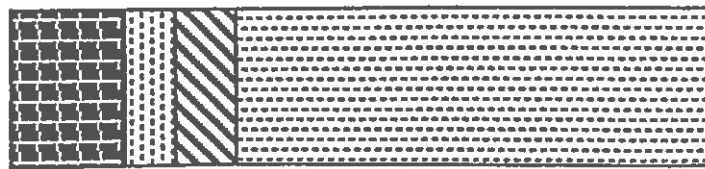
sables noirs
sables gris-foncés
sables beiges
sables rougeâtres puis noirâtres
sables bruns-foncés
sables rouges jaunâtres
sables beiges

A0
A1
A2
B2h
Bhfe
B'2t
C



sables noirs, humides
sables gris-rosés, frais
sables bruns foncés, humides
sables bruns, humides
sables argileux bruns, humides
sables argileux gris-foncés, humides
sables marmorisés gorgés

A0
A1g
A2g
B2hg
A'2g
B'2tg
C



sables organiques noirs, frais
sables gris-pâles humides
sables argileux gris-olives, humides
sables gris-verts gorgés

Ap
A2g
B2tg
C

Fig. 27 : Les différents types de sols de la Réserve (d'après Maucois, 1983)

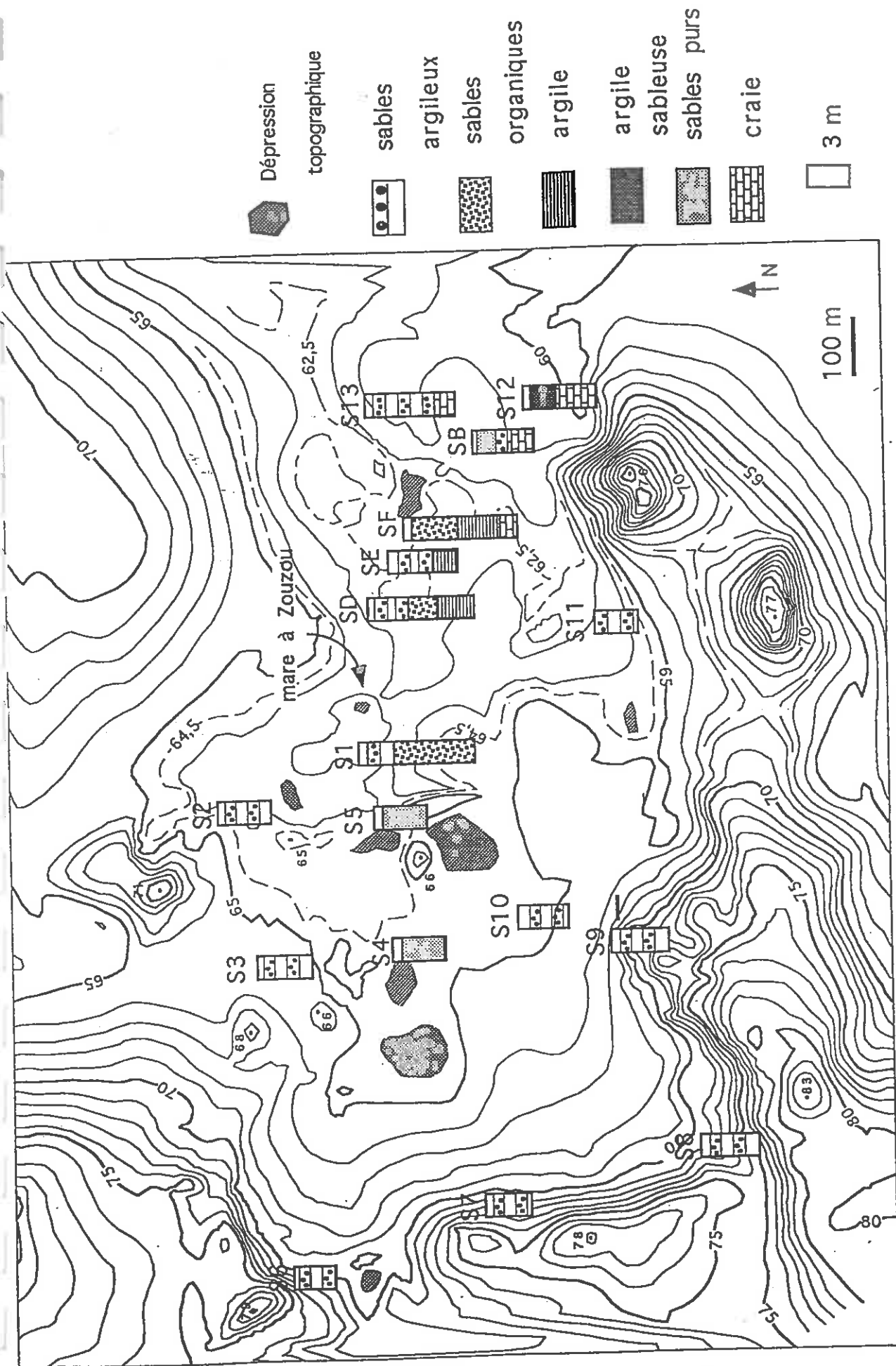


Fig. 29 : Indications ponctuelles de la lithologie des dépôts rencontrés dans la Réserve

b) Tectonique

Nous avons bénéficié de niveaux repères lithologiques fiables (craie tabulaire, entablements de "galets de Versigny") au sein de la Réserve comme à l'extérieur (sondages issus de la Banque de données du sous-sol) et également d'éléments morphostructuraux régionaux identifiés dans le chapitre précédent. Il a été ainsi possible de réaliser deux coupes géologiques à une plus petite échelle (Fig. 30). Leur tracé est indiqué sur la carte géologique ainsi que sur la carte topographique IGN à 1/25 000, qui servira de support à l'analyse morphologique du secteur en question (Fig. 31).

* Coupe A-B :

Orientée W-E, elle passe par une faille détectée par sondage ($\phi 1$), orientée N25° et deux linéaments morphologiques connus ($\phi 2$ et $\phi 3$) de directions respectives N140° et N30°.

Cette faille ($\phi 1$) est visible à l'affleurement à Fressancourt où elle décale deux formations distinctes, laissant apparaître une ligne de source continue sur le flanc du versant raide (Fig. 32). Son prolongement vers le nord-est se manifeste dans la topographie un vallon encaissé et démontre une fois de plus la bonne adéquation entre la direction des thalwegs et la structure du substratum (Colbeaux & Sommé, 1981, 1985).

Au nord-ouest de la carte géologique, la vallée du Saint-Lambert se présente sous la forme d'une vallée disymétrique avec un versant raide, constitué de dépôts tertiaires, tourné vers le nord-est et un versant doux crayeux tourné vers le sud-ouest. L'orientation de ce versant n'est pas caractéristique d'une évolution climatique de versant sous climat périglaciaire (Pomerol & Renard, 1989 ; Tricart, 1981). Elle suggère plutôt un contrôle (Bonnet et *al.*, 1996). L'orientation du versant coïncide avec celle du linéament ($\phi 2$). On peut attribuer cette anomalie morphologique à la faille ($\phi 2$). Son action conjuguée à la faille ($\phi 1$), induit un effondrement de la butte sparnacienne. Ce mécanisme est également constaté dans le Nord (Sommé, 1977).

Dans la Réserve, on observe également des décalages stratigraphiques, suggérant une intervention tectonique. La carte topographique à 1/25 000 n'enregistre pas d'anomalies morphologiques et ne permet pas d'apporter d'explications. Toutefois, une étude plus fine à l'échelle du site (1/1500°), met en évidence la persistance de buttes sableuses reliques, alignées

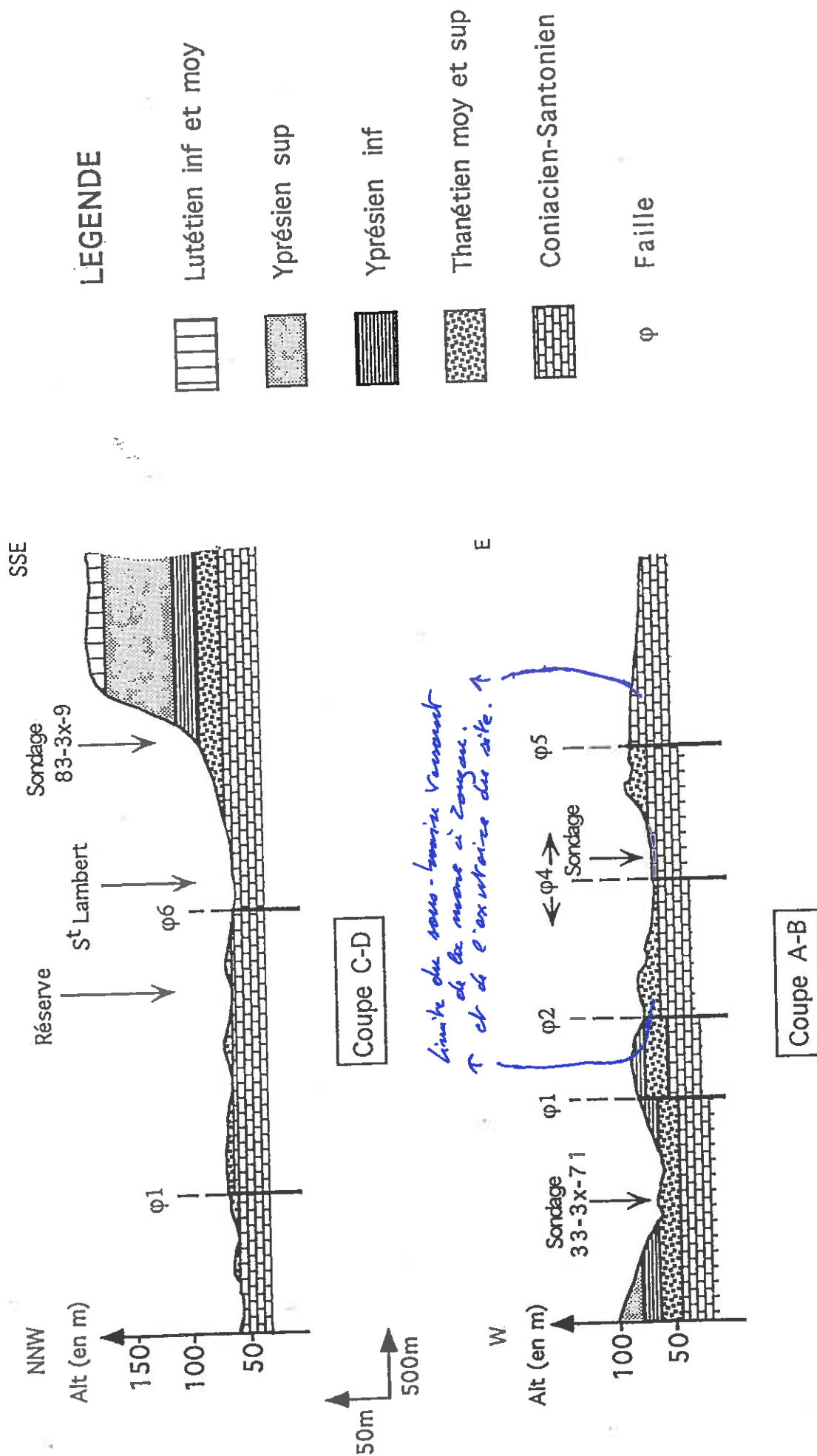
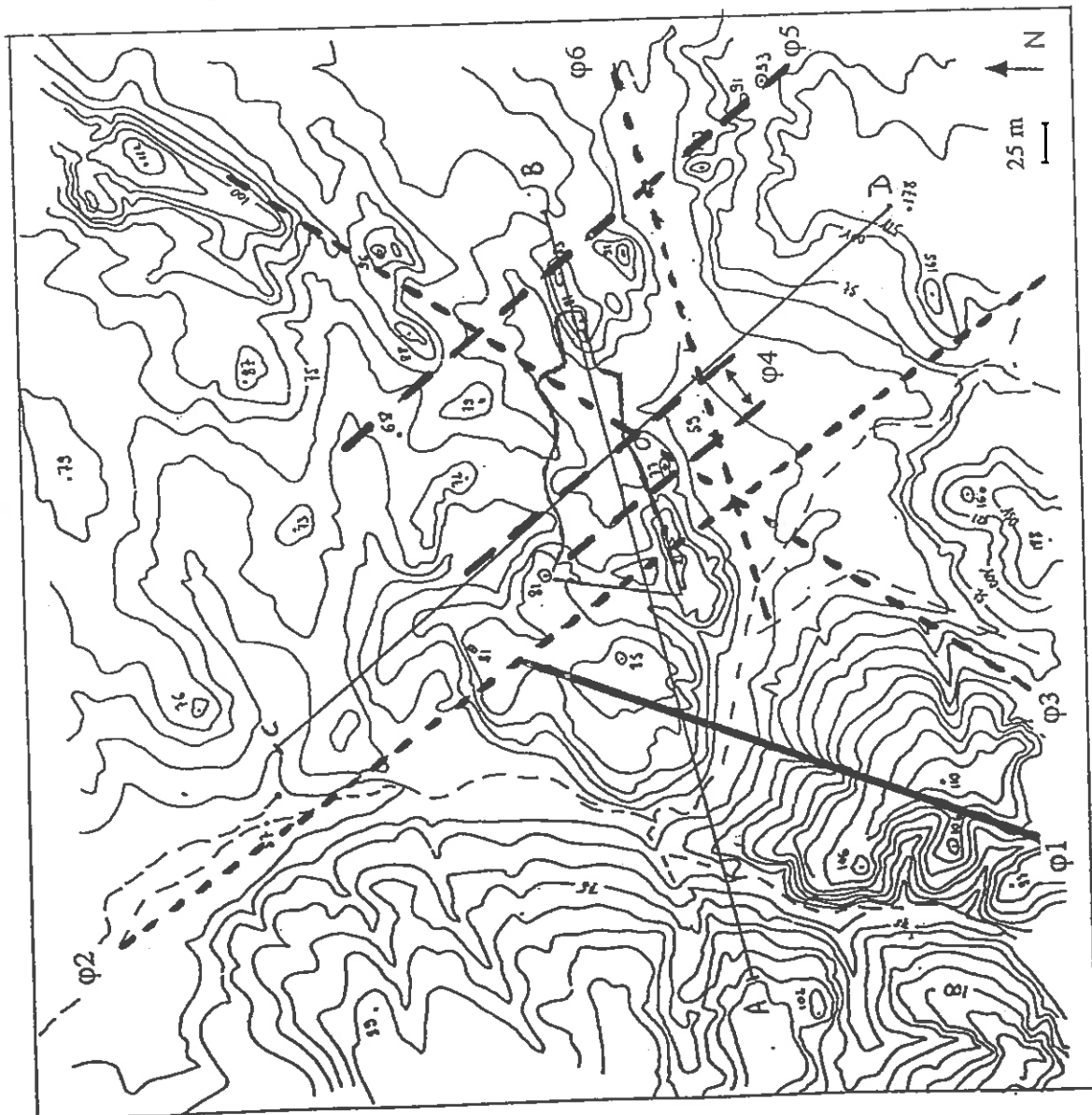


Fig. 30 : Coupes géologiques A-B et C-D



Réserves Naturelles



- fautes vues par la coupe
- fautes identifiées par sondages
- linéaments

Fig. 31 : Extrait de la carte topographique au 1/25 000

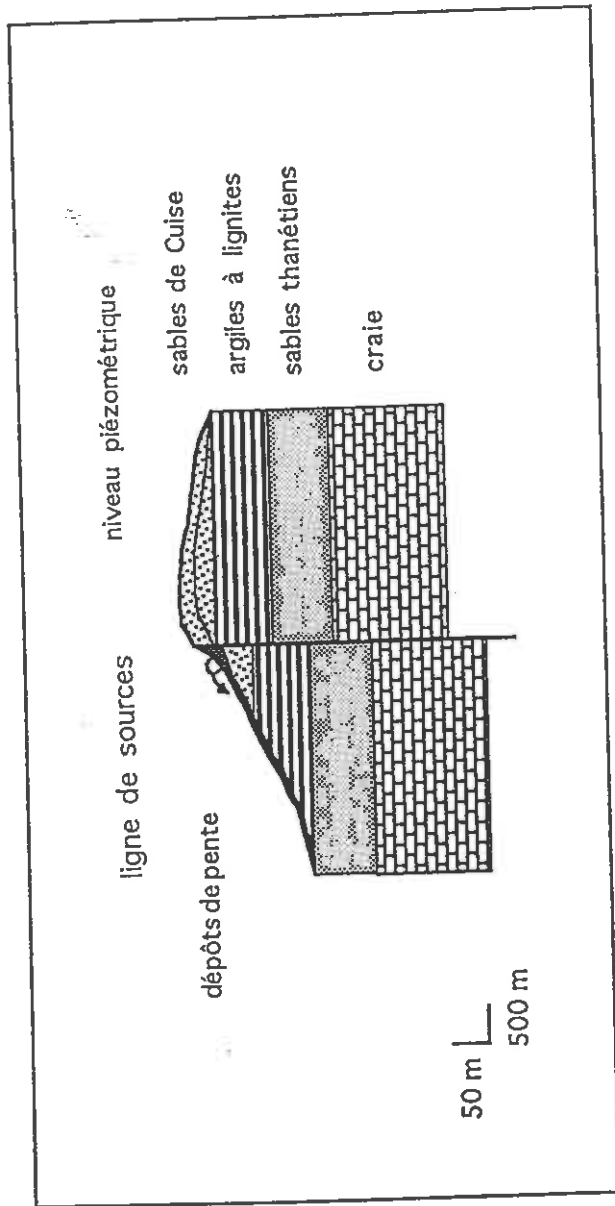


Fig. 32 : Conséquences de la tectonique sur l'hydrogéologie (la faille de Fressancourt)

suisant des axes subparallèles au linéament ($\varphi 2$) (Fig. 33). Par ailleurs, on note une dissymétrie de ces buttes avec un versant émoussé et un versant raide rectiligne. Ces observations suggèrent un contrôle structural de la micromorphologie et de ce fait un découpage de la Réserve en sous-blocs, comme le tend à prouver les travaux inédits de Bonnet (1997). La Réserve serait alors traversée par un ou plusieurs accidents ($\varphi 4$) de direction homothétique aux linéament ($\varphi 2$).

A l'est de la Réserve, les buttes sableuses thanétiennes sont juxtaposées à la craie. L'analyse des éléments morphologiques (alignement de thalwegs, de buttes résiduelles et versants raides atypiques), met en évidence l'existence d'un trait morphostructural (orienté N140°) à composante verticale ($\varphi 5$) et confirme le mécanisme de préservation des buttes résiduelles par effondrement de blocs structuraux.

*Coupe C-D :

Orientée nord-ouest-sud-est, elle est recoupée par l'accident ($\varphi 1$) et les linéaments morphologiques connus ($\varphi 6$ (orienté N80°) et $\varphi 3$). La faille ($\varphi 1$) est le seul accident qui apparaît clairement par un décalage craie-sables thanétiens. En effet, les linéaments $\varphi 6$ et $\varphi 3$ ne semblent décaler aucun bloc. Tout au moins, ce décalage n'est pas appréciable à l'échelle de la carte. Cependant, nous savons vu (Chapitre 2) qu'il existe un fort pourcentage de fracture N80° dans la carrière de Fourdrain située à 1,5 km au sud du site et notamment des failles à très faibles rejeux (quelques centimètres).

CONCLUSION

Ces coupes mettent en évidence 3 familles de failles de directions N140°, N30° et N80°. Ces traits structuraux induisent dès lors des modelés morphologiques particuliers (butte, versant raide atypique, vallon). On s'aperçoit effectivement que les limites topographiques de la Réserve sont sous contrôle structural. La Réserve correspond donc à une dépression morpho-tectonique, avec évidemment des sables thanétiens jusqu'à la craie puis comblement quaternaire par des dépôts alluviaux et éoliens.

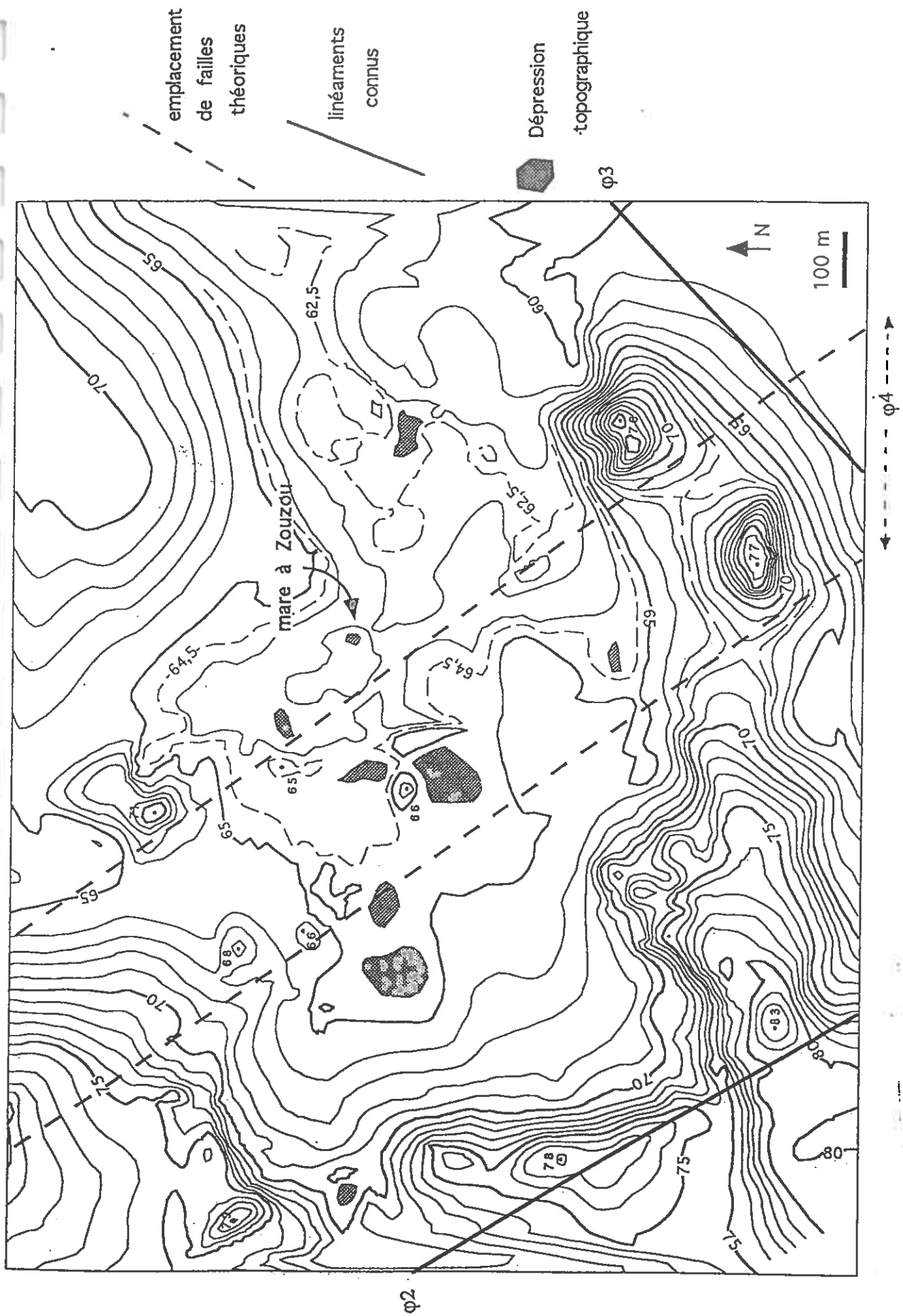


Fig. 33 : Morphostructure de la Réserve

4. Hydrogéologie

Les nouvelles informations obtenues sur les terrains géologiques, permettent d'élargir les hypothèses sur les aquifères en présence ainsi que sur leur relation.

a) Identification des aquifères

D'après les connaissances lithologique du site et du secteur environnant, il est possible de proposer trois aquifères potentiels :

- un aquifère sablo-argileux (dépôts quaternaires) très limité, dont l'imperméable est constitué par endroits d'une argile grise, très compacte dont l'épaisseur peut dépasser 2 m, mais dont l'extension reste approximative.

- un aquifère sableux (sable thanétien) plus local, séparé du précédent par l'argile de Vaux-sous-Laon ;

- un aquifère crayeux d'extension régional ;

On a exposé ici les aquifères (la roche réservoir) susceptibles de contenir une nappe mais rien ne prouve pour l'instant qu'il existe 3 nappes individualisées.

b) La piézométrie

La piézométrie du site a été établie à partir de la pose de 14 piézomètres répartis sur l'ensemble de la Réserve. 10 sont implantés dans des formations sablo-argileuses, 2 dans des formations sableuses (P₄ et P₅) et 2 dans les formations crayeuses.(P₁₂ et P₁₃) (Fig. 34).

(1) Cartes piézométriques

** Hautes eaux*

Elle a été réalisée à partir des relevés piézométriques du 23-05-97 au moyen d'une méthode de calcul basée sur la triangulation irrégulière sur surface quintique (Bonnet, en cours de publication).

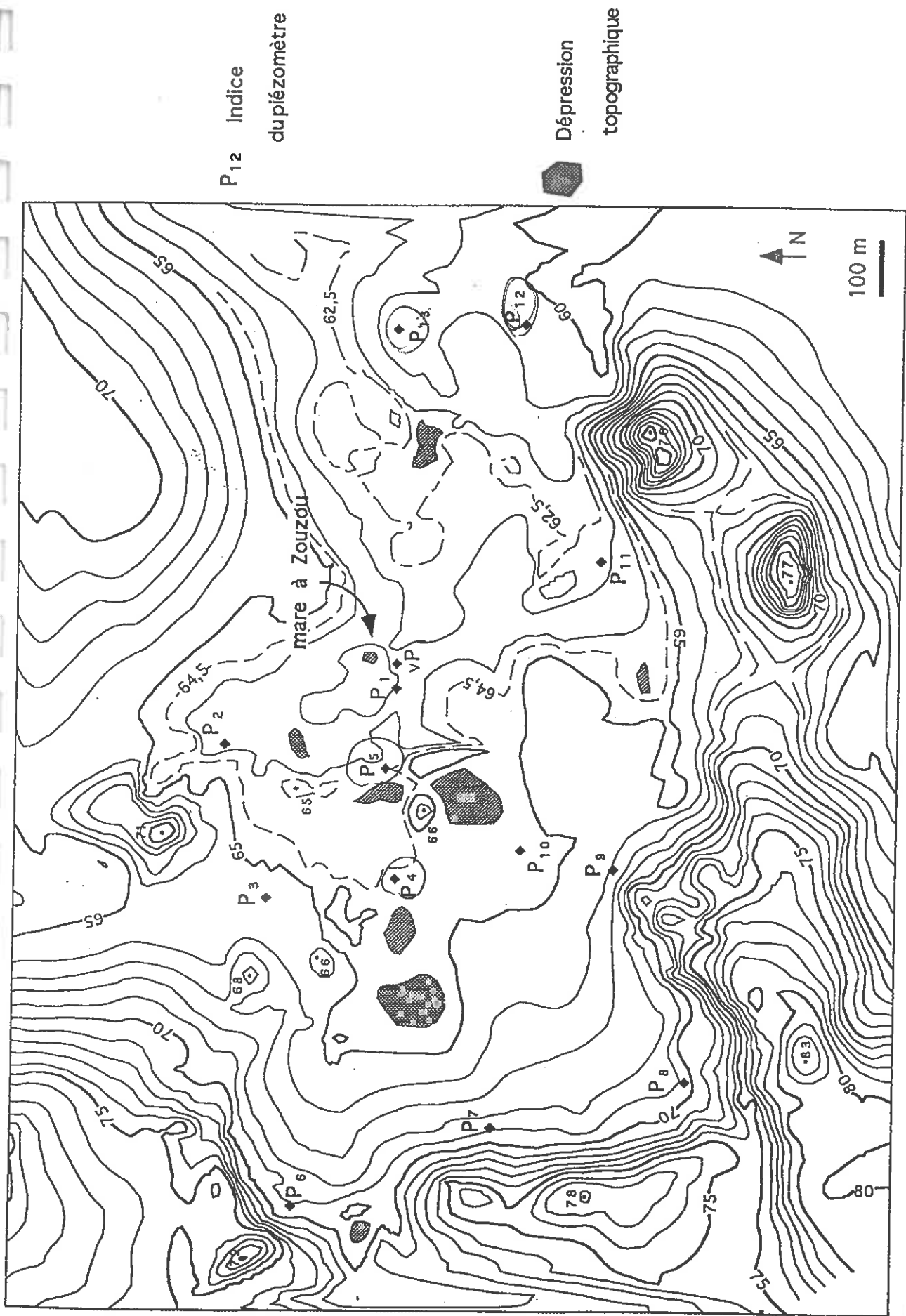


Fig. 34 : Localisation des piézomètres

Cette carte piézométrique prise dans son ensemble indique une circulation des eaux souterraines d'ouest en est. (Fig. 35). Aucun gradient hydraulique important entre les formations sableuses, sablo-argileuses et crayeuse n'apparaît, ce qui impliquerait une continuité hydraulique entre ces formations. Cependant, la piézométrie subit 2 interférences :

- un léger dôme piézométrique au niveau des sables thanétien, qui témoigne d'un fonctionnement hydraulique différent des sables quaternaires avoisinants ;
- un axe de drainage très important NW-SE.

** Basses eaux*

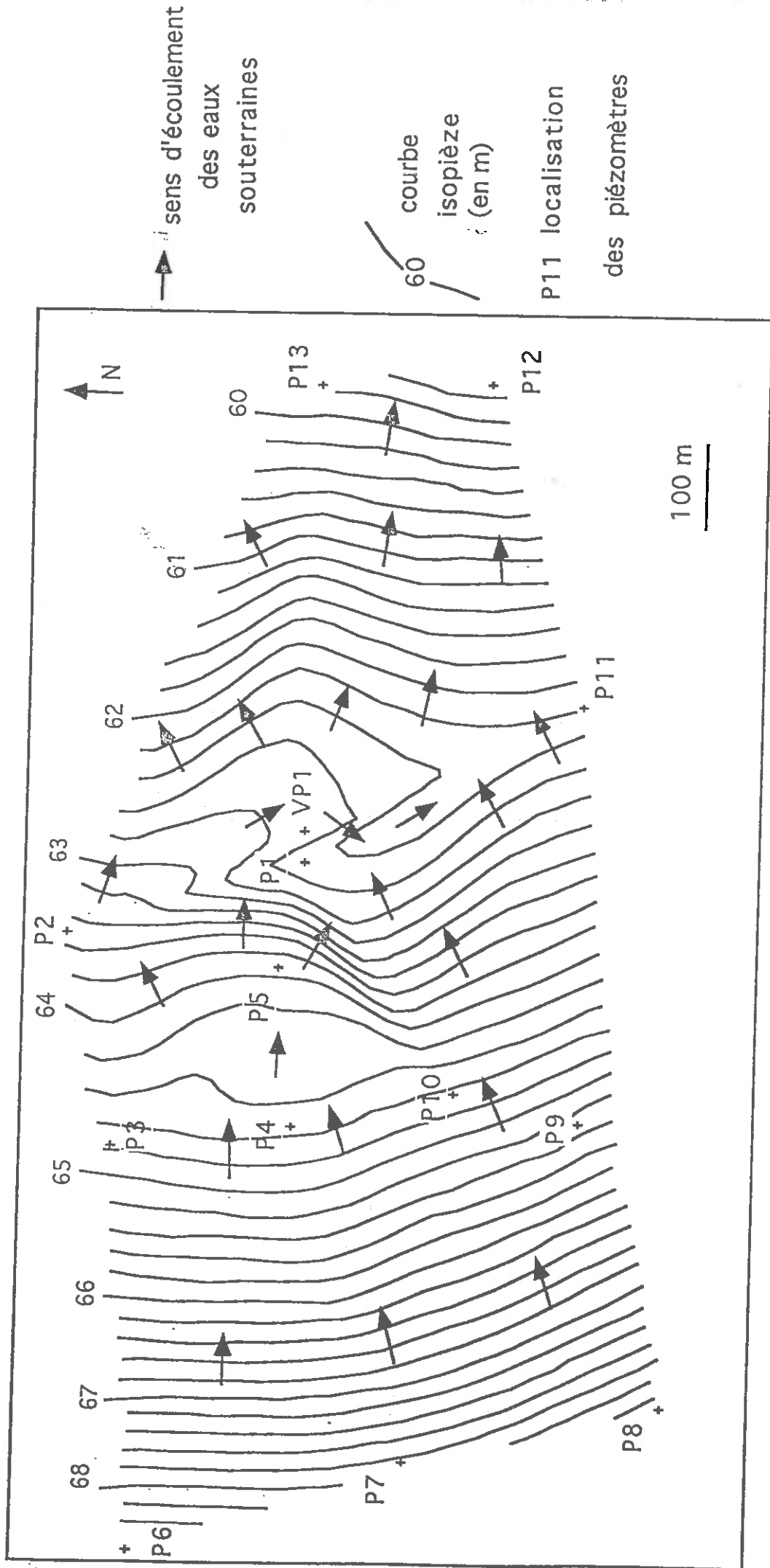
Cette carte a été effectuée à partir des relevés piézométriques du 8-08-97, au moyen de la méthode précédente (Fig. 36). On peut observer 3 différences notables :

- l'effet du dôme piézométrique s'atténue ;
- le drainage NW-SE a disparu ;
- le sens d'écoulement des eaux diffère également ; au sud de la Réserve, la nappe s'écoule d'ouest en est. Au nord, elle chemine d'ouest vers le nord-est puis redescend vers le sud-est. La circulation s'effectue par la suite vers l'est (c'est à dire vers la plaine crayeuse), malgré une topographie contraire, mais une structure conforme.

(2) Relation Pluie-Niveau piézométrique

Nous avons comparé les précipitations et les variations des niveaux piézométriques. Ceci fait apparaître une étroite relation entre les fortes intensités pluviométriques et les hauts niveaux piézométriques (Fig. 37). Cependant, on distingue suivant le lieu d'implantation des piézomètres des nuances saisonnières.

- A la fin du mois de Mai, tous les niveaux piézométriques augmentent parallèlement aux précipitations ;
- Au début du mois de Juillet, seuls les piézomètres implantés dans la craie ne réagissent pas aux précipitations.



↑ sens d'écoulement
des eaux
souterraines

60
courbe
isopièze
(en m)

P11 localisation
des piézomètres

100 m

Fig. 35 : Piezométrie hautes eaux

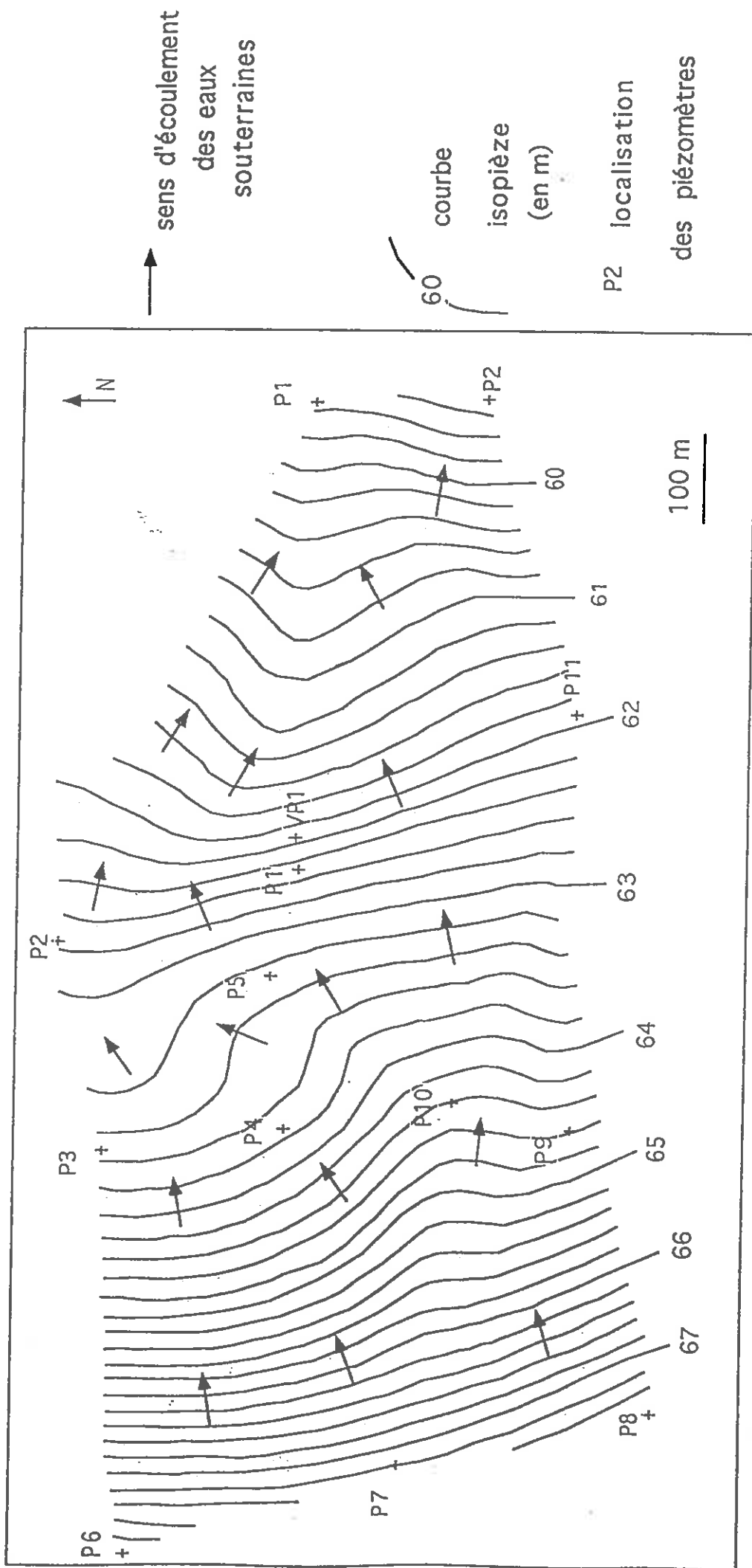


Fig. 36 : Piézométrie basses eaux

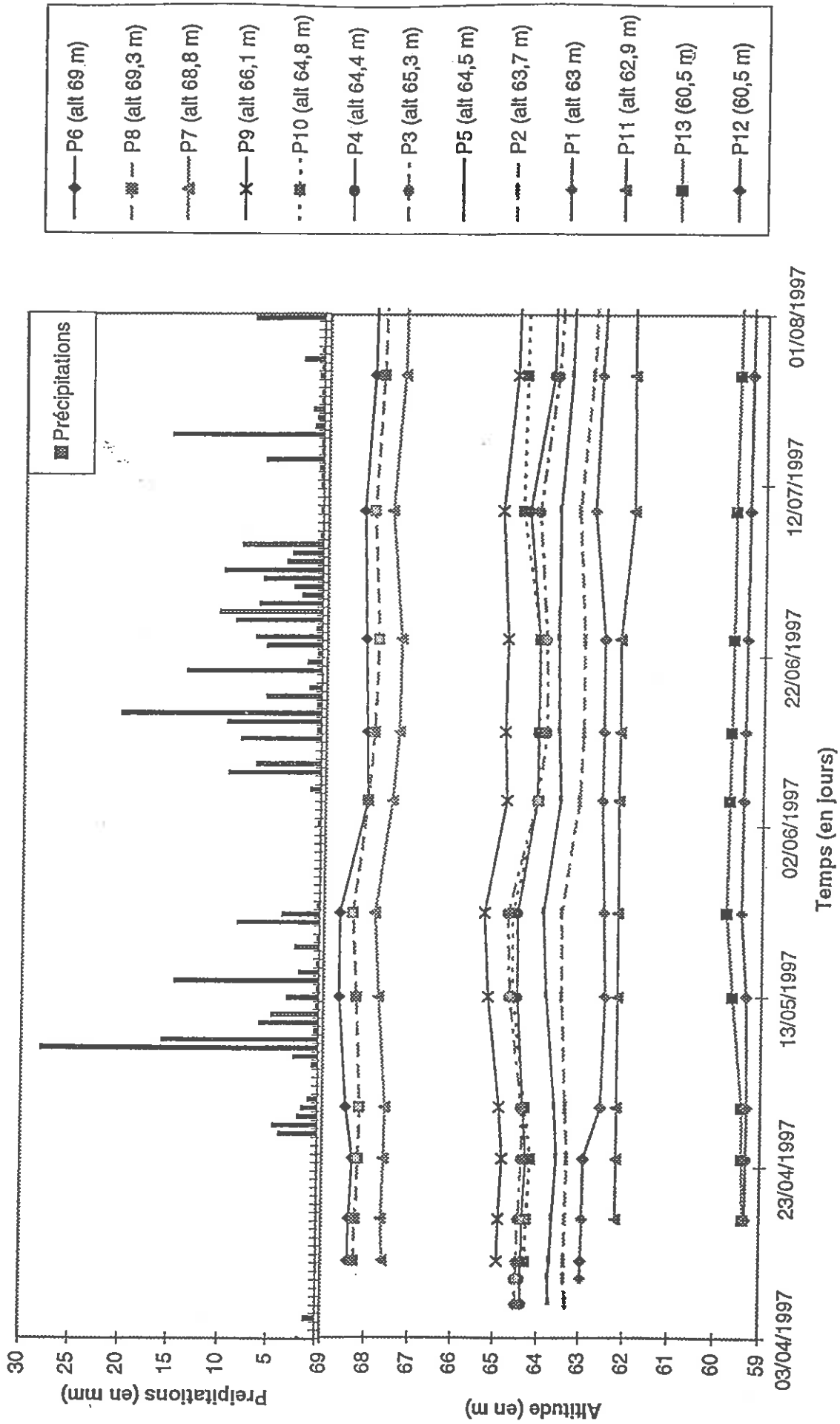


Fig. 37 : Relation Pluie-Niveau piézométrique

c) Superposition de la topographie et de la piézométrie

Cette manipulation vise à vérifier la cohérence de nos cartes piézométriques, mais également à identifier les zones inondables pérennes.

Les superpositions de ces cartes apparaissent sur les figures 38 et 39 pour les hautes eaux et les basses eaux.

En hautes eaux, la partie ouest de la Réserve se retrouve sous plus d'un mètre d'eau tandis que la partie située à l'est de la mare à Zouzou n'est pas submergée. Ces zones inondées englobent une partie des zones humides répertoriées, dont la mare à Zouzou.

En basses eaux, on constate le même phénomène, avec dans la partie ouest une zone immergée mais sur beaucoup moins de surface. La mare à Zouzou est asséchée.

d) Interprétation du fonctionnement hydrogéologique

Pour faciliter la compréhension et l'interprétation de la superposition de la carte topographique et piézométrique, a été réalisé pour chaque période un transect longitudinal.

* En hautes eaux

Transect A : (Fig.40)

La partie ouest de la Réserve se retrouve sous plus d'un mètre d'eau tandis que la partie située à l'est de la mare à Zouzou n'est pas submergée. Cette coupe traduit une aberration liée au manque de données piézométriques entre P_6 et P_4 . Cette carence était imprévisible vu le peu de distance séparant ces zones (400 m).

Nous émettons l'hypothèse que les zones humides situées à l'ouest de la Réserve, en contrebas des versants, servent d'exutoire à la nappe des sables-argileux quaternaires (sous forme de source), et rabattent dès lors la surface piézométrique de celle-ci. La localisation de ces zones humides auraient donc une explication rationnelle.

Plus à l'est, entre les piézomètres P_4 et P_5 , le gradient hydraulique demeure faible dans les sables thanétiens homogènes, puis augmente sous l'effet du drain. On s'aperçoit également que le niveau d'eau de la mare coïncide avec un niveau piézométrique de la nappe des sables argileux quaternaires. Vers le sud-est de la Réserve, l'écoulement des eaux souterraines de

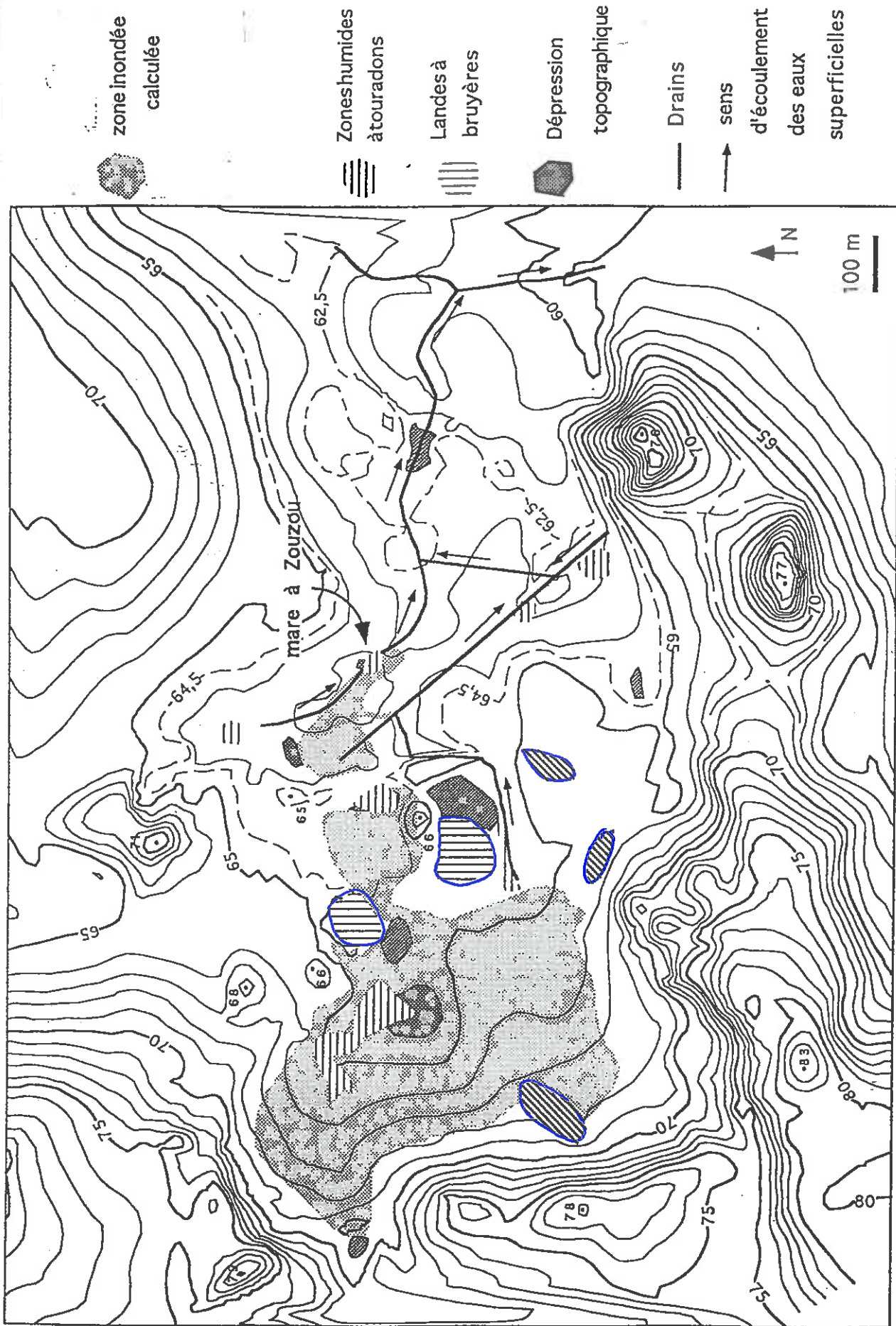


Fig. 38 : Superposition de la topographie et de la piézométrie en hautes eaux

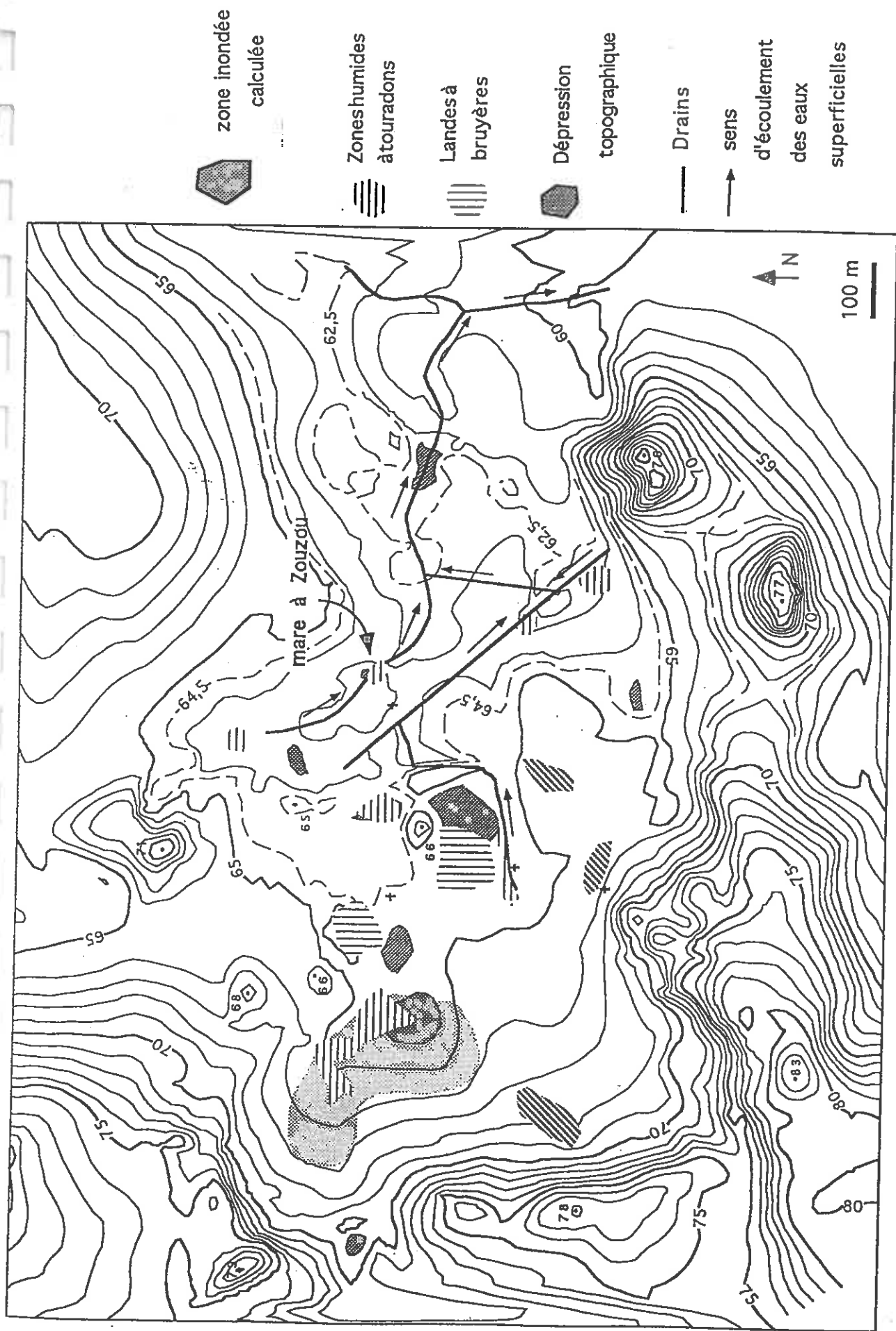


Fig. 39 : Superposition de la topographie et de la piézométrie en basses eaux

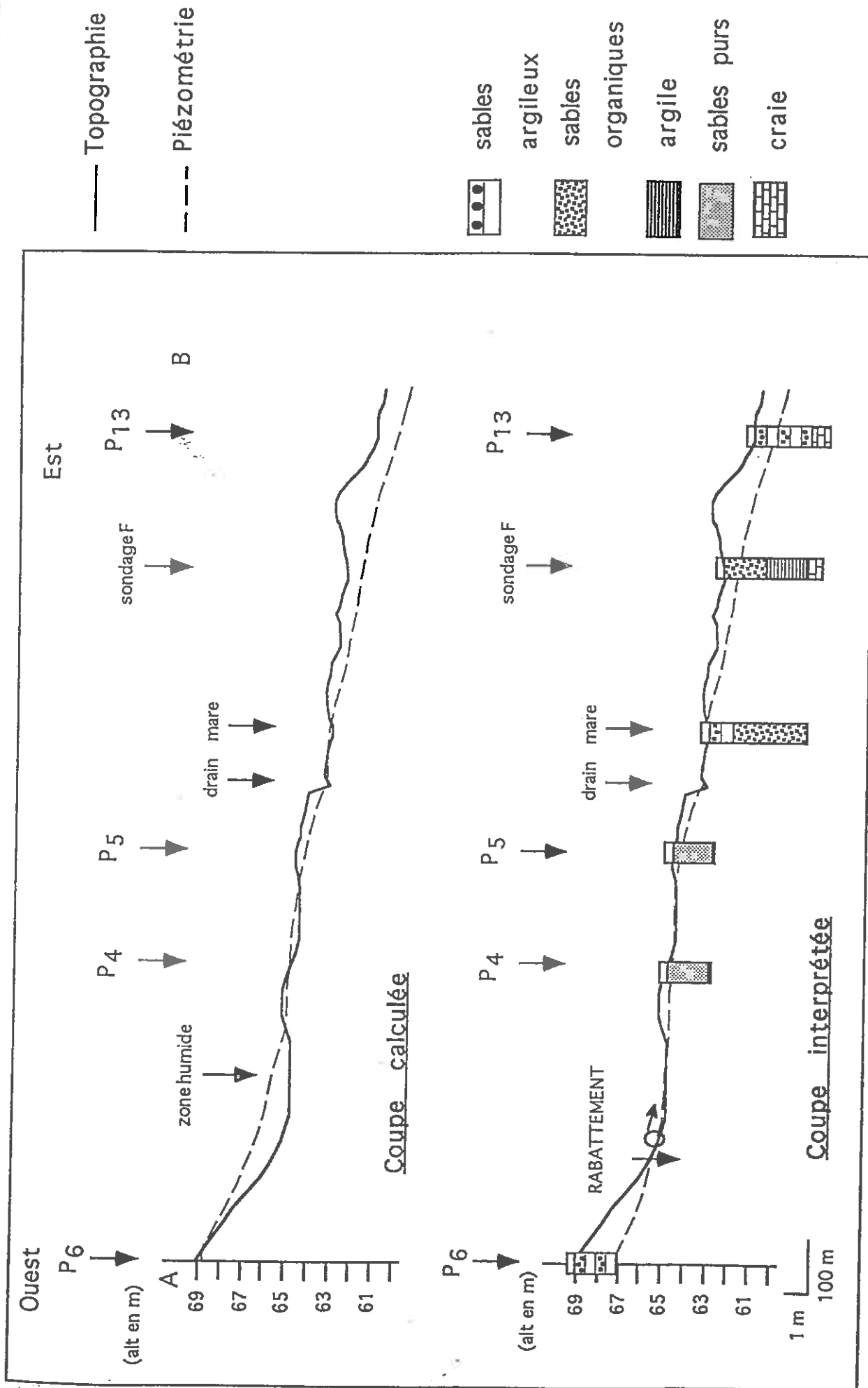


Fig. 40 : Transect A

l'ensemble craie-sables argileux s'écoulent uniformément vers la plaine crayeuse malgré une topographie inverse.

Par ailleurs, la superposition de la carte piézométrique et des drains superficiels, indique que le drainage des eaux souterraines de l'aquifère superficiel sableux-argileux est induit par 1 seul drain (Fig.41).

* En basses eaux :

Plus à l'est, la nappe semble s'écouler de manière continue des formations sablo-argileuses aux formations crayeuses.

* Transect B : (Fig.42)

On constate également la présence d'une zone inondée. Elle correspondrait à l'exutoire de la nappe des sables argileux, dont la surface piézométrique serait rabattue. On remarque que cette zone humide ne représente que le seul site potentiellement ennoyé en période estivale, la mare à Zouzou s'asséchant.

Le drainage superficiel a disparu. Un léger dôme piézométrique subsiste et indique par là même des hétérogénéités latérales de la transmissivité. L'écoulement d'ensemble des eaux souterraines s'effectue toujours vers le S-E. Il subit néanmoins des changements de direction locales qui ne peuvent être expliqués par les données dont nous disposons.

5. Hydrologie

La mare à Zouzou, siège du développement d'une végétation oligotrophe acide, subit des variations de la physico-chimie de ces eaux inexplicées. Par ailleurs, son fonctionnement étant inconnu, ce site est apparu comme la zone test du suivi hydrologique et hydrochimique. L'acquisition de ces nouvelles connaissances devra être recoupée par la suite, aux informations recueillies sur le fonctionnement hydrogéologique des aquifères.

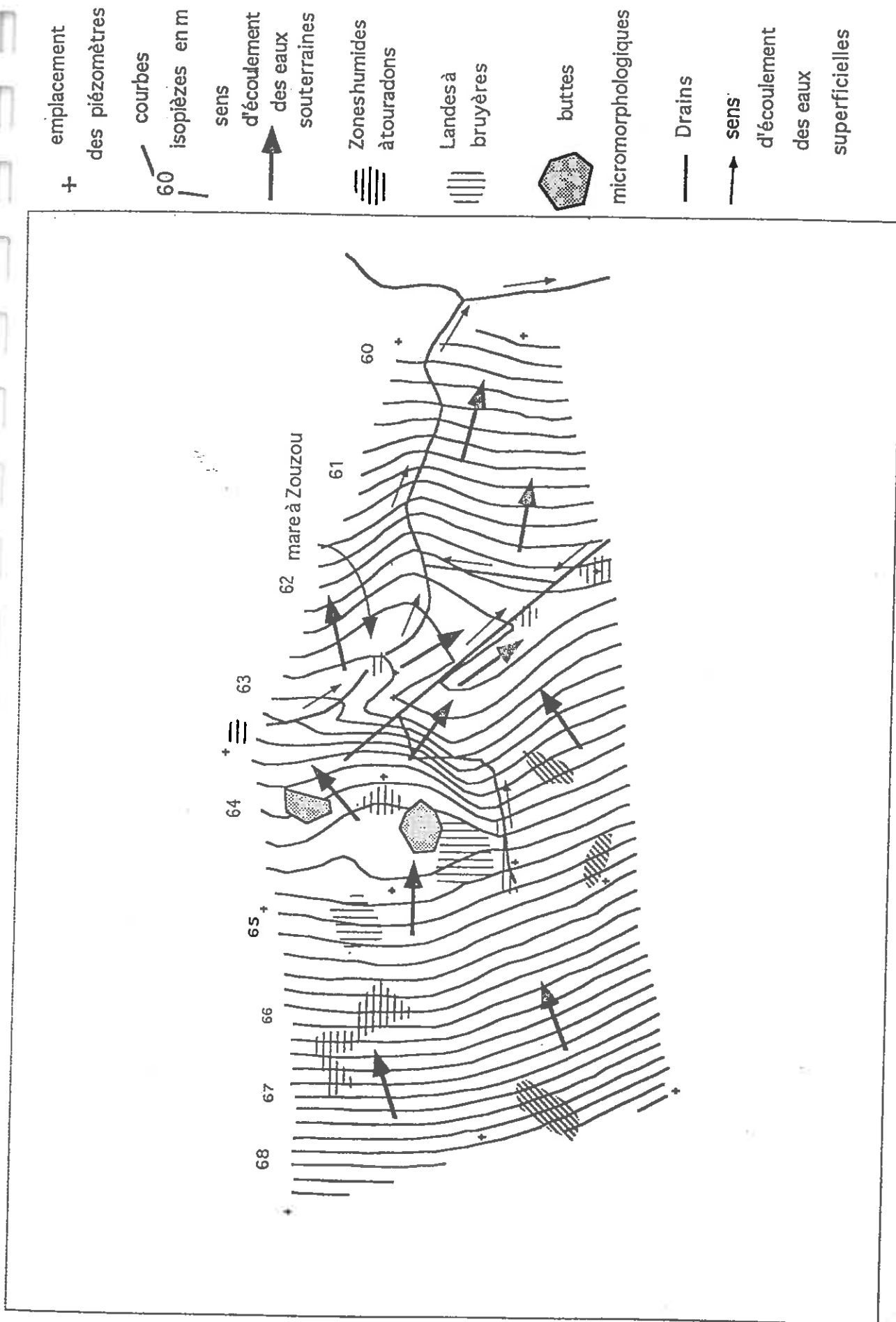


Fig. 41 : Superposition de la piézométrie et du réseau de drains artificiels

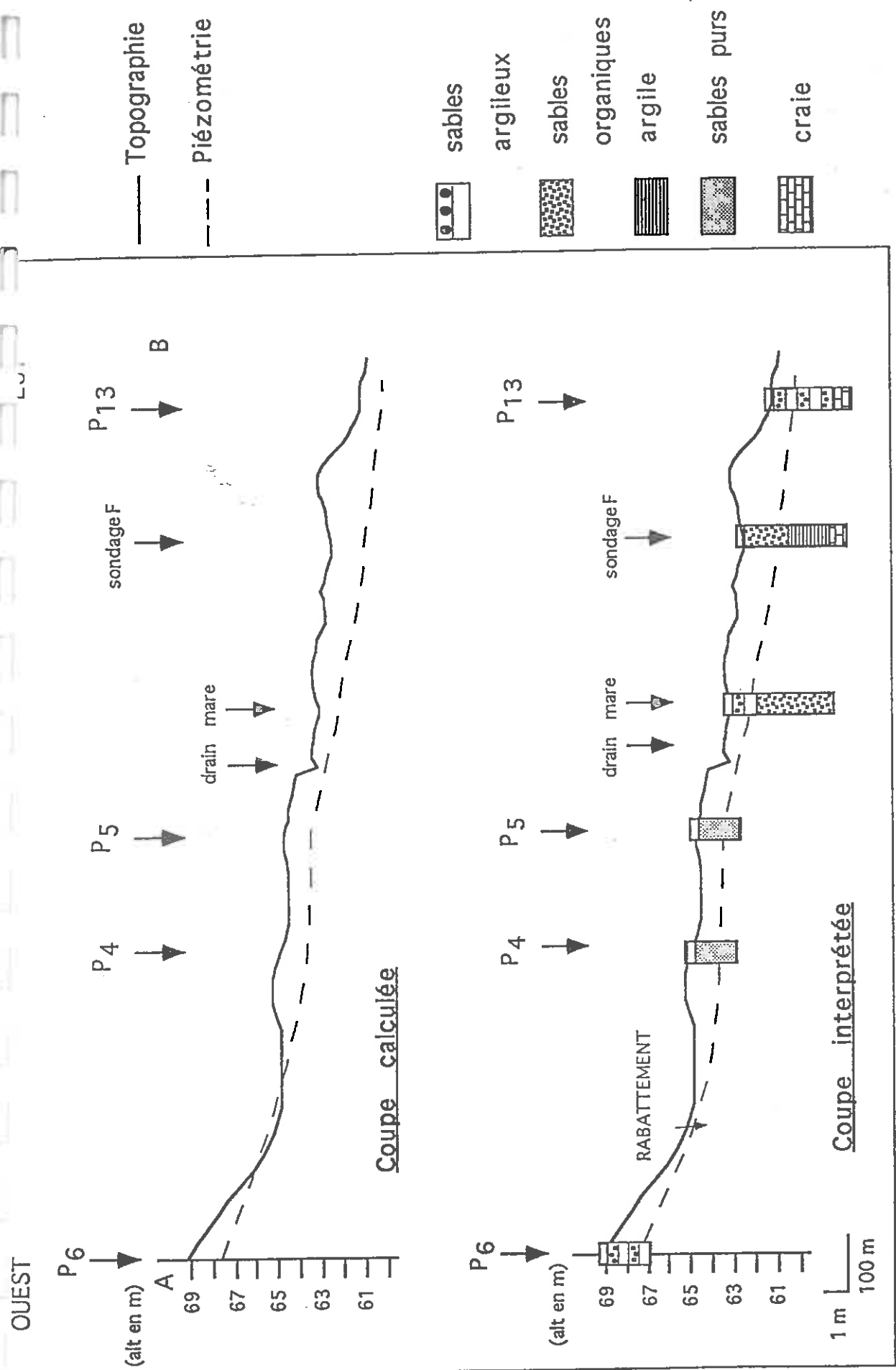
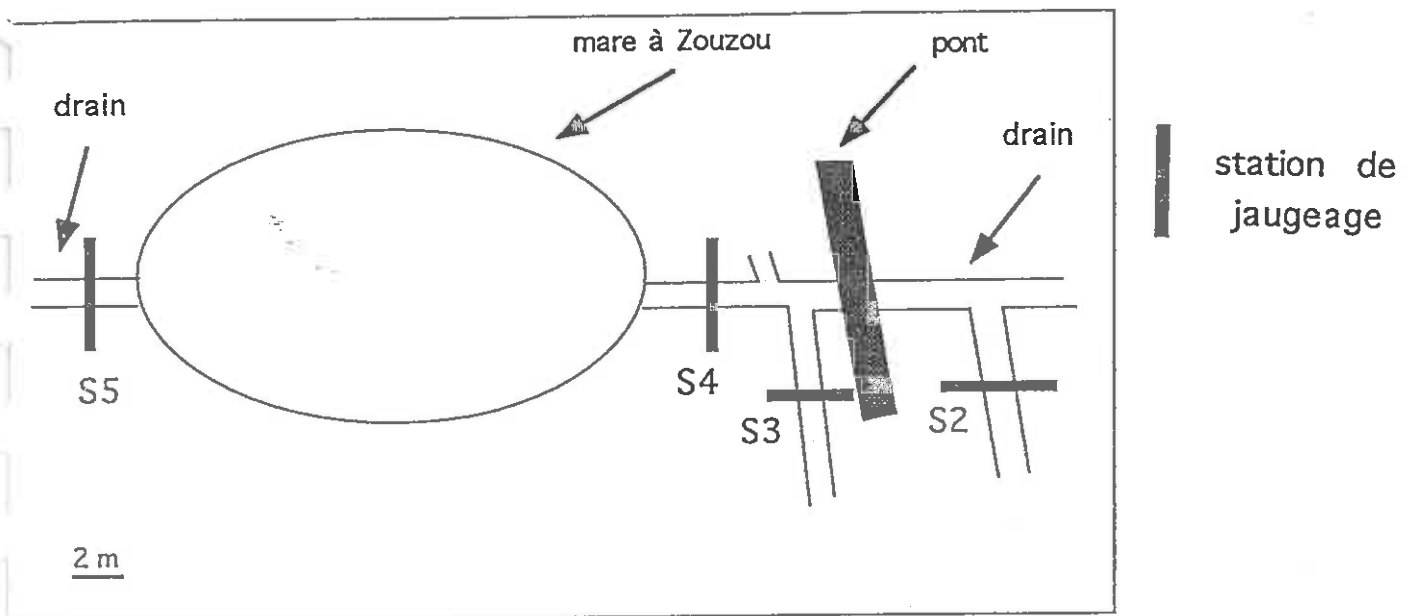


Fig. 42 : Transect B

a) Descriptif technique des stations de jaugeage et définition des techniques de mesures de débit

Au total, 4 stations de jaugeages ont été installées. Leur implantation permet de quantifier tous les débits entrant et sortant de la mare (Fig.43).

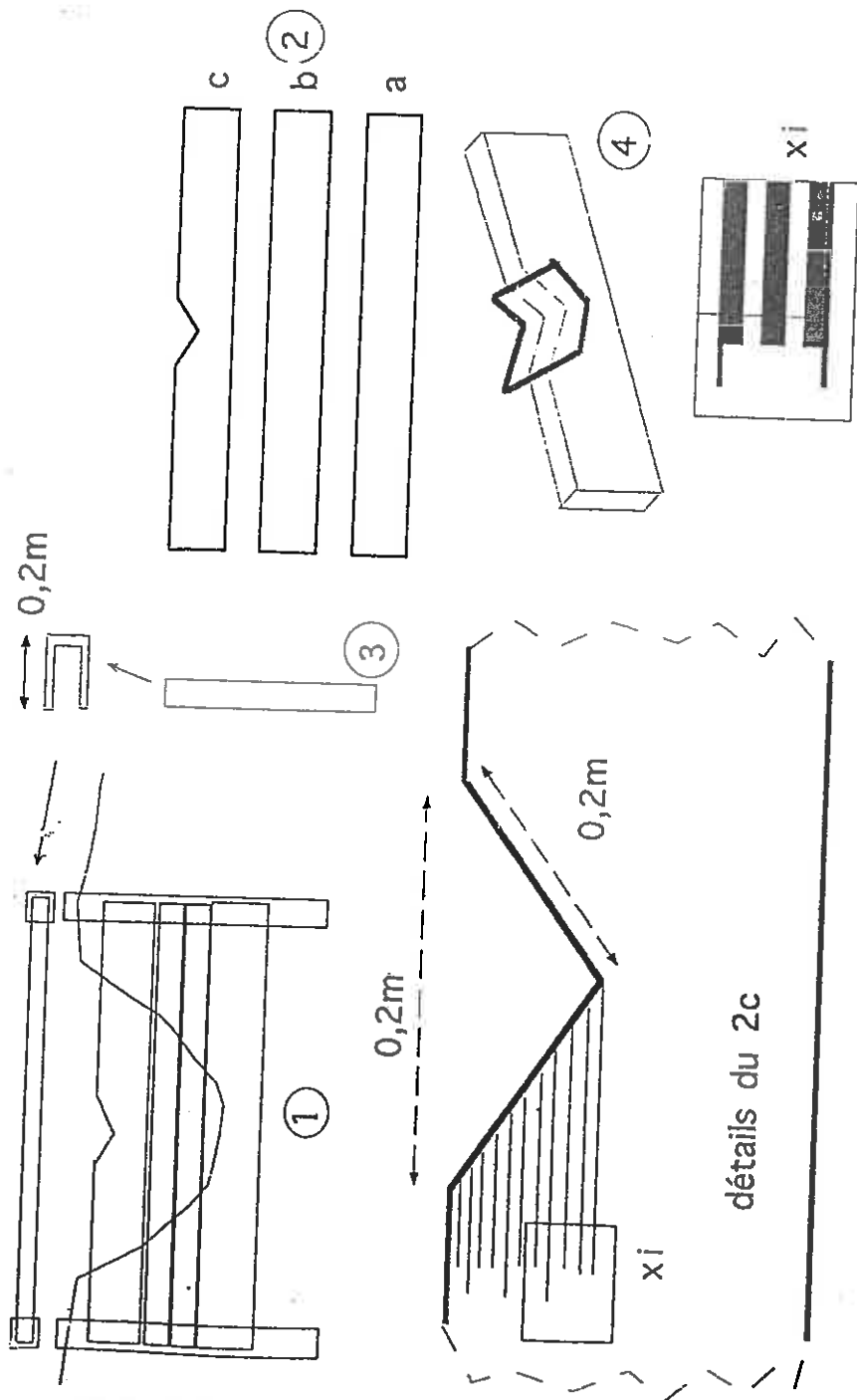


~~Fig. 43~~ : Localisation des stations de jaugeage autour de la Mare à Zouzou.

Les stations de jaugeages sont constituées par un système de planche en bois. Ce système permet à un débit représentatif de l'écoulement de passer à la surverse. L'ouvrage est schématisé sur la figure 44. Les diverses planches sont installées dans des coulisses fixées dans les berges. Ces coulisses d'une largeur de 20 cm, sont en métal d'une épaisseur suffisante pour supporter les planches.

Au centre de la planche de surverse, est réalisée une découpe précise en triangle équilatéral de 20 cm de côté. Sur le bord de cette découpe, est installée une graduation tous les centimètres (le zéro étant la pointe du triangle). Le triangle de découpe est des équipé d'un "V" en métal, dépassant d'au moins 5cm de chaque côté de la planche de surverse.

Deux méthodes de mesure ont été utilisées dans le cadre du suivi des débits afin d'apprécier la valeur des résultats. La première consiste à évaluer la quantité d'eau qui se déverse dans un seau de 10l par unité de temps et donne donc des valeurs réelles.



- 1- schéma de l'ouvrage
- 2- plaques utilisées, d'épaisseur d'au moins 4 cm et d'une longueur d'au moins 2,5 m.
 - type a : larges de 5 cm, et fichées en fond de fossé ;
 - type b : plaques de régulation de niveau, de 5 cm de large ;
 - type c : planche de surverse, de 5 cm d'épaisseur.
- 3- coulisses en métal fixées dans le sol.
- 4- schéma du "V" du déversoir et de la graduation associée

Fig. 44 : Descriptif technique des stations de jaugeage

La seconde est basée sur une application de l'équation de Bernouilli, qui permet de calculer le débit d'un écoulement laminaire au travers de l'ouverture en " V " d'un déversoir (Fig.45).

L'équation s'écrit :

$$* Q = 1,32 \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \times H^{2,42}$$

Q : débit en ls^{-1}

H : hauteur d'eau dans le " V "

α : angle du " V "

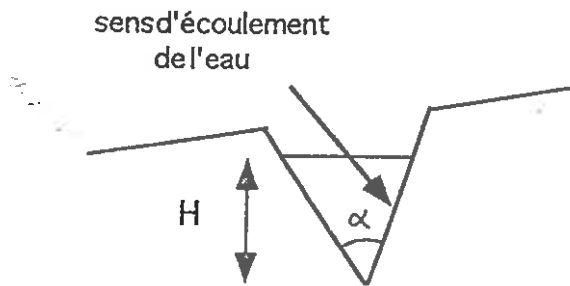


Fig. 45 : Schéma d'application de la loi de Bernouilli

b) Les débits

(1) Critique des résultats obtenus

Pour les débits, le pourcentage d'erreur du au mode de mesure atteint 15% pour des valeurs supérieures à $1,5 \text{ ls}^{-1}$. En effet, pour de telles valeurs de débits, le seau se remplit en 6,6s. En effet, considérant une erreur de lecture constante de 1s due à la manipulation du chronomètre, on obtient un pourcentage d'erreur équivalent à $1/6,6$, soit 15%. Il devient inférieur à 10% pour des débits inférieurs à 1 l/s, ce qui représente 85% des cas.

(2) Les courbes de tarage

Les deux stations de jaugeages fonctionnelles S4 et S5, ont permis de recueillir respectivement 20 et 16 mesures de débits. Ces mesures servent à l'élaboration des courbes de tarages :

$$* - H = f(Q).$$

H : hauteur d'eau dans le V du seuil considéré

Q : débit obtenu à la station de jaugeage correspondant

Le but de ces courbes de tarages est double; d'une part permettre une estimation rapide des débits et d'autre part vérifier l'extrapolation des mesures de débits réalisées.

- au seuil : l'interpolation logarithmique propose pour les deux stations de jaugeages deux courbes de tarage. (Fig.46). Elles démontrent dans le temps une bonne adéquation entre hauteur et débit. La distinction entre ces 2 courbes indique uniquement une variation des débits écoulés pour une hauteur d'eau équivalente dans les deux seuils. Cependant, ces courbes restent à compléter car il n'a pas été possible de recueillir de débits supérieurs à 1.66 ls^{-1} pour S4 et 1.53 ls^{-1} pour S5, débits assurément dépassés vus les marques laissées par les niveaux d'eau sur les stations.

- d'après la loi de Bernouilli : l'interpolation logarithmique présente 2 courbes de tarages quasiment identiques et confirme la qualité des stations installées (Fig.47).

L'ensemble de ces observations indiquent un fonctionnement global correct des seuils hydrauliques, avec des débits de fuites trop peu importants pour altérer les relations entre hauteur et débit, et montre une méthode de calcul des débits très convenable.

(3) Estimation des débits mensuels

Les débits instantanés mesurés permettent une estimation des débits mensuels. Elle consiste à relier dans un repère orthonormé ($y = \text{débit}$ et $x = \text{temps (en jours)}$) chaque mesure de débit par une droite puis de calculer entre ces 2 épisodes de mesures les débits moyens journaliers, par simple intégration des valeurs journalières comprises sous la courbe.

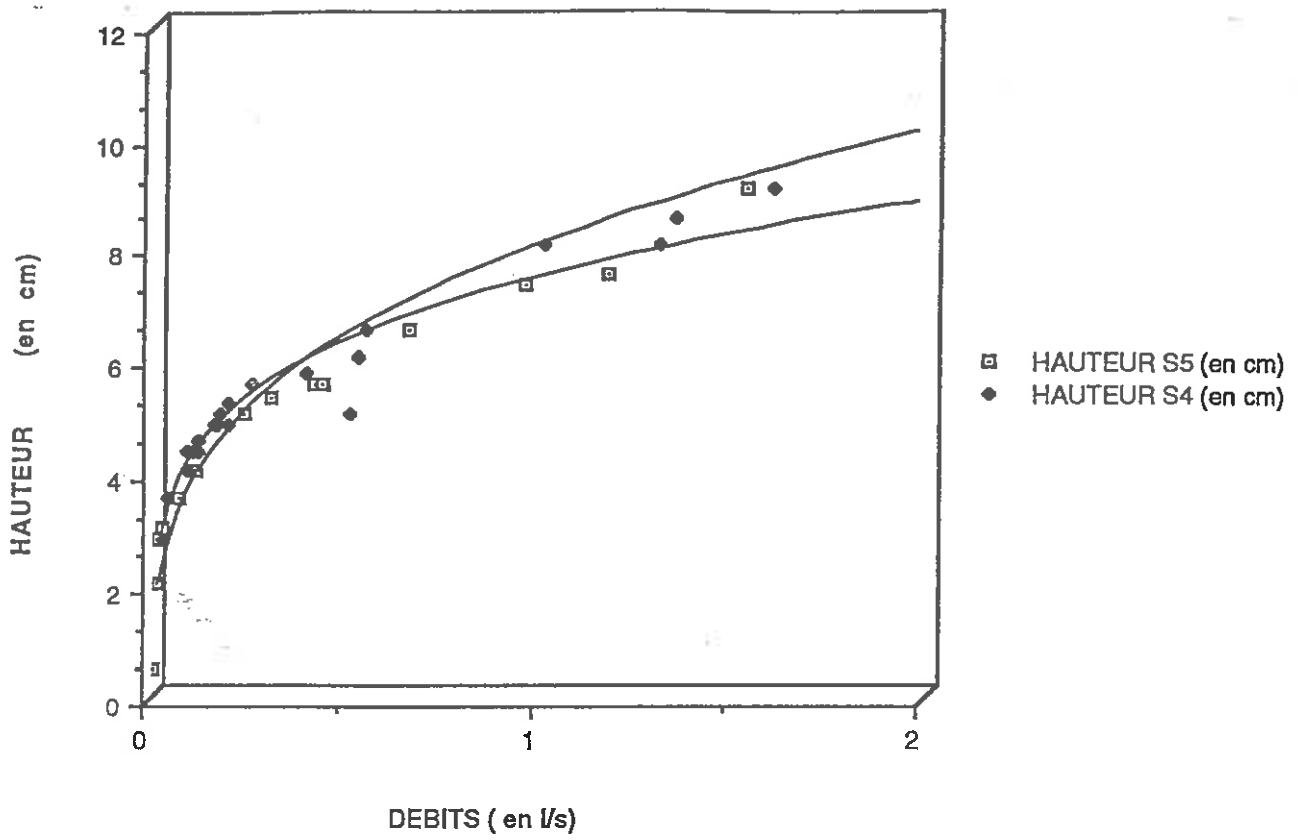


Fig. 46 : Courbe de tarage d'après les mesures au seuil

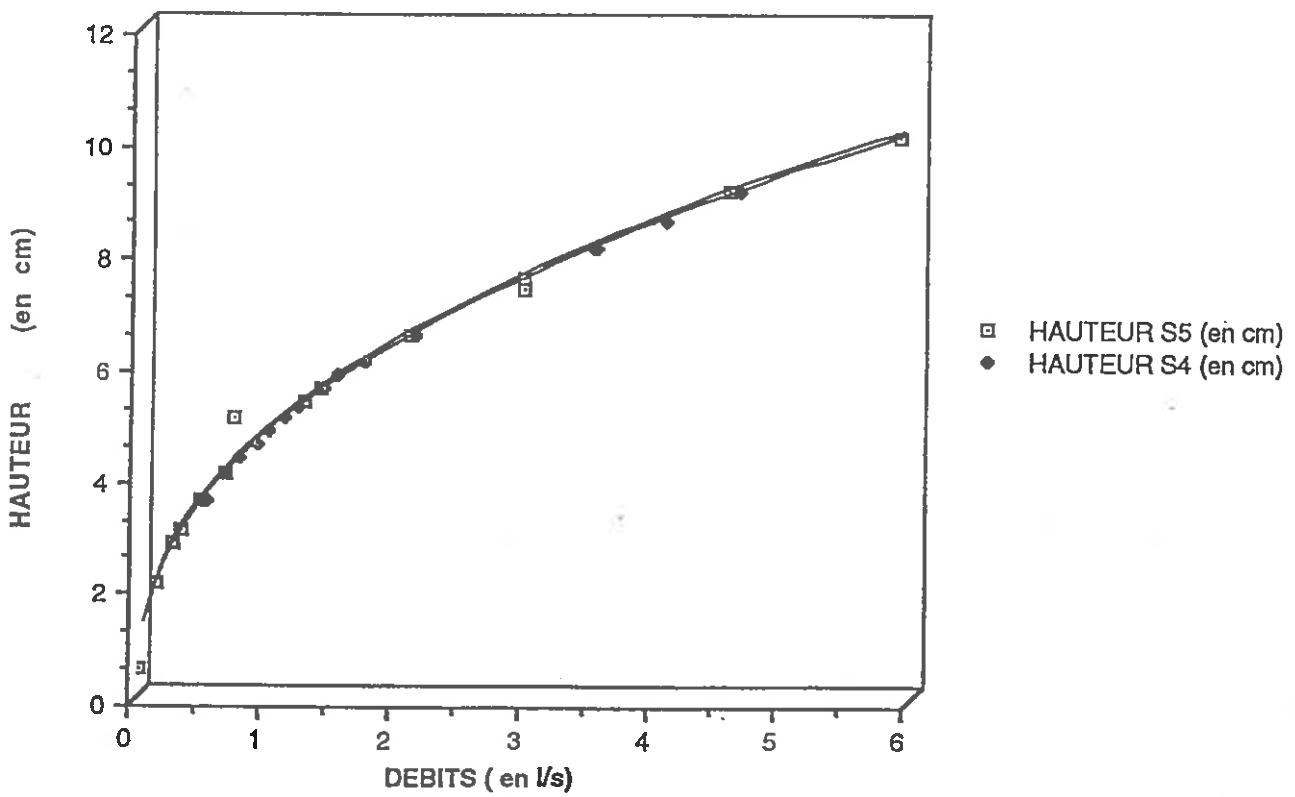


Fig. 47 : Courbe de tarage d'après la loi de Bernoulli

Les résultats sont fournis dans le tableau XVIII.

Mois	F	M	A	M	J	Jt
débit S4 (en $l s^{-1}$)	1,19	1,08	0,13	0,72	0,02	0,05

Tableau XVIII : Débits mensuels estimés pour la station de jaugeage S4 de Février 1997 à Juillet 1997. (en $l s^{-1}$)

Ces résultats montrent des débits variables, importants en Février, Mars et Mai et quasiment nul en Juin et Juillet.

(4) Etude des transferts Pluies-Débits

Les données de débits n'étant pas continues, il n'est pas possible de travailler sur des hydrogrammes de crues. Cette étude vise simplement à percevoir la réponse des débits au signal pluie, dans sa globalité.

L'évolution de ces relations de Janvier 1997 à Juillet 1997 montre une correspondance entre ces 2 variables. Cependant, suivant les époques de l'année, il apparaît une altération de la réponse débit au signal pluie (Fig.48).

- Début Février-mi-Avril : les débits instantanés maximaux atteignent $1.66 l s^{-1}$ pour S4 et $1.53 l s^{-1}$ pour S5, pour une intensité pluviométrique du 4 Février au 5 Mars de 95 mm.

- Mi-Avril-début Juin : bien que les intensités pluviométriques augmentent légèrement, 105 mm du 25 Avril 1997 au 22 Mai 1997, les débits instantanés n'excèdent pas $1.34 l s^{-1}$ pour S4 et $0.95 l s^{-1}$ pour S5.

- Début Juin-mi-Juillet : les observations faites ci-dessus se poursuivent, et malgré une pluviométrie quasi continue du 5 Juin au 5 Juillet avec 152 mm d'eau, les débits maximaux relevés ne dépassent guère $0.15 l s^{-1}$ pour S4 et $0.1 l s^{-1}$ pour S5.

La diminution des débits s'accroît avec l'état d'avancement des saisons et cela malgré des épisodes à totaux pluviométriques sans cesse croissants. Or, nous savons que l'ETP augmente considérablement en période estivale. Il sera donc intéressant de voir par la suite dans quelles mesures l'ETP intervient sur la régulation des débits.

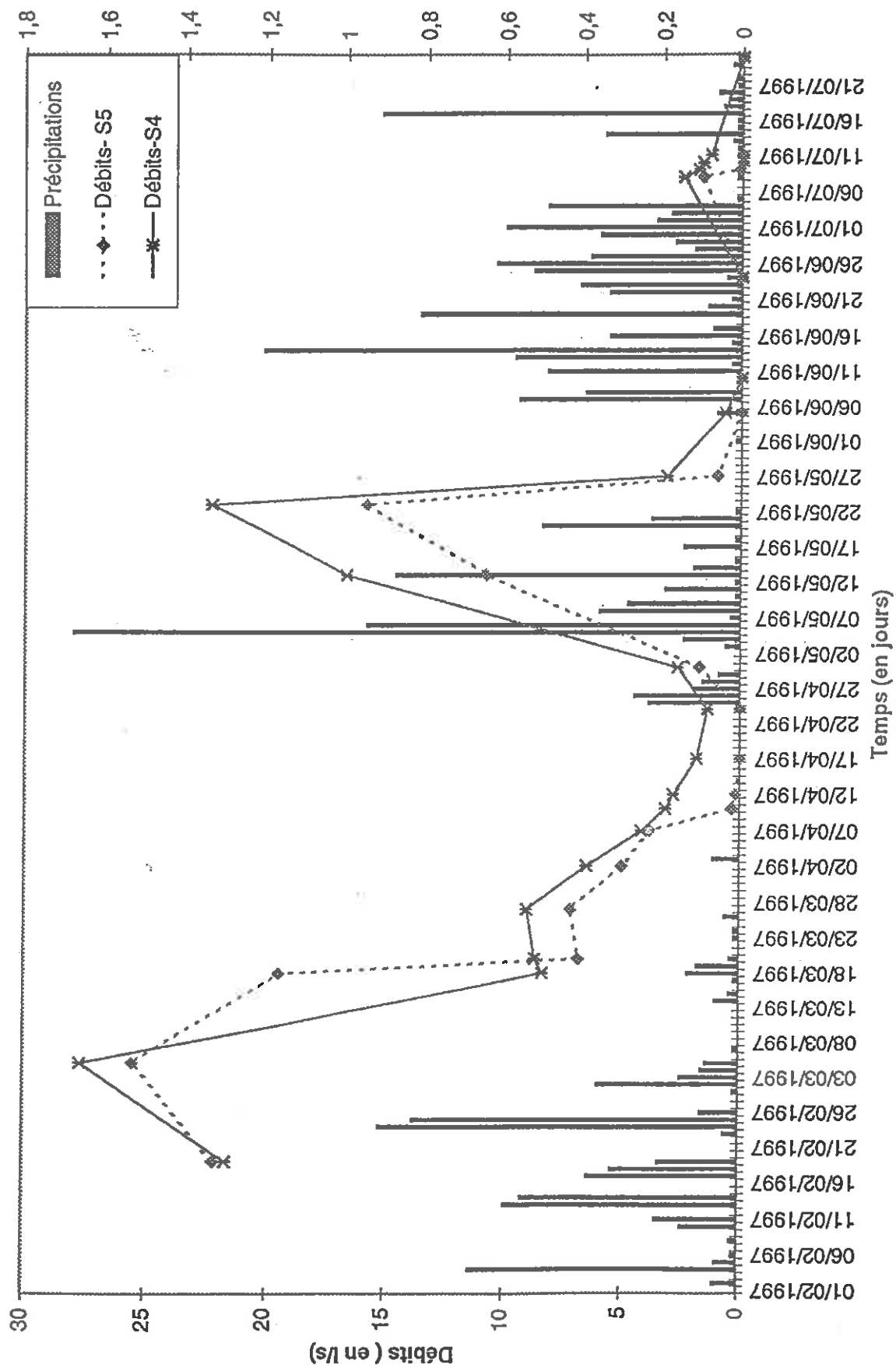


Fig. 48 : Relation Pluie-Débit

(5) Relation Débit de surface- Niveau piézométrique

Ces relations indiquent l'intensité des liaisons qui peuvent exister entre "la ou les" nappes et les débits de l'exutoire de la mare. En supposant que les variations des débits peuvent représenter les variations des réserves hydrogéologiques, de bonnes corrélations entre variations des débits et variations piézométriques confirmeraient cette hypothèse.

La figure 49 montre la similitude entre l'élévation des niveaux piézométriques et l'augmentation des débits. Il existerait une certaine correspondance entre ces deux phénomènes.

c) Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique d'un bassin versant est une méthode de calcul qui permet d'apprécier les relations entre apports et sorties d'eau, sur une période de temps déterminée, ici de Janvier 1997 à Juillet 1997. L'objectif est de vérifier la cohérence d'ensemble des données recueillies et calculées : mesure de précipitation, mesure de débits ...

La définition de cette méthode est détaillée dans l'annexe 4.

D'après cette méthode, on en déduit les valeurs de l'évapotranspiration réelle mensuelle, le stock d'eau disponible dans le sol en fin de mois et l'excédent mensuel (EXCi).

L'hétérogénéité du substratum rencontrée dans la Réserve (sables, sables argileux, craie), démontre la difficulté du choix de la réserve facilement utilisable (RFU), habituellement fixé à 100 mm. D'après les études réalisées par l'INRA sur différents types de sol de la région, 3 bilans peuvent être établis avec une RFU égale à 70 mm, 50 mm et 25 mm. (Tableau XIX à XXI).

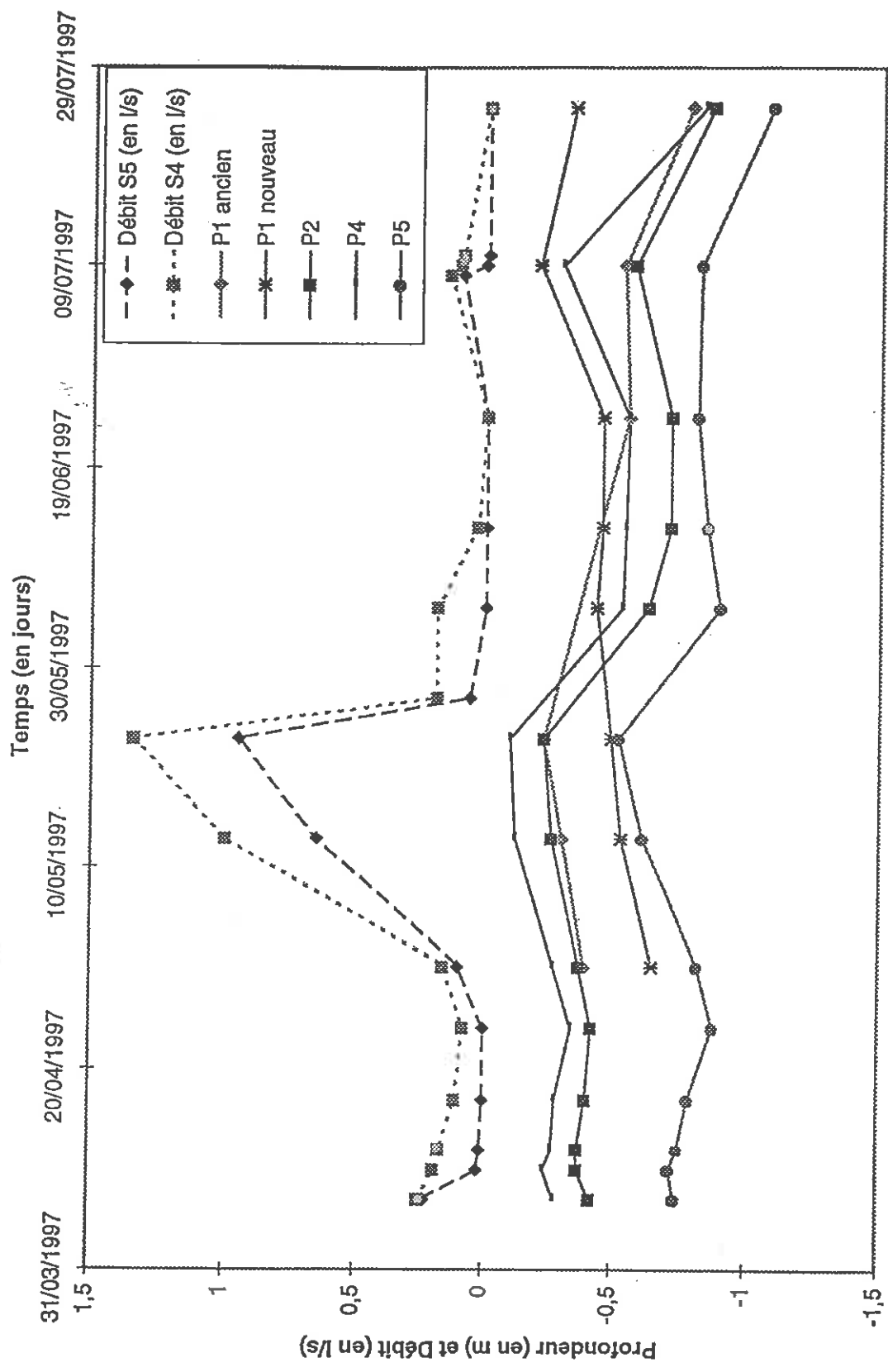


Fig. 49 : Relation Débit-Niveau piézométrique

MOIS	TEMP (en °C)	ETP (en mm)	PL (en mm)	STOCK (en mm)	ETR (en mm)	EXC (en mm)
Février	6,6	29,7	85,2	70	29,7	55,5
Mars	8,9	40,5	18,9	48,4	40,5	0
Avril	8,1	72,3	14	0	62,4	0
Mai	13,2	96,6	93,4	0	93,4	0
Juin	16,1	97,9	127,6	29,7	97,9	0
Juillet	17,6	114,5	60	0	89,7	0
TOTAL		451,5	399,1		413,6	55,5

Tableau XIX : Bilan hydrologique pour une RFU égale à 70 mm, de Février 1997 à Juillet 1997

TEMP : température moyenne du mois considéré

ETP : évapotranspiration mensuelle calculée par la méthode de Penman

PL : pluie mensuelle

ETR : évapotranspiration réelle

STOCK : stock d'eau contenu dans le sol en fin de mois

EXC : excédent disponible pour le ruissellement et l'infiltration

MOIS	TEMP (en °C)	ETP (en mm)	PL (en mm)	STOCK (en mm)	ETR (en mm)	EXC (en mm)
Février	6,6	29,7	85,2	50	29,7	55,5
Mars	8,9	40,5	18,9	28,4	40,5	0
Avril	8,1	72,3	14	0	62,4	0
Mai	13,2	96,6	93,4	0	93,4	0
Juin	16,1	97,9	127,6	29,7	97,9	0
Juillet	17,6	114,5	60	0	89,7	0
TOTAL		451,5	399,1		393,6	55,5

Tableau XX : Bilan hydrologique pour une RFU égale à 50 mm, de Février 1997 à Juillet 1997

MOIS	TEMP (en °C)	ETP (en mm)	PL (en mm)	STOCK (en mm)	ETR (en mm)	EXC (en mm)
Février	6,6	29,7	85,2	25	29,7	55,5
Mars	8,9	40,5	18,9	3,4	40,5	0
Avril	8,1	72,3	14	0	62,4	0
Mai	13,2	96,6	93,4	0	93,4	0
Juin	16,1	97,9	127,6	25	97,9	4,7
Juillet	17,6	114,5	60	0	89,7	0
TOTAL		451,5	399,1		363,9	60,2

Tableau XXI : bilan hydrologique pour une RFU égale à 25 mm, de Février 1997 à Juillet 1997.

Sur les cinq mois étudiés, l'évapotranspiration représente au minimum 91 % du volume d'eau précipité et 9% seulement reste disponible pour alimenter le ruissellement et l'infiltration. Les observations réalisées au cours de cette étude, n'ont révélé aucun phénomène de ruissellement. Ainsi, les pluies efficaces alimentent uniquement les différents aquifères en présence. L'examen des bilans montre que l'on observe des reprises d'écoulement alors même que les stocks d'eau sont insuffisants. Ces anomalies reflètent les limites de cette méthode : choix arbitraire du facteur RFU et un pas de mensuel du calcul. Toutefois, cette analyse démontre en période estivale, l'effet de l'ETP sur le ruissellement et l'infiltration. Elle se traduit par une diminution, voir une absence des recharges des aquifères et contribue très fortement à son tarissement. Afin de vérifier la cohérence du bilan annuel, on compare la lame moyenne écoulée de Janvier 1997 à Juillet 1997, à l'excédent calculé.

On note que le terme d'écoulement sur 5 mois est nettement inférieur à l'excédent, quelque soient les valeurs de RFU utilisées (Tableau XXII).

	EXC (en mm)	surface du bassin versant topographique (en m ²)	EXC (en m ³)	volume d'eau écoulé (en m ³)
RFU = 70 mm	55,5	662 500	36 768	8 222
RFU = 50 mm	55,5	662 500	36 768	8 222
RFU = 25 mm	60,2	662 500	39 882	8 222

Tableau XXII : Comparaison entre les volumes d'eau précipités et écoulés.

Plusieurs hypothèses peuvent être proposées:

- une sous-estimation de la lame écoulée : le suivi des débits n'étant pas continu, les résultats ne prennent en compte qu'une partie de l'information. Toutefois, un calcul du volume d'eau écoulé, volontairement exagéré (soit 25960 m³ sur 5 mois), effectué à partir d'un débit moyen correspondant au débit maximum instatanné mesuré sur la période d'étude, démontre également l'incohérence des données.

- une sous-estimation des pluies : les pluies sont obtenues à partir de la station météorologique d'Aulnoy-sous-Laon, et nous avons vu qu'elles étaient représentatives du secteur étudié, donc il n'y a pas lieu de craindre une erreur importante.

- une sous-estimation de l'ETP : considérant que les limites du bassin versant topographique coïncide avec celles du bassin versant hydrogéologique, la lame d'eau précipitée

sur ces surfaces devraient être identiques à la lame d'eau écoulée. Or, il n'en est rien et cette différence pourrait être induite par une ETP calculée inadaptée au site.

- la mare n'est pas l'unique exutoire du bassin versant topographique, et les pluies efficaces alimentent parallèlement un autre aquifère sous-jacent dont l'exutoire se trouve en dehors de la Réserve.

- les valeurs d'ETP utilisées pour le calcul du bilan sont justes mais les limites des bassins versants topographique (Fig.50) et hydrogéologique sont distinctes. Les faibles volumes d'eau écoulés à l'exutoire de la mare à Zouzou indiqueraient alors un bassin versant de taille plus restreinte dont la surface théorique peut être estimée de la sorte :

$$* S_{BVH} = \frac{V_{LE}}{EXC} = \frac{8222}{0,0555} = 148156m^2$$

V_{LE} : volume de la lame d'eau écoulée (en m³)

EXC : excédent calculé d'après le bilan hydrologique pour une RFU = 70 mm

Ce bassin versant théorique ne peut être replacer sur une carte topographique. Son existence demeure contestable.

d) Bilan hydrogéologique

	EXC (en mm)	surface du bassin versant hydrogéologique (en m ²)	EXC (en m ³)	volume d'eau écoulé (en m ³)
RFU = 70 mm	55,5	418 700	23 240	8 222
RFU = 50 mm	55,5	418 700	23 240	8 222
RFU = 25 mm	60,2	418 700	25 200	8 222

Tableau XXIII : Comparaison entre volumes d'eau écoulés et précipités sur le bassin versant hydrogéologique.

La surface du bassin versant hydrogéologique de l'exutoire de la mare est estimée à 0,418 km² à partir de la carte piézométrique générale (Fig.51). Les volumes précipités, établis à partir d'une RFU= 70 mm, représentent 25 200 m³, alors que les volumes écoulés ne dépassent pas 8222 m³.

On peut proposer deux hypothèses :

- le bassin versant hydrogéologique de l'exutoire de la mare serait inférieur au bassin versant hydrogéologique déterminé et supposerait dès lors un compartiment autonome délimité par des failles étanches, ce qui paraît peu vraisemblable dans des sables.

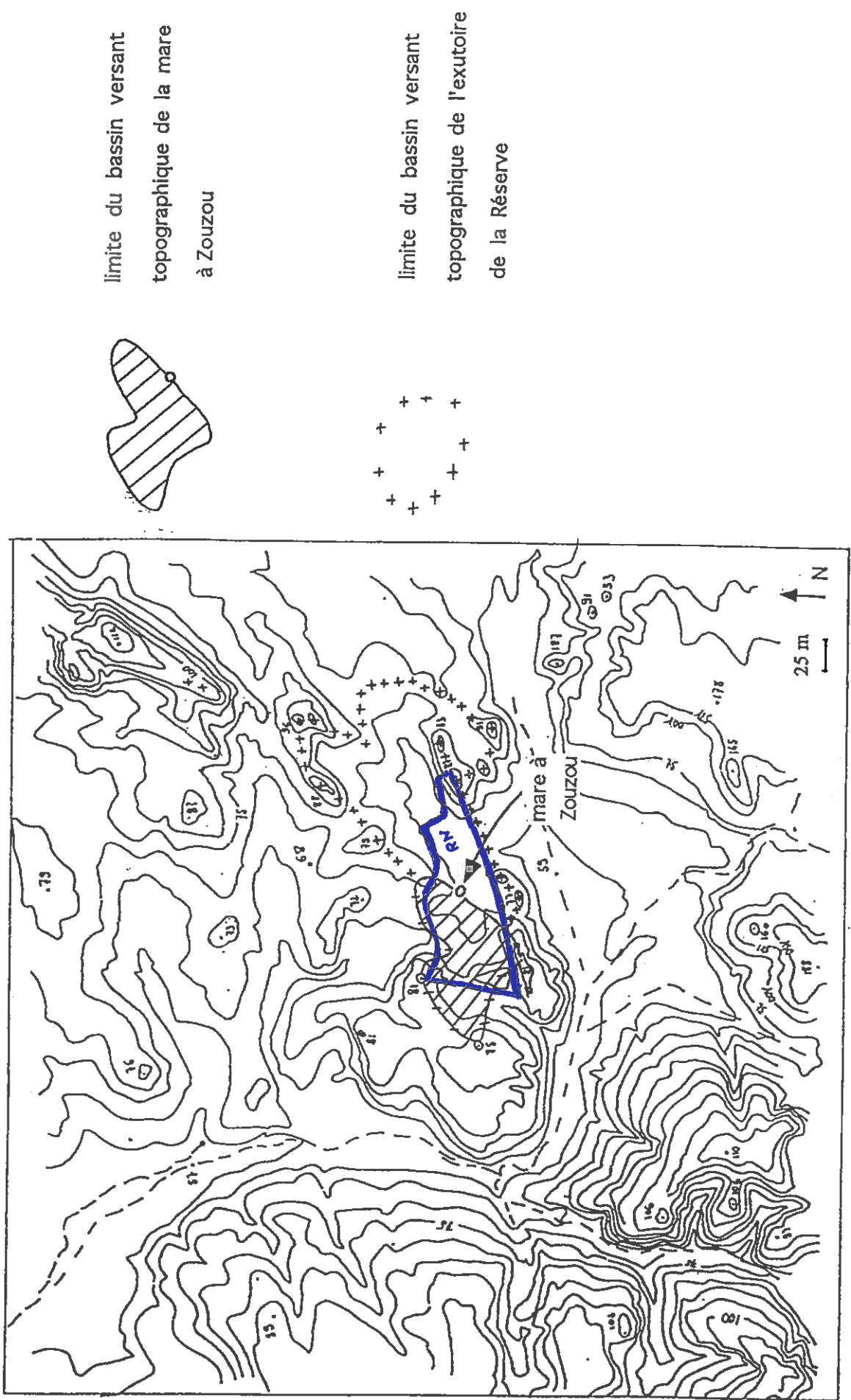


Fig. 50 : Limite du bassin versant topographique de la mare à Zouzou

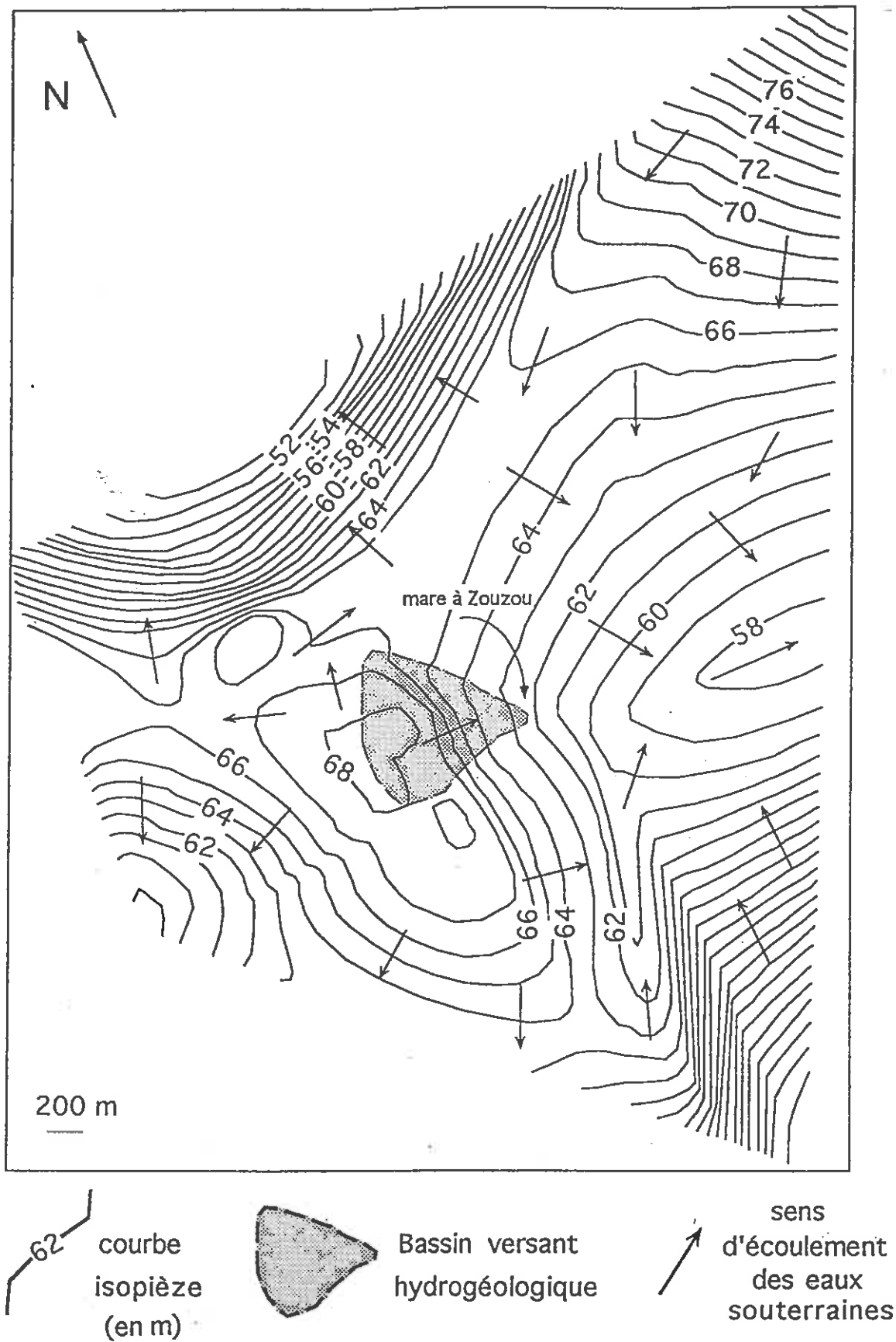


Fig. 51 : Limite du bassin versant hydrogéologique de la mare à Zouzou

- la mare n'est pas le seul exutoire du bassin versant hydrogéologique

e) Interprétation du fonctionnement hydrologique

Les fortes correspondances entre les fluctuations des niveaux piézométriques et les débits ainsi que les localisations des zones inondées indiquent que les niveaux d'eau dans la mare coïncident avec le niveau piézométrique de la nappe des sables-argileux quaternaire. Le niveau d'eau de la mare est donc régi par l'état des réserves de l'aquifère sablo-argileux quaternaire. Celles-ci étant fortement altérées en Été sous l'action de l'ETP, la mare à Zouzou se tarirera progressivement à partir du Printemps. Elle sera donc inondée préférentiellement en Hiver.

Par ailleurs, la mare n'est pas l'unique exutoire de son bassin versant topographique et hydrogéologique. Ceci implique l'alimentation d'un autre aquifère dont l'exutoire se situe à l'extérieur de la Réserve. D'après les cartes piézométriques, il s'agirait de l'exutoire de la nappe de la craie.

6. Hydrochimie

a) La nécessité d'un protocole de mesures

L'étude physique des milieux naturels présente d'énormes difficultés car on mesure des variables (température de l'air, de l'eau; pH; conductivité; débits) plus ou moins indépendantes les unes des autres et conditionnées par des facteurs spatiaux. De plus, chaque variable fluctue suivant des périodes propres : journalière, saisonnière, annuelle, pluriannuelle...

Par ailleurs, pour des raisons de moyens techniques et financiers, le suivi n'a pu s'effectuer que de manière temporaire. Les résultats ne reflétant dès lors qu'une partie de l'information (variations entre 2 mesures), il s'est avéré nécessaire de limiter au maximum les erreurs dues à la méthode d'échantillonnage.

Par conséquent, face à ces phénomènes de variations spatio-temporelles, il a été décidé d'appliquer un protocole de mesure visant à réduire la marge d'erreur inhérente aux conditions du milieu (heure et profondeur de la mesure).

(1) Choix des sites de mesures

Ce choix apparaît comme une évidence mais il traduit parfois une vraie problématique comme nous le verrons ultérieurement. L'emplacement des sites dépend des phénomènes que l'on veut observer. Ici, on désire quantifier les volumes d'eaux entrant et sortant de la mare, les apports latéraux au drain principal, ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques (pH et conductivité).

Quatre seuils hydrauliques ont été posés et six sites de mesures ont été choisis. (Fig.52). M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_5 , M_6 sont les sites de mesures de la qualité physico-chimique des eaux associés aux stations de jaugeages S_2 , S_3 , S_4 , S_5 . M_6 correspond à un site de contrôle aléatoire à l'intérieur de la mare et M_1 à la qualité des eaux évacuées vers l'exutoire. Ce nombre de postes aurait être plus élevé avec d'autres dans la zone aval, amont et intérieure à la mare, sachant que le traitement des résultats est à double tranchant : soit la multiplication des données recueillies permet de mettre en relation chaque paramètre et ainsi de comprendre une grande partie des mécanismes propres au milieu, soit elle augmente les incertitudes sur les relations spatio-temporelles entre les différentes variables et nécessite un traitement statistique très pointu plus ou moins exploitable suivant la précision des mesures réalisées.

Elles représentent l'élément prépondérant car c'est sur elles que repose la validité des résultats. Cet effort de qualité de la mesure n'a pour but que de réduire les erreurs liées à la manipulation ; ainsi les résultats reflètent des variations induites uniquement par les conditions physiques propres au milieu.

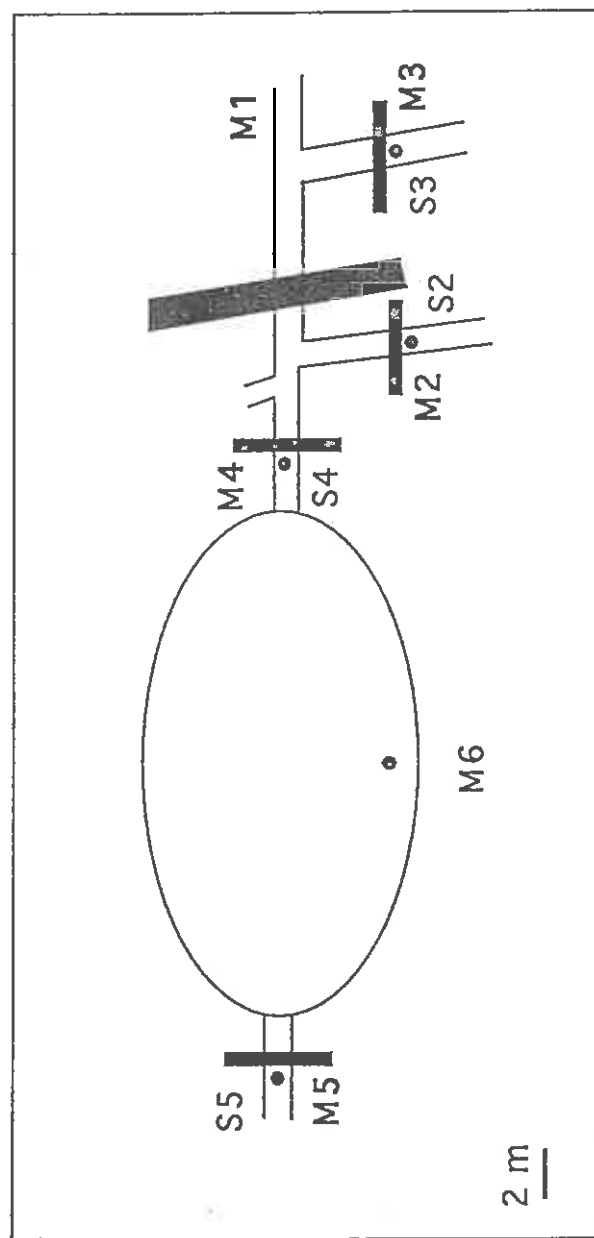


Fig. 52 : Localisation des sites de mesures de la qualité physico-chimique des eaux de la mare à Zouzo

Trois points sont apparus primordiaux :

- la fréquence de la mesure : elle a été amenée à 1 mesure minimum tous les quinze jours du 23-11-96 au 1-12-97. Elle permettra d'avoir un relevé régulier sur 12 mois de l'année;

- l'heure de la mesure : elle est fixée, à une heure près, entre 9 et 10 heures du matin. Pour les relevés physico-chimiques, ce protocole limite les interférences liées aux cycle journalier de certains facteurs régulateurs (par exemple le taux d'oxygène dissous);

- la profondeur de la mesure : cette précaution ne s'applique qu'aux sondes pH-mètres et conductimètres. Les sondes baignent dans les quinze premiers centimètres de la tranche d'eau superficielle, afin de ne pas pénétrer la vase qui tapisse le fond de la mare.

Ces mesures seront effectuées lorsqu'il y aura écoulement au niveau des déversoirs en «V» pour les quatre seuils (sinon à défaut dans la tranche d'eau stagnante), à 70 cm du bord de la mare pour M₆, et en plein écoulement pour M₁

b) Qualité physico-chimique des eaux de la mare à Zouzou

(1) Définition des paramètres physico-chimiques utilisés

Seuls le pH et la conductivité ont fait l'objet d'un suivi temporel. Toutefois, d'autres paramètres ont été mesurés ponctuellement et leur définition est fournie à titre indicatif.

** Le potentiel hydrogène : pH*

Il exprime le caractère alcalin ou acide du milieu. Il s'évalue en fonction de la concentration en ions hydrogène présents en solution. On peut écrire :

$$\text{pH} = \text{colog}_{10} [\text{H}^+] \quad \text{d'ou} \quad \text{pH} = (\log_{10} [\text{H}^+])^{-1}$$

Une variation de ± 1 unité pH indique donc une multiplication des concentrations en ions H⁺ par 10, et s'avère dès lors représentative d'une modification des caractéristiques physiques du milieu.

remarque : le pH varie en fonction inverse de la température.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les erreurs liées à l'échantillonnage des mesures ont été minimisées. Cependant, les risques ne sont pas nuls et peuvent être imputables à un mauvais étalonnage ou à une dérive des appareils électroniques (pH-mètre, conductimètre, chronomètre). Ainsi, avant chaque campagne de mesure, les appareils sont vérifiés.

On obtient donc pour le pH des valeurs dont l'incertitude est de plus ou moins 0,01 unité et pour la conductivité de $1 \mu\text{S cm}^{-1}$ près.

* La conductivité

Elle traduit la quantité d'électricité transportée par des particules chargées (anions et cations). Elle permet d'évaluer rapidement mais approximativement la minéralisation globale de l'eau. Elle est exprimée en microSiemens par centimètre. Elle est reliée à la résistivité par la relation :

$$X = \frac{1000000}{P}$$

X : conductivité en $\mu\text{S cm}^{-1}$

P : résistivité en ohms par centimètre

D'après les travaux de Richard et *al.* (1961), il est possible de relier la conductivité (exprimée en $\mu\text{S cm}^{-1}$ à 20°C) à la minéralisation par un facteur X, variable suivant les intervalles de conductivité choisis. Ainsi pour le site, on trouve $X = 0,769574$. Considérant des variations moyennes de minéralisation de 25 mg l^{-1} comme significatives, on estimera parallèlement les variations de conductivité supérieures à $30 \mu\text{S cm}^{-1}$ comme significatives d'une modification des caractéristiques physiques de l'eau.

remarque : la conductivité varie de façon croissante avec la température. Par ailleurs, elle est influencée par le pH de la solution, la valence des ions et le degré d'ionisation.

** Oxygène dissous et pourcentage de saturation*

L'oxygène dissous reflète le taux d'oxygénation de l'eau. Il résulte des échanges entre les trois domaines : eau, air, sédiment. Il permet de mesurer, d'une part l'impact de la végétation aquatique et de la température sur la qualité de l'eau et d'autre part de détecter d'éventuelles pollutions organiques. Sa solubilité varie en fonction (inverse) de la température, de la salinité et de la pression atmosphérique. Il s'exprime en mg l^{-1} ou pour plus de facilité en % de saturation.

** Matières en suspension*

Elles englobent les particules minérales et organiques qui résultent de l'érosion des sols et les déchets organiques issus de la décomposition des débris végétaux et animaux.

L'appréciation et l'abondance des matières en suspension mesure le degré de turbidité de l'eau. Ces MES interviennent sur la composition de l'eau par leurs effets d'adsorption et d'échanges d'ions, aussi bien que sur les éléments chimiques que sur les micro-organismes.

** Potentiel d'oxydoréduction*

Il témoigne du pouvoir oxydant ou réducteur de la solution. Il est affecté par la quantité d'oxygène dissous et la température qui agit sur l'activité des ions et donc sur les vitesses de réactions. Il s'exprime en mV.

** Demande biochimique en Oxygène à 5 jours (DBO_5).*

Elle exprime la quantité d'oxygène nécessaire pour des micro-organismes à la dégradation ou la destruction des matières organiques de l'eau. Elle correspond à l'oxygène consommée en 5 jours, à une température de 20 °C. Elle permet d'apprécier la charge du milieu considéré en substances putrescibles et son pouvoir auto-épurateur. Elle se mesure en mg l^{-1} .

** Demande chimique en Oxygène (DCO)*

Elle mesure la quantité de matières organiques et chimiques oxydables. Elle s'apprécie en dosant la quantité nécessaire à leur oxydation à partir d'un oxydant : le bichromate de potassium. Elle se mesure en mg l^{-1} .

(2) Analyses chimiques des eaux superficielles de la mare à Zouzou

Un échantillon d'eau, de couleur jaune, prélevé le 13 Mars 1997 au seuil de la station S4, en condition de forts débits, a fourni les résultats suivants :

pH	conductivité	TH	TAC	DBO ₅	DCO	MES
(à 20 °C)	(en $\mu\text{S cm}^{-1}$)	(en °F)	(en °F)	(en mg l^{-1})	(en mg l^{-1})	(en mg l^{-1})
3.73	190	6.6	0.3	< 10	35	5.2

Anions	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻
(en mg l^{-1})						
	3.7	19.2	37.1	0.3	< 0.05	< 0.1

Cations	Ca	Mg	Na	K	NH ₄ ⁺	Mn ²⁺	Fe	Al	SiO ₂
(en mg l^{-1})							total	total	
	24	1.3	9.6	4.2	< 0.005	< 0.1	1.8	0.85	16.7

Tableau XXIV : Résultats des analyses physico-chimiques.

Les eaux de la mare à Zouzou sont acides, peu minéralisées, marquées par des concentrations en fer total et en aluminium total élevées. Les éléments indésirables, tels que NO₃⁻, PO₄³⁻, NH₄⁺, vecteurs favorisant la prolifération des algues et de la végétation aquatique de part leur pouvoir nutritionnel, ne sont présents qu'en très faible quantité. A cela 2 explications ; soit l'eau est dépourvue de ces éléments, soit la majeure partie a été absorbée par les végétaux et les algues pour les besoins de leur croissance.

De même, la pollution organique paraît faible, cependant la DCO légèrement élevée indique un stock de matières organiques potentiellement oxydables non négligeable.

La composition chimique de cette eau est commandée par des éléments prédominants tels que les sulfates, les chlorures et le sodium. La classification des eaux de Piper, basée sur la proportion des anions et des cations principaux (exprimés en milliéquivalents par gramme et par litre), et représentée sous forme triangulaire, fournit une eau du type chlorurée sodique et potassique (ou sulfatée sodique) (Fig.53).

La qualité de cette eau, comparée à celles de la nappe libre de la craie ou en régime captif, dont le type est bicarbonaté calcique, indique une nette différence de minéralisation au sein de ces aquifères. Cependant, ces disparités doivent être nuancées, car on se base sur un seul échantillon provenant d'une eau superficielle recueillie en condition de hautes eaux piézométriques et il n'est pas certain que ces résultats soient constants sur une année.

(3)Hypothèses sur l'origine des sulfates, du fer et de l'aluminium.

* *Les sulfates*

Ils peuvent provenir de la destruction de minéraux à base de soufre tels que la pyrite. Or on sait d'une part que les sables thanétiens sont riches en pyrite et d'autre part que les argiles sparnaciennes démantelées et que l'on suppose avoir été redéposées en partie au fond de la réserve (sondage à la tarière à main), contiennent de la pyrite en grande quantité. (Pfeffer, 1959). La présence de ces sulfates seraient donc due à la destruction de la pyrite issue de sédiments de natures différentes.

- 1 eau chlorurée, sulfatée, calcique, magnésienne
- 2 eau bicarbonatée, calcique, magnésienne
- 3 eau carbonatée, sodique, potassique
- 4 eau sodique, chlorurée, potassique ou sulfatée, sodique

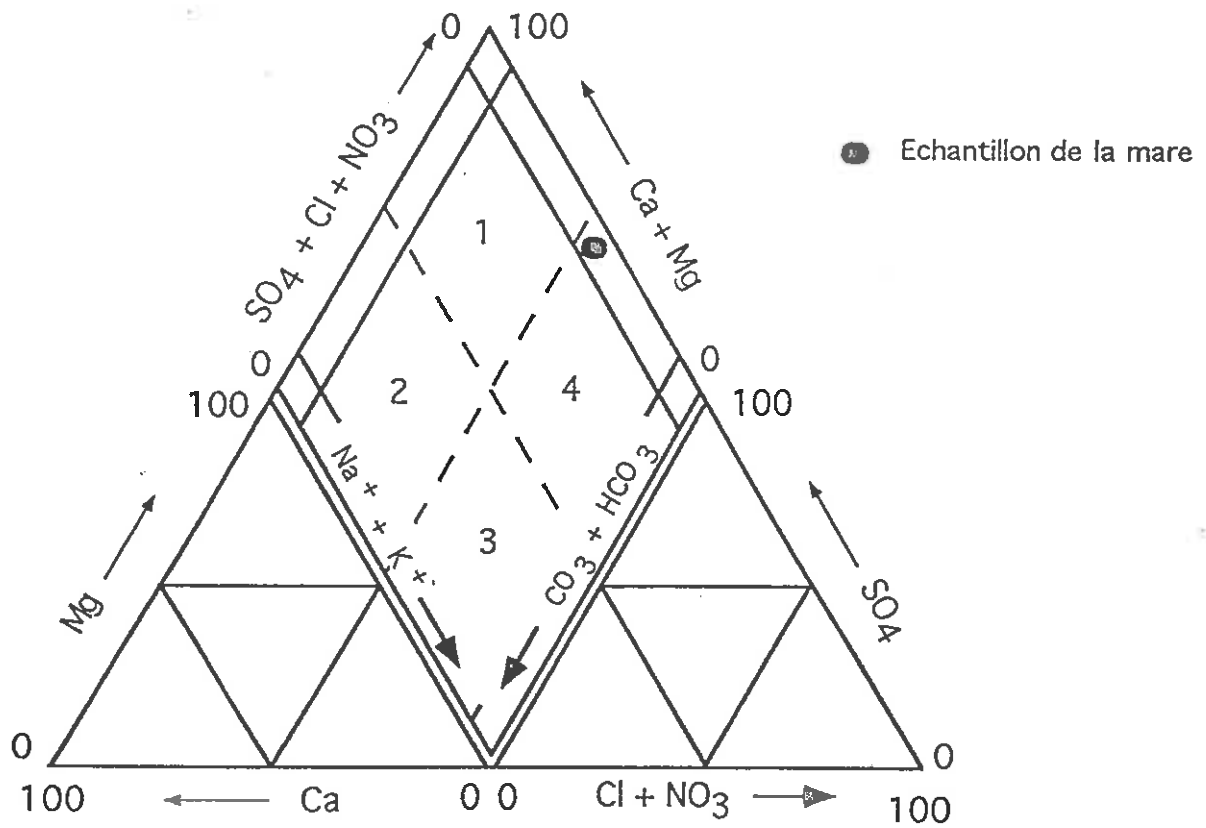


Fig. 53 : Classification des eaux de la mare à Zouzou

* L'Aluminium et le Fer

La présence du fer sous forme libre (forme ionique échangeable (Fe^{3+} ou Fe^{2+}) ou forme ionique hydroxylée ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), provient comme on l'a vu dans le paragraphe précédant d'une destruction des pyrites.

Cependant, d'autres phénomènes liés aux processus pédogénétiques, agissent directement ou indirectement sur le stock de fer libéré, ainsi que sur sa mobilité. Ces considérations sont également valables pour l'aluminium.

Les deux phénomènes pris en considération pour leurs effets sur l'origine et la mobilité du fer et de l'aluminium, sont la podzolisation et l'hydromorphie (Maucorps, 1983).

- La podzolisation apparaît sous l'influence d'un horizon organique à faible turn-over (mor ou moder), produisant des composés organiques solubles et mobiles dont l'action est double :

- le caractère acide et complexant de ces acides organiques provoque une dégradation progressive de la structure initiale des minéraux primaires, en l'occurrence ici la glauconie. Les ions Fe^{3+} et Al^{3+} intégrés dans les feuillet cristallins, sont dès lors libérés puis entraînés sous formes de complexes mobiles (chélates) vers les horizons d'accumulation.

- L'hydromorphie quant à elle, induit par une saturation permanente ou temporaire des sols, des processus de réduction et de ségrégation local du fer. Sous l'influence de nappes acides et dans un contexte d'anaérobiose (milieu réducteur), le fer pour la grande part à l'état ferreux mobile, s'accumule à la base des profils sous forme de carbonates ferreux ou sels complexes de teintes verdâtres. En été, la nappe s'abaisse, une certaine remontée capillaire du fer ferreux intervient et précipite sous forme de taches rouilles.

Remarque : Il est possible également d'observer dans ce contexte, un processus similaire à la podzolisation, dit de pseudopodzolisation. Les litières organiques des sols hydromorphes (hydromor ou hydromoder), donnent naissances à des acides organiques solubles, favorisant la complexation. La conséquence est une dénaturation des argiles préexistantes et une solubilisation d'éléments qui à l'état libre sont immobiles. L'association acides organiques, ions métalliques (fer et aluminium) (ou complexes organo-métalliques) permet dès lors le départ d'ions des horizons superficiels vers la base des profils.

(4) : Suivi du pH et de la conductivité des eaux superficielles de la mare à Zouzou

* *Suivi temporel : Décembre 1996-Juillet 1997*

- *Le pH*

Il a été mesuré chaque quinzaine dans les mêmes conditions. Nous disposons de 6 sites de mesures, mais seulement 4 s'avèrent utilisables vue la continuité des mesures réalisées. La figure 54 montre l'évolution du pH du 4 Décembre 1996 au 23 Août 1997, soit au total 23 mesures. Cet échantillonnage limité, ne peut que servir à discuter des évolutions de grandes longueurs d'onde (à l'échelle de la saison).

On distingue globalement pour tous les sites de mesure une évolution cyclique que l'on peut diviser en 4 phases distinctes d'après des sauts de pH supérieurs à 1 unité pH :

- début Décembre-mi Mars
- Mi Mars-miMai ;
- Mi Mai-début Juin ;
- Début Juin-actuel.

Remarque : on perçoit également des variations du pH sur des périodes de temps plus courtes, qui ne peuvent être appréciées que par un suivi en continu.

*- Début Décembre-mi Mai

Le pH de l'eau de la mare à Zouzou fluctue autour d'une valeur moyenne de 5.

*- Mi Mars-miMai

Le pH oscille entre 5 et 6,3, de manière très rapide.

*- Mi Mai-début Juin

Le pH varie rapidement de 5 et 6,5.

** - Début Juin-actuel

Le pH augmente à nouveau très rapidement de 5,5-6 à 6,8.

On constate malgré des oscillations du pH brèves mais très marquées, une tendance progressive au passage d'un pH acide (4,5-5) à un pH proche de la neutralité (6,8).

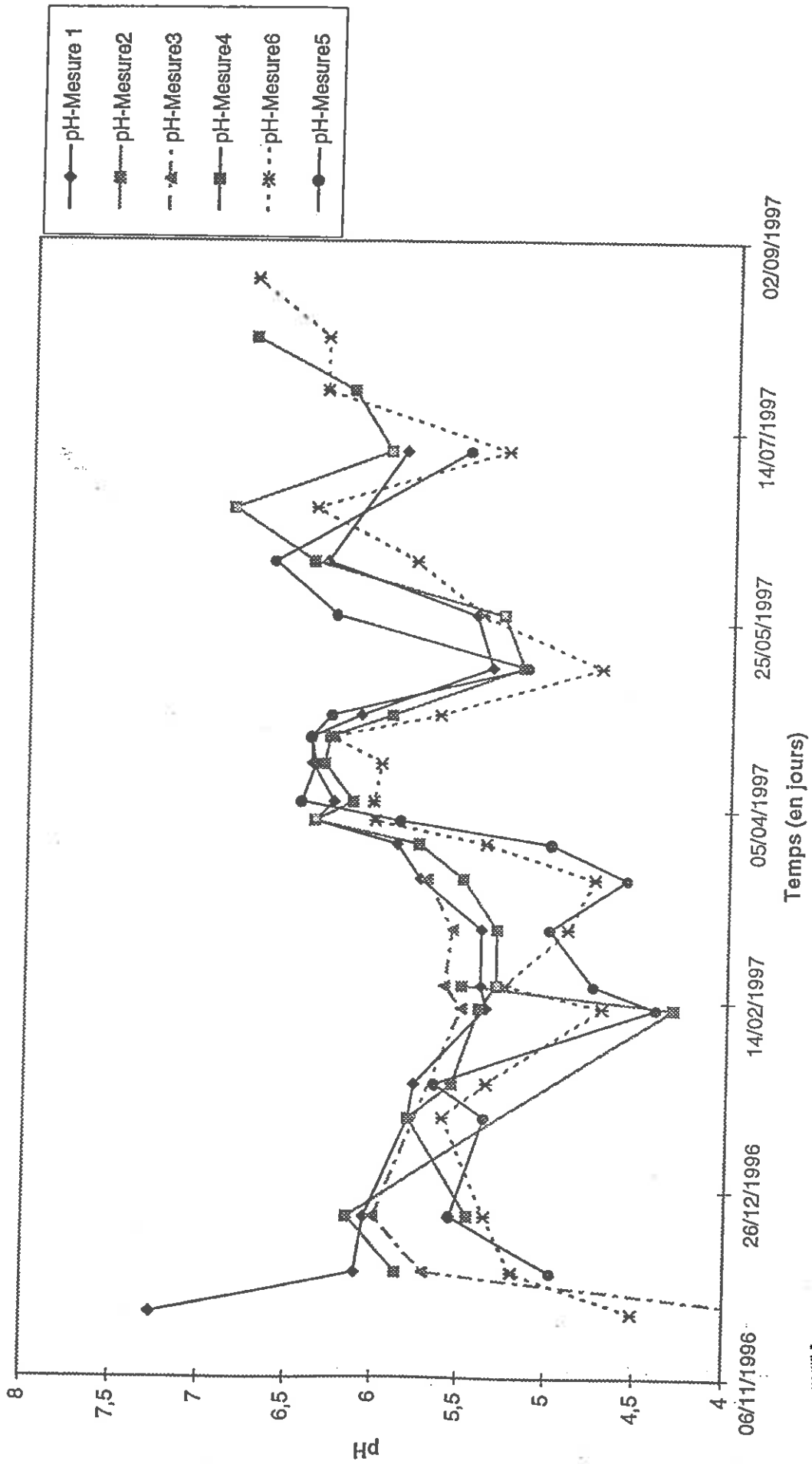


Fig. 54 : Evolution du pH de Decembre 1996 à Juillet 1997, des eaux de la mare à Zouzou

- La conductivité

Elle a été mesurée parallèlement au pH, sur tous les sites de mesures et on bénéficie au maximum de 20 mesures. Chaque mesure est automatiquement corrigée par le conductimètre pour une température de référence de 25°C (Fig. 55).

L'évolution de la conductivité s'avère similaire pour l'ensemble des points de mesures. On peut différencier 3 phases correspondant à des conductivités différentes :

*- Janvier-Début Février : toutes les stations possèdent des valeurs entre 350 et 250 μScm^{-1} .

*- Début Février-début Mai : la conductivité évolue autour de 200 μScm^{-1} .

*- Début Mai-fin Juillet : la conductivité a tendance à diminuer et à varier autour de 125 à 200 μScm^{-1} .

Le recoupement des données pluie, température, conductivité, pH, amènent aux observations suivantes (Annexe 5) :

- la conductivité évolue conformément au pH.

- la conductivité diminue alors que les débits augmentent, ce qui est logiquement compréhensible ; la quantité d'ions supposée constante se trouve transportée dans un volume d'eau plus important. Il y a un phénomène de dilution.

- la conductivité diminue avec l'augmentation progressive des températures annuelles.

Or l'augmentation de la température du milieu, s'accompagne d'une reprise des activités des micro-organismes. Leurs activités de synthèse et de dégradation pourraient alors modifier les équilibres chimiques établis ?

** Variabilité spatiale du pH*

Des mesures effectuées inopinément à différents endroits de la mare révèlent des variations significatives du pH. Par ailleurs, une étude plus fine entre les eaux entrant et sortant de la mare indique une discordance ponctuelles du pH. Face à l'hétérogénéité de ces valeurs, des mesures plus précises ont été réalisées afin de mieux apprécier ces variabilités.

Cette campagne de mesure a été effectuée le 23 Mai 1997 et s'est réalisée en 2 étapes (matin et après-midi). Elle a concernée 4 paramètres (temp de l'eau de l'air, pH et potentiel d'oxydo-réduction), sur 14 sites différents.

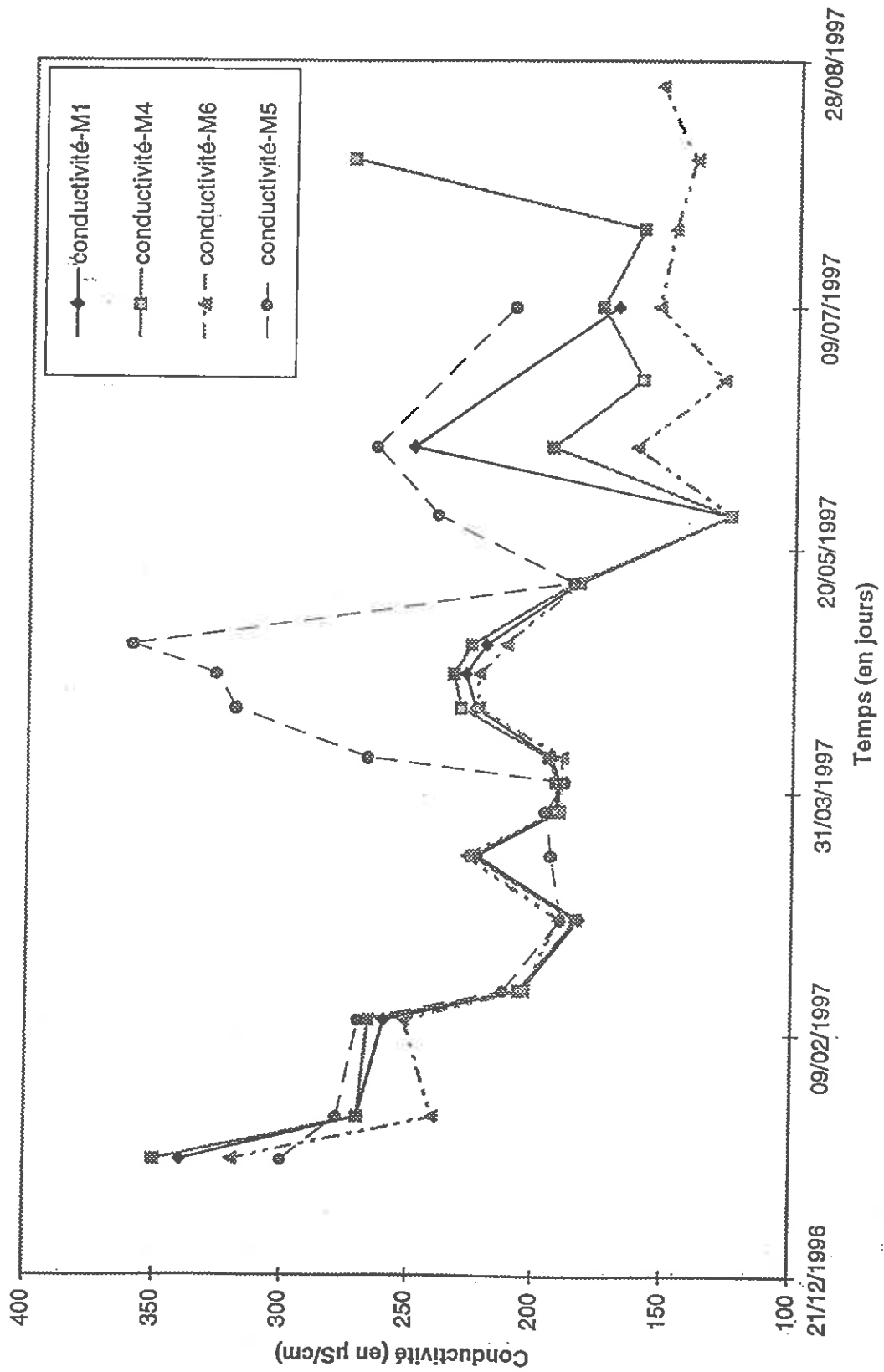


Fig. 55 : Evolution de Conductivité de Decembre 1996 à Juillet 1997, des eaux de la mare à Zouzou

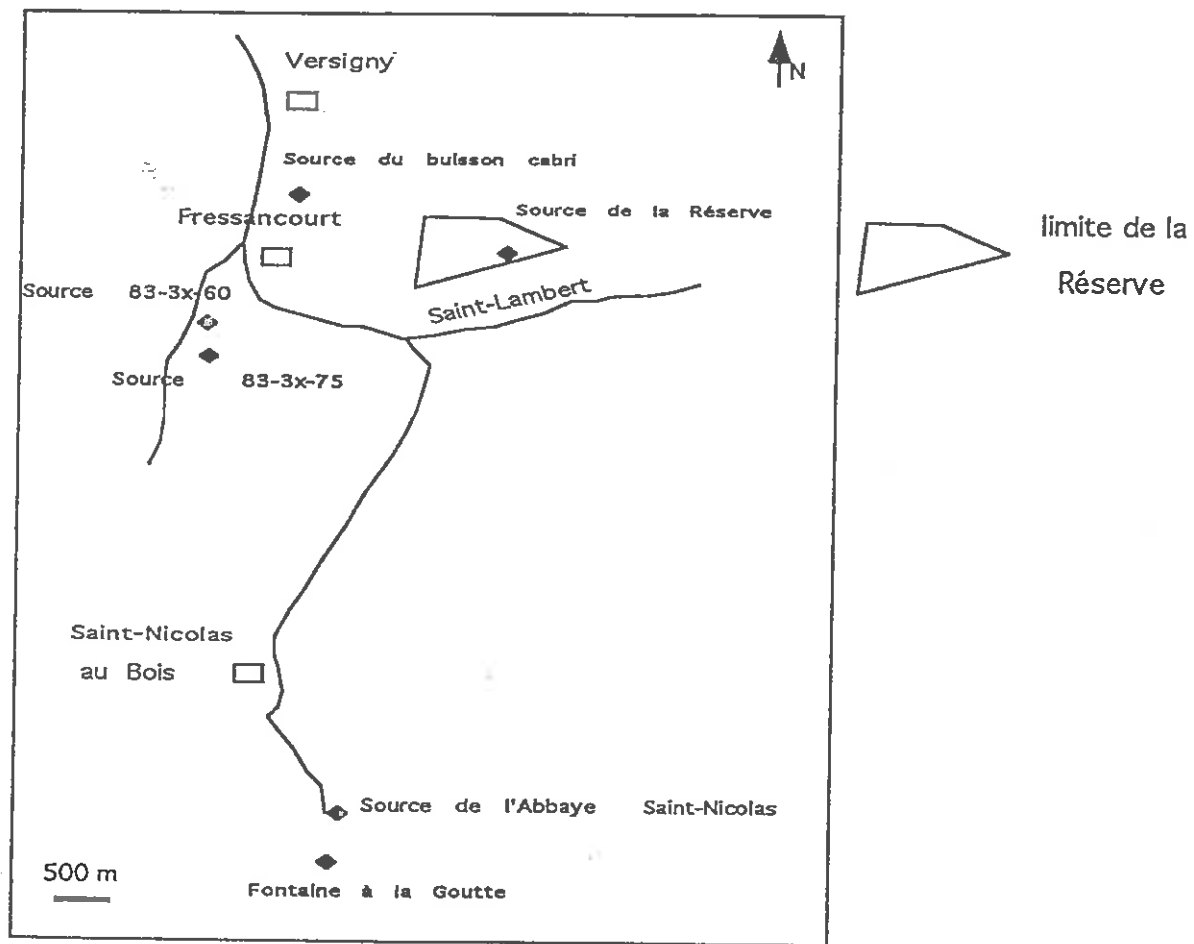


Fig. 56 : Localisation des sources étudiées

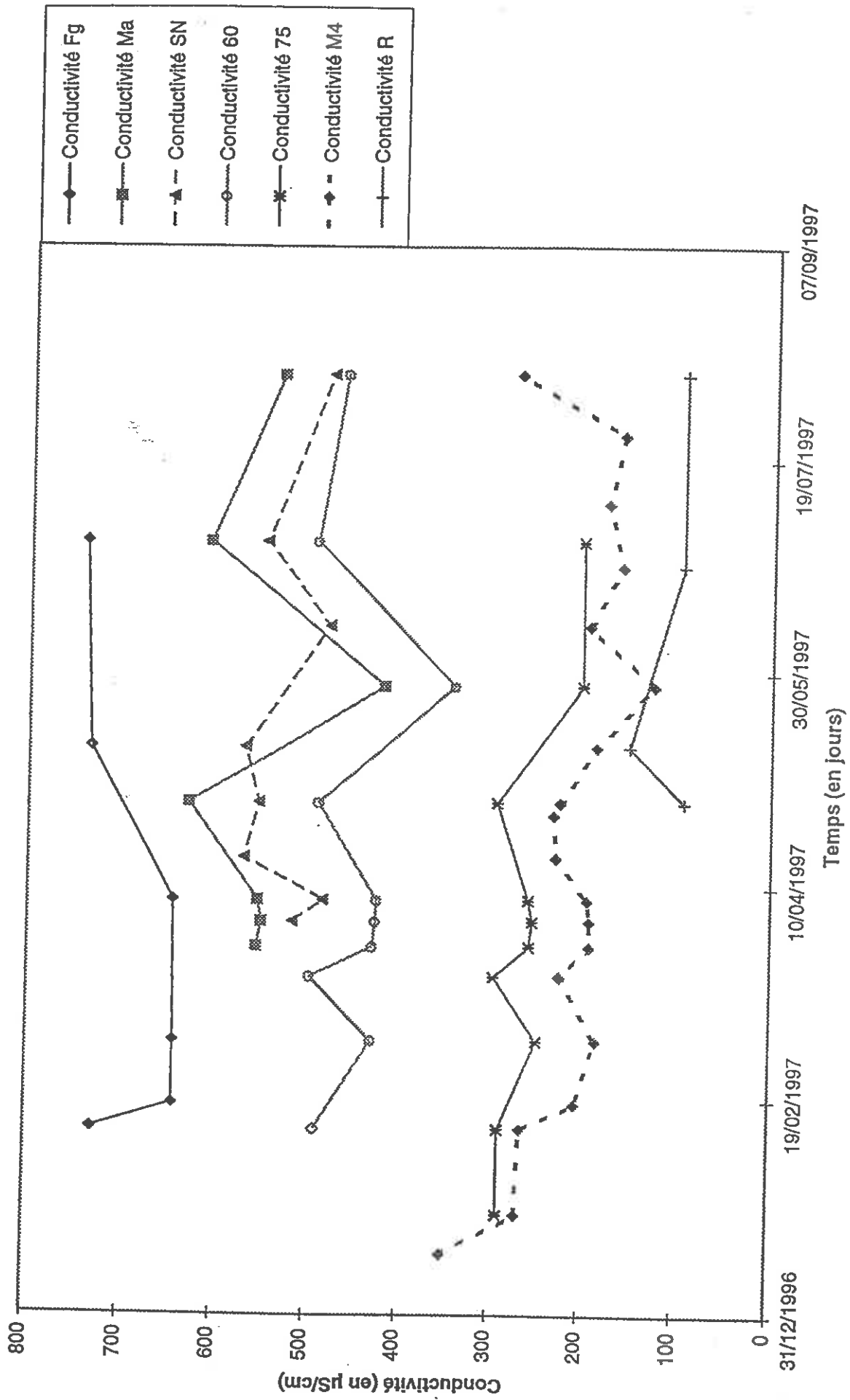


Fig. 57 : Evolution du pH des sources étudiées

Il ressort de cette campagne 2 choses :

- le potentiel d'oxydo-réduction a tendance à diminuer du matin à l'après-midi, ce qui indiquerait une diminution de la capacité d'oxydation de la mare donc un appauvrissement de la teneur en O₂ dissous, ou à un ralentissement des échanges eau-air du fait d'une diminution de la solubilité de l'O₂ dissous en fonction de l'augmentation de température ?

- l'hétérogénéité des valeurs de pH au sein de la mare : on s'aperçoit que les valeurs le matin comme l'après-midi de 4,8 à 6.

	pH-entrée mare		pH-sortie mare
matin	5,7	$4,8 < x < 6$	5,2
après-midi	6,3	$4,8 < x < 6$	5,2

Tableau XXV: Synthèses des mesures réalisées sur 14 sites

Bien plus important que les fluctuations journalières qui demeurent inexplicables à partir de ces simples mesures, ce constat démontre toute notre impuissance quant au choix d'un site de mesure représentatif, et soulève toute la problématique concernant la validité d'une mesure et notamment les normes qu'il faudrait appliquer pour la rendre valide.

Ainsi, notre suivi plurimensuel à l'intérieur de la mare s'avère peu représentatif des phénomènes de courtes longueurs d'onde observés ici. Les données entrée-sortie mare peuvent être considérées comme plus représentatives :

- en hautes eaux : les débits obtenus en amont mare permettent une homogénéisation des volumes d'eau issus du drain et limitent les effets de la variabilité du pH dans le drain. De même, les forts volumes d'eau apportés dans la mare conduisent à une homogénéisation des masses d'eau.

- en basses eaux : les débits en amont mares sont quasiment nuls et c'est lors de ces périodes que l'on note des variations brutales du pH mais surtout de la conductivité. A la sortie de la mare, les débits sont rarement nuls sauf en Juillet, et la comparaison des différentes mesures plurimensuelles ne fait pas ressortir de données aberrantes, mais il n'est pas exclu du fait de la faible vitesse de renouvellement des eaux que s'individualisent en fonction des milieux ambiants des zones aux conditions physico-chimiques différentes. Du fait d'un suivi très lâche, il n'est pas possible de mettre en évidence ces hétérogénéité de masses d'eau, mais il est

importants de les suspecter dans le cadre d'un suivi continu afin de pouvoir les éliminer de l'échantillonnage supposé représentatif.

(5) Physico-chimie de quelques sources : suivi pH et conductivité

Afin d'identifier l'appartenance des eaux de la Réserve à tels ou tels aquifères recensés dans la région, il a été décidé de suivre dans la limite du possible différentes sources supposées caractéristiques de certains aquifères. 6 sources situées aux alentours de la Réserve ont donc fait l'objet de mesures ponctuelles. (Fig. 56).

Cependant, le rattachement de ces sources à un aquifère précis s'est avéré difficile vu les discordances entre les données lithologiques de la carte géologique et les données de terrain. De plus, les sources identifiées en fond de vallée (dans les dépôts de pente, ou dans les alluvions), provoquent des incertitudes quant à leur véritable origine. Le tableau indique les caractéristiques de chaque source.

	sigle	localité	aquifères	âges des formations	caractéristique
Fontaine à la Goutte	Fg	S ^t Nicolas aux Bois	marno-calcaire	Lutétien sup	
Source Abbaye S ^t Nicolas	AS ^N	S ^t Nicolas aux Bois	calcaire grossier	Lutétien sup	artésienne
Source du Buisson Cabri	BC	Versigny	sables	Thanétien ou quaternaire	artésienne
Source de la Réserve	R	Versigny	sables	Thanétien ou Quaternaire	
Source 83-3x-60	3x-60	Fressancourt	sables argileux	Quaternaire	artésienne
Source 83-3x-75	3x-75	Fressancourt	s	Cuisien	

Tableau XXVI : Descriptif de chaque source

La figure 57 individualise 3 types d'eau aux pH respectifs de 7,5-7, 6,5-6, et 5,5-5. L'évolution du pH est propre à chaque source, avec un pH pour les sables thanétiens remaniés quaternaires (BC) de l'ordre de 6,5.

Depuis mi Avril, la source de la Réserve (R), indique une faible variation du pH de l'eau (égal à 5).

La figure 58 montre une évolution générale des conductivités des sources quasiment semblables, sauf pour la Fontaine à la Goutte. Chaque période de baisse de conductivité semble être reliée à des épisodes pluvieux importants, entraînant une dilution des ions présents en solution?

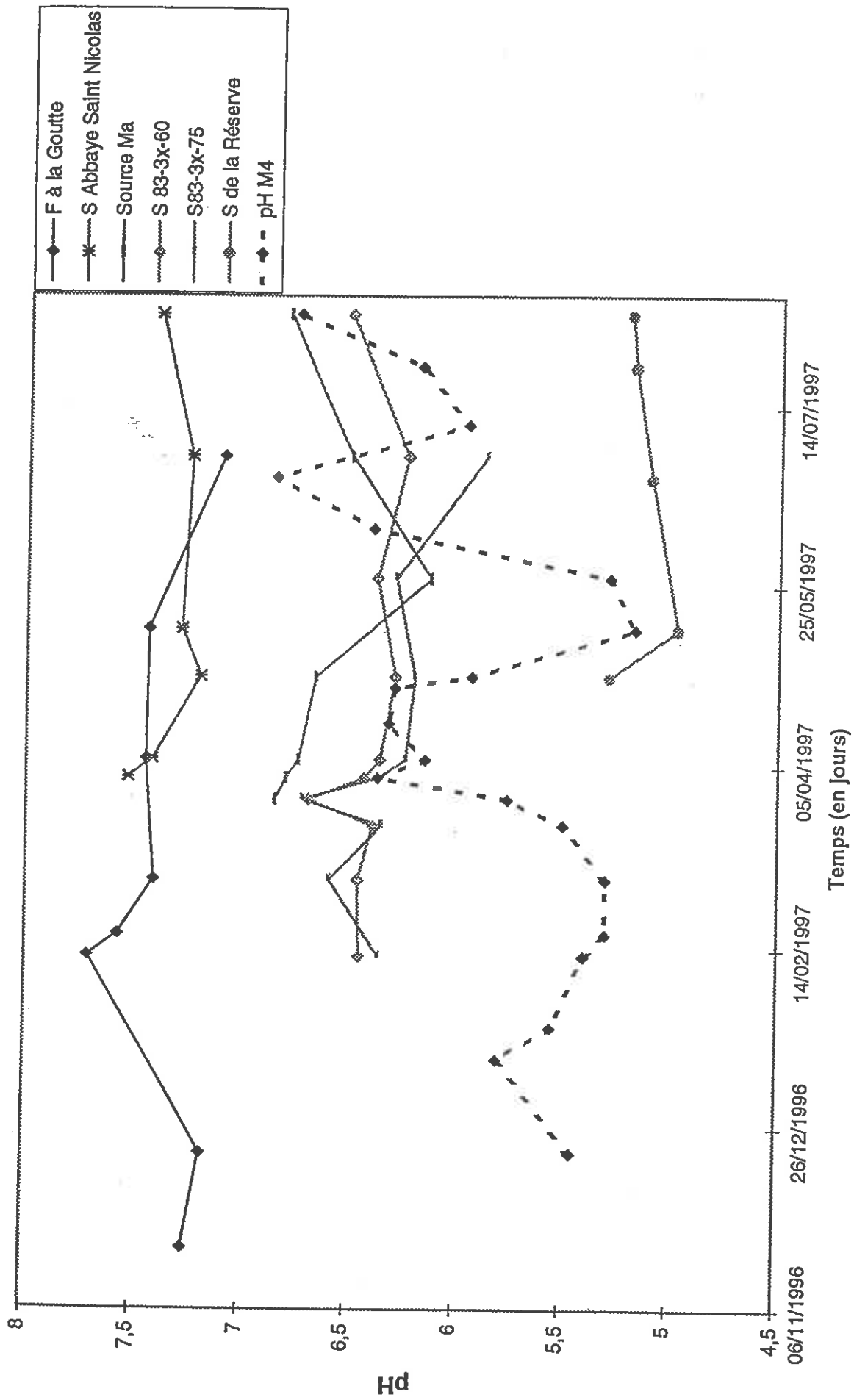


Fig. 58 : Evolution de Conductivité des sources étudiées

Toutefois, malgré cette évolution cyclique, la conductivité de chaque source évolue entre un minima et maxima, qui indiquerait la valeur intrinsèque de la conductivité de l'eau, sans perturbation extérieure (pluie).

(6) Hypothèses sur les mécanismes régulateurs de la physico-chimie des eaux superficielles de la mare à Zouzou

Trois hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces fluctuations :

- en haut niveau piézométrique, les débits sont élevés, les eaux souterraines circulent dans les horizons superficiels des sols (podzol humique à gley sur sol lessivé, sols lessivés hydromorphes...) très acides (3,5 à 4 pour les litières et 4 à 6 pour les horizons d'éluviation et d'illuviation) (Maucorps, 1983), et se chargent en acides organiques solubles et donc en ions H^+ : le pH diminue.

- lorsque le niveau piézométrique baisse, les débits diminuent, l'eau peut circuler au travers de terrains moins sujets à la podzolisation, moins acides, où règnent les conditions physiques proches de celles rencontrées dans les sables thanétiens (La Quèrrière (de), 1972) c'est à dire proche de la neutralité : le pH augmente.

- du Printemps à l'Automne, quelque soit le niveau piézométrique, les organismes vivants présents dans les différents environnements aquatiques, sont responsables de certains changements de la composition chimique des eaux naturelles. Les synthèses et dégradations de la matière organique par les producteurs primaires et les décomposeurs, engendrent des variations de la physico-chimie des eaux. Ces micro-organismes provoquent la disparition de certaines espèces chimiques et la production de nombreuses molécules organiques par l'intermédiaire entre autres de deux phénomènes physiologiques :

- La photosynthèse : elle conduit à la fabrication de matière vivante par réduction du CO_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} et oxydation de l'eau.

- La respiration : elle se traduit par une minéralisation de la matière organique (oxydation de la matière organique).

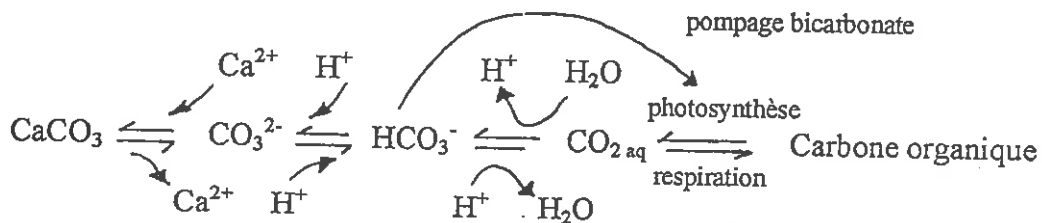
Ces réactions qui engendrent une variation de la composition chimique des eaux, se traduisent par un couplage entre réaction d'oxydo-réduction et acido-basiques. Les réactions rédox (transfert d'électrons) sont lentes et sont le support des activités autotrophes et hétérotrophes.

Les réactions acido-basiques (transfert de protons), rapides et fréquemment couplées aux réactions rédox, sont responsables des variations de concentration en ions H^+ des eaux et par conséquent du pH.

Ainsi, l'assimilation du CO_2 par les algues lors de la photosynthèse, entraîne une diminution spécifique de la quantité d'acide carbonique, et engendre une rééquilibration rapide des caractéristiques acido-basiques du milieu, du fait de lents échanges gazeux avec l'atmosphère : le pH augmente.

Cette augmentation peut s'avérer spectaculaire dans les milieux où les eaux sont faiblement tamponnées (faible teneur en calcium) comme c'est le cas dans les eaux de la mare à Zouzou..

Remarque : réciproquement, lors de la respiration aérobie, on peut observer une diminution du pH en liaison avec la production de CO_2 . Le bilan du CO_2 (et indirectement ses répercussions sur le pH) dépendra dès lors de la concurrence entre photosynthèse et respiration.



On s'aperçoit qu'à l'échelle annuelle, il existe une interférence entre un cycle diurne et saisonnier du CO_2 sous contrôle biologique, qui contribue à modifier les caractéristiques physiques des eaux.

Ce modèle peut être également appliqué à notre site ; ainsi, en Hiver, période où les activités biologiques sont ralenties, les caractéristiques des eaux seraient uniquement fonction des horizons pédologiques et lithologiques qu'elles traversent tandis qu'au Printemps, et en Eté, les activités biologiques devenant prépondérantes, induiraient (tant au niveau des sols qu'au niveau des eaux superficielles) des modifications des caractéristiques des eaux, acquises en Hiver.

On découvre ici toute la complexité de l'interprétation de données physiques (pH, conductivité), contrôlées par des facteurs physiques et biologiques dont les influences respectives varient indépendamment et suivant des périodes propres.

Toutes ces observations mènent à 2 suggestions :

- Nécessité de réaliser des suivis en continu pour appréhender les effets combinés de phénomènes cycliques (physiques et biologiques) de différentes longueurs d'onde.

- Obligation de développer des normes sur les mesures de la qualité des eaux pour s'affranchir des disparités liés aux conditions de mesures.

CONCLUSION-SYNTHESE

La Réserve Naturelle de Versigny, située dans le département de l'Aisne, subit depuis les dix dernières années un assèchement et une dégradation de sa richesse floristique. Afin d'apporter une meilleure connaissance du fonctionnement du milieu, et notamment les interactions entre le facteur eau et la répartition des groupements végétaux, une étude géologique, hydrogéologique, hydrologique et hydrochimique a été menée.

L'analyse structurale de la région de la Fère montre un secteur affecté par un réseau de failles de directions principales N30°, N60°-80°, N110° et N140°-150°. Des arguments morpho-tectoniques tendent à prouver que la morphologie de la Réserve Naturelle s'est façonnée sous contrôle structurale type boutonnière. Cette dépression est creusée en partie dans les sables thanétiens. Elle atteint localement la craie, notamment dans le secteur sud-est de la Réserve.

La combinaison des facteurs tectoniques et climatiques ont conditionnées les phénomènes sédimentaires à l'origine des dépôts quaternaires. Ainsi, la Réserve est constituée par des terrains de lithologies différentes, la craie crétacée, les sables thanétiens et les sables argileux quaternaires. Ces terrains sont tous trois aquifères mais il n'est pas possible de distinguer leur extension géologique.

L'analyse piézométrique a été réalisée communément dans ces divers formations. Il apparaît que ces différentes formations ne contiennent qu'une nappe commune. Les réactions piézométriques varient selon les aquifères et démontrent des modifications des transmissivités latérales.

Le niveau piézométrique de cette nappe recoupe la topographie selon une dynamique hautes eaux-basses eaux. Ainsi, les niveaux d'eau superficiels observés (mare à Zouzou, drains, zones humides...) correspondent à l'affleurement de cette nappe. Le recouplement de ce niveau piézométrique avec la topographie contrôle directement la position des zones humides, notamment par le fonctionnement des sources.

Le réseau de drains, installé pour drainer cette nappe, s'avère peu efficace. Cependant, il occasionne localement, une accélération du drainage de cette nappe en hautes eaux et contribue alors dans la partie sud-ouest, à une diminution des périodes d'exondation de ce secteur. La diminution excessive, si elle se vérifiait au cours du temps, du niveau de cette nappe (excès de

drainage, de végétation (augmentation de l'ETP), ou évènement climatique ...) serait la cause de l'assèchement des zones humides.

La qualité physico-chimique de cette eau à l'air libre a été suivie à la mare à Zouzou. Les fluctuations de son chimisme paraissent être liées à une combinaison entre les facteurs du sol (apports d'acides organiques des sols podzoliques et sols hydromorphes en hautes eaux) et les facteurs biologiques (variation du pH et de la conductivité en période d'activité végétales).

Les connaissances acquises nous permettent de proposer un schéma théorique de fonctionnement du site (Fig.59).

Une compréhension plus fine de ces mécanismes pourrait être obtenue par différentes méthodes :

- campagne géophysique afin de distinguer l'extension de chaque aquifère;
- campagne de traçage afin de déterminer les échanges entre chaque aquifère ;
- suivi scientifique en continu afin d'apprécier précisément la dynamique journalière

et saisonnière Cette dernière proposition a déjà été retenue et verra bientôt le jour.

Ce mémoire met en évidence la très forte interaction entre le facteur eau et la répartition des groupements végétaux. Cette piste de recherche, encore méconnue, pourrait être poursuivie et approfondie sur d'autres sites, afin d'apporter une meilleure connaissance du fonctionnement des milieux, connaissance nécessaire à leur gestion.

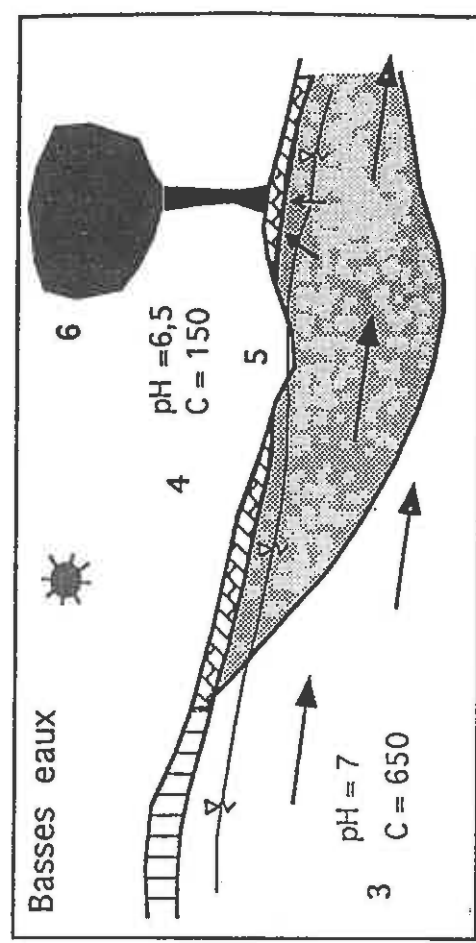
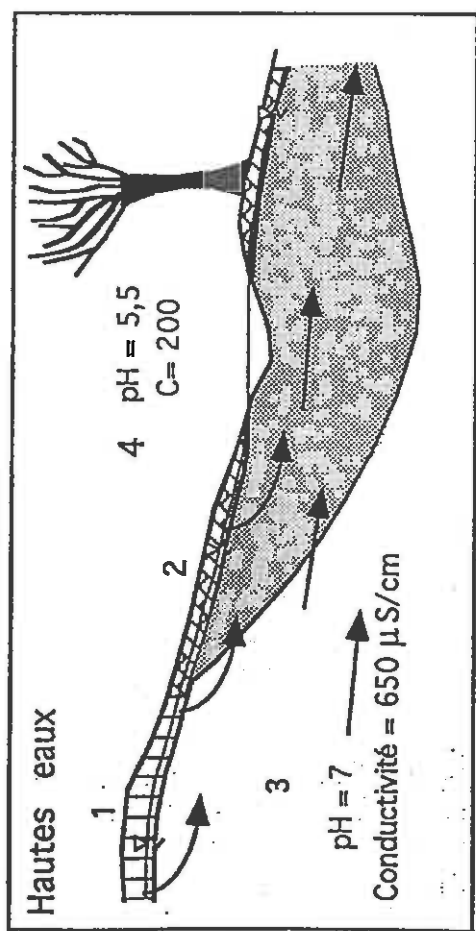
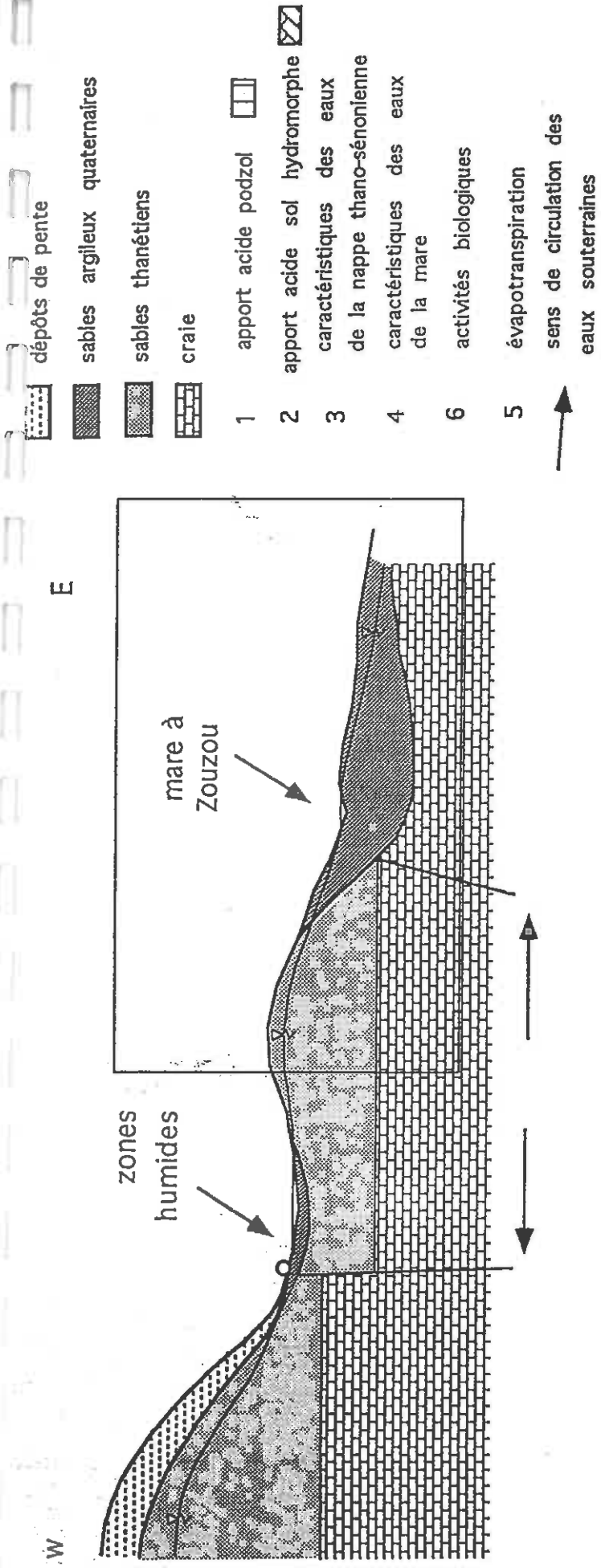


Fig. 59 : schéma théorique des mécanismes régulateurs de la physico-chimie des eaux de la mare à Zouzou

BIBLIOGRAPHIE

- AUFFRET J.P. & COLBEAUX J.P. (1977)** - Etude structurale du Boulonnais et de son prolongement sous-marin en Manche orientale, Bull. Soc. Géol. France, t XIX, n° 5, p 1047-1055.
- BLONDEAU A., CAVELIER C., FEUGUEUR L., POMEROL C. (1965)** - Stratigraphie du Paléogène du Bassin de Paris en relation avec les bassins avoisinants. Bull. Soc. Géol. de France, 7^{ème} série, tome 7. pp 200-221.
- BONNET T & COLBEAUX J.P. (1996)** - Influences tectoniques et néotectoniques sur l'évolution des versants du Haut Pays Artésien (Nord de la France), Réunion ASF-SGF "Quantification de la tectonique et de l'eustatisme", Rennes, 1996.
- BONNET T., COLBEAUX J.P., BRACQ P. (1996)** - Analyses multicritères d'une région du Nord de la France (Bapaume). Importance du contexte morphostructural sur le débit des captages d'eau potable obtenu dans l'aquifère crayeux, Ann. Soc. Géol. Nord, T4 (2^{ème} série), p 91-97.
- BRACQ P. (1994)** - L'effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux, apports de l'analyse morphostructurale. Thèse Univ. Lille I, Soc. Géol. Nord, Pub. n° 21.
- BRACQ P., COLBEAUX J.P., MAQSOUUD A., CRAMPON N. (1992b)** - Vers une nouvelle définition du concept de bassin versant en pays crayeux fracturé à partir de l'étude hydrogéologique du système aquifère des sources de la Lys. 5^{ème} Coll "Hydrogéologie en Pays calcaire", Proceeding, Neufchâtel, Suisse, Ann. Univ. Besançon, 1, p 77-87
- CAOUS J.Y. & CAUDRON M. (1983)** - Notice de l'atlas hydrogéologique de l'Aisne. Synthèse générale des données sur les nappes. Doc. BRGM.
- CAOUS J.Y. & ROUX J.C. (1981)** - Ressources en eau de la Picardie (France), Bull BRGM, sect III, n° 1, p 19-52.
- CARLIER E., COLBEAUX J.P., CRAMPON N. (1983)** - Détermination des écoulements souterrains en milieu calcaire fissuré à l'aide des traits morphologiques. Bull. BRGM Hydrogéologie, Géologie de l'ingénieur, n°4, pp279-286.
- CASTANY G. (1982)** - Principes et méthodes de l'Hydrogéologie, Dunod, 235p.
- CAVELIER C & POMEROL C. (1979)** - Chronologie et interprétation des événements tectoniques cénozoïques dans le Bassin de Paris. Bull. Soc. Géol. de France, vol. 21, n°1, p33-48.

- COLBEAUX J.P., SOMME J., TUFFREAU A. (1988)** - Le gisement paléolithique moyen de Biache-Saint-Vaast, Mém. Soc. Préhist. Fr., Paris, 21, p 61-67.
- COLBEAUX J.P. & SOMME J. (1985)** - Signification des analyses de linéaments dans la Nord de la France, Hommes et Terres du Nord, p 195-200.
- COLBEAUX J.P. (1982)** - Interprétation tectonique du Bassin Houiller du Nord de la France d'après la carte des zones stratigraphiques à la côte -300. Ann. Soc. Géol. Nord, 102, pp 61-63.
- COLBEAUX J.P., SOMME J. (1981)** - Fracturation du substrat crayeux et géomorphologie dans le Nord de la France : exemple de la feuille de Desvres à 1/50 000, Bull. Ass. Fr d'ét. du Quaternaire, 1, p 33-39.
- COLBEAUX J.P., SOMME J., TUFFREAU A. (1981)** - Tectonique quaternaire dans le Nord de la France : l'apport du gisement paléolithique de Biache-Saint-Vaast, Bull. Ass. Fr. Quaternaire, 3-4, p 183-192.
- COLBEAUX J.P., DUPUIS CH., ROBASYNSKI F., AUFFRET J.P., HAESAERTS P., SOMME J. (1980)** - Le détroit du Pas-de-Calais : un élément dans la tectonique de blocs de L'Europe nord-occidentale, Bull. Inf. Géol. Bassin. Paris, 17, p 41-54.
- COLBEAUX J.P., LEPLAT J., PAEPE R., SOMME J. (1978)** - Tectonique récente dans le Nord de la France et le Sud de la Belgique ; exemple de la plaine de la Lys (feuille d'Hazebrouck à 1/50 000), Ann. Soc. Géol. Nord, XCIII, p 179-188.
- COLBEAUX J.P. (1975)** - Géométrie et cinématique de la fracturation en Boulonnais extension vers l'Est. Thèse 3^{ème} cycle, USTL. 141p.
- COLBEAUX J.P. (1974)** - Mis en évidence d'une zone de cisaillement Nord-Artois, C.R. Acad. Sciences, T278, p 1159-1161.
- D'ARCY & ROUX J.C. (1970)** - Toit des dièvres toroniennes du Nord de la Picardie. Bull. BRGM. Série 2, S₁, n°2, p 43-46.
- DAUBREE A. (1879)** - Etudes synthétiques de géologie expérimentale, T1, Dunod, Paris, 478 p.
- DELAY F., BRACQ P., COLBEAUX J.P. (1992)** - Cartographie numérique des linéaments morphostructuraux ; exemple d'application à l'Hydrogéologie de la craie du Nord de la France, Bull. Soc. Géol. France, 163, 3, p 345-352.
- DEVRED D. (1989)** - Etude pluviométrique du bassin de la Sambre. Etude hydrogéologique du sous bassin de la Solre. Thèse Univ. Lille 1, 382p.
- DEWOLF Y & POMEROL C. (1997)** - Surfaces d'érosion polygéniques dans les formations cénozoïques du Bassin Parisien. Bull. Soc. Géol. France, 168, 4, 12p.

- DUPUIS J. (1963)** - Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux et à travers les terrains perméables. Dunod 2ème éd., Paris.
- FEUGUEUR L. (1963)** - L'Yprésien du Bassin de Paris. Mémoire Carte géologique de France.
- GAVIGLIO P., CHAYE D'ALBISSIN M., BERGERAT F., VANDYCKE S. (1993)** - Modification de texture dans la craie au contact de failles normales : un exemple de graben dans le bassin de Mons (Belgique), Bull. Soc. Géol. France, 164, 4, p 565-575.
- GREGOIRE F., MERKACHI M. (1986)** - Un réseau stationnel en milieu tempéré de plaine : Cessières (Aisne), nuances locales et significations régionales. Mélanges offerts au Professeur P Pagney, Université de Dijon.
- LA QUERIERE (DE) P. (1972)** - Esquisse hydrogéologique du Noyonnais et du Soissonais. Relations entre les nappes perchées de l'Eocène, la nappe de la craie, sous les plateaux et dans les vallées de l'Oise et de l'Aisne. Thèse 3^{ème} cycle, Univ Paris VI. 158p.
- LA QUERIERE (DE) .P, ROUX J.C., TIRAT M. (1971)** - Carte du toit de la craie sous recouvrement tertiaire dans le Sud de la Picardie (Aisne, Oise). Bull. BRGM, Section I, n°2. pp47-50.
- LIORZOU A. (1985)** - Initiation pratique à la statistique. Eyrolles et Gauthiers-villas, ed. Paris 1970.
- LOUCHE B., DELAY F., CARLIER E. (1997)** - Comparaison des caractéristiques hydrodynamiques et structurales de l'aquifère crayeux du littoral Nord-Pas-de-Calais, 168, 4, 12 p.
- MAUCORPS .J, SOLAU J.L., HEBERT J. (1983)** - Carte des sols de l'Aisne. Mémoire explicatif. Chambre d'Agriculture de l'Aisne.
- MEGNIER C. & MEGNIER. F. (1980)** - Synthèse géologique du Bassin de Paris : Stratigraphie et Paléogéographie, Mémoire BRGM, n°101, 466p.
- MEYBECK M & POURRIOT R. (1995)** - Limnologie générale, Masson, 956p.
- PFEFER. D. (1959)** - Etude du chimisme de la nappe aquifère des terrains créacés sous recouvert. tertiaire ou alluvionnaire, dans la bordure septentrionale du Bassin Parisien. DES. 122p.
- PRYGIEL J. (1996)** - Utilisation de bioindicateurs pour l'estimation de la qualité des milieux aquatiques marins et continentaux du bassin Artois-Picardie. Thèse 3^{ème} cycle, 3 vol, Univ. Lille 1.
- POMEROL C. (1973)** - Stratigraphie et paléogéographie. Ere cénozoïque (Tertiaire et Quaternaire). Doin, 1^{er} vol. Paris. 269p.

POMEROL B., RENAUD M., RIVELINE J. (1977) - Données nouvelles sur le Thanétien supérieur du Nord du Bassin de Paris. La limite Paléocène- Eocène dans les bassins nordiques et sa corrélation avec les bassins mésogènes. Bull. Soc. Géol. France (7), XIX. pp 155-164.

POMEROL C., RENARD M. (1989) - Eléments de géologie, Armand Colin, 3ème ed., Paris.

RODIER J. (1984) - L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Dunod, Paris, 7, 1365p.

SOMME J (1977) - Les plaines du Nord de la France et leur bordure. Etude géomorphologique, Thèse Doc. Etat, Univ. Paris, 810 p.

TOTAL.S.A.-Direction exploration- Division des Projets Nouveaux. Duprat. M (1996) - Modèle tectono-sédimentaire des dépôts paléogènes dans le Nord-Est du Bassin de Paris : conséquences sur la géométrie du toit de la craie. Posters." Colloque de la Craie". Arras, 1996.

TRICART J (1981) - Précis de géomorphologie, t II : géomorphologie dynamique générale, 345p ; t III : géomorphologie climatique, 313p, SEDES, Paris.

ANNEXE 1

ANNEXE 2

FORMULES DE L'ETP D'APRES THORNTHWAITE ET PENMAN

*** Formule de l'ETP d'après Thornthwaite :**

$$* \text{ETP} = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^\alpha \cdot L$$

T : température moyenne du mois considéré (en °C).

$$\alpha = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0.49239$$

I : indice thermique annuel ; somme des douze indices thermiques mensuels i , sachant que pour un mois considéré, $i = (T/5)^{1.514}$.

L : coefficient de correction, fonction de la latitude et du mois. Pour la zone étudiée, la latitude est voisine de 49 degrés Nord et les coefficients mensuels sont les suivants

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
latitude 49° N	0.75	0.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	0.93	0.76	0.71

Tableau : Coefficients mensuels de correction pour le calcul de l'ETP (d'après Thornthwaite).

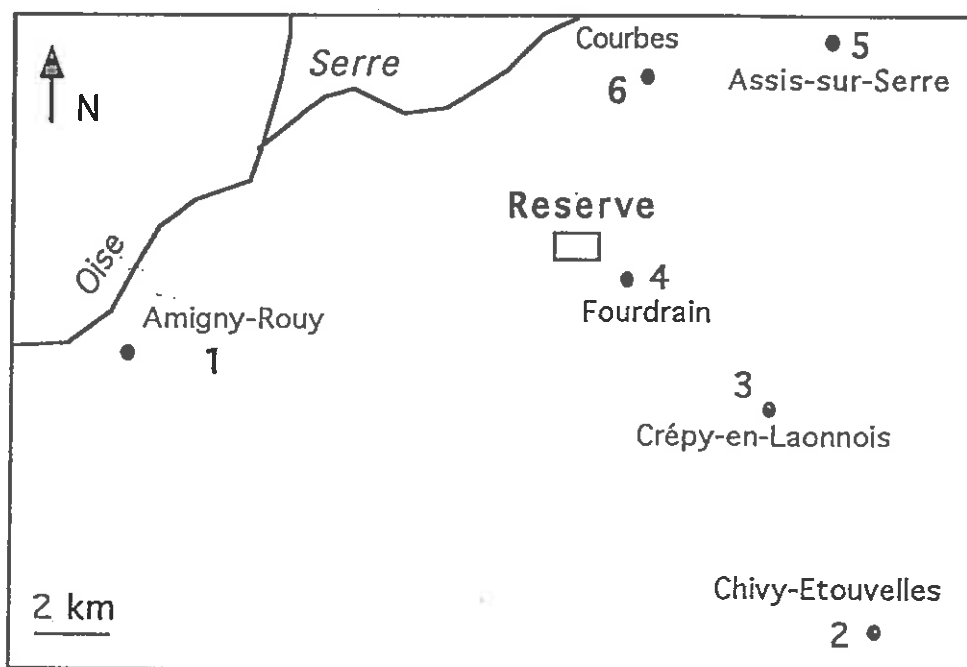
*** Formule de l'ETP selon Penman :**

Cette expression se présente en deux termes :

$$* \text{ETP} = \Phi(Rn) + \Phi(Ea)$$

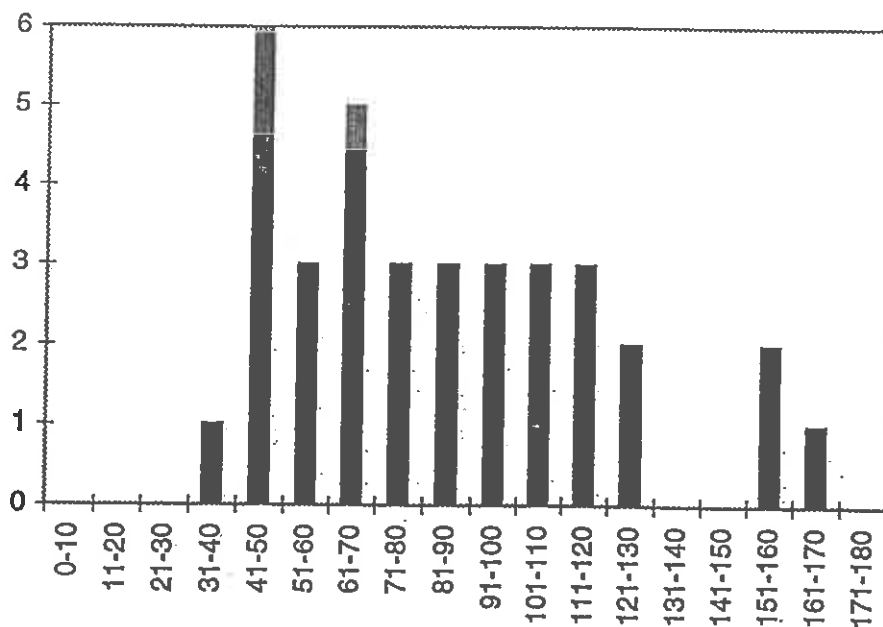
LOCALISATION DES CARRIERES ETUDIEES

HISTOGRAMMES DE FREQUENCE DES MESURES DE FRACTURATION

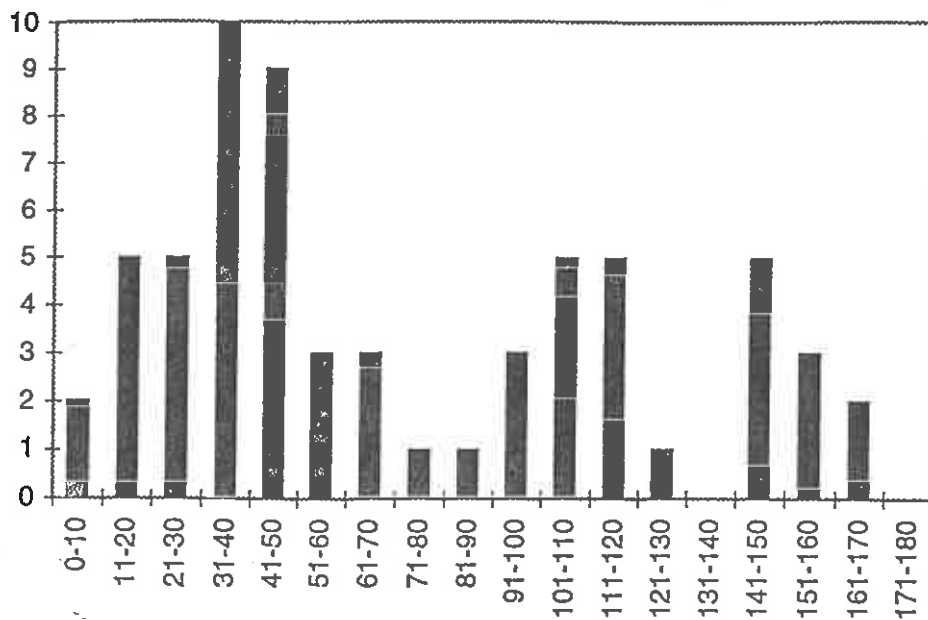


1 n° de la
carrière

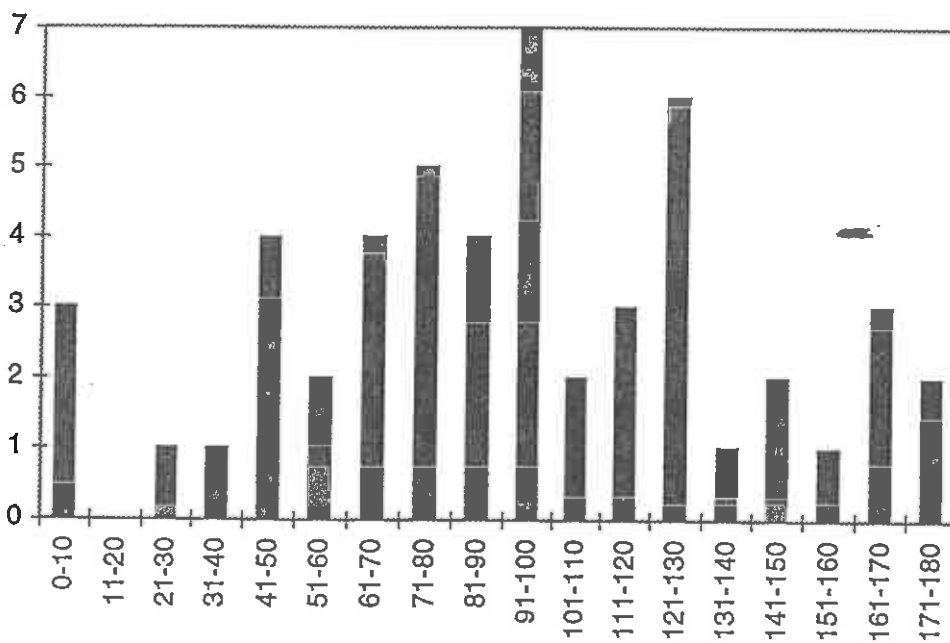
AMIGNY-ROUY (35 mesures)



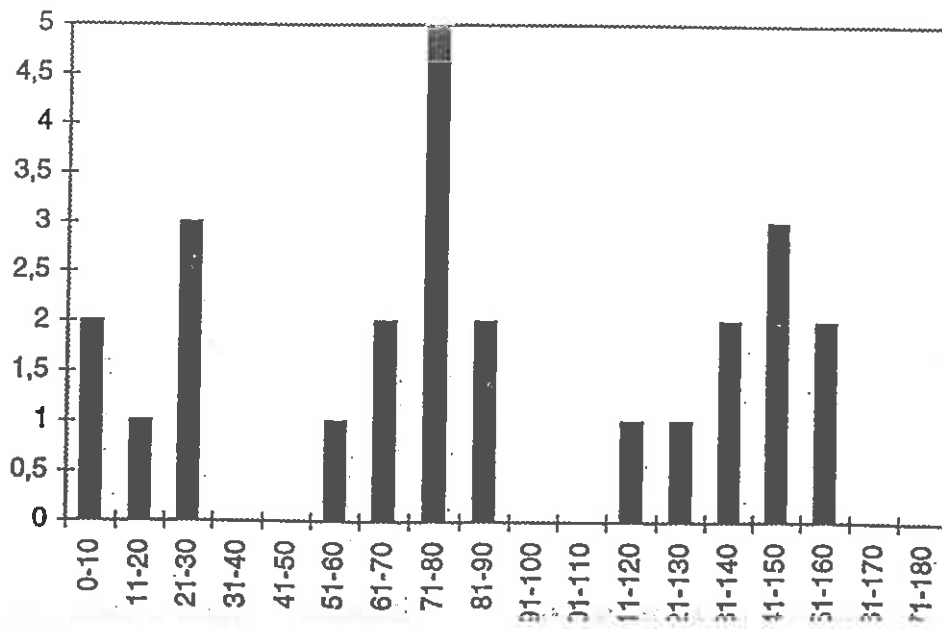
CHIVY-ETOUVELLES (59 mesures)



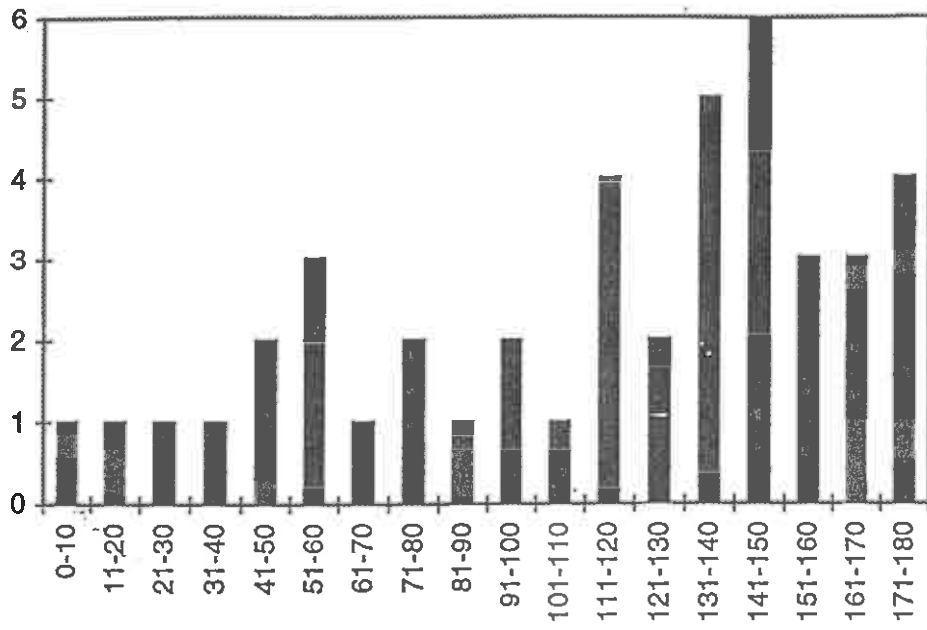
CREPY-EN-LAONNOIS (51 mesures)



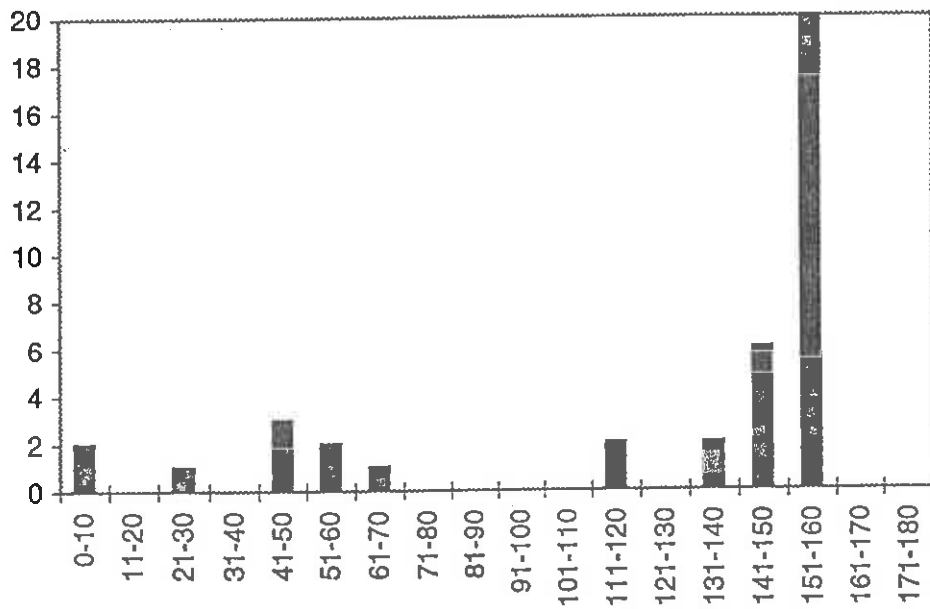
FOURDRAIN (25 mesures)



ASSIS-SUR-SERRE (44 MESURES)



COURBES (39 mesures)



ANNEXE 4

CALCUL DU BILAN HYDROLOGIQUE SELON LA METHODE DE THORNTHWAITE

Le bilan hydrologique d'un bassin peut se traduire par l'équation :

$$* P = ETR + EXC + \Delta RFU$$

P : lame moyenne précipitée sur le bassin versant en mm

ETR : évapotranspiration en mm

EXC : excédent d'eau

ΔRFU : variation de la réserve facilement utilisable, c'est à dire de la lame d'eau stockée dans le sol

L'excédent EXC, correspond à la somme des précipitations ruisselées et infiltrées.

$$* EXC = I + R$$

I : infiltration

R : ruissellement

Le bilan vise à déterminer l'excédent (EXC) puis à le comparer avec l'écoulement réellement obtenu. On utilise pour cela la méthode du bilan de Thornthwaite.

Rappel: le calcul de l'ETR et de l'excédent (EXC) est effectué de la façon suivante :

1^{er} cas : Pluie mensuelle P supérieure à l'évapotranspiration potentielle ETP =>P>ETP

$$ETR = ETP$$

si RFU initiale $< \Delta$ RFU max , EXC = P-ETP-(RFU max-RFU)

si RFU initiale = RFU max , EXC = P-ETP

2° cas : Pluie mensuelle P égale à l'évapotranspiration potentielle ETP $\Rightarrow P=ETP$

ETR = ETP

EXC = 0

3° cas : Pluie mensuelle P inférieure l'évapotranspiration potentielle ETP $\Rightarrow P < ETP$

ETR = ETP si $P + RFU > ETP$

ETR = P + RFU si $P + RFU < ETP$

EXC = 0

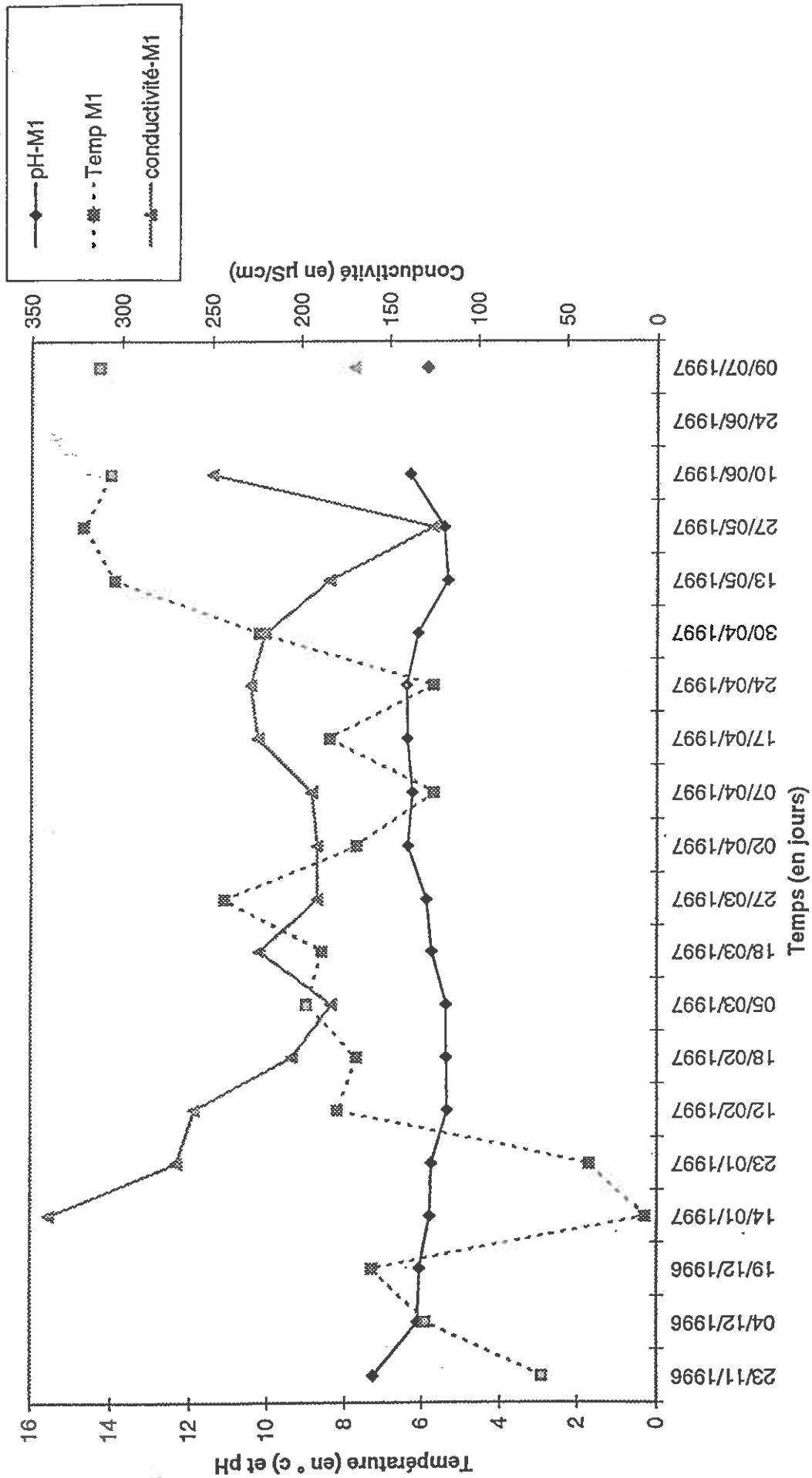
Pour un bilan sur n mois, l'excédent total s'exprime sous la forme :

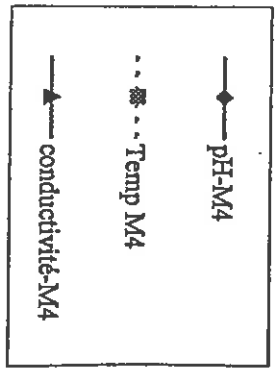
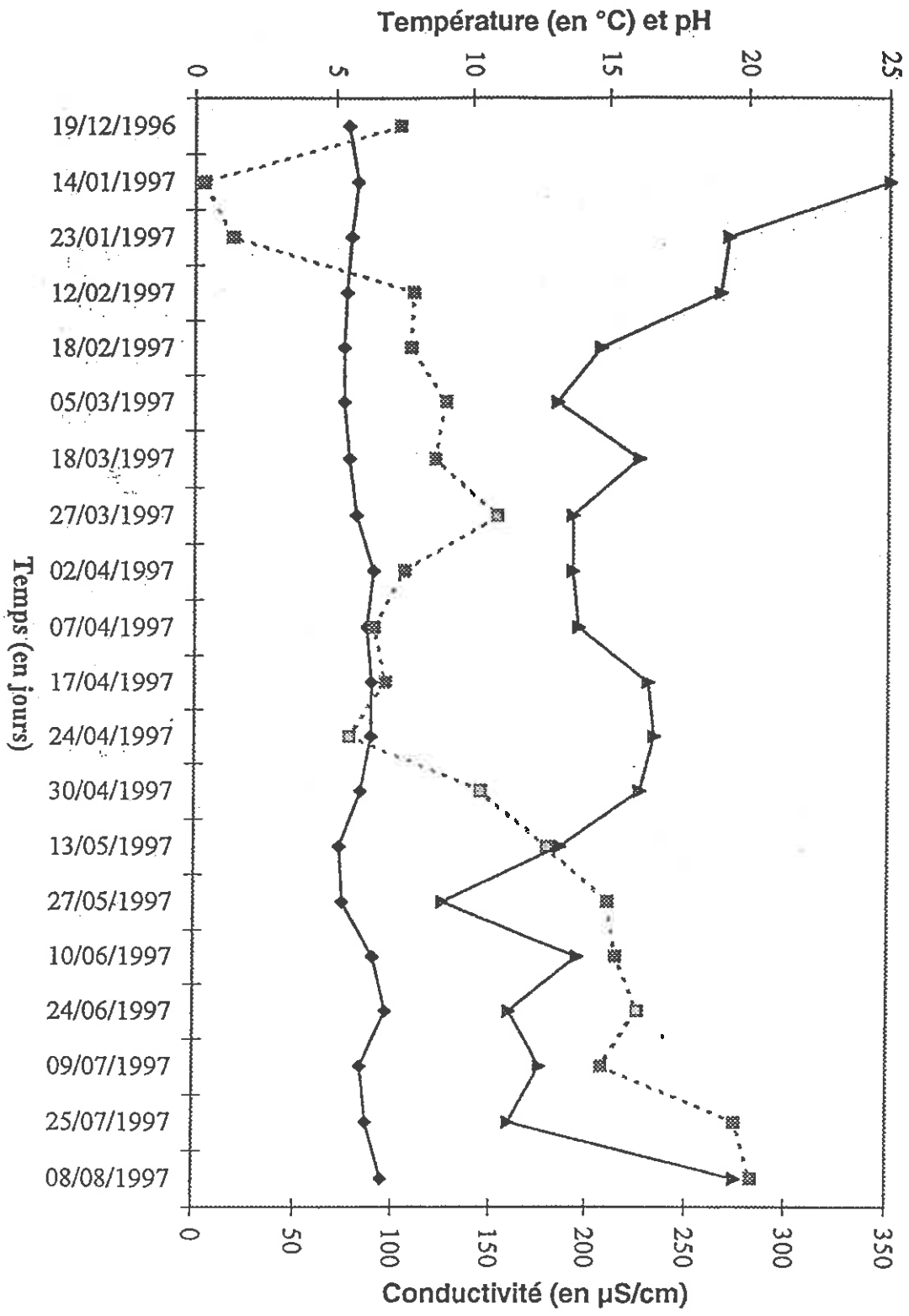
$$EXC \text{ total} = \sum_{i=1}^n EXC_i = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n ETR_i + (RFU_0 - RFU_n)$$

ANNEXE 5

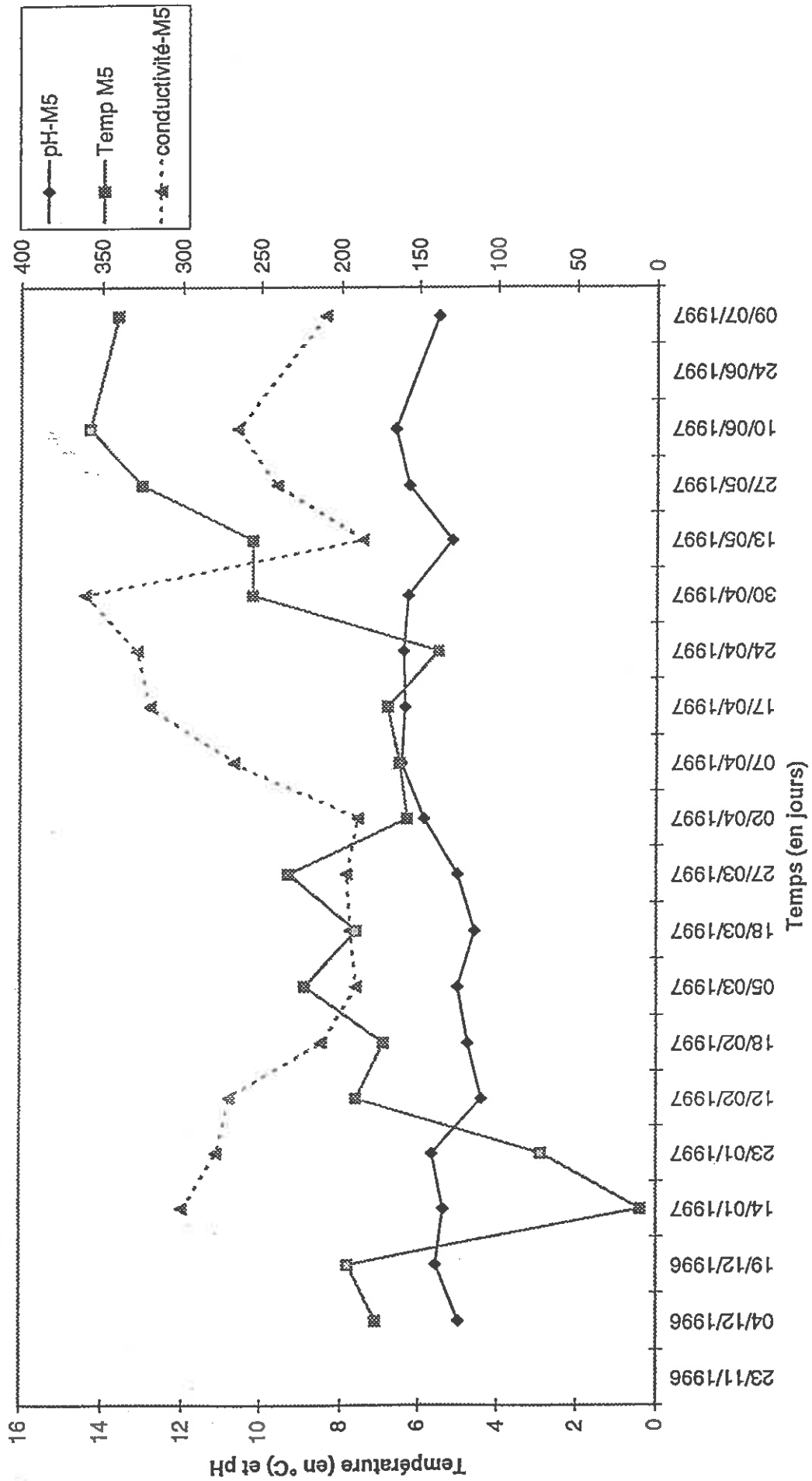
COMBINAISON DES DIFFERENTS FACTEURS PHYSIQUES MESURES A
LA MARE A ZOZOU

Relation pH-conductivité-température

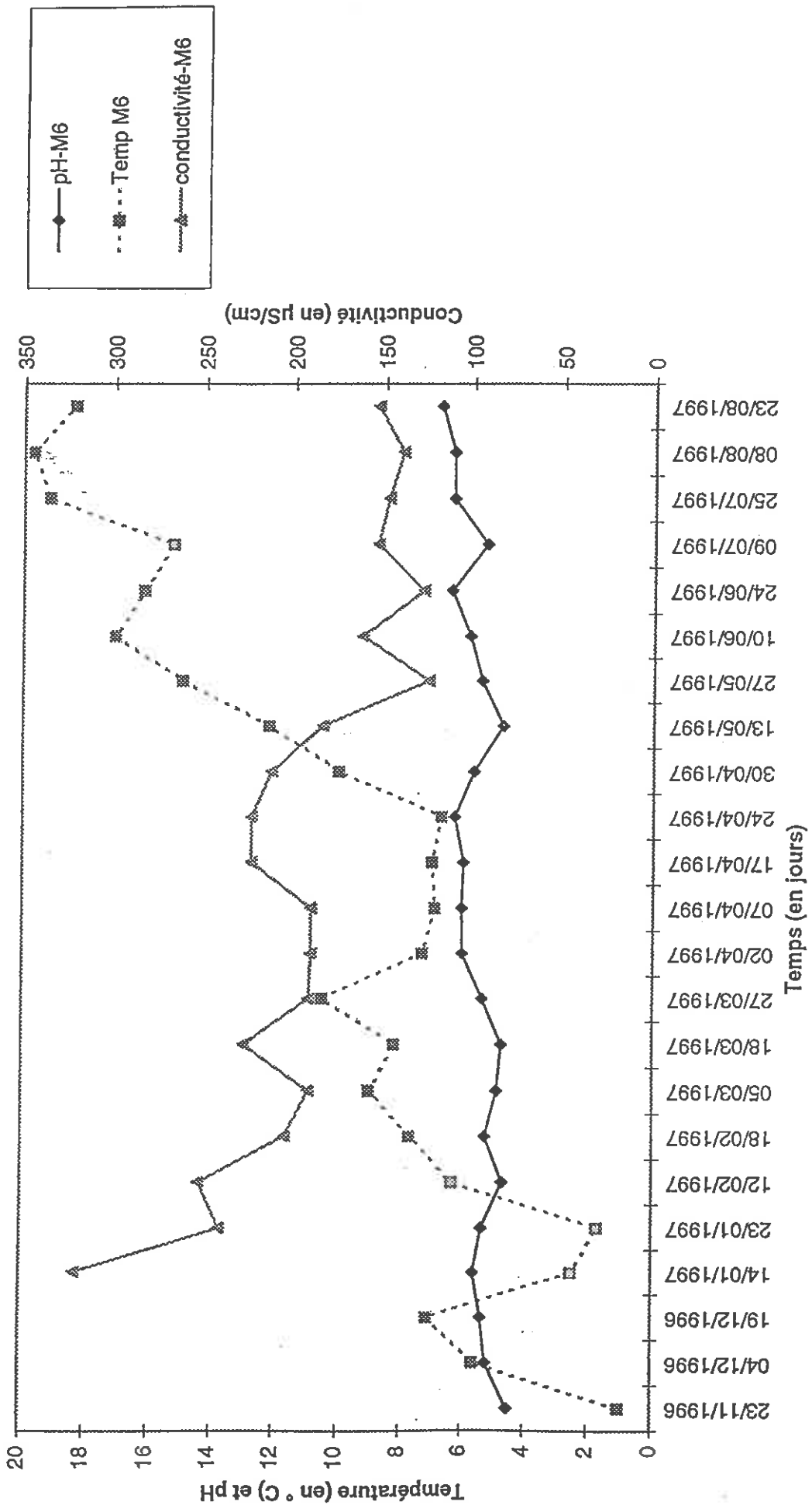




Relation pH-conductivité-température



Relation pH-conductivité-température



pH

Relation débit-conductivité-pH

