

**Direction Régionale de l'ENvironnement
de Basse-Normandie**



LE SYSTEME KARSTIQUE DE L'ORBIQUET

MARC LEBLANC 1998



SOMMAIRE

INTRODUCTION.....5

I^{ère} PARTIE: CONTEXTE ET METHODES D'ETUDE.....7

CHAP. I : CADRE PHYSIQUE

1 CONTEXTE CLIMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE

- 1.1 Situation géographique
- 1.2 Eléments climatiques
- 1.3 Morphologie du Bassin versant
 - 1.3.1 Physiographie
 - 1.3.2 Géomorphologie

2 CONTEXTE GEOLOGIQUE

- 2.1 A l'échelle régionale
- 2.2 A l'échelle du bassin
 - 2.2.1 Histoire et description des terrains
 - 2.2.2 Coupe stratigraphique

3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

- Nappe de la craie
- Nappe des "sables verts"
- Nappe des calcaires de l'Oxfordien
- Nappe alluviale

CHAP.II: CONSIDERATIONS GENERALES SUR LE KARST

- 1 Définition d'un karst
- 2 Définition d'un Aquifère karstique
- 3 Notion de système karstique

CHAP.III: METHODES D'ETUDES

- 1 Circonscription de l'étude
- 2 Dispositif de mesure



01.01-00 / 6875

II^{ème} PARTIE: LA STRUCTURE DU KARST: MORPHOLOGIE.....24

CHAP.IV: L'EXOKARST

- 2.1.1 introduction
- 2.1.2 La surface crayeuse et les formations de recouvrement
- 2.1.3 Les formes de surface
- 2.1.4 Les dolines
- 2.1.5 Les pertes et les exutoires

CHAP.V: L'ENDOKARST: les cavités souterraines de l'Orbiquet

- 2.2.1 Introduction
- 2.2.2 Paléokarst
- 2.2.3 Plongée spéléologique dans l'émergence de l'Orbiquet

III^{ème} PARTIE: FONCTIONNEMENT DU KARST.....44

CHAP.VI: APPROCHE HYDROLOGIQUE

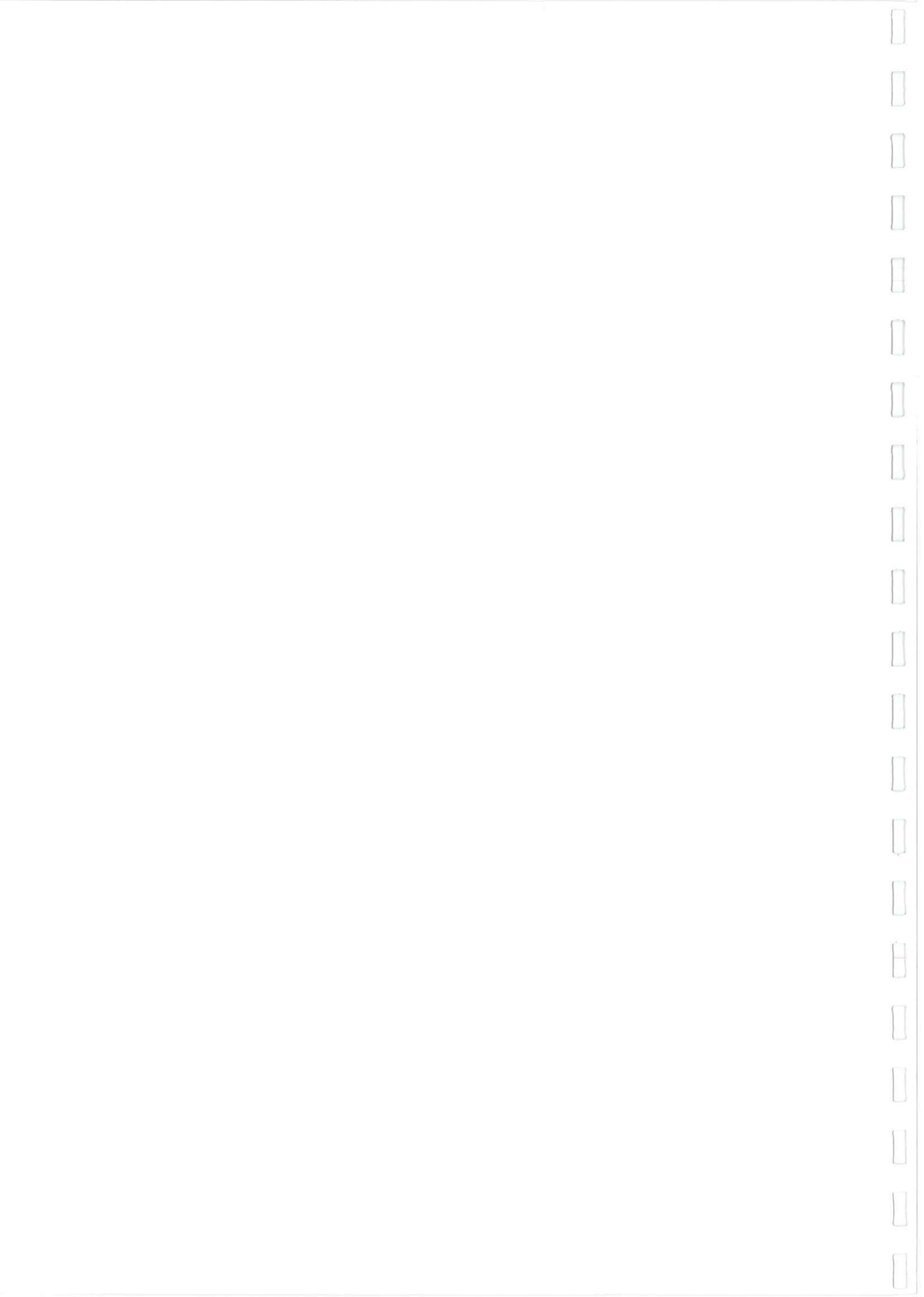
- 4.1 Introduction
- 4.2 courbes de récession
- 4.3 Analyse corrélations et spectrales

CHAP.VII: APPROCHE HYDROGEOCHIMIQUE

<u>IV^{eme} PARTIE: TRACAGE</u>	64
CHAP.VIII: LE TRACAGE DE LA CANNE HAROS	
CHAP.IX: LE TRACAGE DU DOUET ARTHUS	
CHAP.X: LE TRACAGE DE PERCEPIERRE	
CHAP.XI: SYNTHESE DES DIFFERENTS TRACAGES	

<u>V^{eme} PARTIE: VULNERABILITE DU KARST ET PROBLEMES ENVIRONNEMENTAUX</u>	90
CHAP.XIV: DOLINES OU ZONES D'INFILTRATION RAPIDES	
CHAP.XV: RISQUES D'EFFONDREMENTS	

<u>CONCLUSION</u>	98
--------------------------------	----



INTRODUCTION

Cette étude est le fruit d'un travail d'équipe. Elle n'aurait pu être menée à bien sans la contribution dynamique de chacun : **le Conseil Général du Calvados** qui a financé les analyses chimiques, **l'équipe spéléologique d'Hérouville-Saint-Clair**, **l'équipe d'hydrométrie et le laboratoire de la qualité des eaux de la DIREN**.

Elle a été effectuée au sein du Service des eaux et des milieux aquatiques de la Direction Régionale de l'Environnement de Basse Normandie. Elle a débuté durant l'été 1996 avec un premier volet sur la reconnaissance des cavités anthropiques et naturelles et des formes de surface. Elle s'est ensuite prolongée durant mon service national au titre de l'environnement, pour appréhender la structure et le fonctionnement de l'aquifère karstique.

Elle s'est toujours déroulée dans d'excellentes conditions scientifiques et matérielles.

L'Orbiquet est le principal affluent de la Touques. Il draine un plateau crayeux recouvert d'argile à silex qui se situe à la rencontre des départements du Calvados, de l'Orne, et de l'Eure.

Le système hydrologique auquel appartient cette rivière est le siège de phénomènes karstiques. On observe ainsi plusieurs pertes temporaires, telles que celles du Douet Arthus ou du ruisseau du grand fossé, mais aussi des émergences karstiques dont la plus connue est celle de l'Orbiquet à la Folletière Abenon (carte n°6). Le paysage de ce secteur est également parsemé de dolines karstiques qui sont des dépressions topographiques par lesquelles l'eau de ruissellement rejoint directement les conduits de l'aquifère karstique.

Il existe un très grand nombre de cavités anthropiques sur le bassin de l'Orbiquet. En plus des carrières souterraines exploitées pour la pierre de taille, on note la présence d'une multitude de marnières, grandes cavités où la craie était exploitée pour amender les sols argileux des plateaux.

Les risques d'effondrement dus au karst et aux cavités anthropiques, ainsi que la nécessité de mieux connaître l'aquifère karstique de l'Orbiquet, nous ont conduits à entreprendre cette étude.

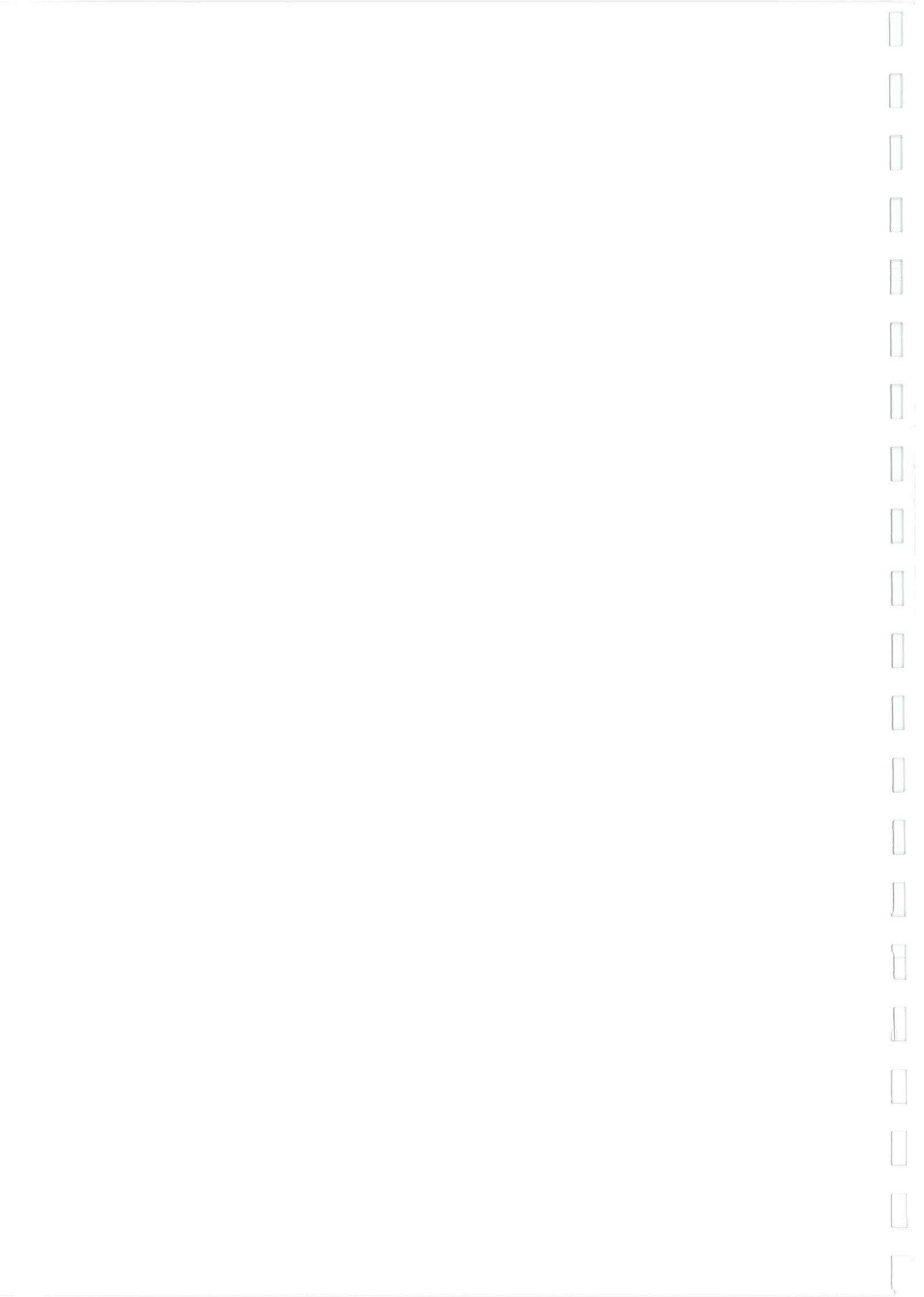
L'analyse des cavités porte sur l'ensemble du bassin versant de l'Orbiquet. Mais l'étude de l'aquifère karstique, se cantonne quant à elle au bassin d'alimentation de la source de l'Orbiquet, qui constitue à cette échelle une unité de drainage karstique.



Les principaux objectifs de cette étude sont:

- une reconnaissance en surface et dans le sous-sol de la structure du karst,
- une meilleure connaissance du fonctionnement de l'aquifère karstique de l'Orbiquet et de ses caractéristiques,
- une approche du degré de karstification,
- une détermination de la vulnérabilité de l'aquifère karstique et des zones sensibles à la pollution,
- une délimitation du bassin d'alimentation de la source de l'Orbiquet,
- une lutte contre les instabilités de terrain, dues aux cavités de la craie.

Après avoir défini le cadre de l'étude, la structure et le fonctionnement du karst de l'Orbiquet feront l'objet de deux chapitres. La troisième partie sera consacrée aux expériences de traçage que nous avons effectuées durant l'hiver et le printemps 98. Enfin, la dernière partie sera consacrée à la vulnérabilité de l'aquifère karstique et aux problèmes environnementaux (risque d'effondrement).



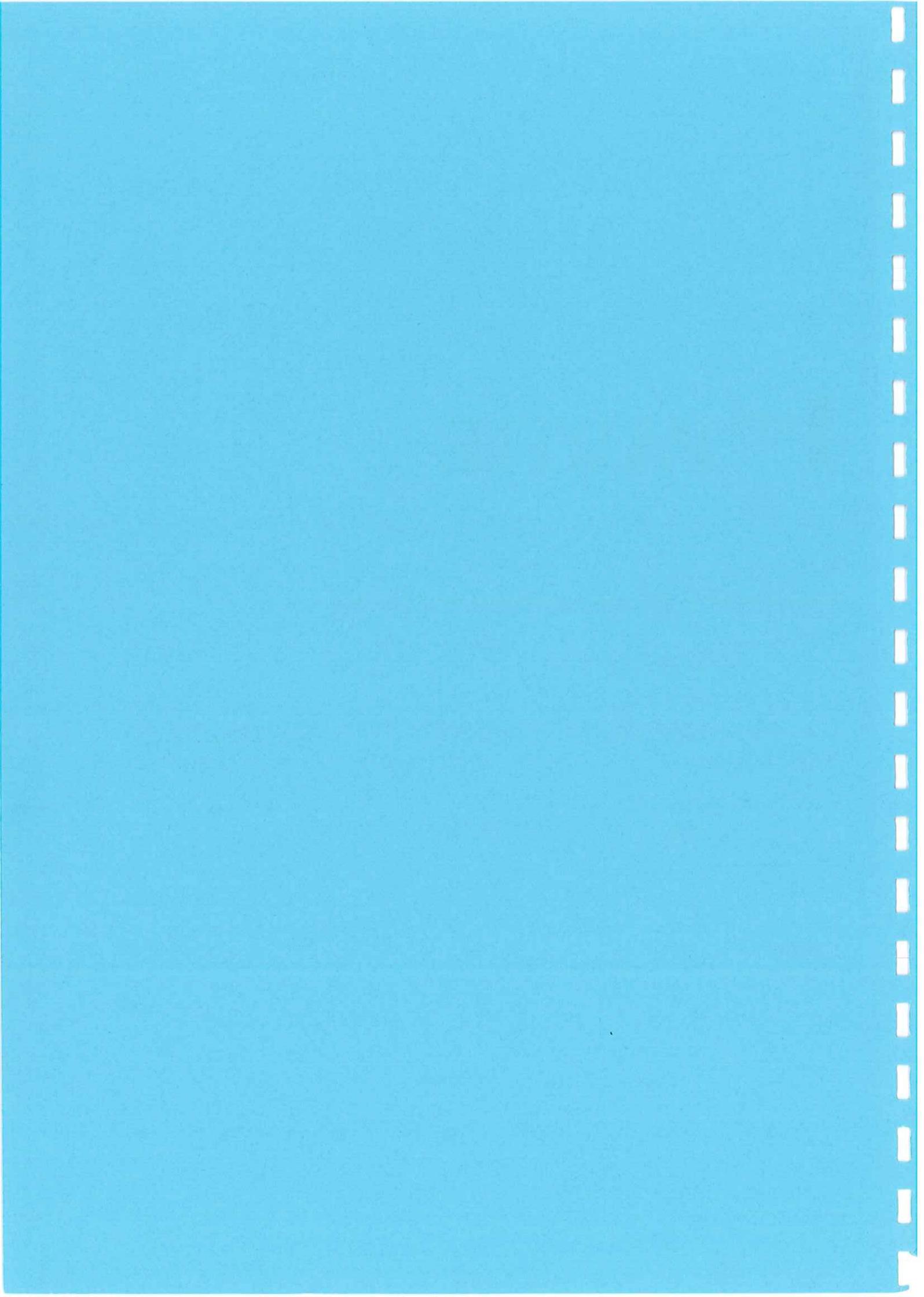
I^{ere} PARTIE

CONTEXTE ET METHODES D'ETUDE:

CHAPITRE I: CADRE PHYSIQUE.

*CHAPITRE II: CONSIDERATIONS GENERALES
SUR LE KARST.*

CHAPITRE III: METHODES D'ETUDE.



I PARTIE:

CONTEXTE ET METHODES D'ETUDE

CHAPITRE I: LE MILIEU PHYSIQUE

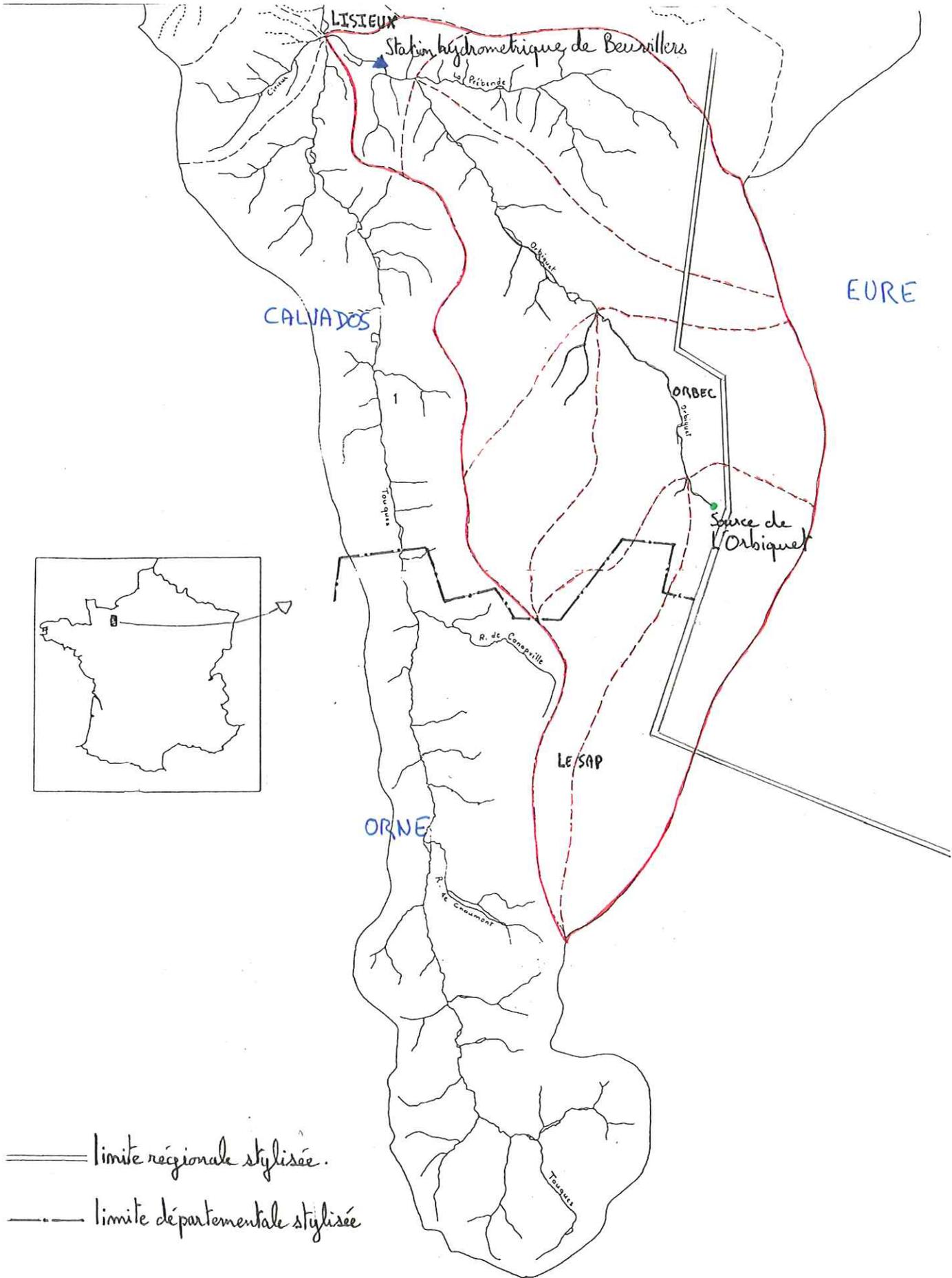
I CONTEXTE MORPHOLOGIQUE ET CLIMATIQUE

1.1 Situation géographique

Le bassin versant de l'Orbiquet se positionne sur deux régions, la Basse-Normandie et la Haute-Normandie, et sur les départements du Calvados, de l'Orne, et de l'Eure (voir carte n°1). C'est un secteur très agricole, avec des cultures céréalières sur les plateaux et de l'élevage dans les vallées.

1.2 Eléments climatiques

Le climat est de type océanique tempéré humide. Les températures minimales extrêmes approchent -10°C , alors que les maximales sont environ de $+30^{\circ}\text{C}$. Les vents dominants proviennent en toutes saisons de l'Ouest. Les seconds en fréquence viennent du Nord-Est au printemps et du Sud-Ouest le reste de l'année. Une moyenne interannuelle (1931-60) des précipitations est proposée par Bédiet à 870 mm/an. Par ailleurs, les pluies efficaces ont été estimées par le BRGM à 200 mm/an.



Carte n°1: positionnement du bassin versant de l'Orbiquet.

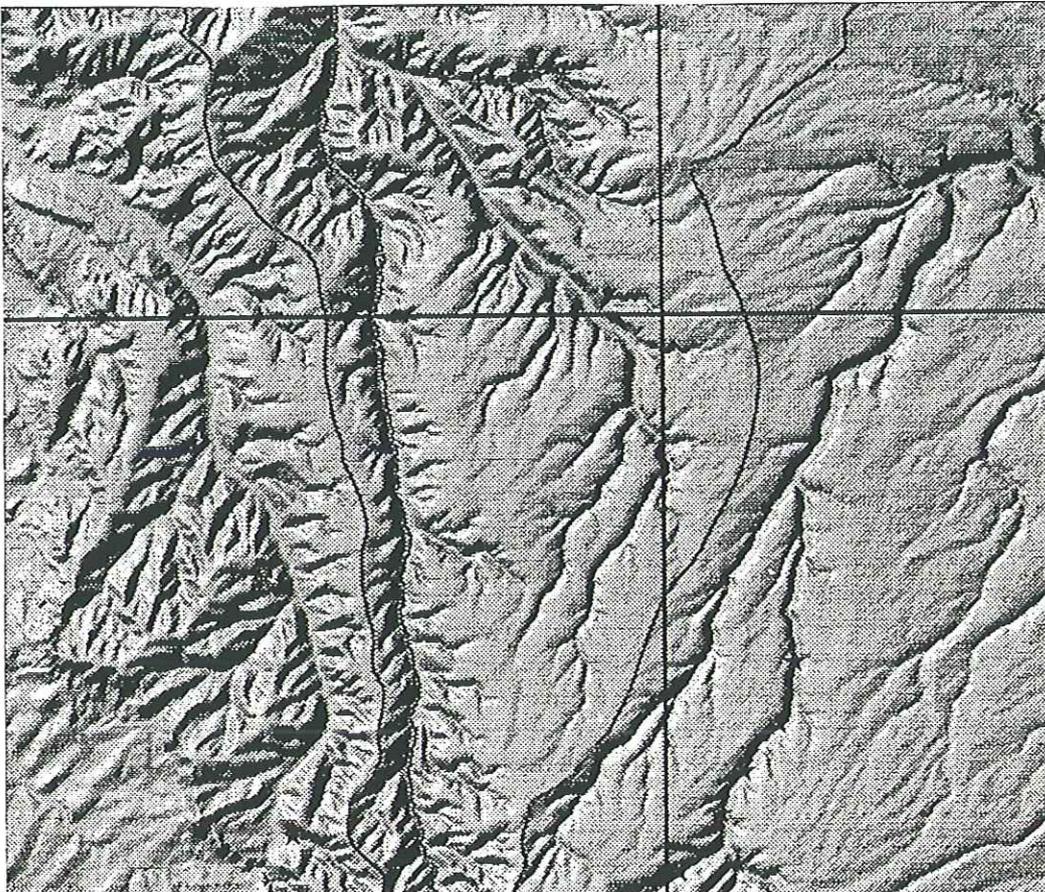
1.3 Morphologie du Bassin versant topographique

1.3.1 Physiographie: (d'après: D.Evrard)

La superficie totale du bassin versant topographique, jusqu'à sa jonction avec la Touques à Lisieux, est de 348 km², pour un périmètre 92km. D'après D.EVRARD, l'indice de compacité ou coefficient de Gravelius du bassin est égal à 1,38. Rappelons que ce coefficient indique une compacité moyenne. Il est de 1,12 pour un carré et de 1,5 pour une croix constituée de cinq carrés. La comparaison à un rectangle équivalent qui est basée sur l'identification du bassin versant à un rectangle de longueur L et de largeur l ayant même surface et même périmètre que le bassin donne pour le bassin de l'Orbiquet L=36,5km et l=9,5km. Pris dans sa totalité, ce bassin est donc quatre fois plus long que large. Le bassin versant topographique en amont de la source de l'Orbiquet a une surface de 69 km². Il s'étend également en longueur.

1.3.2 Géomorphologie

Les plateaux, surfaces planes et étendues, bordent le bassin versant et en constituent la position haute. Les vallées sèches forment dans le paysage un intermédiaire entre les plateaux et les vallées humides. Plus profondes et plus larges que les vallées sèches, les vallées humides portent un cours d'eau aérien et dominant la partie Nord-Ouest du bassin. Ces traits majeurs du paysage sont accompagnés de formes de surfaces diverses révélant le caractère karstique du bassin de l'Orbiquet (voir II^{ème} partie).



carte n°2: modèle numérique de terrain du bassin de l'Orbiquet.

2.2 A l'échelle du bassin

2.2.1 Histoire et description des terrains (résumé de la notice de la carte géologique de Bernay d'après Kuntz)

a Histoire des dépôts et de leurs déformations

L'absence de forage profond ne nous permet pas de décrire l'histoire géologique de ce secteur avant le Jurassique supérieur. A compter de cette époque l'histoire géologique est marquée par les grandes phases suivantes:

1 – Les Sables de Glos se déposent à l'Oxfordien supérieur, ils correspondent à une formation estuarienne.

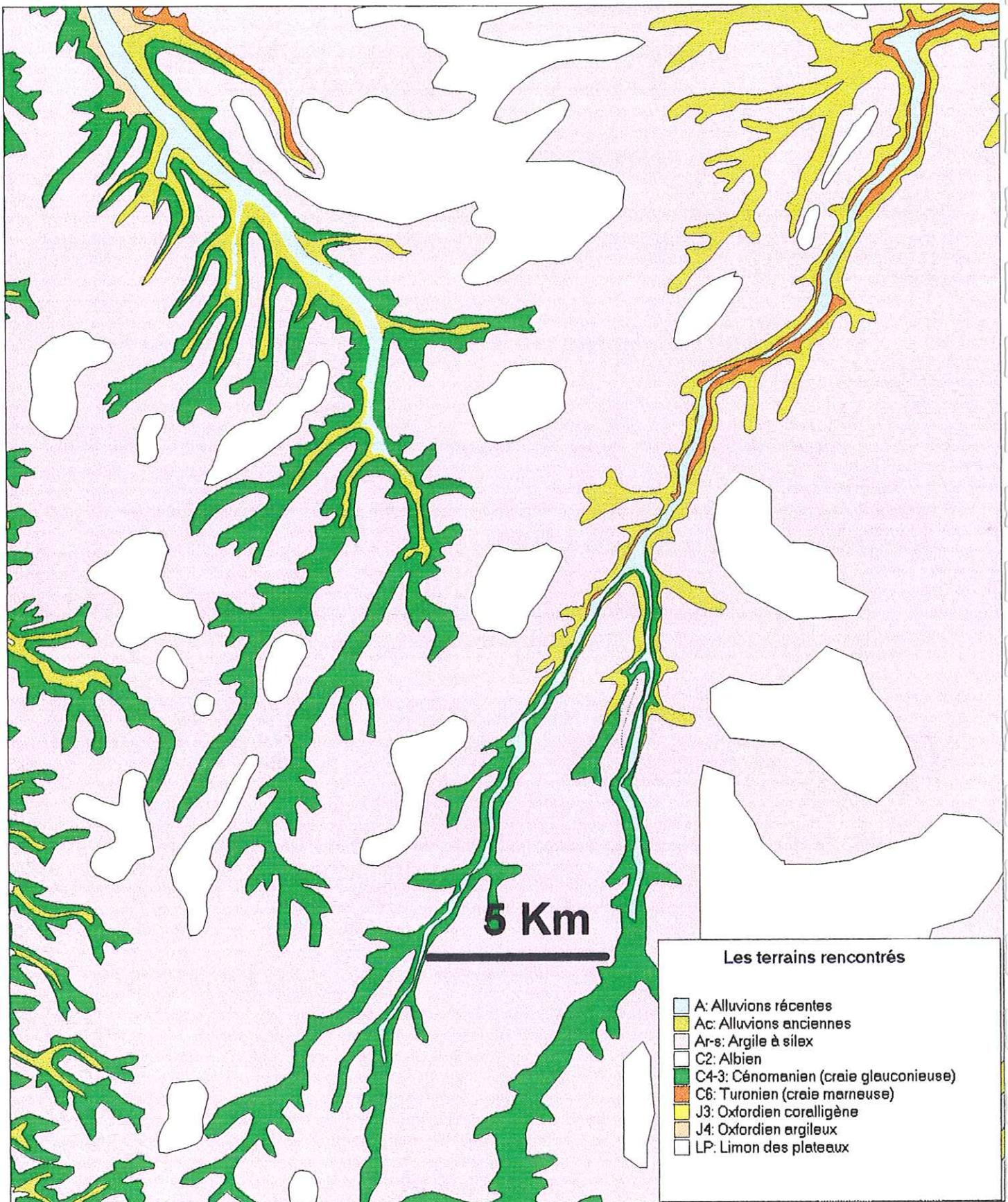
2 – Après l'émersion de la fin du Jurassique survient une transgression. Des sables ferrugineux recouverts à leur sommet par un niveau argileux, correspondent à des dépôts marins du Crétacé inférieur. Ils sont d'âge Aptien supérieur. Certaines argiles observées lors de forages pourraient appartenir à un niveau marin de l'Albien.

3 – Une nouvelle transgression marine permet d'abord le dépôt du niveau de la Glauconie d'âge Albo-cénomarien, puis la mise en place de la sédimentation crayeuse.

4 – Une vaste émersion débute à la fin du Crétacé et se poursuit au Tertiaire. Durant cette dernière période l'altération et la dissolution des carbonates de la craie entraînent une accumulation d'argile à silex au sommet de celle-ci.

5 – La dernière transgression marine survient au Stampien. Des sables fins que l'on ne retrouve que ponctuellement dans des poches karstiques constituent des dépôts relatifs à cette phase. A la fin du Stampien la région émerge définitivement.

6 – Durant le Quaternaire les cours d'eau érodent le relief. Les périodes froides de cette ère permettent le dépôt de limons éoliens, pouvant par la suite être remaniés.



Carte n°4: carte géologique du bassin de l'Orbiquet (extrait de la carte géologique au 1/80 000 ème d'après GUYERDET, BIGOT, RAGUIN).

b Description des terrains affleurants

***Oxfordien supérieur.** *Sable de Glos.* Seule la partie supérieure de ces sables affleure. Ils sont surtout visibles dans la carrière de Courtonne-la-Ville, où l'on peut y distinguer trois niveaux.

***Aptien supérieur.** *Sable et argile au sommet.* Ces dépôts sont également appelés: sables ferrugineux. La partie inférieure correspond à des sables moyens à fins, de nature quartzreuse et feldspathique, avec des passées grossières. Ils sont de couleur claire à jaunâtre et contiennent un peu de glauconie.

***Albien à Cénomaniens inférieurs.** *niveau de la Glauconie.* Il s'agit d'une argile très glauconieuse de couleur verdâtre. La partie inférieure de ce niveau contient d'une part des passées à tendance sableuse et graveleuse et, d'autre part, des nodules phosphatés.

***Cénomaniens inférieurs à supérieurs.** *Craie à chailles, glauconieuse puis blanchâtre.* De couleur grise à gris verdâtre, elle est plus ou moins riche en grains de glauconie. Elle contient de fréquents lits de chailles, qui peuvent parfois être consolidés en bancs. Son épaisseur maximale est de 55m. Dans le paysage, elle forme les versants raides des vallons et vallées. Deux niveaux sont discernables:

– à la base une craie à chaille, plus ou moins glauconieuse. Elle est parfois sableuse et contient souvent des niveaux noduleux. Ce niveau constitue à son sommet un ensemble de craie indurée dont l'épaisseur atteint fréquemment 20m. Ce niveau appartient au Cénomaniens inférieurs.

– au sommet, une craie ferme, contenant de nombreux lits de chailles et de couleur blanchâtre. La partie inférieure de cette craie est glauconieuse, alors que le sommet de celle-ci est noduleux et glauconieux. Cet ensemble est d'âge Cénomaniens supérieurs.

***Turonien inférieur à moyen.** C'est une craie tendre et gris blanchâtre, contenant des silex dans sa partie supérieure. Dans la zone étudiée, elle n'affleure que dans le compartiment effondré au Sud de la faille de Courtonne et dans quelques affleurements près d'Orbec.

*Formations superficielles tertiaires et quaternaires:

– Formation résiduelle à silex. Les silex sont enrobés dans une matrice argileuse, souvent de couleur brun-rouge vers le sommet, et brun à brun-noir près de la craie. Dans la partie supérieure, les silex sont fragmentés par cryoclastie. Dans le paysage, elle recouvre de manière continue les plateaux, où elle surmonte la craie cénomaniens ou turonniens. Sur les versants, elle est fréquemment remaniée par des coulées de solifluxion.

– Formation des Biefs et limons à silex. Ces deux terrains ont le même faciès: matrice de limon très argileux, parfois sableux, contenant des silex fragmentés. Ils apparaissent dans le paysage, entre la bordure du plateau où affleure la formation résiduelle à silex et la partie centrale où les limons des plateaux sont présents.

– Limons des plateaux. Il s'agit des loess en place, limons éoliens très fins, déposés au cours

des périodes froides du Quaternaire, ainsi que des loess remaniés, lors des périodes plus chaudes.

2.2.2 Coupe stratigraphique de la zone étudiée

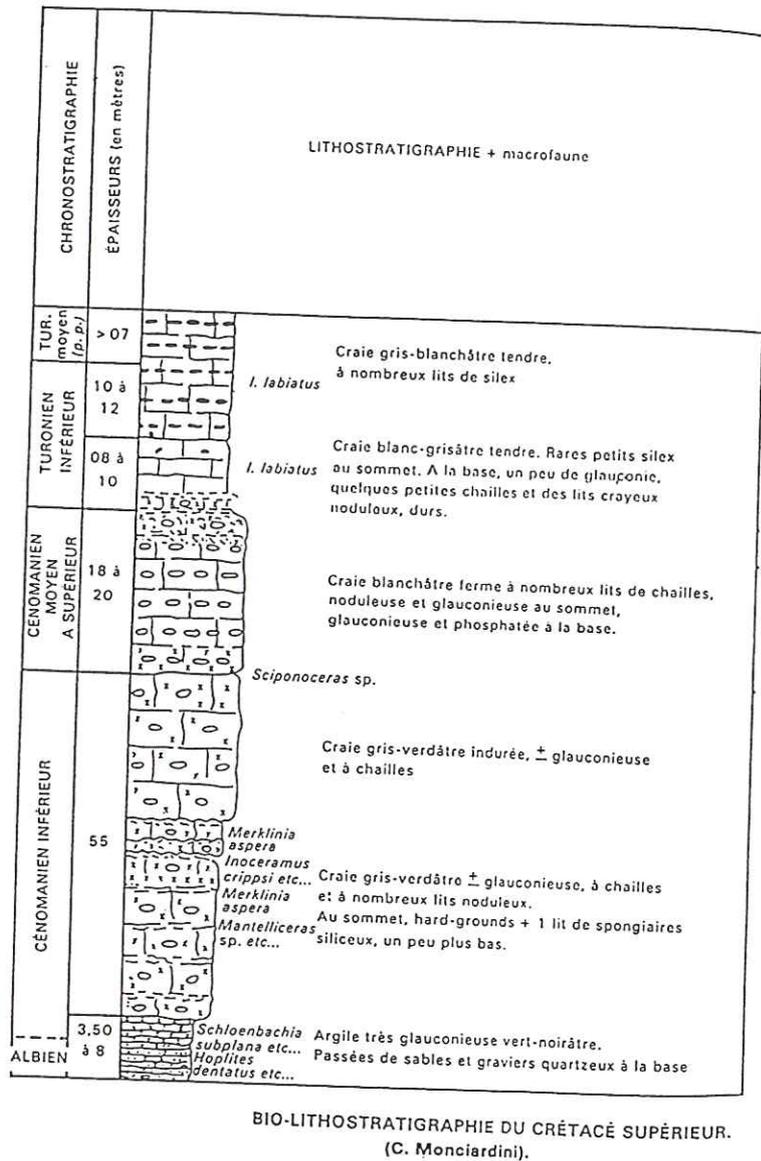


Figure n°1: coupe bio-lithostratigraphique du Crétacé supérieur. (C. Monciardini)

III CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE (à l'échelle de l'ensemble du bassin versant de l'Orbiquet)

3.1 Aquifère de la craie cénomanienne

3.1.1 Généralités

Cet aquifère prend place dans les terrains crayeux du Crétacé supérieur. Il s'agit d'un aquifère à nappe libre et en partie karstique. Son mur est formé par la glauconie de base et l'Albien argileux.

3.1.2 Caractéristiques et configuration de l'aquifère

Structure et Paramètres hydrodynamiques

porosité totale

Elle est double: Il y a porosité de pores et de fissures. On estime généralement à 30% ou 40% le volume total des pores intergrains dans la craie. Une si forte valeur est due à l'absence de ciment entre les éléments particulaires. Cette porosité donne à la craie sa capacité régulatrice.

porosité efficace

Elle définit le volume d'eau mobilisable par rapport au volume total de l'aquifère. Pour la craie elle est environ de 8%, ce qui est faible compte tenu de la porosité totale. Ceci s'explique par le manque d'interconnexion des vides intergranulaires.

perméabilité

La craie est un milieu poreux où la perméabilité est faible, à cause de la mauvaise interconnexion des vides intergrains. Néanmoins, une partie importante des flux peut s'écouler par l'intermédiaire de fissures mais aussi de réseaux karstiques.

3.1.3 Hydrodynamique et piézométrie de l'aquifère

Surface piézométrique

Les cartes hydrogéologique au 1/100000^{ème} des départements de l'Eure et du Calvados donnent une image de la surface de la nappe et de l'organisation des écoulements en période d'étiage (voir annexe n°1). On peut ainsi remarquer qu'elle suit la surface topographique dont elle atténue les irrégularités. Sous les vallées sèches, la nappe n'est profonde que de quelques mètres.

Directions d'écoulements

La direction globale de l'écoulement se fait du Sud vers le Nord, ainsi que des plateaux vers les vallées. Dans le cas des vallées humides, la nappe de la craie alimente les cours d'eau et les nappes alluviales. Les vallées sèches constituent d'autres axes d'écoulement où la fracturation de la craie a pu favoriser l'apparition de karst.

Fonctionnement de la nappe de la craie

Sur les plateaux, les eaux infiltrées doivent percoler à travers les formations superficielles et le bief à silex parfois épais de plus de 20 m. Ensuite, elles circulent lentement à travers la zone non saturée de la craie dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Les temps de transit sont donc très longs sous les plateaux et la recharge de la nappe est parfois décalée de plusieurs mois par rapport aux épisodes pluvieux.

Dans les vallées sèches et surtout les vallées humides, la faible épaisseur des formations superficielles ainsi que la proximité de la nappe entraînent des remontées de niveau quelques jours ou même quelques heures après les pluies.

Localement en plateau et surtout en vallée sèche, il est fréquent que les fortes pluies soient captées par des dolines (bétoires), zones de dissolutions de la craie où se concentrent les eaux de ruissellement, pour rejoindre ensuite rapidement le réseau karstique et la zone noyée du karst.

La recharge de la nappe s'effectue donc en deux temps, presque immédiatement après les pluies en vallées et par le jeu des dolines, ou en plusieurs semaines sous les plateaux.

L'écoulement souterrain

La vitesse de l'écoulement souterrain est très variable selon la perméabilité du réservoir. De quelques centimètres par jour dans les pores de la craie massive, cette vitesse peut passer à plusieurs centaines de mètres par heure lorsque les eaux circulent dans un réseau karstique. L'eau peut donc s'écouler au travers des pores (c'est à dire à l'intérieur de la roche massive), au travers des fissures de la roche, ou bien au travers de conduits karstiques.

Les exutoires

- **Lorsque la nappe de la craie s'écoule vers la nappe alluviale et les cours d'eau qui la drainent.** Sur le bassin de l'Orbiquet, les alluvions sont des dépôts essentiellement grossiers, l'eau circule alors de manière diffuse de la nappe de la craie vers la nappe alluviale. Les sources de débordement sont alors rares.
- **Lorsque la nappe de la craie s'écoule vers les vallées sèches.** Les plus prononcées provoquent en leur point bas l'apparition de sources qui correspond au recoupement de la surface piézométrique par la surface topographique. Ce phénomène est surtout observable en hiver lorsque la nappe de la craie atteint son niveau le plus haut.
- **Emergences karstiques:** Elles constituent une sortie importante des eaux de la nappe de la craie. C'est le cas de la source de l'Orbiquet. Il faut distinguer deux types de fonctionnements et d'origine quant à l'eau de ces sources. Au cours des périodes d'étiage, les conduits karstiques drainent l'eau contenue dans les pores et les fissures de la craie. Durant les forts événements pluvieux, les eaux météoriques s'engouffrent directement dans les conduits karstiques par l'intermédiaire des dolines et

contribuent fortement au débit des sources.

3.2 Aquifère des calcaires de l'Oxfordien

Les calcaires de l'Oxfordien supérieur forment une nappe captive. Elle est notamment exploitée à Beuvillers pour l'alimentation de la ville de Lisieux.

3.3 Nappe alluviale

Il s'agit d'une nappe libre s'écoulant dans les alluvions déposées en fond de vallée. Elle est présente dans la partie Nord du site étudié. Elle se caractérise par des flux importants, un temps de résidence des eaux faible, une relation avec la rivière, une alimentation par la nappe de la craie.

Cependant, il faut noter le faible volume que représentent ces alluvions et cet aquifère dans la zone d'étude.

CHAPITRE II: CONSIDERATIONS GENERALES SUR LE KARST

I DEFINITION DU KARST

Il s'agit d'un type de paysage affectant les pays calcaires. Il est dû à la dissolution des roches carbonatées par les eaux riches en gaz carbonique. Par extension, on désigne souvent par karst tout effet de la karstification sur une roche karstifiable.

II DEFINITION D'UN AQUIFERE KARSTIQUE

La structure et le fonctionnement des aquifères karstiques sont fondamentalement différents de ceux des milieux poreux et fissurés. On observe en effet:

- une hétérogénéité spatiale et temporelle,
- une hiérarchisation des vides et de l'écoulement (analogie avec un réseau hydrographique de surface),
- une dissociation des fonctions capacitives et transmissives,
- des conditions particulières d'écoulements (pertes de charge importantes dans les conduits). La fonction conductrice est assurée pour l'essentiel par le réseau de conduits karstiques interconnectés, alors que la fonction capacitive est assurée principalement par le milieu aquifère fissuré ou poreux.

III NOTION DE SYSTEME KARSTIQUE

"Avec le karst, la notion de système hydrologique prend toute son importance; c'est la seule qui permette d'aborder la compréhension de ce type de réservoir et son fonctionnement. En effet, les descripteurs traditionnels qui identifient les propriétés hydrauliques des terrains non karstiques deviennent inopérants, en raison des discontinuités introduites par les drains. L'aquifère doit donc être pris dans son ensemble et, le seul niveau d'échelle qui permette de rendre compte de son fonctionnement, est celui qui intègre l'organisation du drainage. On retrouve à ce niveau très exactement la notion de bassin versant telle qu'elle est décrite par les écoulements de surface.

Bien plus encore, le système karstique ne saurait être limité aux seuls terrains karstiques. En effet, tout le ruissellement issu des terrains imperméables et qui est drainé en totalité par les calcaires ne saurait être dissocié du fonctionnement de l'aquifère. Le système karstique correspond par conséquent à l'ensemble de l'impluvium au niveau duquel l'aquifère karstique proprement dit constitue une unité de drainage" d'après Collin et Mangin.



Photo n°1: station hydrométrique de la source de l'Orbiquet.

CHAPITRE III: METHODES D'ETUDES

I ZONES ET PERIODE DE L'ETUDE

1 Zones d'étude

Pour le recensement des cavités et des formes de surface, la zone d'étude s'étend à l'ensemble du bassin versant topographique de l'Orbiquet (340 km²).

Cependant, le reste de l'étude est restreint au bassin d'alimentation de la source de l'Orbiquet (bassin topographique et ses alentours). Cette échelle de travail forme dans son ensemble une unité de drainage karstique. Elle est donc la mieux adaptée pour comprendre le fonctionnement de l'aquifère karstique. L'essentiel des informations est alors récolté à la source de l'Orbiquet.

2 Période d'étude

On considère que la période minimale d'étude pour pouvoir cerner le fonctionnement d'un karst est un cycle hydrologique. On admet ainsi que toutes les saisons sont alors représentées et que l'on peut capter les types de réponse de l'aquifère. Cependant, nous n'avons pu étendre la période d'étude que sur neuf mois (du 25/11/97 au 31/08/98). Sur une période si courte, l'application de certaines méthodes d'analyse du karst est parfois délicate. Les résultats obtenus nécessitent donc d'être interprétés avec précautions et ne doivent pas être pris comme tels. mais comme des ordres de grandeurs ou des indications.

II DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1 Hydrométrie

Le débit est le paramètre le plus important. Une station hydrométrique, équipée d'un limnigraphe OTT, type 20, enregistre en continu les variations du plan d'eau à quelques mètres de l'émergence de l'Orbiquet (voir photo n°1). Avec environ un jaugeage par semaine, nous avons pu monter une courbe de tarage et ainsi transformer les hauteurs enregistrées par le limnigraphe en débits.

2 Géochimie

Les substances dissoutes sont des indicateurs de l'histoire de l'eau. Nous avons donc mis en place un dispositif de suivi du chimisme de l'eau à la source de l'Orbiquet. L'objectif est d'étudier le fonctionnement et la vulnérabilité de l'aquifère karstique ainsi que les modes d'écoulement de l'eau à l'intérieur de celui-ci. La conductivité et la turbidité qui sont des paramètres synthétisant beaucoup d'informations ont été mesurées en continu.

Parallèlement, nous avons fait une analyse par semaine des éléments majeurs de l'eau (Ca⁺⁺; Mg⁺⁺; Na⁺; K⁺; HCO₃⁻⁻; SO₄⁻⁻; NO₃⁻; Cl⁻) et du pH.

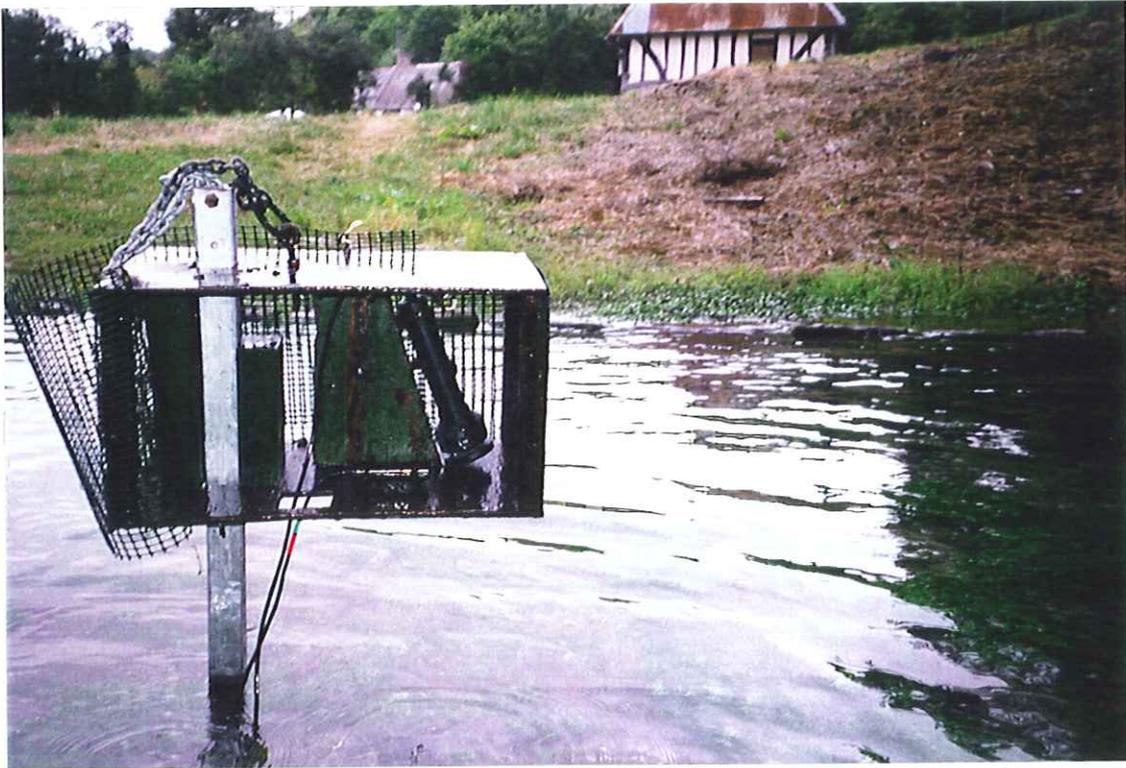


Photo n°2: sondes conductivité et turbidité placées sur le terrain à l'émergence de l'Orbiquet.



Photo n°3: récolte des données du conductimètre et turbidimètre de terrain, stockées dans la centrale d'acquisition

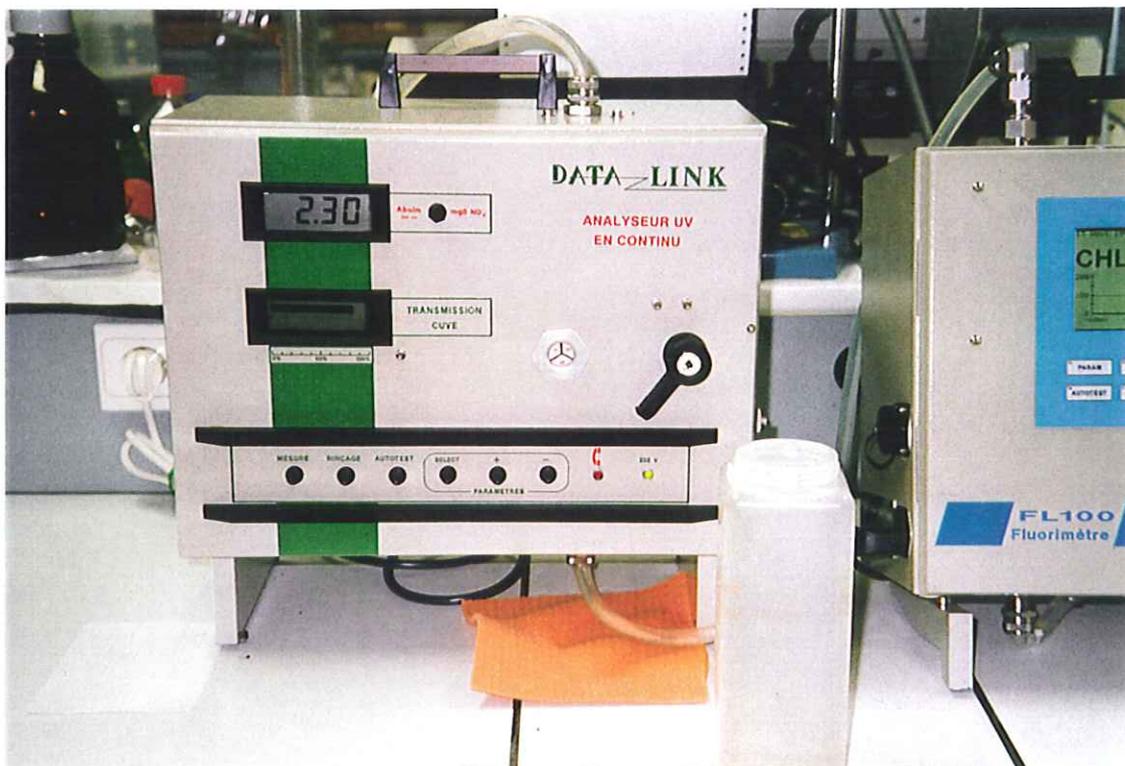


Photo n°4: détermination de la concentration en nitrates.

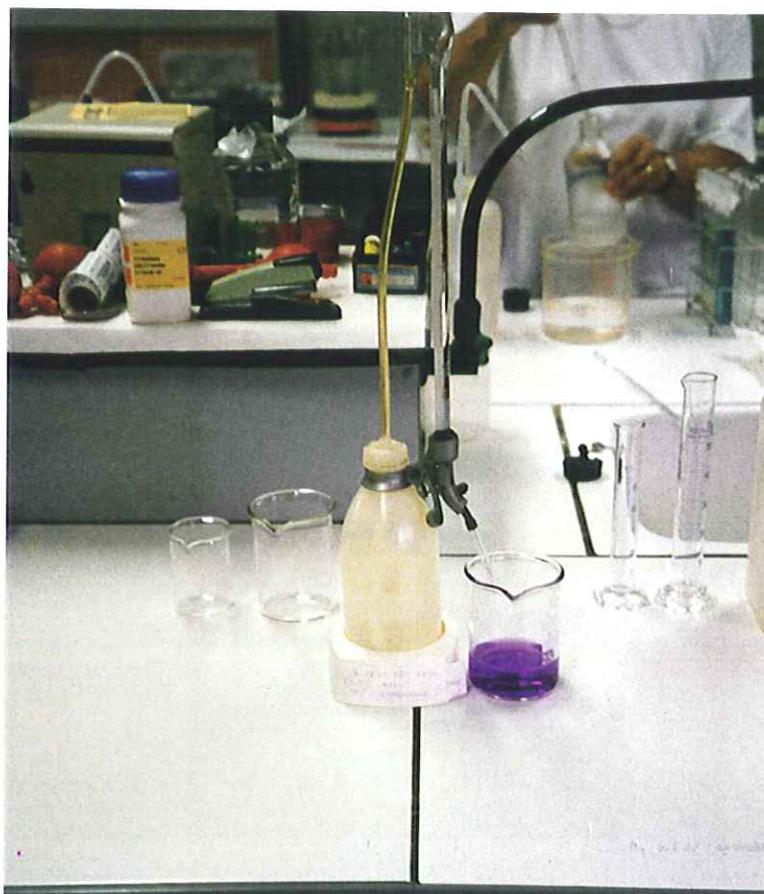


Photo n°5: détermination de la concentration en calcium par titrimétrie.

3 Traçages artificiels

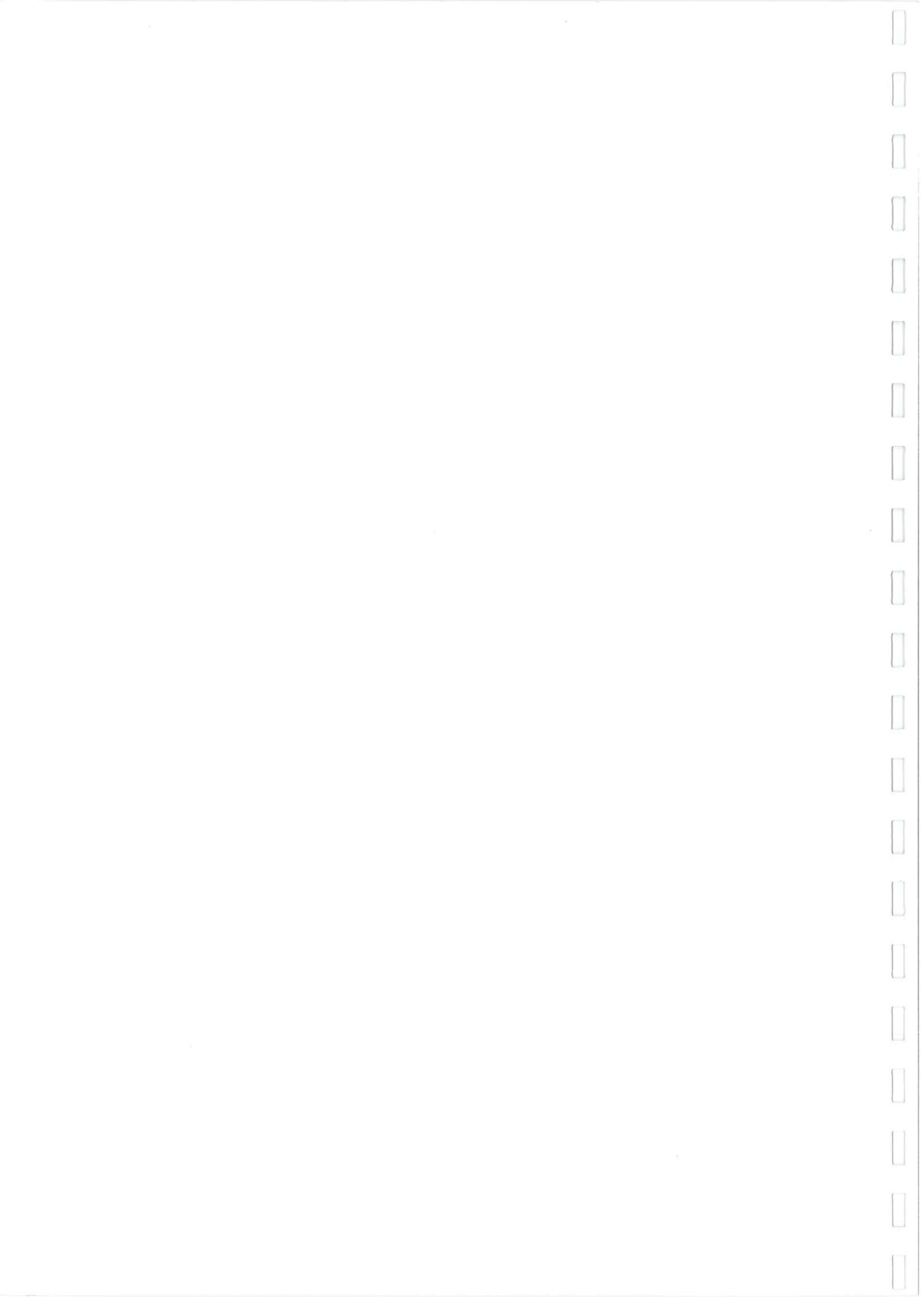
Des traçages artificiels ont été organisés pour augmenter et contrôler les connaissances acquises. Deux types de suivi ont été mis en place:

- un suivi qualitatif, en tout ou rien, qui nous indique grâce à des fluocapteurs le passage ou non d'un nuage de fluorescence en en point.
- un suivi quantitatif à la source de l'Orbiquet avec un fluorimètre de terrain, data link, type FL100, qui nous permet d'obtenir la distribution des temps de séjours et les vitesses de circulations.

4 Terrain et photo-interprétation

Un travail de terrain a été effectué en complément de ces investigations en vue d'observer la structure du karst en surface mais aussi dans le sous-sol. Avec l'équipe Spéléologique d'Hérouville Saint Clair, nous avons pu visiter des cavités anthropiques et noter à l'intérieur de celles-ci les formes de l'endokarst et la fracturation de la craie.

Une étude de la zone par photo-interprétation a permis d'une part de repérer au préalable les anomalies de grandes dimensions et d'autre part de réaliser une analyse structurale.



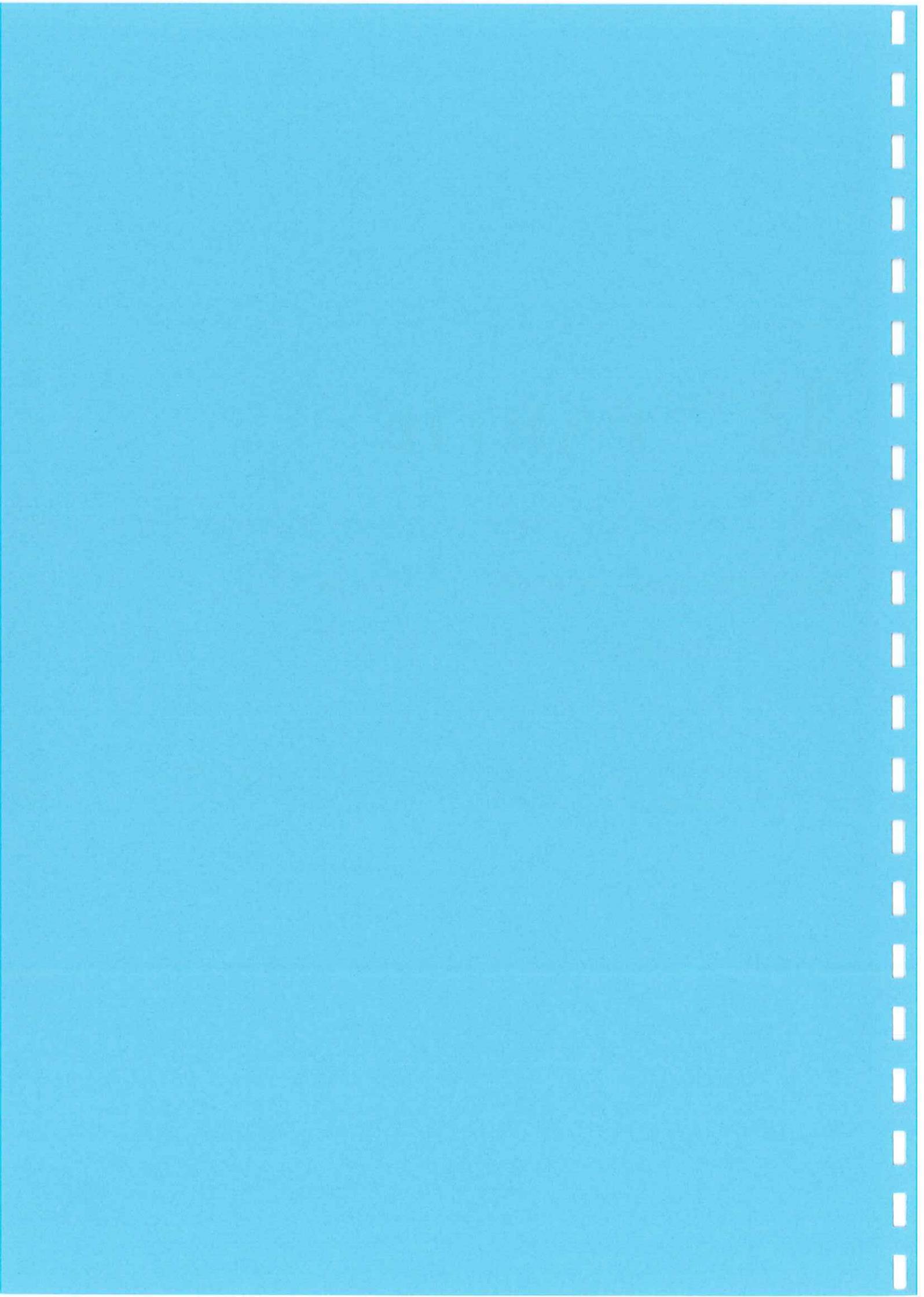
II^{eme} PARTIE

LA STRUCTURE DU KARST DE L'ORBIQUET

CHAPITRE IV: L'EXOKARST.

CHAPITRE V: L'ENDOKARST.

*CHAPITRE VI: ZONE D'INFILTRATION ET ZONE
NOYEE*



II^{eme} PARTIE:

LA STRUCTURE DU KARST DE L'ORBIQUET

CHAPITRE IV: L'EXOKARST

I INTRODUCTION

La dissolution des roches carbonatées (karstification) engendre des vides qui s'organisent en une unité de drainage. En surface, les manifestations du karst se traduisent par des anomalies topographiques (dépressions et effondrements) et par des particularités du réseau hydrographique (pertes et émergences).

L'intensité et l'abondance de ces formes peuvent parfois traduire le degré de karstification. Nous verrons dans le paragraphe suivant que tel n'est pas le cas pour l'Orbiquet qui est un karst masqué. Parmi les formes les plus classiques du paysage karstique retenons:

- le lapiaz, qui est une surface creusée de trous, de cannelures ou de rigoles d'ordre centimétrique à métrique.
- La doline, qui est une dépression circulaire.
- les vallées sèches, qui peuvent être liées à l'enfoncement souterrain d'une partie du réseau hydrographique, qui circule alors dans les conduits karstiques.
- les avens, qui sont des gouffres s'ouvrant sur les profondeurs. Il n'en est pas de connu sur le bassin de l'Orbiquet.
- les pertes, qui sont des points d'infiltration de rivières vers le réseau karstique.
- les émergences karstiques, qui sont des sources où l'eau provient du réseau de conduits karstiques.

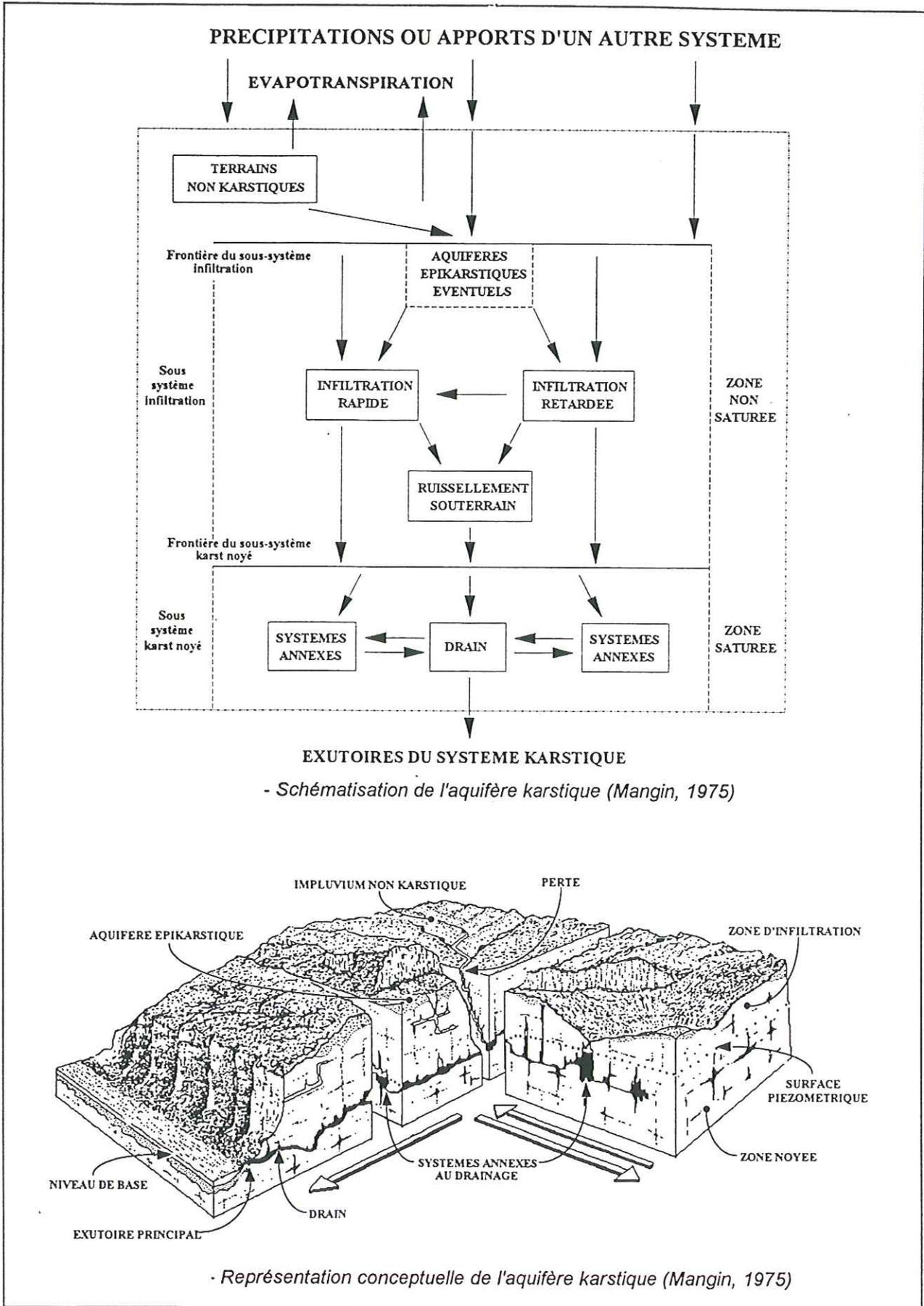
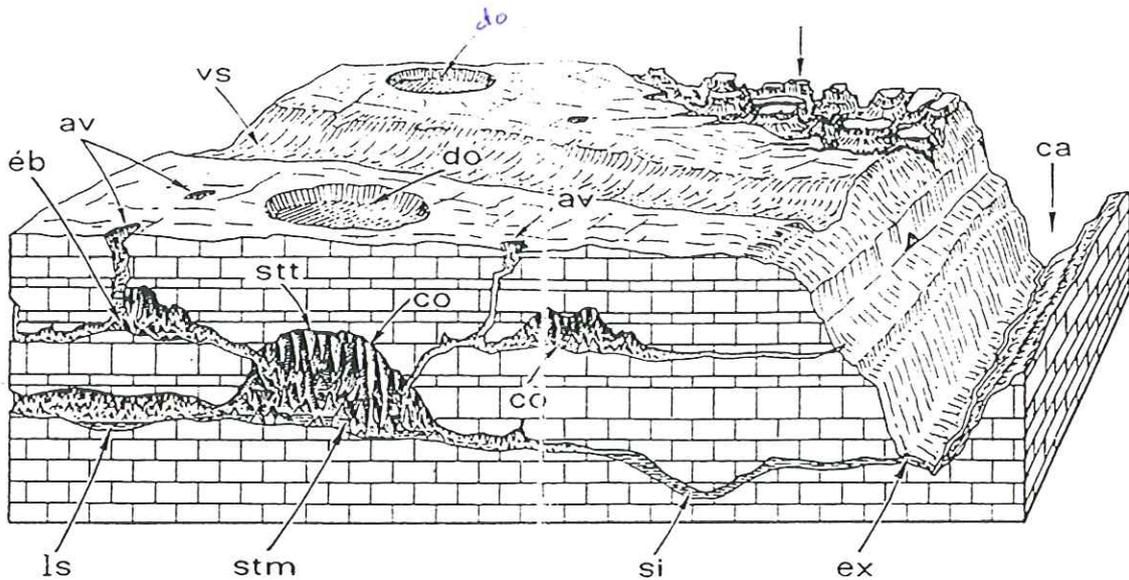


Figure n°2 et 3: schématisation et représentation conceptuelle de l'aquifère karstique (Mangin)



modèle karstique

av : aven – ca : canyon – co : colonne – do : doline – éb : éboulis – ex : exurgence – ls : lac souterrain alimenté par une rivière souterraine – rr : relief ruiniforme – si : siphon – stm : stalagmite – stt : stalactite – vs : vallée sèche

Figure n°4: modèle karstique (dictionnaire de géologie; ed. Masson)

II LA SURFACE CRAYEUSE ET LES FORMATIONS DE RECOUVREMENT

1 La surface crayeuse

La dissolution de la craie a engendré une accumulation d'argile à silex (éléments insolubles) au-dessus de la surface crayeuse. Néanmoins, il est possible d'apercevoir la surface de la craie cénomanienne dans les carrières à ciel ouvert d'Orbec et de Courtonne les Deux Eglises. La surface de contact entre le résidu de la décalcification et la craie non altérée possède une morphologie très irrégulière et fréquemment dentelée (notion de relief ruiniforme). Elle se caractérise par des entonnoirs de dissolution, séparés par des pinacles de craie, pouvant atteindre des dimensions métriques à décimétriques (voir photo n°6). A sa surface, la craie cénomanienne est donc cariée et possède des formes typiques d'un processus de karstification.

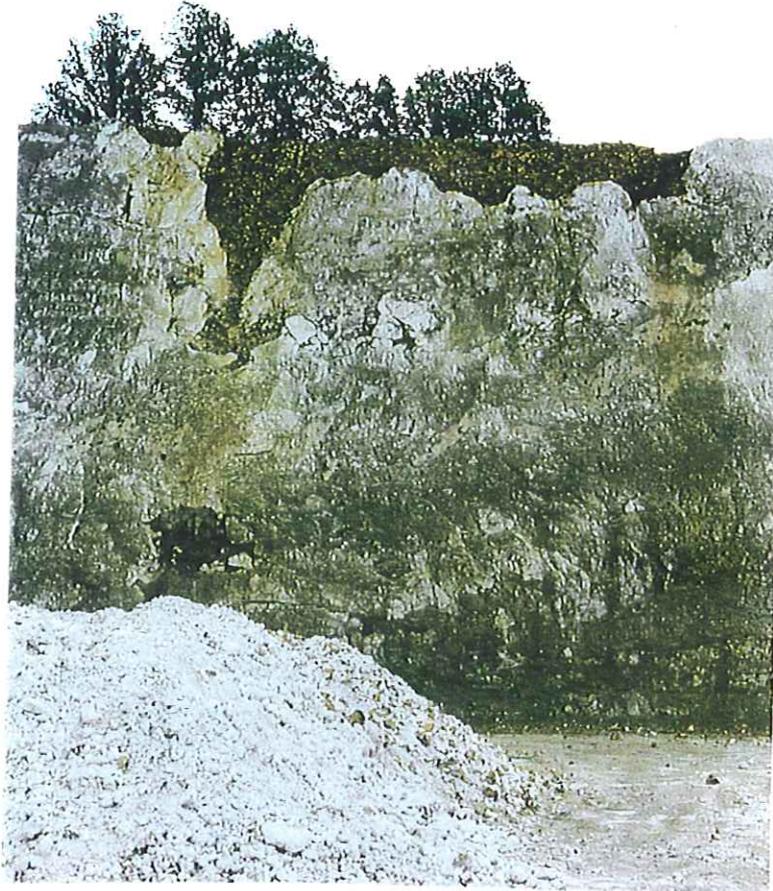


Photo n°6: pinacles et caries sur la surface crayeuse (carrière à ciel ouvert de Courtonne les Deux Eglises).

2 Formations superficielles et atténuation du phénomène karstique.

Comme nous venons de le voir, la surface de la craie est recouverte par de l'argile à silex, résidu de la dissolution de la craie. De plus, des limons éoliens qui se sont déposés durant les périodes froides du Quaternaire viennent également recouvrir l'argile à silex et la surface crayeuse. L'épaisseur que constituent ces formations superficielles (limons des plateaux et argiles à silex) est considérable. Elle atteint fréquemment plusieurs mètres. Par ailleurs, elles occupent une grande partie de la superficie du bassin versant. Cette épaisseur et cette extension rendent délicate l'approche de la morphologie de l'exokarst, d'autant plus qu'on observe fréquemment un remaniement des limons et de l'argile à silex. On parle de karst masqué. Ces formations superficielles impliquent:

- que la surface crayeuse est rarement visible depuis la surface.
- une atténuation du phénomène karstique
- une fossilisation prématurée des formes karstiques de surfaces, en raison du fait que les

La structure du karst de l'Orbiquet

formations meubles sont soumises à de forts mouvements gravitaires. Toute anomalie topographique sera rapidement comblée pour atteindre de nouveau l'équilibre .

- les entrées naturelles du réseau karstique sont a priori impénétrables pour l'homme depuis la surface (sauf source de l'Orbiquet). Une exploration des cavités anthropiques (carrière souterraine et marnière) est donc nécessaire à l'observation de l'endokarst.

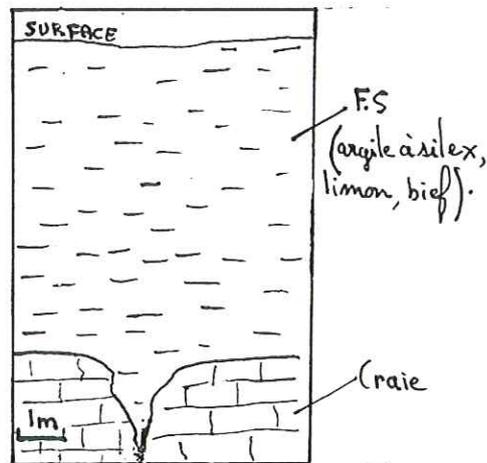


Figure n°5: atténuation en surface des manifestations karstiques par les formations superficielles.

III LES DOLINES

Elles forment dans le paysage des dépressions circulaires. Il en existe plusieurs types:

- point d'infiltration rapide

Cette forme de doline est très présente sur le bassin de la source de l'Orbiquet, on l'appelle régionalement « bétoire ». Elles se situent presque toujours dans les vallées sèches où elles constituent des points de concentration et d'infiltration rapide des eaux de ruissellement. Elles sont reliées au réseau karstique dont ils constituent un élément à part entière. Elles assurent la collecte et la distribution d'une partie des eaux de surface vers les conduits karstiques et l'émergence lors des forts événements pluvieux.

En amont de la source de l'Orbiquet, toutes les vallées sèches possèdent de telles dolines. Mais les plus prononcées se situent sur la commune de Monnai au lieu dit de la « Fosse au Roi », à l'intersection entre les vallées sèches de la Montjoie et de la Chesnaie. La Fosse au Roi forme une grande doline de diamètre pluridécamétrique. Au cœur de celle-ci, des eaux de ruissellement viennent se perdre dans plusieurs petites dolines profondes, très actives, et dont la position semble mobile.

Depuis l'aménagement de réseaux de drainage sur les plateaux, le volume d'eau de ruissellement qui rejoint le karst par ces dolines a considérablement augmenté.

Bon nombre de drains s'écoule en effet des plateaux imperméables vers les vallées sèches où ils achèvent leur parcours dans des dolines (ex de Percepierre au Sap et du Douet Arthus).

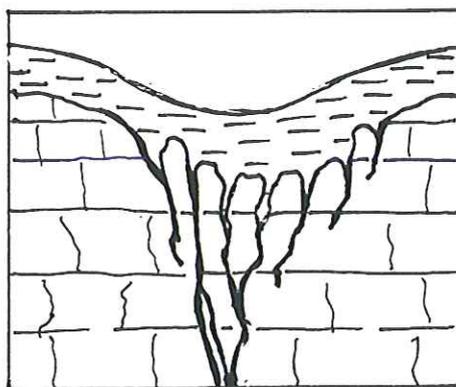


Figure n°6: doline d'infiltration rapide.



Photo n°7: doline d'infiltration rapide au lieu dit de « Percepierre » à Saint Germain d'Aunay.



Photo n°8: une des dolines de la Fosse au Roi à Momai

- *dépression liée à l'effondrement de l'endokarst*

Les cavités karstiques atteignent parfois des tailles conséquentes. Dans des zones fragiles, ces vides peuvent générer des effondrements, dont la manifestation peut se faire ressentir jusqu'en surface par la naissance d'une doline (voir figure n°7). Leur morphologie présente un profil symétrique et point bas situé au centre de la dépression. Elles se positionnent le plus souvent dans les vallons et peuvent monter un alignement le long d'un drain souterrain. Nous avons observé une telle doline dans la vallée sèche de la Montjoie sur la commune Saint Gemaint d'Aunay (voir carte n°5). Il s'agit d'un effondrement récent (probablement hiver 97/98) aux formes très franches (parois verticales) avec un diamètre et une profondeur de trois mètres.

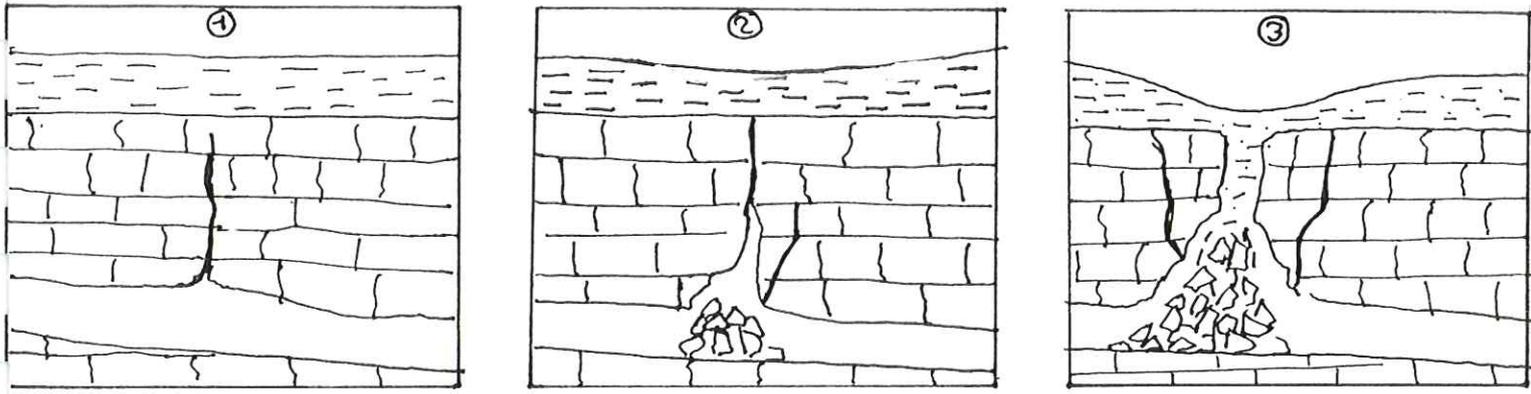


Figure n°7: naissance d'une doline liée à l'effondrement de l'endokarst.



Photo n°9: doline d'effondrement de l'endokarst.

- dépression liée à l'effondrement de racine de la craie: (cf: J Rodet)

Les racines et pinacles que l'on observe au niveau de la surface crayeuse sont instables. J.RODET indique dans sa thèse que dans les karsts de la craie une doline peut naître par effondrement au niveau d'une racine de la craie. La rétraction des argiles durant une période de sécheresse crée un vide qui permet la circulation et le drainage des eaux lors du prochain épisode pluvieux. Si la nature des eaux le permet, elles altéreront la craie. Un vide se forme; il sera comblé par des formations superficielles, ce qui crée une doline en surface. De manière générale, on observe que ces dolines se positionnent sur les plateaux. On peut voir dans la carrière de Courtonne-les-Deux-Eglises un tel effondrement au niveau d'une racine crayeuse.

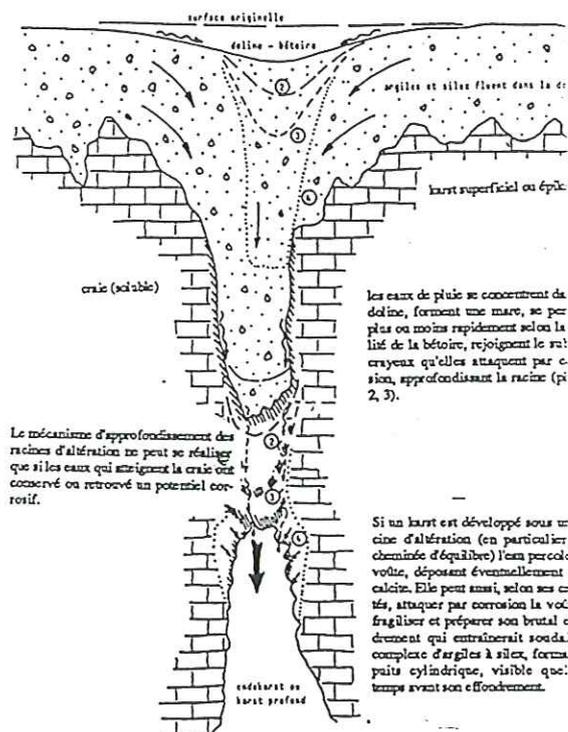
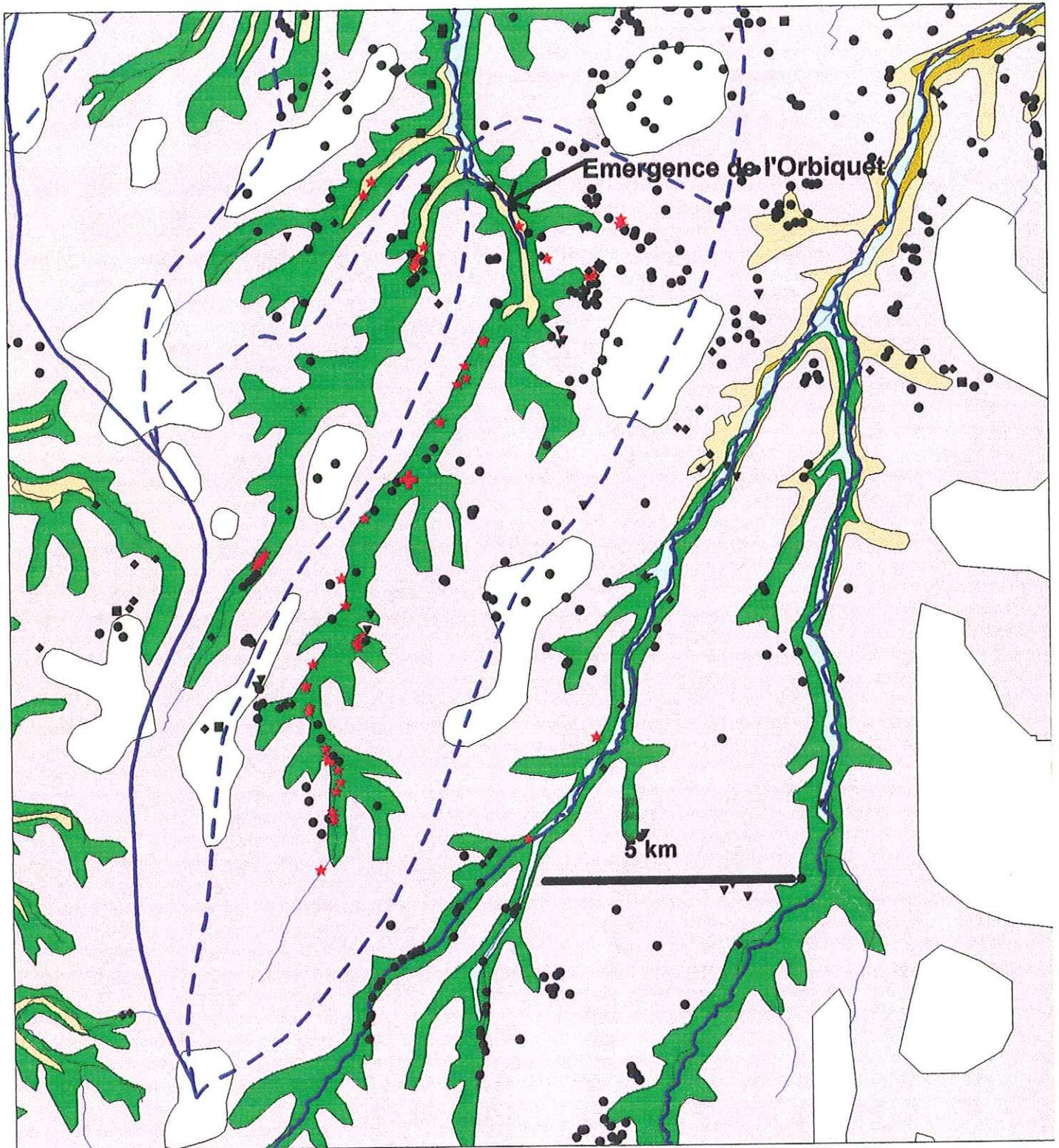


Figure n°8: création d'une doline sur une racine crayeuse (d'après J.RODET)

b Inventaire et Cartographie

A l'échelle du bassin versant et des alentours, un inventaire des dolines semble dès lors indispensable (voir carte n°5). Ce travail permet d'une part de quantifier, de positionner et de comprendre les manifestations du karst en surface et, d'autre part, de prévenir des risques d'effondrements et de déterminer les zones d'infiltration rapide sensibles aux pollutions.

Trois méthodes ont été employées pour cet inventaire. Il s'agit de la synthèse des données connues, d'une photo-interprétation, et d'une reconnaissance de terrain. Une grande partie des cavités et anomalies de surfaces connues ont été positionnées sur l'ensemble des cartes géologiques du territoire. Le paysage de bocage, l'épaisseur des formations superficielles, ainsi que la petite taille de certaines anomalies rendent l'analyse des photos aériennes délicate.



- Cavités et formes de surface sur le bassin d'alimentation de l'émergence de l'Orbiquet**
- ◆ carrière à ciel ouvert abandonnée; ref. carte géol
 - carrière souterraine; ref. carte géologique
 - ▲ carrière souterraine; ref. DIREN
 - ▼ carrière souterraine remblayée; ref. carte géologique
 - doline d'origine indifférenciée (karstique ou anthropique); ref. carte géol.
 - ★ doline karstique; ref. DIREN
 - ⊕ effondrement karstique; ref. DIREN

Carte n°5: les formes de surface sur le bassin de l'Orbiquet.

IV PERTES ET EMERGENCES KARSTIQUES

a Définition

On appelle perte d'un cours d'eau, le lieu où l'on observe un phénomène de disparition naturelle, totale ou partielle, d'un cours d'eau de surface vers le sous-sol, qu'il soit permanent ou temporaire.

Une émergence karstique est un type de source relative aux aquifères karstiques, dont l'eau peut provenir:

- de pertes de cours d'eau de surface, on parlera alors de résurgence,
- ou bien de précipitations efficaces sur l'aire d'alimentation, il s'agit dans ce cas d'une exurgence.

b Inventaire et cartographie

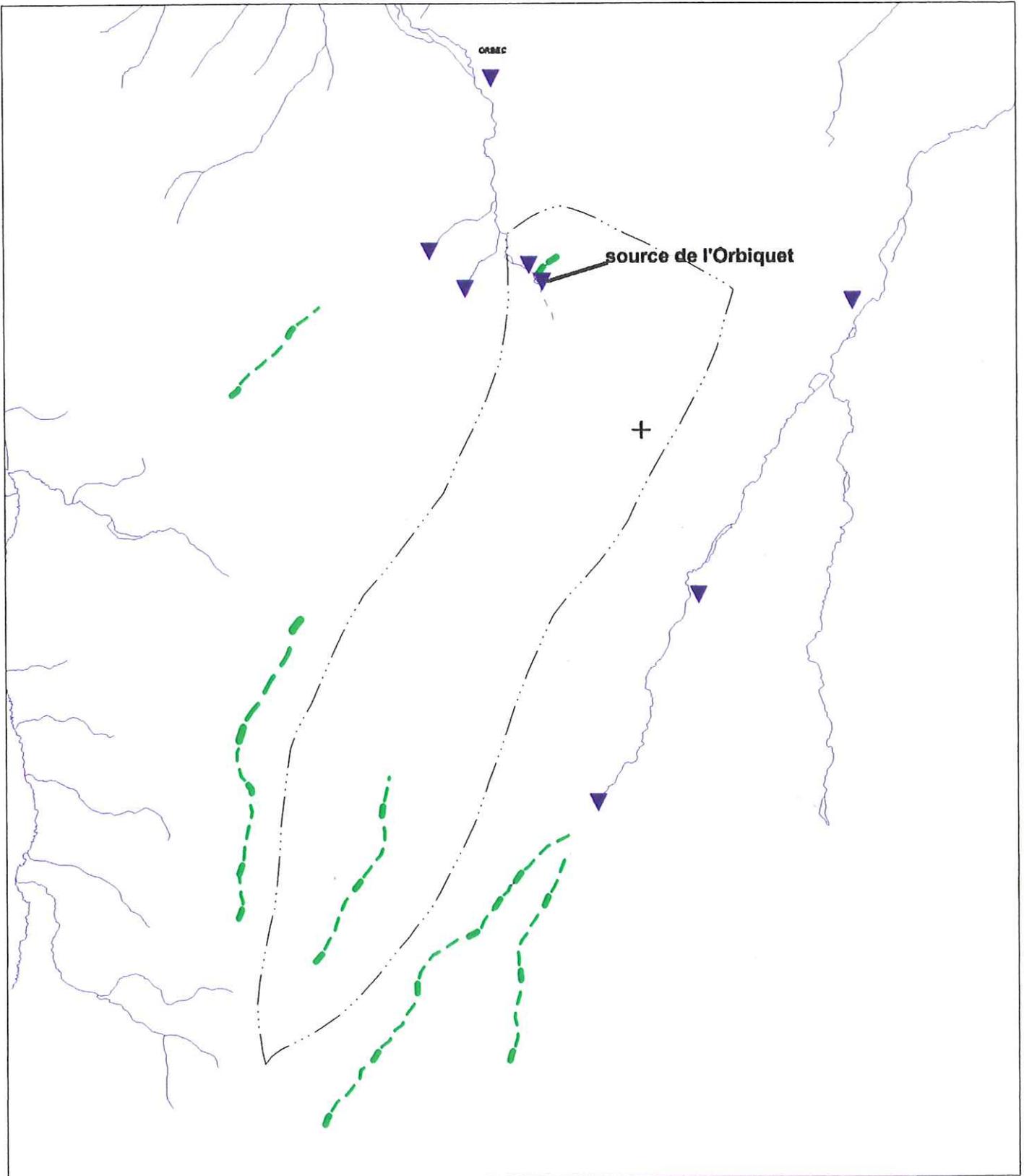
Sur le bassin topographique de la source de l'Orbiquet, nous avons observé deux pertes totales de cours d'eau temporaires.

La première perte, qui est la plus importante en débit, correspond au ruisseau du Douet Arthus dont la connexion avec la source de l'Orbiquet a été montrée par le traçage du 24/03/98. Par l'intermédiaire de drains agricoles, le ruisseau du Douet Arthus récolte rapidement les eaux de ruissellement du plateau environnant. En période de pluie, le débit du Douet Arthus augmente vite et dans des proportions très importantes. Nous avons remarqué des pertes dans le lit du ruisseau dès 100 mètres en aval du bourg du Douet Arthus. Mais c'est surtout dans sa partie terminale que l'on peut observer les pertes les plus importantes, avec parfois un modelé bien spécifique du lit du ruisseau et des dolines.

La deuxième perte concerne également un cours d'eau temporaire. Il s'agit d'un petit ruisseau situé dans une vallée Nord Est-Sud Ouest qui converge en direction de la source de l'Orbiquet. La perte se situe dans la commune de la Folletière-Abenon, à quelques centaines de mètres de la source de l'Orbiquet, au croisement de la vallée avec l'ancienne voie de chemin de fer. Ce petit ruisseau ne coule que rarement, lors des très fortes pluies.

La principale émergence est bien sûr la source de l'Orbiquet; il existe néanmoins quatre autres sources karstiques en proximité de la source de l'Orbiquet. Ce sont:

- une source située à flanc de coteau à 200 m en aval de la source de l'Orbiquet, dans la même vallée sèche, appelée « les sept sources ».
- la source de la Bigotière,
- la source de la Vespière à Orbec,
- la source de Friardel.



Carte n°6: Les pertes et les émergences.

CHAPITRE V: L'ENDOKARST

1 INTRODUCTION

Sur le bassin de l'Orbiquet, l'endokarst n'est accessible qu'aux plongeurs spéléologues qui en partant de l'émergence de l'Orbiquet remontent une partie du réseau karstique noyé. Cependant, il existe de nombreuses cavités anthropiques, carrières souterraines, marnières, puits. L'exploration de celles-ci, avec l'aide du club spéléologique d'Hérouville-Saint-Clair, nous a permis d'approcher l'endokarst. Notre domaine d'étude s'étend cette fois-ci à l'ensemble du bassin versant de l'Orbiquet.

2 OBSERVATION DU PALEOKARST

La totalité des conduits karstiques observés était non fonctionnelle. On parle alors de paléokarst.

2.1 Inventaire

La direction des conduits et leur inclinaison ont été relevés lors d'exploration spéléologique (voir annexe n°2).

2.2 Mise en évidence de processus

Guide de direction

Il est aujourd'hui clairement admis que la stratification (pendage des couches et niveaux indurés de celles-ci) , ainsi que la fracturation, constituent des guides de direction préférentielle pour les conduits karstiques. Ce phénomène est également observable sur le karst de l'Orbiquet. Un bel exemple se situe en proximité de la source de l'Orbiquet dans une carrière souterraine, dans laquelle on entre par une ouverture située en bord de route (D130), à flanc de coteau. Dans cet ensemble de carrières, on peut en effet voir un conduit karstique fossile suivre clairement une fracture sur plusieurs mètres (cf photo n°10). On aperçoit également un autre conduit fossile qui se développe parallèlement à un banc induré.

Décompression

Les conduits karstiques comme toutes autres cavités souterraines engendrent un phénomène de décompression sur les roches qui les entourent. La pression lithostatique qui s'exerçait sur la roche tend en effet à se rapprocher de la pression atmosphérique. Ainsi décomprimée, la craie se fracture. On peut voir un tel phénomène dans la marnière de M. LEPOIVRE, à Courtonne les deux Eglises (photo n°11).



Photo n°10: conduit karstique fossile suivant une fracture, carrière souterraine de la Folletière Abenon.

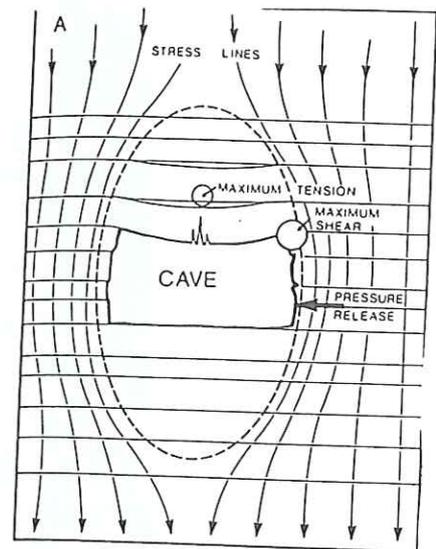


Photo n°11: fentes de décompression concentriques à un conduit karstique fossile.

CHAPITRE VI: ZONE D'INFILTRATION ET ZONE NOYEE.

I LA ZONE D'INFILTRATION

1 La zone d'infiltration rapide

Les dolines et les pertes constituent des zones où les eaux de ruissellement pénètrent dans le sous-sol. Les résultats obtenus lors des traçages et fournis par l'analyse du fonctionnement de la source montrent que l'eau s'infiltrant en ces points rejoint très rapidement l'aquifère karstique et l'exutoire (voir chapitre n°III et IV). En période pluvieuse, on observe une forte contribution de ces zones dans le débit à la source de l'Orbiquet (voir chapitre n°III, IV et VII).

2 La zone d'infiltration retardée

La craie est une roche poreuse, mais elle est aussi fracturée. Une partie des eaux de pluie peut rejoindre les conduits karstiques par l'intermédiaire de petites fissures. C'est l'infiltration retardée.

3 La zone d'infiltration très lente

On admet que la porosité d'interstice peut constituer jusqu'à 40% de la craie. Il existe donc au sein de celle-ci un écoulement poreux. Simplement, de part la nature de ses pores, qui présentent une faible interconnexion, les vitesses d'écoulement dans la matrice crayeuse sont lentes.

II LA ZONE NOYEE

Différentes plongées spéléologiques dans l'émergence de l'Orbiquet ont permis d'observer une partie de la zone noyée du karst. La parole est ici aux plongeurs-spéléologues qui, comme on peut l'imaginer, ont fait un travail considérable pour obtenir une topographie du réseau visité.



La source (en basses eaux)

ne sont pas d'accord sur la troisième...

815 MÈTRES DE GALERIES SUBMERGÉES

Avant de jaillir à La Folletière-Abenon, l'Orbiquet serait alimenté par au moins deux cours d'eau souterrains, ce que confirment d'ailleurs les explorations subaquatiques entreprises depuis plus de 30 ans.

Sous le plateau calcaire, les plongeurs spéléologues ont reconnu, avec beaucoup de difficultés, 815 mètres de galeries en deux branches, et ils soupçonnent que le réseau hydrographique souterrain s'étend plus loin.



Dans le siphon

Pour effectuer cet arpentage subaquatique, ils ont même utilisé une nouvelle méthode de relevés topographiques par caméra vidéo étanche, dont la première expérimentation fut réalisée dans le cours souterrain de l'Orbiquet.

UN SIPHON, UNE SALLE, UN SIPHON...

M. Francis Menu et ses collègues plongeurs-spéléos ont commencé par reconnaître le parcours déjà effectué par leurs prédécesseurs : le siphon d'accès, relativement accessible - 60 mètres de long, 2 mètres de largeur, 1,50 m de hauteur, mais noyé en toutes saisons, donne accès à une petite salle d'environ 15 mètres carrés, où les plongeurs n'ont de l'eau que jusqu'au buste. Suit un autre couloir immergé, avec, à 160 mètres, un autre siphon qui descend de 3 mètres à 9 mètres de profondeur.

DEUX AUTRES SALLES, PUIS UN CONDUIT DE 30 CM

Après avoir constaté que les Caennais et les Parisiens avaient exploré 450 mètres de conduits et qu'il était impossible d'aller plus loin dans cette direction, les plongeurs spéléos de l'Eure ont découvert un autre boyau immergé, et s'y sont engagés. Ils ont découvert deux autres petites salles, et porté, en 1993, la longueur explorée à 815 mètres.

A environ 500 mètres de l'entrée, par le second conduit, ils butent en effet sur une étroiture immergée : un conduit dont ils ont estimé la longueur à 5 ou 6 mètres, et la hauteur à 25 ou 30 centimètres. Autrement dit, le franchissement n'est possible que... sans les bouteilles d'air comprimé ! Et pour découvrir quoi ? Une nouvelle salle... ou des ramifications d'un diamètre encore plus réduit, inexplorables. De plus, un courant violent sort de ce conduit.

Ce n'est pas une mince affaire, en effet, que de prospecter le cours souterrain de l'Orbiquet.

LE CONSEIL GÉNÉRAL VA RESTAURER LES ABORDS DE LA SOURCE DE L'ORBICQUET

Le territoire du Calvados offre quelques curiosités géologiques. La "source vaclusienne" de l'Orbiquet, à La Folletière-Abenon, quelques kilomètres au sud d'Orbec, est de celle-là. Le Conseil général du Calvados va, cette année, en faire restaurer les abords, pour y créer un but de promenade touristique.

Avec un débit moyen de 450 litres par seconde, et trois ou quatre fois plus en période de

crue, où elle "craque" alors un mascaret d'un mètre de haut ou plus, la source de l'Orbiquet serait la 4^{ème} source vaclusienne de France. Le conditionnel est de rigueur, car les géographes et les hydrogéologues



Sortie de plongée de nuit

Les premières explorations ont été entreprises, à partir de 1964, par des plongeurs spéléos caennais, qui ont reconnu le premier siphon, de 60 mètres, puis ont poussé au-delà d'un second siphon, jusqu'à 495 mètres de la source, distance réduite à 405 mètres par des mesures plus précises.

Ces mesures ont été effectuées, à partir de 1988 par les membres de la Commission Plongée du Comité départemental de Spéléologie de l'Eure, commission dont le responsable est M. Francis Menu, à Vernon.

Élargissement de l'entrée du siphon (sous l'eau)



UN INVENTAIRE DES RESSOURCES EN EAU

Le maire de La Folletière-Abenon, M. René Launay, et l'herbager exploitant les terres où apparaît l'Orbiquet, M. Levillain, suivent de près les explorations conduites par les plongeurs-spéléos de l'Eure. Pas seulement par curiosité, ou dans l'espoir de prochaines "relombées" touristiques.

Ces recherches subaquatiques contribuent en effet à une meilleure connaissance des réseaux hydrologiques. D'où leur intérêt, dans l'actuel contexte d'inventaire des ressources en eau et de leur qualité : une politique de gestion de l'eau dans laquelle le Conseil général du Calvados s'est engagé ! Le problème est que ces explorations sont menées avec des moyens entièrement bénévoles, donc réduits. La Commission Plongée du Comité départemental de Spéléologie de l'Eure a des projets pour l'Orbiquet : des propulseurs subaquatiques, pour raccourcir le délai de franchissement des 450 mètres déjà connus, et donc accroître le temps consacré à l'exploration, une expérience de coloration de l'eau du "Canne-Haro", dont la "participation" à la source de l'Orbiquet est probable, mais pas scientifiquement démontrée. Et... des détecteurs de gaz.

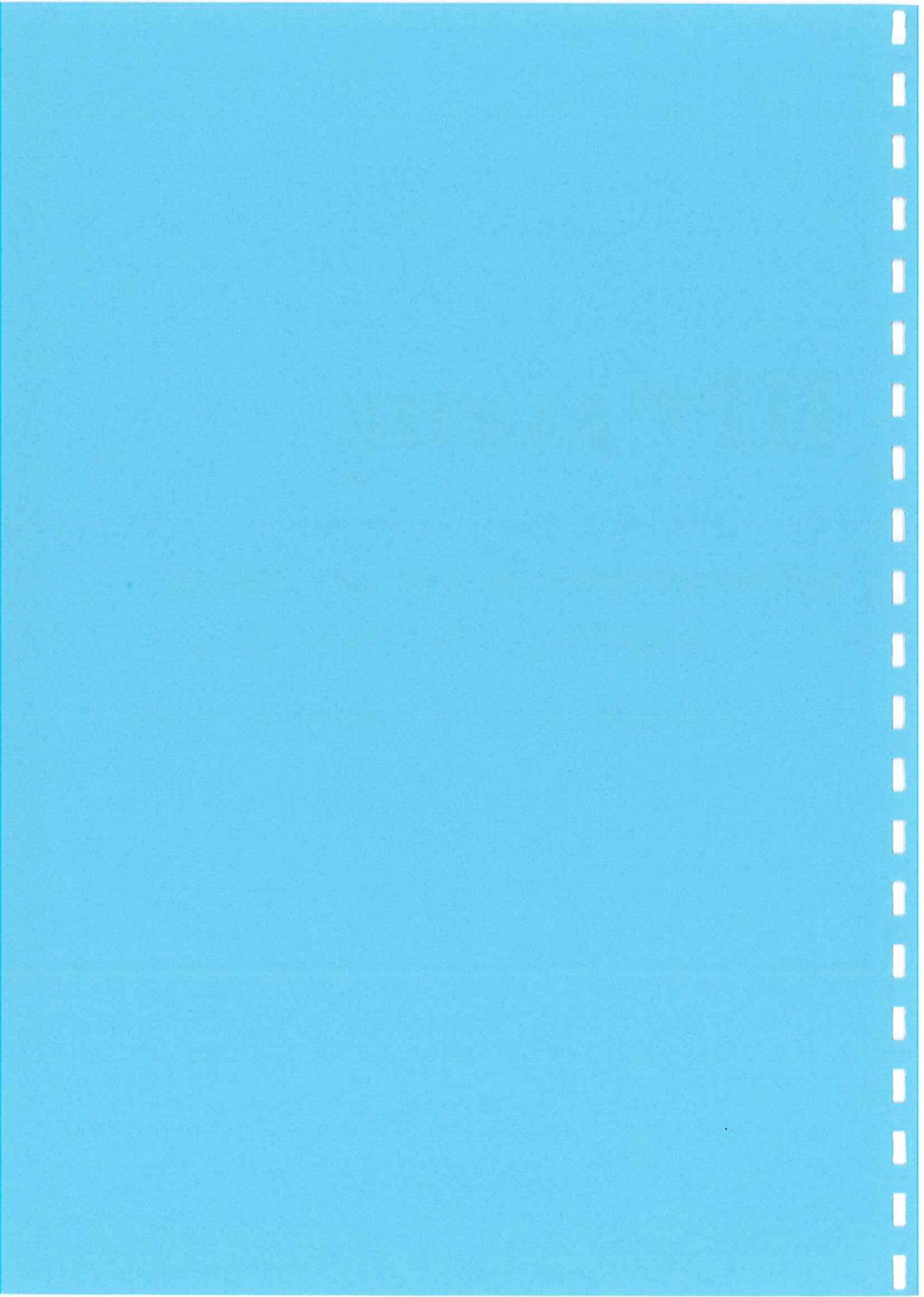
Car les plongeurs-spéléos n'osent pas ôter leur masque et leur embout respiratoire, lorsqu'ils émergent dans les deux salles les plus lointaines. L'atmosphère pourrait ne pas y être respirable : non pas de l'air, mais une poche de dioxyde de carbone, par exemple. Le cas s'est déjà produit : aussi loin sous terre, il est mortel...

III^{eme} PARTIE

LE FONCTIONNEMENT DU KARST DE L'ORBIQUET

CHAPITRE VI: APPROCHE HYDROLOGIQUE.

CHAPITRE V: APPROCHE HYDROGEOCHIMIQUE.



III^{eme} PARTIE:

LE FONCTIONNEMENT DU KARST DE L'ORBIQUET

CHAPITRE VI: APPROCHE HYDROLOGIQUE

1 INTRODUCTION

Pour les besoins de l'étude, une station hydrométrique a été placée à la Folletière–Abenon. Elle mesure les débits en continu de l'émergence de l'Orbiquet depuis le 25/11/97. La courbe de tarage qui a permis de transformer les hauteurs du plan d'eau en débit est présentée en annexe.

L'information délivrée par le débit est capitale. C'est en quelque sorte le paramètre le plus important. L'objectif est de cerner le fonctionnement de l'aquifère karstique au moyen du débit à l'exutoire. La méthode proposée suit l'approche fonctionnelle développée par Mangin (ref. biblio.). Pour cela il était souhaitable d'avoir au minimum un enregistrement des débits de la source sur un cycle hydrologique.

Pour situer le régime hydrologique de la période d'étude par rapport aux années antérieures, nous pouvons nous référer aux débits enregistrés à Beuvillers depuis 1983 par la DIREN. La figure n°9 montre que la période d'étude se caractérise par des débits très bas excepté pour le mois

d'avril 98. On observe même plusieurs mois au dessous d'une récurrence de décennale sèche (sept, oct, nov97 et fev98).

La source de l'Orbiquet se caractérise par un débit moyen de 270 l/s (sur la période du 25/11/98 au 31/08/98).

L'hydrogramme montre des pics de crue pour la plupart des événements pluvieux. Ces pics apparaissent pointus avec une décrue rapide. Le débit maximum observé sur cette période de mesure est de 1.2 m³/s le 05/01/98. Pour un tel débit, nous n'avons pas observé de débordement au trop plein de la Canne Haros.

Quelque jours après une crue, la source atteint son débit de base qui se maintient sans faiblir. La source ne montre pas de tarissement significatif durant la saison sèche (été 98). Elle possède donc d'importantes réserves qu'on ne peut qu'attribuer aux réserves de la matrice crayeuse.

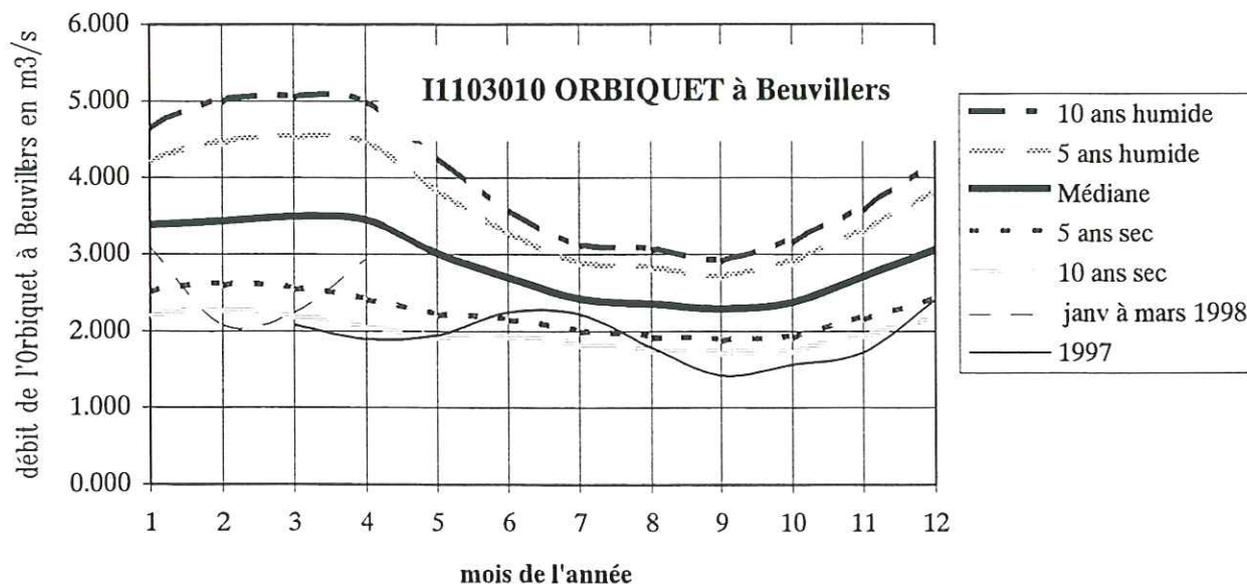


Figure n°9: Le régime hydrologique sur la période d'étude par rapport aux débits de référence à Beuvillers.

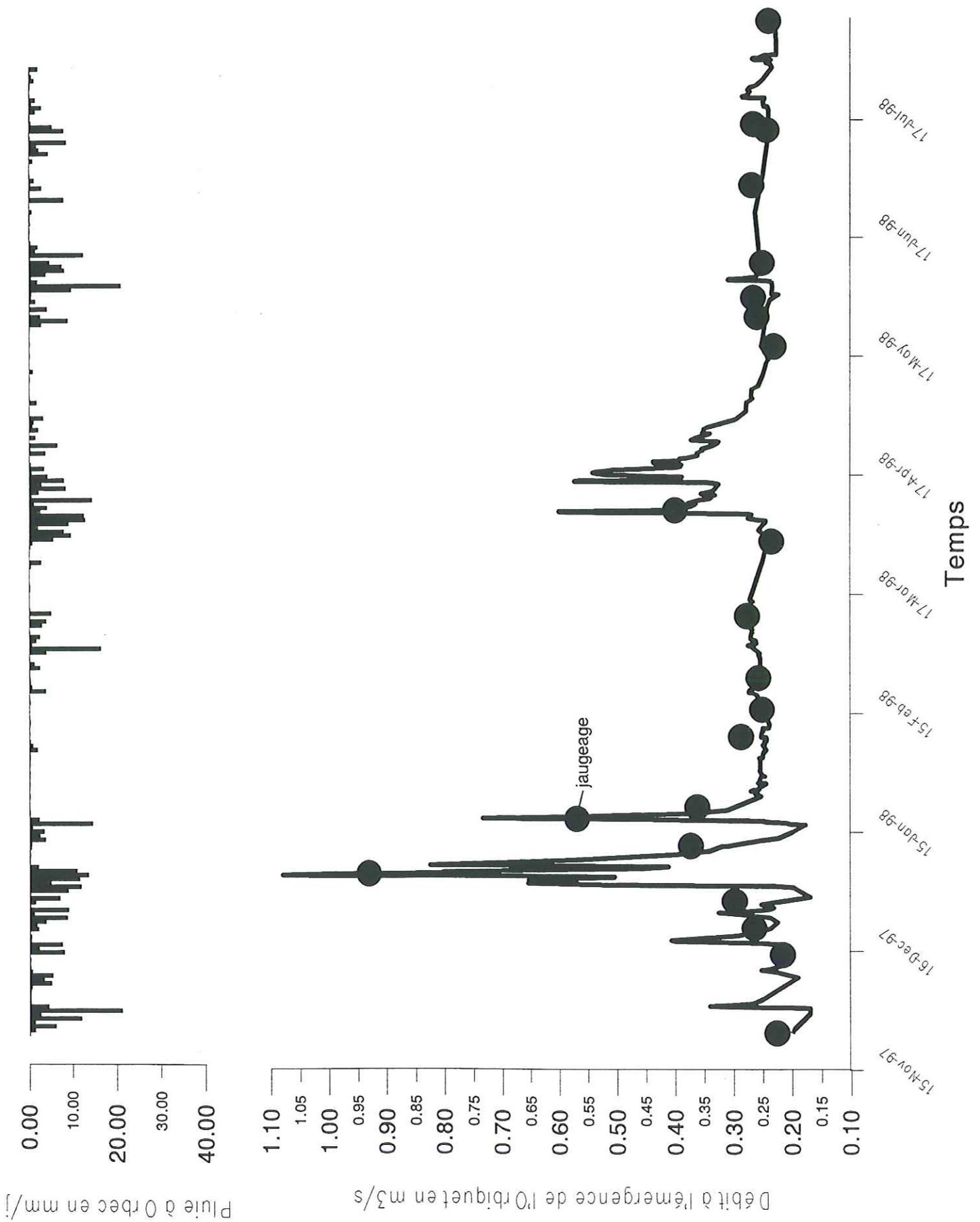


Figure n°10: hydrogramme à la source de l'Orbiquet et hyétogramme à la station du Sap.

2 COURBE DE RECESSION

L'analyse des courbes de récession renvoi à l'étude des décrues et tarissements observés sur les hydrogrammes de la source. L'aquifère est alors considéré comme un réservoir se vidangeant au travers d'un bouchon poreux. Mangin propose d'améliorer ce modèle en introduisant un deuxième réservoir qui rendra compte de l'écoulement lié à l'infiltration dans la zone non saturée. Pour ce type de modèle deux parties des courbes de récession sont alors distinguées:

- la décrue durant laquelle le débit d'infiltration influence la vidange du réservoir.
- le tarissement qui ne commence que lorsque le débit d'infiltration devient nul, et pour lequel la vidange du réservoir principal suit la loi de Maillet.

La source de l'Orbiquet se caractérise par une absence de tarissement significatif. Durant la période sèche, nous avons pas observé de chute perceptible du débit, mais un maintien quasi constant du débit de base. Cette méthode n'est donc pas applicable dans le cas de l'émergence de l'Orbiquet. Cependant nous pouvons dire que l'émergence de l'Orbiquet possède des réserves très importantes. Elles ne se situent pas au niveau du réseau karstique proprement dit (drain et systèmes annexes au drainage), mais dans la matrice poreuse de la craie.

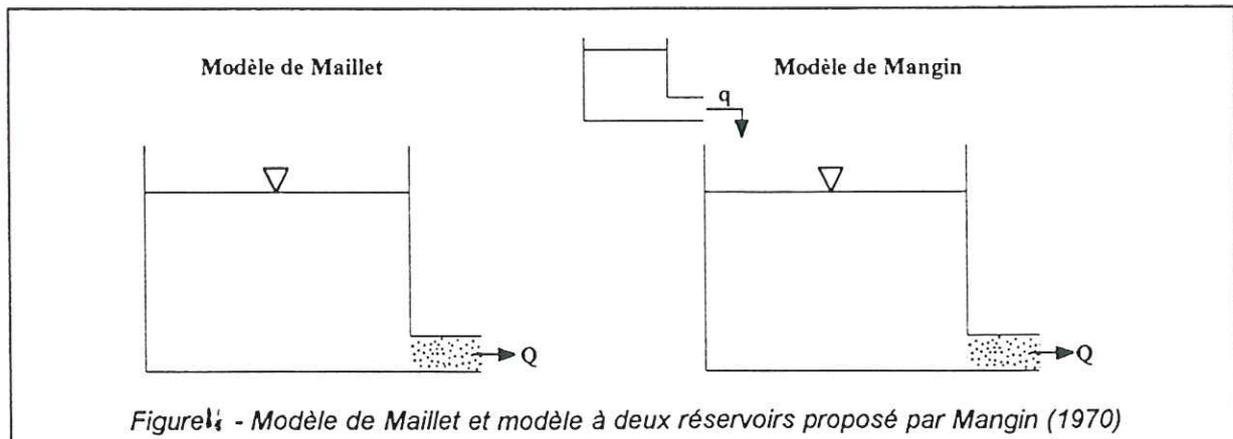


Figure 14 - Modèle de Maillet et modèle à deux réservoirs proposé par Mangin (1970)

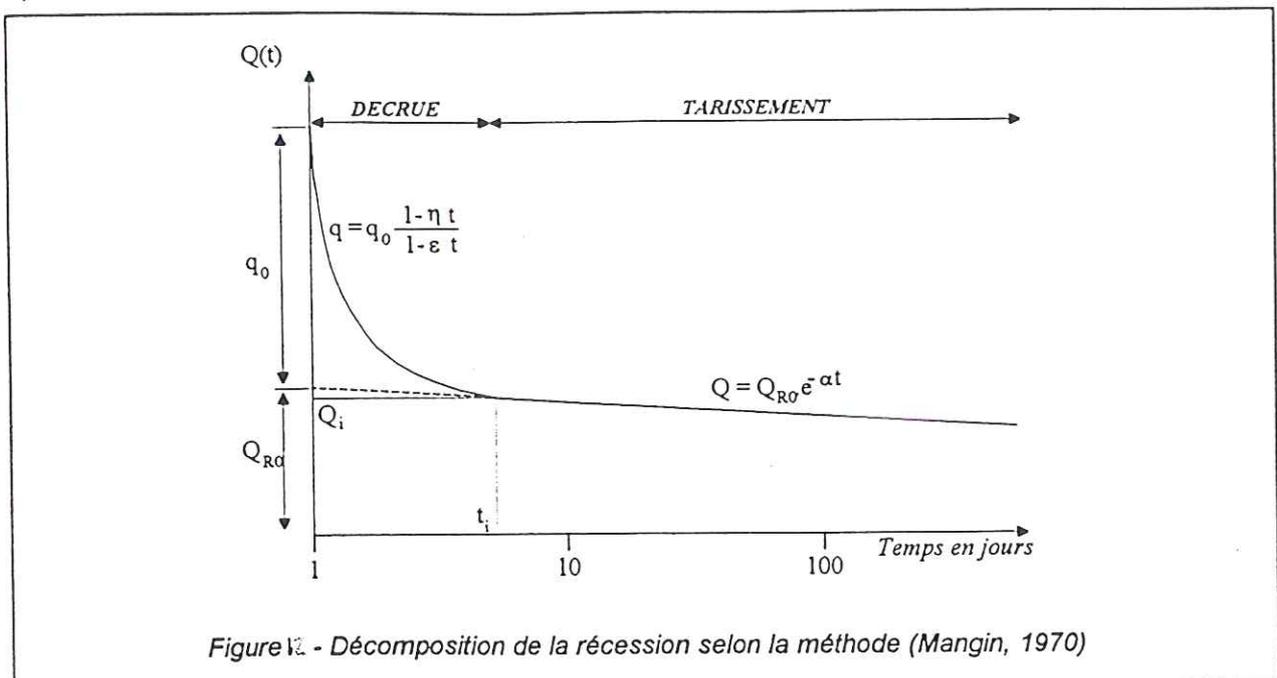


Figure 15 - Décomposition de la récession selon la méthode (Mangin, 1970)

3 ANALYSES CORRELATOIRES ET SPECTRALES SIMPLES ET CROISEES

"Cette méthode cherche à identifier les différentes composantes contenues dans la série temporelle: tendance linéaire ou non ; les réponses déterministes approchées par des séries périodiques et le bruit de fond aléatoire" d'après A.Mangin. Cette identification s'effectue à partir d'analyses statistiques, le corrélogramme et le spectre de densité de variance (qui sera mieux adapté pour décrire les composantes périodiques). Cette approche repose sur le fait qu'un système (aquifère karstique) possède un comportement de filtre se traduisant par une mémoire plus ou moins importante des événements antérieurs. Dans le cas des systèmes karstiques, ce comportement est directement lié à l'organisation de la structure de drainage et à l'importance des réserves. L'analyse corrélatrice et spectrale permettra une comparaison avec d'autres aquifères karstiques déjà classés en fonction de leur degré de karstification.

3.1 L'analyse simple

Elle est pratiquée en considérant le signal seul et permet d'identifier les composantes à l'intérieur d'une même chronique. Ce type d'analyse comprend deux outils: le corrélogramme et le spectre de densité.

3.1.1 Le corrélogramme

Il mesure l'autocorrélation (corrélation d'une chronique par rapport à elle même) selon un décalage temporel de plus en plus grand. Il donne donc une image de l'influence d'un événement quelconque sur les suivants. Il permet ainsi d'obtenir "l'effet mémoire" du système karstique qui est égal au nombre de jours correspondant à la valeur $r_k=0.2$ du corrélogramme. Cet effet mémoire traduit l'inertie de l'aquifère qui est lié à la présence de réserves karstiques et au degré de karstification.

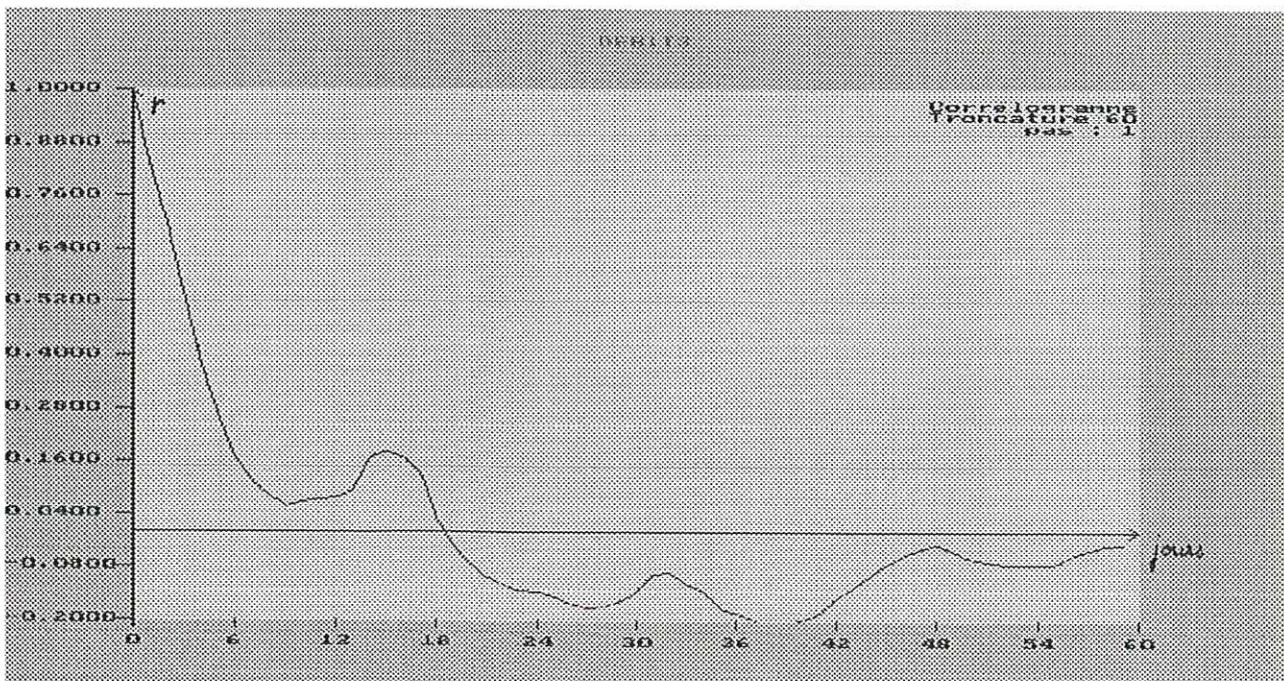


Figure n°13: corrélogramme des débits à la source de l'Orbiquet.

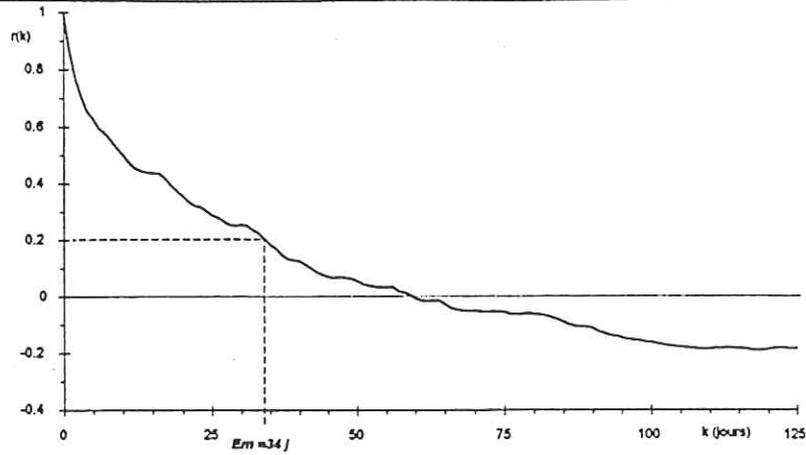


Figure 16 - Exemple de corrélogramme simple (système karstique d'Archiane)

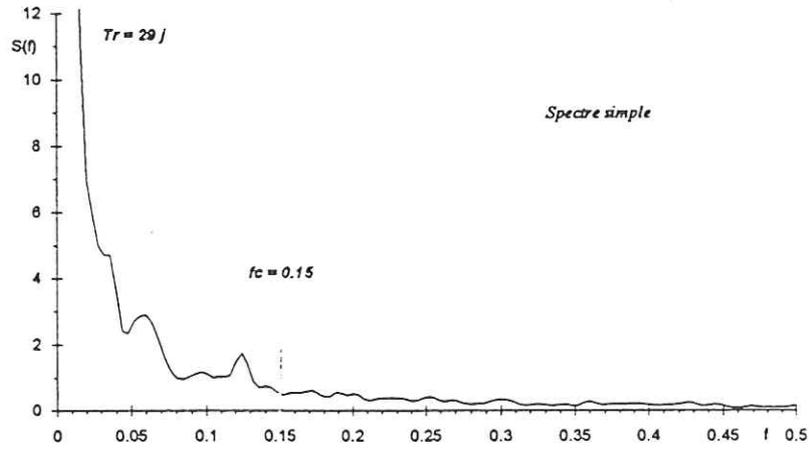


Figure 17 - Exemple de spectre simple (système karstique d'Archiane)

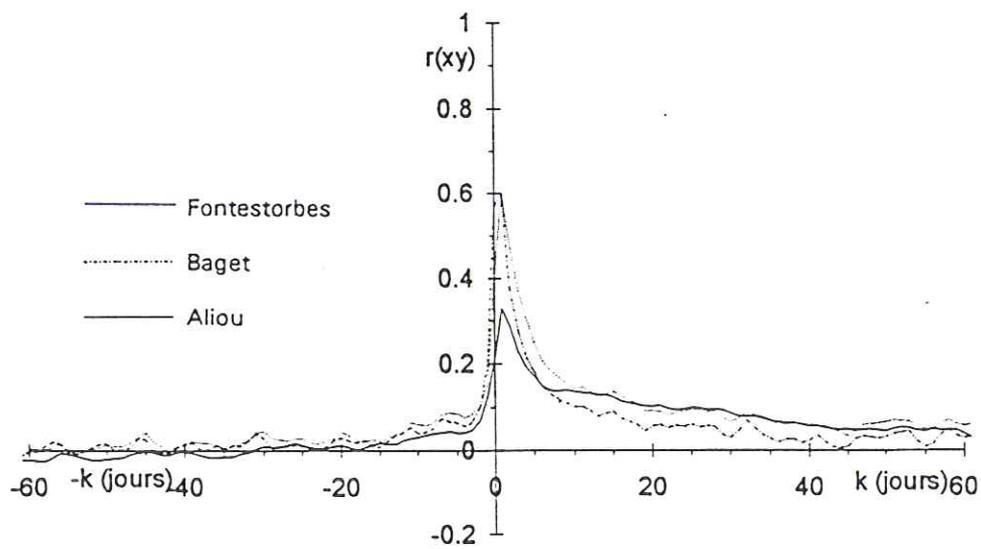


Figure 18 - Exemples de corrélogrammes croisés

On a appliqué cette méthode à la source de l'Orbiquet sur une chronique des débits allant du 25/11/97 au 31/08/98. La décroissance rapide du corrélogramme met en évidence l'évolution brève du débit de l'émergence de l'Orbiquet. De même, si l'on augmente la fenêtre d'observation ($m=125$; $k=1$), il n'apparaît pas de tendance (décroissance lente dans le corrélogramme), qui aurait traduit une évolution à long terme du débit (évolution saisonnière).

L'effet mémoire du système est obtenu pour la valeur de $r(k)=0,2$. Le corrélogramme montre un effet mémoire de 6 jours à l'émergence de l'Orbiquet. En comparaison avec d'autres sources karstiques, l'effet mémoire de la source de l'Orbiquet serait donc très faible. Les sources de référence proposées par Mangin donnent des effets mémoire allant de 4 jours pour l'Aliou (très karstifié) à 15 jours pour le Badget (moyennement karstifié) et 60 jours pour Fontestorbes (peu karstifié).

Au vu de ces résultats l'analyse corrélatrice apparaît comme un outil très intéressant. Mais ici, la chronique des débits est trop courte pour que nous puissions prendre la valeur de l'effet mémoire comme telle. Nous devons nous en servir comme d'une simple indication.

MANGIN (1982) décrit la relation entre l'effet mémoire et les réserves de l'aquifère de la façon suivante « L'effet mémoire obtenu sur une chronique de longue durée fournit une indication quant à l'importance des réserves. Si on détermine cet effet mémoire cycle par cycle, on peut alors suivre l'évolution de ces réserves ». Un effet mémoire important traduirait donc des réserves importantes et inversement. Pourtant nous notons là une contradiction dans les résultats des différentes méthodes, en effet l'absence de tarissement et le maintien d'un fort débit de base en période sèche indique des réserves très importantes alors que l'effet mémoire de la source est très court (réserves faibles).

En fait, nous analysons des réserves et des régimes d'écoulement différents. Alors que la courbe de récession analyse l'alimentation lente de l'aquifère karstique par la matrice crayeuse durant les périodes de basses eaux, le corrélogramme s'attache plutôt aux écoulements très rapides qui pourraient correspondre aux réserves stockées dans les drains ou à des pertes (voir perte du Douet Athus).

3.1.2 le spectre de densité de variance

Le spectre de densité de variance est obtenu par la transformée de FOURNIER du corrélogramme. On déplace l'analyse du domaine temporel au domaine spectral. On exprime alors la densité de variance portée par chaque fréquence. Le spectre de variance met en évidence les cycles à l'intérieur de la chronique qui sont signalés sur le spectre de variance par des pics. Il permet d'obtenir " la fréquence de coupure" qui quantifie l'inertie (ou filtrage) de l'aquifère et le "temps de régulation" (durée de l'influence d'événements pluvieux ou durée de la réponse impulsionnelle).

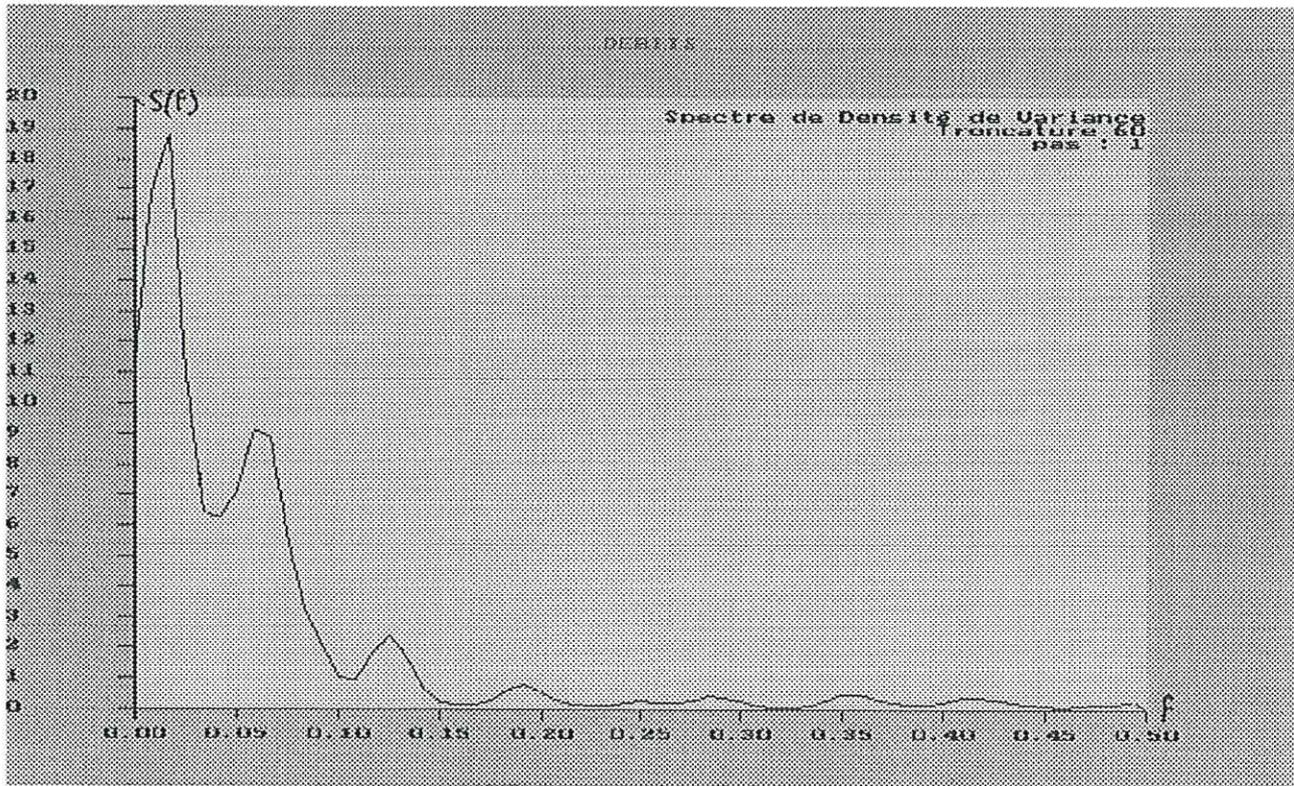


Figure n°17: spectre de variance des débits de la source de l'Orbiquet.

Des pics à 8, 17 jours apparaissent sur le spectre de variance des débits. La chronique possède donc des périodicités de ces valeurs. Ils peuvent correspondre à une structure de la pluie, qui montre également ces périodicités (voir figure n°).

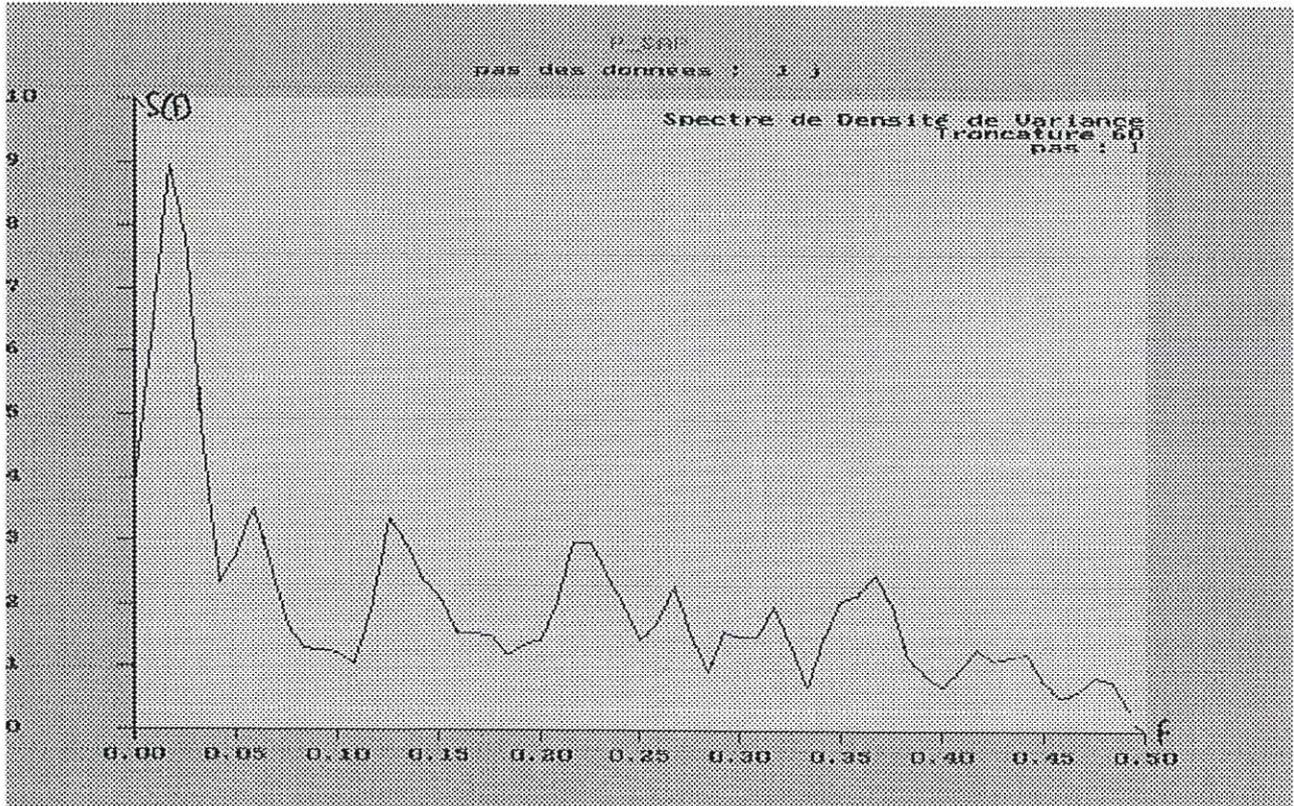


Figure n°18: spectre de densité de la pluie à la station du Sap.

La fréquence de coupure est égale à la valeur pour laquelle la densité de fréquence devient négligeable. Elle quantifie la régulation introduite par le système et donne la durée minimale que doit avoir un événement pluvieux pour influencer sur le système. La chronique des débits à la source de l'Orbiquet montre une fréquence de coupure relativement haute (0.15) à 6 jours. Cette information semble confirmée par ailleurs: la source ne répond pas aux faibles événements pluvieux.

Le temps de régulation caractérise la durée de l'influence d'un événement pluvieux sur l'aquifère karstique. C'est la longueur de la réponse impulsionnelle. Il est égal à l'ordonnée maximal du spectre divisé par deux. Pour la source de l'Orbiquet le temps de régulation est très faible. Il est en effet de 9.5 jours (19/2).

3.2 L'analyse croisée

On s'intéresse à la relation pluie-débit. Elle permet grâce au corrélogramme croisé d'obtenir une approche de la réponse impulsionnelle. Un fort développement des conduits karstiques qui revient à un drainage important par le système, se traduit par un pic important et resserré du corrélogramme croisé. Au contraire, une allure aplatie du corrélogramme révèle des systèmes mal drainés en raison d'un réseau de conduits mal développés.

Les pluies ont été prises à la station météorologique d'Orbec située environ deux kilomètres en aval de la source.

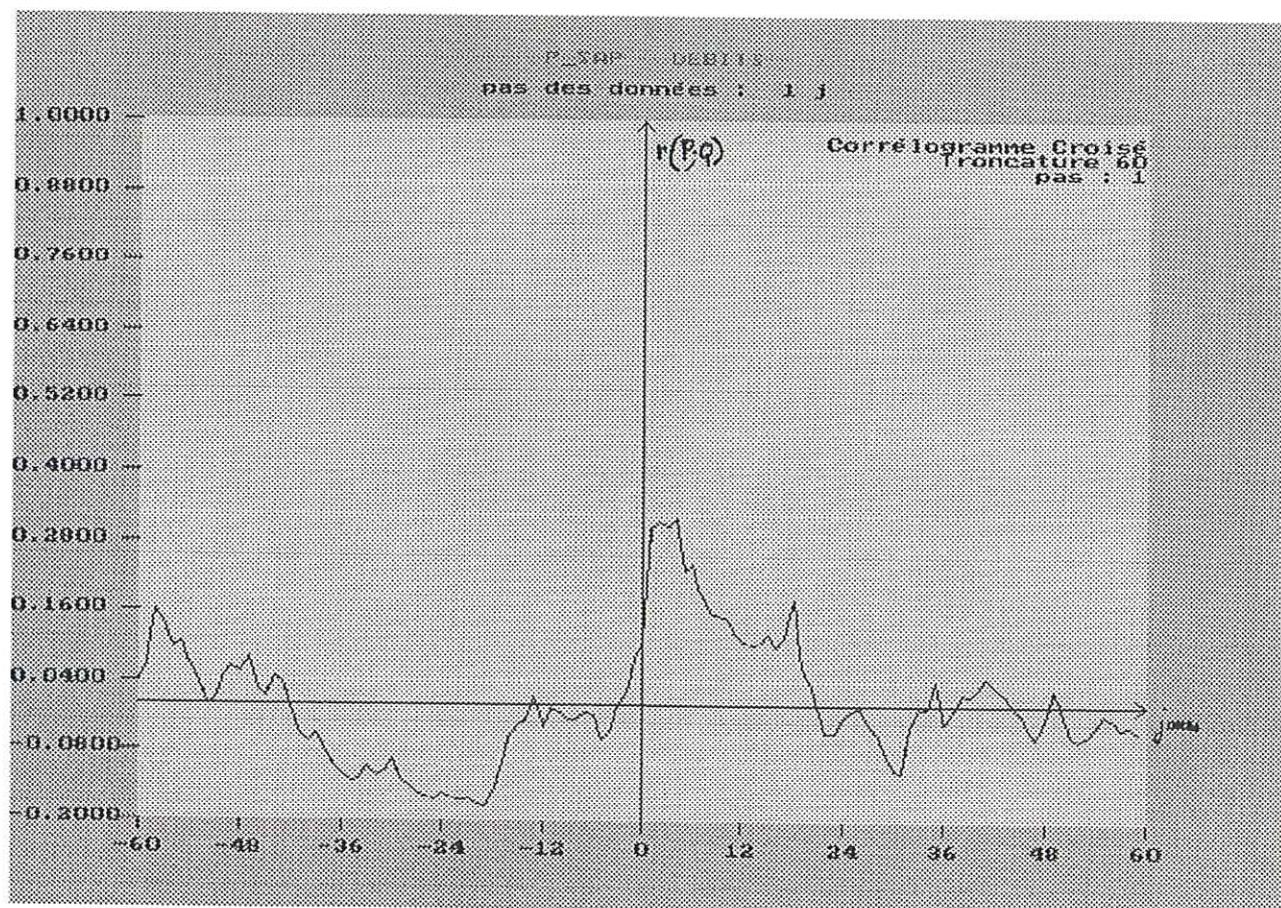


Figure n°19: corrélogramme croisé pluie-débit à la source de l'Orbiquet.

Le corrélogramme croisé pluie-débit de la source de l'Orbiquet montre une relation claire de cause à effet: le pic du corrélogramme croisé se situe dans les valeurs positives. La réponse impulsionnelle est pointue et peu étalée ce qui suggère un degré de karstification important.

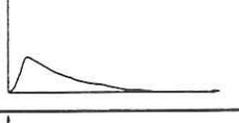
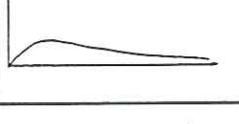
TYPES	EFFET MEMOIRE	FREQUENCE DE COUPURE	TEMPS DE REGULATION	REPOSE IMPULSIONNELLE
<i>ALIOU</i>	Réduit (5 jours)	Très haute (0,30)	10 à 15 jours	
<i>BAGET</i>	Petit (10 à 15 jours)	Haute (0.20)	20 à 30 jours	
<i>FONTESTORBES</i>	Grand (50 à 60 jours)	Basse (0.10)	50 jours	
<i>TORCAL</i>	Considérable (70 jours)	Très basse (0.05)	70 jours	

Tableau - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse corrélatrice et spectrale

CHAPITRE VII: APPROCHE HYDROGEOCHIMIQUE

1 INTRODUCTION: généralités et méthodologie.

Les éléments chimiques en solution dans l'eau sont fonction des terrains traversés, du temps de contact et des conditions physico-chimiques. Une analyse qualitative et quantitative de ces éléments dissous nous permet donc de retracer l'histoire de l'eau.

Afin d'étudier les variations du chimisme de l'eau en fonction des saisons et des événements climatologiques (pluie, température...), il est nécessaire de faire un suivi durant un cycle hydrologique. Ces variations révèlent alors des informations sur le fonctionnement de l'aquifère karstique au niveau spatial (zones d'infiltration rapide, lente et zone noyée) et au niveau temporel (hautes et basses hautes).

De nombreuses études sur différents karsts ont montré qu'une fréquence d'échantillonnage hebdomadaire dégradait peu l'information. Nous avons donc analysé la composition en éléments majeurs (HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- ; Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) de l'eau à la source de l'Orbiquet une fois par semaine. Ces analyses s'accompagnent d'une mesure sur le terrain de la conductivité, de la température et du pH.

2 ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES VARIATIONS DU CHIMISME DE L'EAU

2.1 Principe

Les résultats des analyses chimiques hebdomadaires de l'eau à la source de l'Orbiquet ont été regroupés sous la forme d'un tableau de mesures qu'il est alors possible de traiter par une analyse en composante principale (A.C.P.).

Cette méthode statistique est essentiellement descriptive. Elle présente sous forme graphique le maximum d'information contenu dans le tableau. Pour cela on positionne les variables étudiées en fonction de facteurs qui expliquent les variations relatives entre variables. le facteur 1 étant celui qui exprime le plus de la variabilité des données.

On s'intéresse essentiellement à la signification des facteurs et à la distribution des variables le long de ceux-ci. Cette recherche conduit à formuler des hypothèses sur les causes de l'évolution des variables. On obtient ainsi des renseignements sur le fonctionnement de l'aquifère.

2.2 résultats

Les résultats de l'ACP sont synthétisés par les cercles des corrélations ci dessous (voir figure n°22) pour l'ensemble des résultats: matrice des corrélations, valeurs propres, coordonnées des observations sur les axes principaux, cosinus des carrés des angles entre les données et les axes du nouvel espace.

Le facteur n°1 exprime près de 61 % de la variance. Les données sont bien réparties le long de cet axe. Il oppose les ions Cl^- , SO_4^{--} , et NO_3^- aux ions HCO_3^- et Ca^{++} . Le facteur 1 rend compte à la fois de l'origine spatiale et temporelle des substances dissoutes. On distingue en effet les éléments ayant comme origine la surface où sub-surface que sont les nitrates, les chlorures et les sulfates, aux éléments acquis au contact de la craie dans l'aquifère (HCO_3^- et Ca^{++}). L'ACP montre donc clairement la forte participation des eaux de surface et de sub-surface (marqué par les Cl^- , SO_4^{--} , et NO_3^-) au débit de l'émergence lors des crues, et l'absence de cette contribution en dehors des crues.

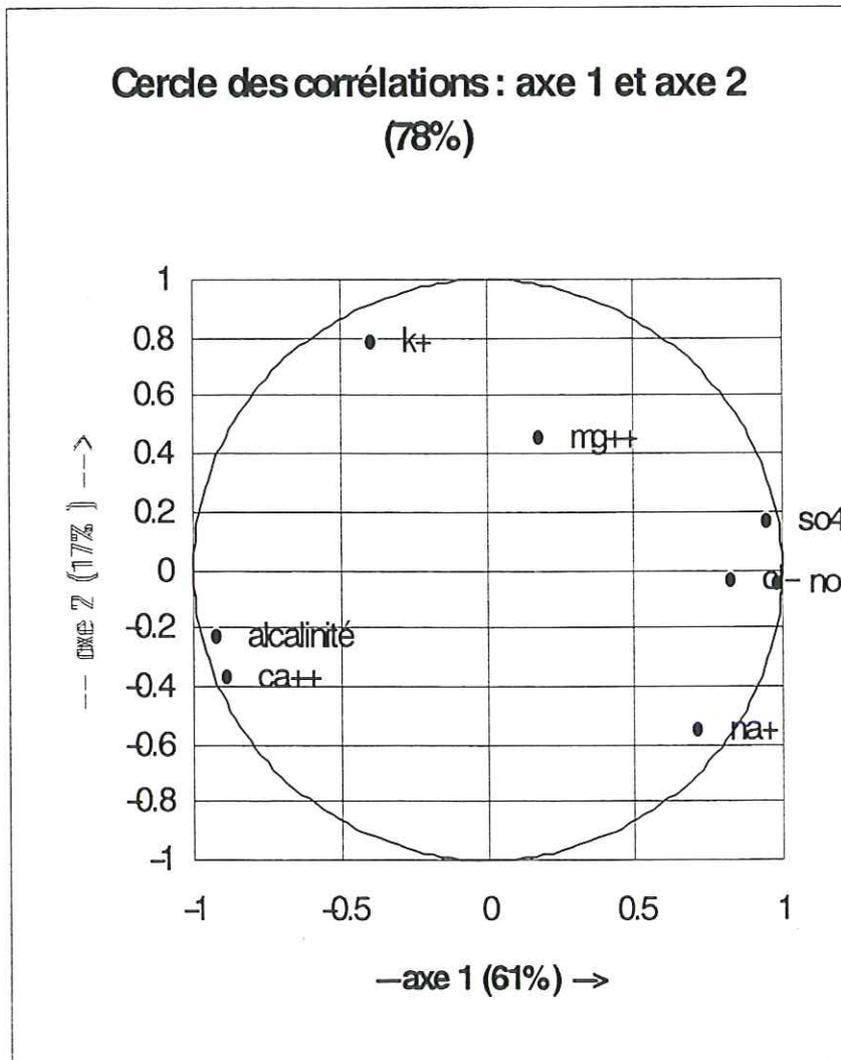


Figure n°20: ACP des éléments dissous; cercle des corrélations pour les facteurs 1 et 2.

3 RESULTATS ELEMENT PAR ELEMENT.

3.1 Les ions chlorures

Ces ions sont généralement très peu présents dans les aquifères carbonatés (sauf intrusion saline ou évaporites). Ils proviennent alors des rejets de l'élevage ou bien des précipitations qui lessivent les poussières atmosphériques (H.Scholler 1962).

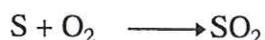
La figure n° 21 montre l'évolution des chlorures à la source de l'Orbiquet du 09/12/97 au 31/08/98. La teneur de base en chlorure se situe aux environ de 15 mg/l. Le fait le plus net est l'augmentation des chlorures durant les crues. Ainsi, pour la crue du 05 janvier 98 la concentration en chlore est passée en une semaine de 20 mg/l (le 29/12/97) à 26 mg/l (le 05/01/98) pour finalement chuter la semaine suivante à 21 mg/l. Notons que ces variations sont toujours très brèves et qu'au pas de temps auquel nous travaillons (7 jours) il n'apparaît pas de décalage temporel entre ces pics de chlore et les crues.

Commentaires des résultats

C'est un élément très conservatif, le signal de base qui est de 15 mg/l peut donc être interprété comme la teneur acquise dans les précipitations. Dans ce cas, les 24 mg/l de chlorure observés en crue signifient l'activation d'une autre source de chlorure provenant d'une pollution animale. Ces pics de chlorure durant les crues traduisent un signal de surface.

3.2 L'ion sulfate.

La combustion du charbon et du pétrole libère dans l'atmosphère une quantité importante de soufre. Il peut être à l'origine d'une partie des sulfates observés dans les eaux souterraines. En effet l'oxydation de l'anhydride sulfureux, qui est lui-même produit par l'oxydation du soufre, donne du sulfate par dissolution dans les eaux de pluie. Lorsque l'acidité est conservée jusqu'au sol, ce phénomène donne lieu aux pluies acides.



Par ailleurs, les minéraux sulfurés, tel que la pyrite (FeS_2), sont fréquemment associés aux roches carbonatées. Sur le bassin de l'Orbiquet des coupes de forage montrent la présence de pyrite dans la craie et surtout dans le banc marneux en base de celle-ci. C'est donc une autre origine possible des sulfates à la source de l'Orbiquet. La mise en solution des sulfates par oxydation de la pyrite au contact de l'eau est cependant une réaction très lente. Elle peut donc permettre d'obtenir une indication sur le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère.

Le fonctionnement du karst de l'Orbiquet

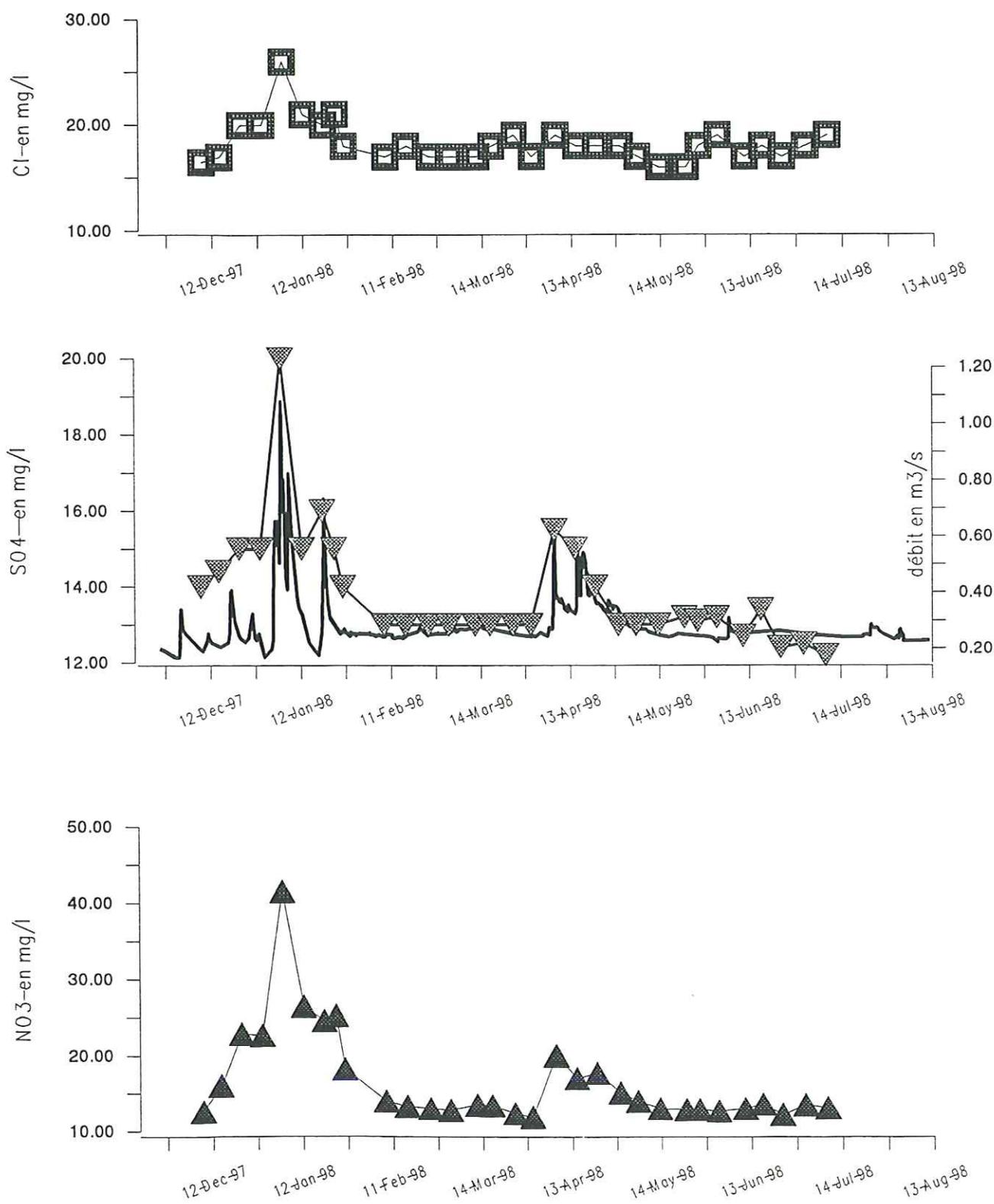


Figure n°21,22,23: évolution des teneurs en Chlorures, sulfates, et nitrates à la source de l'Orbiquet.

Enfin, une troisième source de sulfate peut se situer dans les déjections animales et les engrais dont les sulfates peuvent constituer plus de 10% de la composition.

Commentaires des résultats

Le graphique n° 22 représente l'évolution des teneurs en sulfates à la source de l'Orbiquet. Durant les crues, on observe des pics de sulfates très nets et de courte durée. Ils sont les marqueurs du lessivage des sols par les précipitations. On explique ainsi ces pics par une forte contribution d'eau d'infiltration rapide au débit à l'émergence en période de crue. Ce phénomène est par ailleurs confirmé par l'analyse en composante principale (voir figure n° 20).

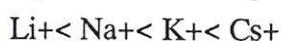
3.3 Les Nitrates.

On observe de forts pics de nitrates durant les crues (figure n°23). Ils sont d'origine superficielle et proviennent des engrais ou de la décomposition de matières organiques. Ils marquent là encore la forte participation des eaux d'infiltration rapide (surface) aux débits à l'exutoire durant les crues. La plus forte augmentation de nitrates a été observée au début de l'hiver. Les premières crues semblent donc accompagnée d'un lessivage intense des sols. Ce premier pic de nitrate en début de cycle hydrologique est de forte intensité puisque l'on observe une multiplication par quatre du taux de nitrates entre début décembre et début janvier, où il atteint 40 mg/l. Ces résultats montrent la grande vulnérabilité de l'aquifère karstique qui se caractérise par une transmission rapide et peu atténuée des pollutions de surface.

3.4 Le sodium et le potassium

Comme le chlore, le sodium et le potassium en solution peuvent provenir d'évaporites ou d'intrusion saline. Cette hypothèse n'est pas vraisemblable pour le karst de l'Orbiquet. Il existe une deuxième origine naturelle, beaucoup plus probable pour les ions Na^+ et K^+ . Ils sont en effet présents dans les minéraux argileux, produits d'altération qui se situent à la fois dans la craie elle-même et surtout dans l'argile à silex des plateaux.

Dans ce cas, le rapport Na/K fournit des informations intéressantes quant à l'échange de base au contact des argiles. En effet, il existe une affinité croissante des alcalins à l'égard des sites électro-négatifs selon la séquence suivante:



Ainsi, dans les argiles où Na^+ et K^+ occupent des sites échangeables, Na^+ aura tendance à partir plus facilement que K^+ .

Enfin, une partie des ces ions sont d'origine agricole (élevage, engrais).

Résultats à la source de l'Orbiquet.

Les variations observées pour ces deux éléments sont de l'ordre de l'imprécision des méthodes analytiques. Il nous est donc défendu d'interpréter quelconque phénomène à partir des variations de ces éléments.

3.5 Le système carbonate CO₂-H₂O-CO₃.

L'écart entre le pH mesuré et le pH d'équilibre calculé, traduit la saturation de l'eau vis à vis du carbonate de calcium dissout. Lorsque l'écart entre ces deux pH est compris entre -0.1 et +0.1 on considère le système comme étant à l'équilibre, en dessous de -0.1 on atteint le domaine de la sous-saturation.

Le Δ pH observé à la source de l'Orbiquet montre toujours une forte sous-saturation de l'eau. Cette sous-saturation augmente encore très nettement durant les périodes de crue. On peut expliquer ce phénomène par l'apport rapide d'eau d'infiltration dans le débit à l'exutoire. De telles conditions favorisent la dissolution de la craie et l'apparition de vides.

Le système carbonaté à la source de l'Orbiquet

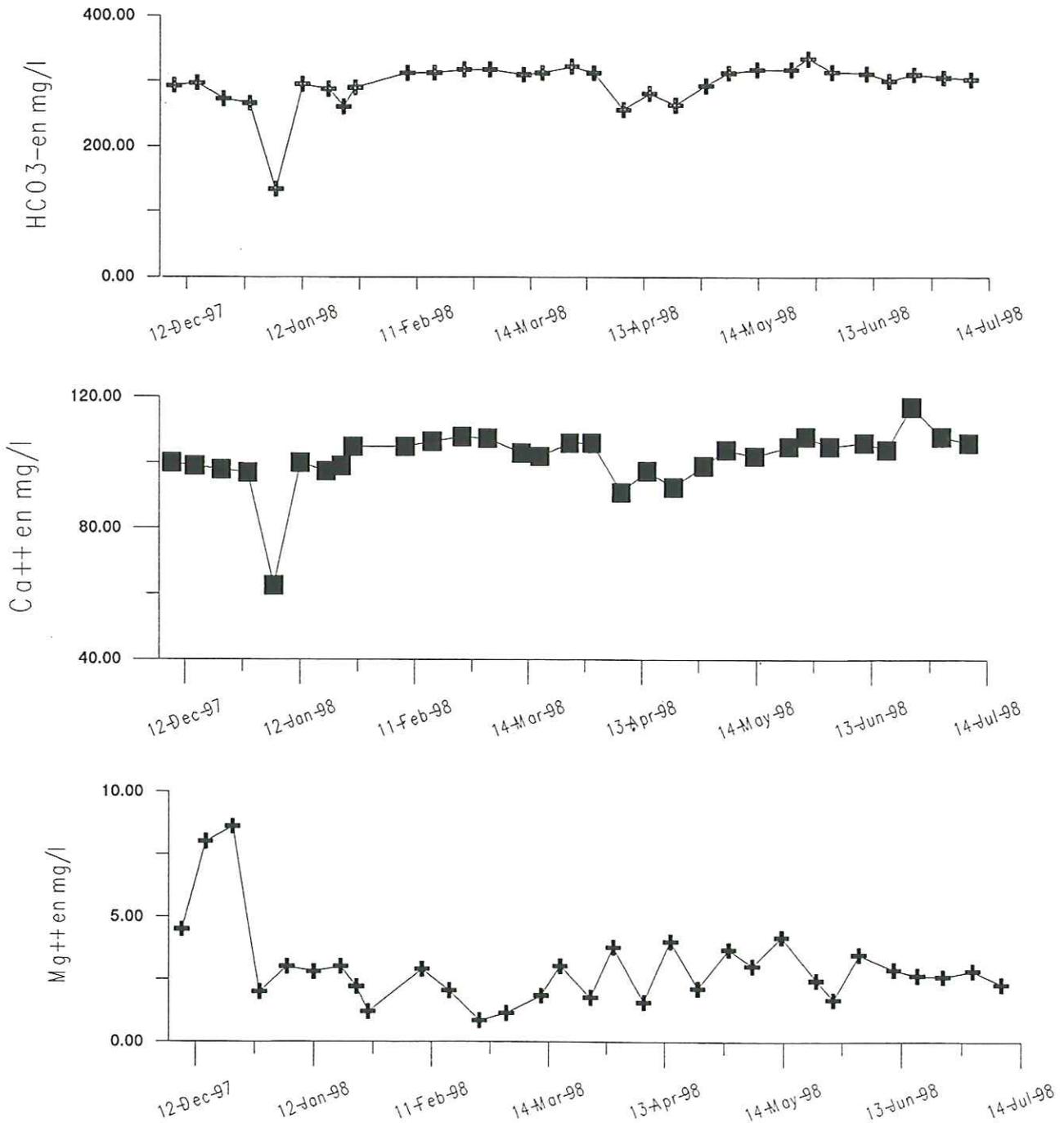


Figure n°24, 25, 26: évolution des teneurs en carbonate, en calcium, et en magnésium de l'eau à la source de l'Orbiquet.

4 VARIATION DU CHIMISME DE L'EAU DURANT UNE CRUE

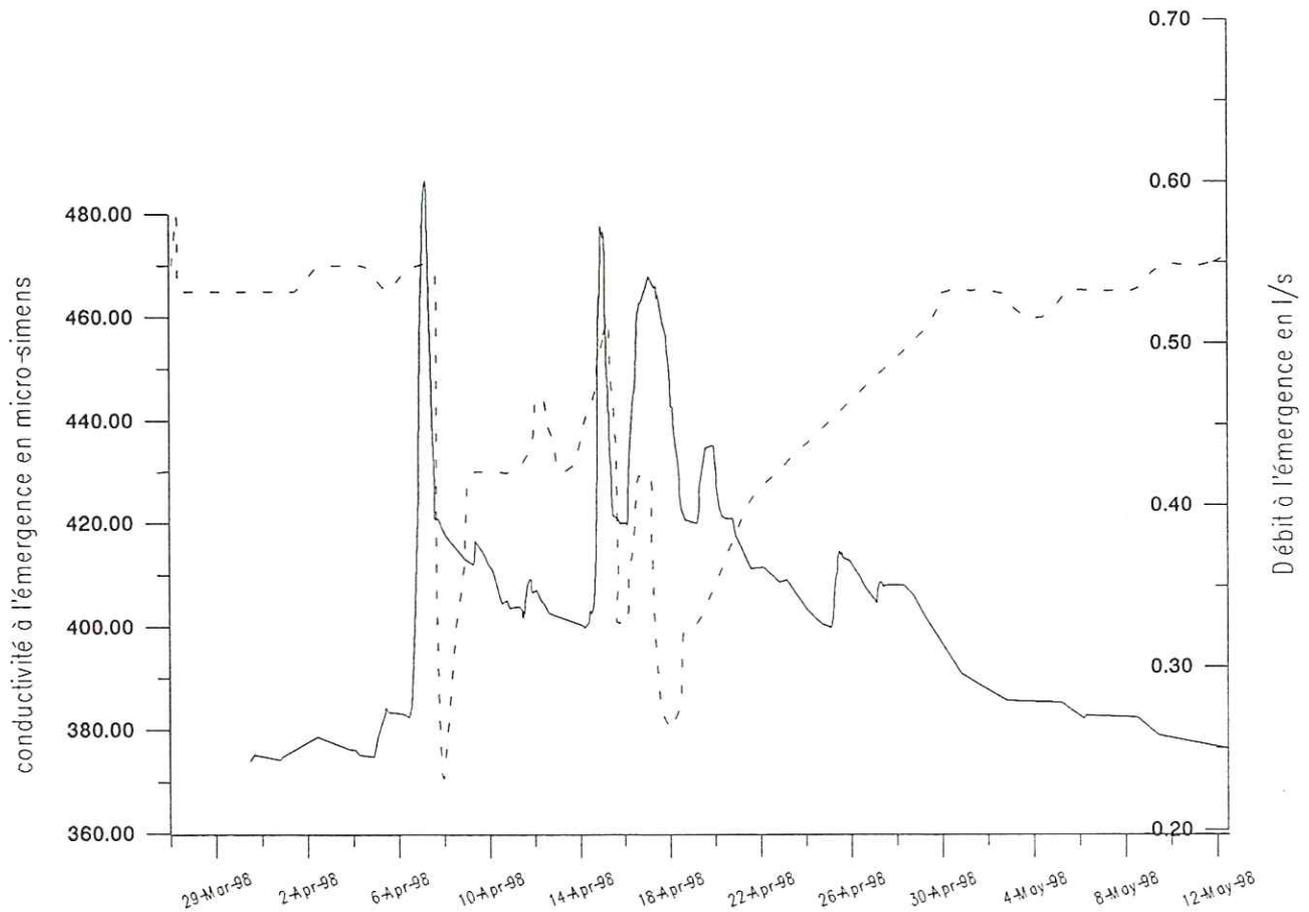


Figure n°27: variation de la conductivité à l'émergence de l'Orbiquet durant les crues.

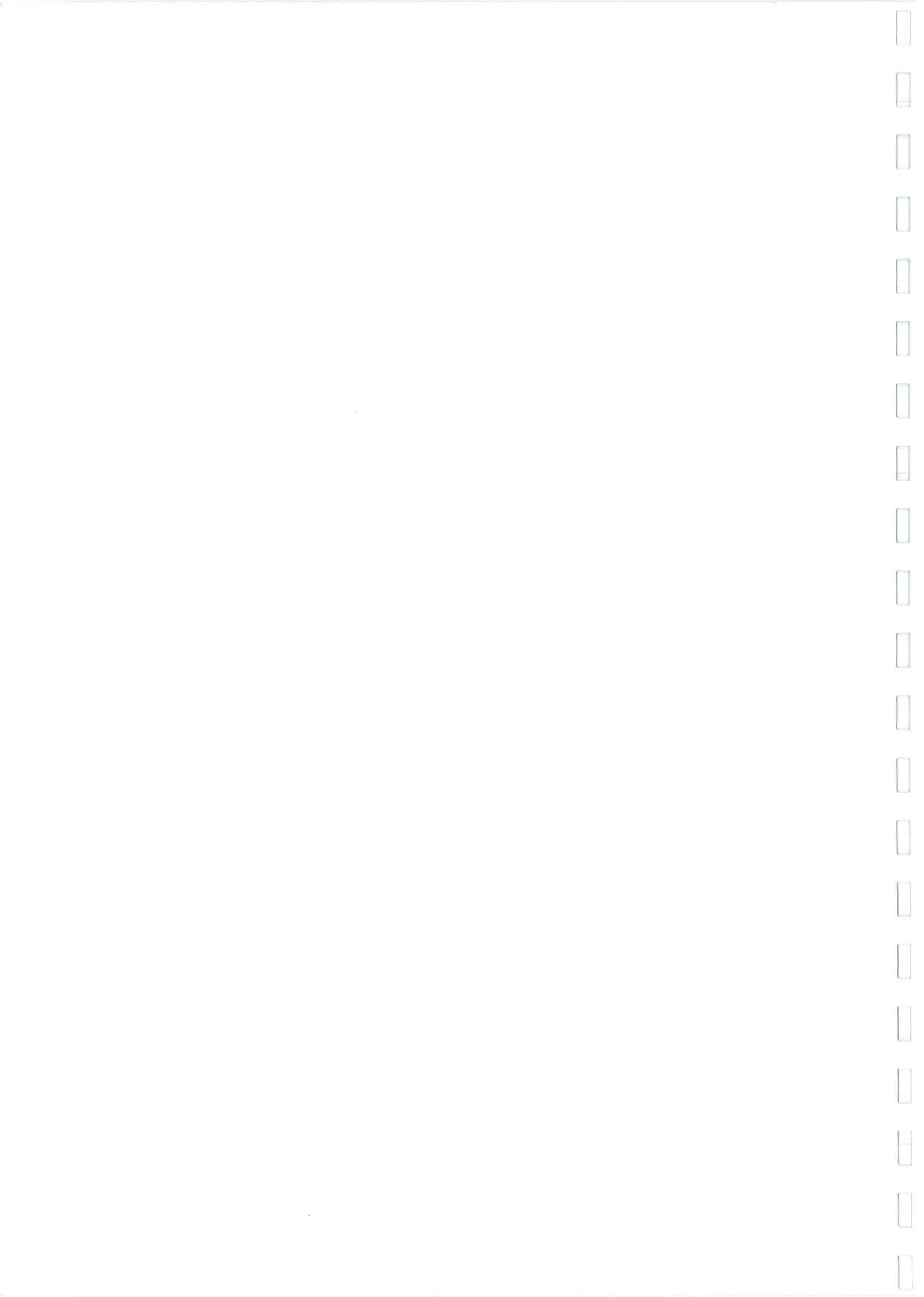
Durant les crues le conductimètre de terrain qui était placé à l'émergence a enregistré des variations de la conductivité atteignant jusqu'à 100 µs. On a pu ainsi observer du 29 mars au 12 mai que la conductivité qui atteignait en 470 µs pour un débit de base a chuté brutalement à chaque pointe de crue. On explique ces chutes de la minéralisation par l'apport d'eau de surface qui sont moins minéralisées que les eaux souterraines, au débit de l'émergence durant les crues.

5 CONCLUSION

L'analyse en composante principale fait ressortir l'hétérogénéité spatiale et temporelle de l'alimentation de l'aquifère karstique de l'Orbiquet. Elle oppose en effet des eaux d'origine superficielle qui marquent les ions Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} et qui interviennent lors des crues, à des eaux ayant séjourné dans l'aquifère, chargées en Ca et HCO_3^{--} et dominant très nettement en dehors des périodes de crues.

Cette forte contribution d'eau de surface ou de sub-surface lors des crues est marquée sur les histogrammes montrant l'évolution de chaque élément majeur dans le temps par des pics en chlorures, nitrates et sulfates. Ces apports de surface sont également mis en évidence par une importante chute de la conductivité que l'on a pu noter au cours des crues.

Durant tout le cycle hydrologique, les eaux de l'Orbiquet se caractérisent par une sous-saturation forte qui fournit ainsi des conditions favorables à la dissolution de la craie. Mais lors des crues, on observe des valeurs particulièrement négatives de ΔpH traduisant une sous-saturation très forte. C'est le résultat du parcours rapide des eaux d'infiltration rapide qui sont fortement sous-saturées vers l'exutoire.



IV^{eme} PARTIE

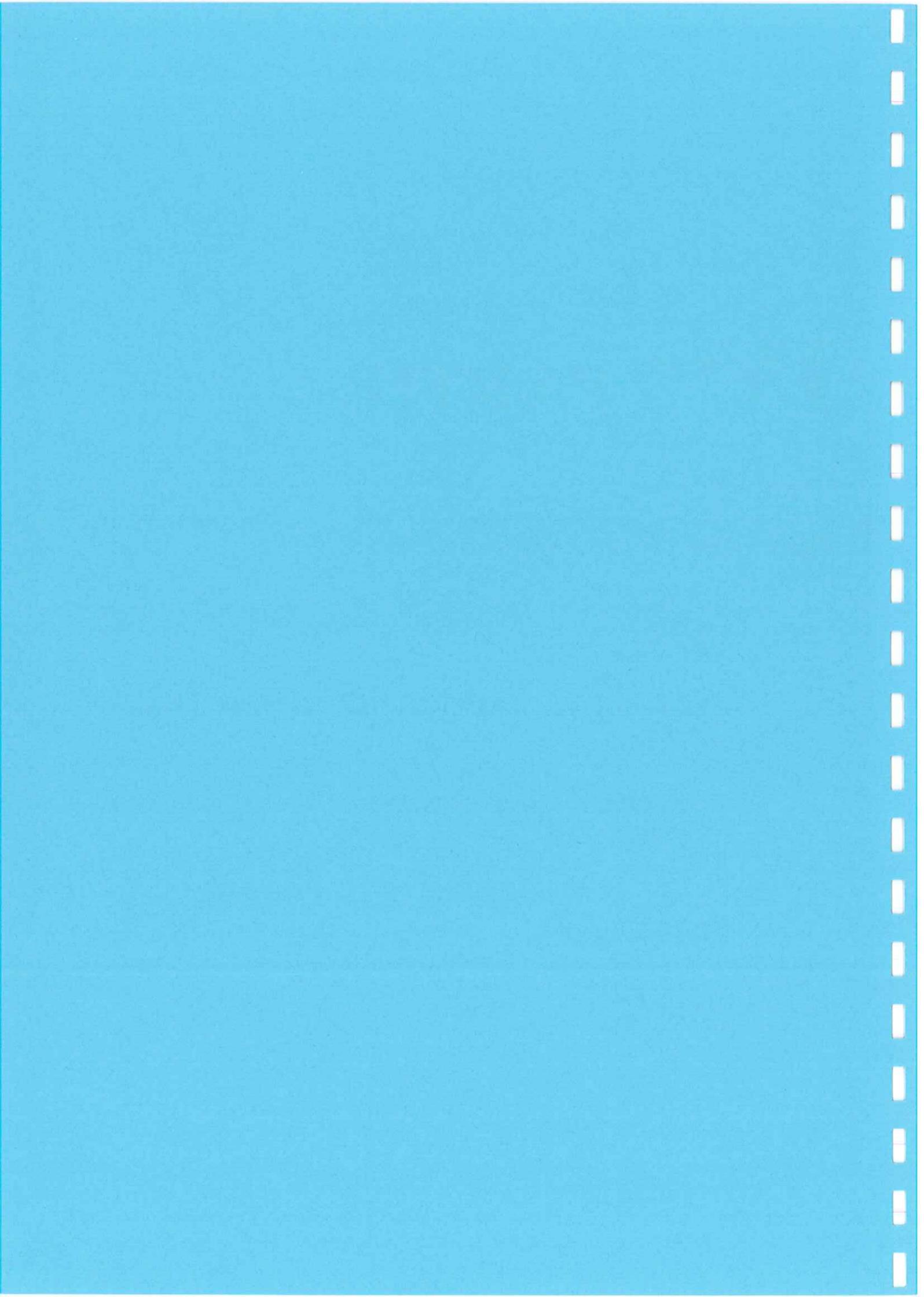
TRACAGES ARTIFICIELS

CHAPITRE VIII: TRACAGE A PARTIR DE LA CANNE HAROS.

CHAPITRE IX: TRACAGE A PARTIR DU DOUET ARTHUS

CHAPITRE X: TRACAGE A PARTIR DU RUISSEAU DU GRAND FOSSE.

CHAPITRE XI: SYNTHESE DES DIFFERENTS TRACAGES



IV^{eme} PARTIE:

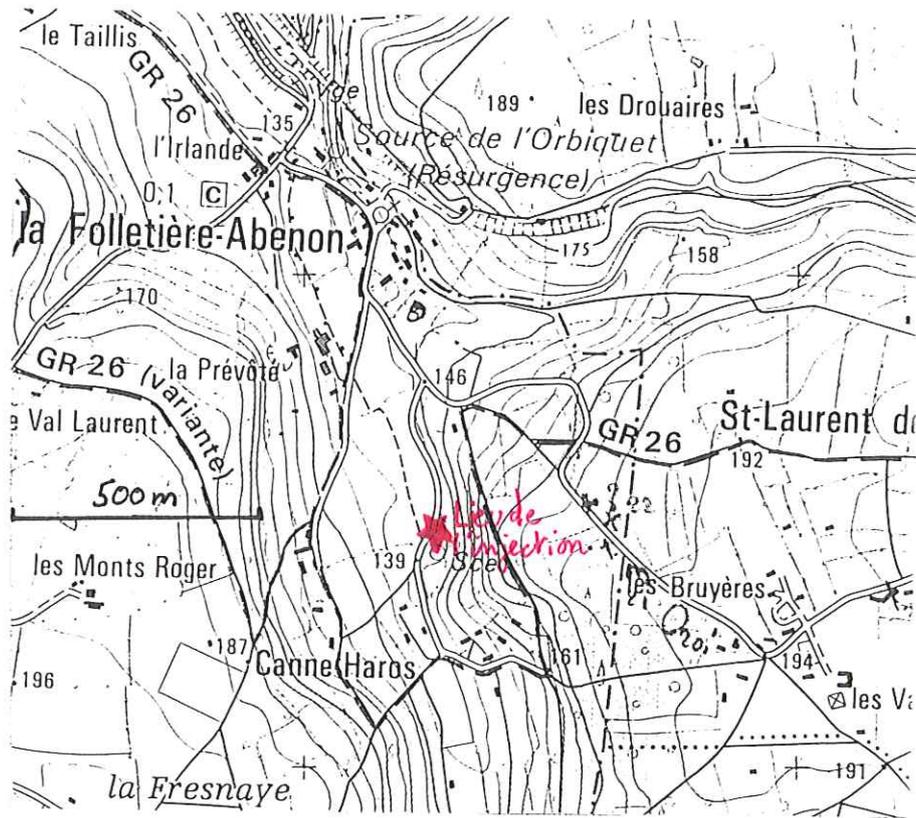
TRACAGES ARTIFICIELS

CHAPITRE VIII: LE TRACAGE A PARTIR DE LA CANNE HAROS

I MISE EN OEUVRE

1.1 Localisation de l'injection

Le traceur a été injecté à partir du point d'eau au lieu dit de la Canne Haros. L'injection a eu lieu mercredi 11 mars 98 à 12h20 et a duré 20 minutes. L'emplacement est indiqué sur la carte n°7 où il est décrit comme une source. Sur le terrain, on s'aperçoit qu'il s'agit actuellement d'une cavité circulaire qui se positionne dans le fond de la vallée sèche et au fond de laquelle se trouve une conduite d'eau en circulation. Elle est profonde d'environ quatre mètres. Son diamètre atteint environ trois mètres au sommet alors qu'il se réduit à cinquante centimètres en son point bas.



Carte n°7: lieu de l'injection, trop plein de la canne haros.



Photo n°12: le trop plein de la Canne Haros.

1.2 Conditions de l'injection

L'injection a suivi une période de faible pluie. Cependant, l'hydrogramme à la source de l'Orbiquet montre que cette pluie n'a eu qu'un faible impact sur le système karstique. Elle n'a engendré qu'une très légère augmentation du débit de la source. Au moment de l'injection le niveau de l'eau à la Canne Haros était bas (voir photo n°13).

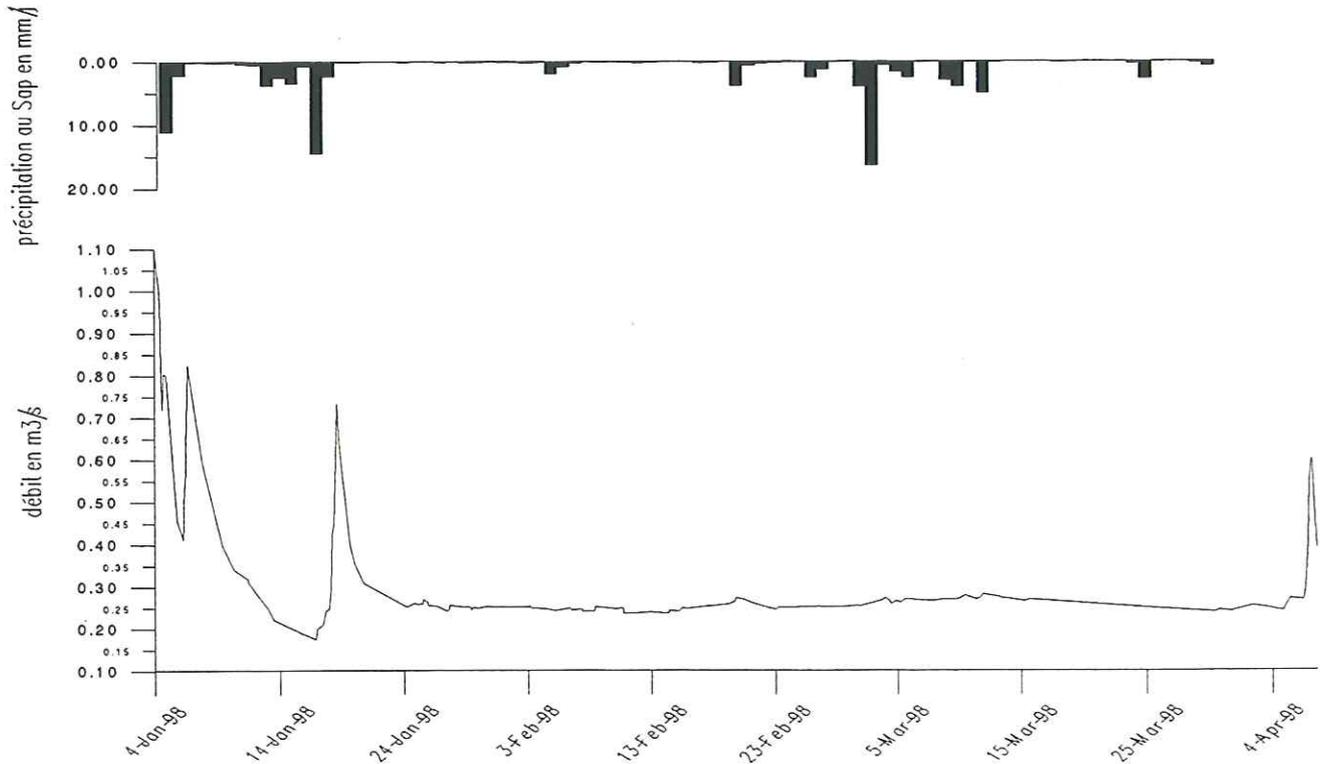


Figure n°28: hyétogramme à la station du Sap et hydrogramme à la source de l'Orbiquet du 4 janvier au 4 avril 98.

1.3 Produit utilisé, quantité injectée, type d'injection

Le traceur retenu pour l'expérience est l'uranine. Il s'agit d'un traceur fluorescent qui donne à l'eau une couleur verte lorsqu'il est en très forte concentration. Ce traceur est fréquemment utilisé en hydrogéologie car il est détectable à des seuils très bas par les instruments de mesures. Par ailleurs ce colorant est inerte, non toxique, et se dilue facilement.

Nous avons injecté 300 grammes d'uranine à la Canne Haros. Elle avait été au préalable mélangée dans une solution comprenant 300 ml d'alcool et 300 ml d'ammoniaque.

Pour simuler une impulsion de type DIRAC, nous nous sommes efforcés d'injecter le traceur en un temps le plus bref possible. L'injection du traceur a duré 20 minutes. Ce temps peut être considéré

comme court. L'injection est donc de type DIRAC. Elle nous permettra d'avoir la réponse impulsionnelle du système.

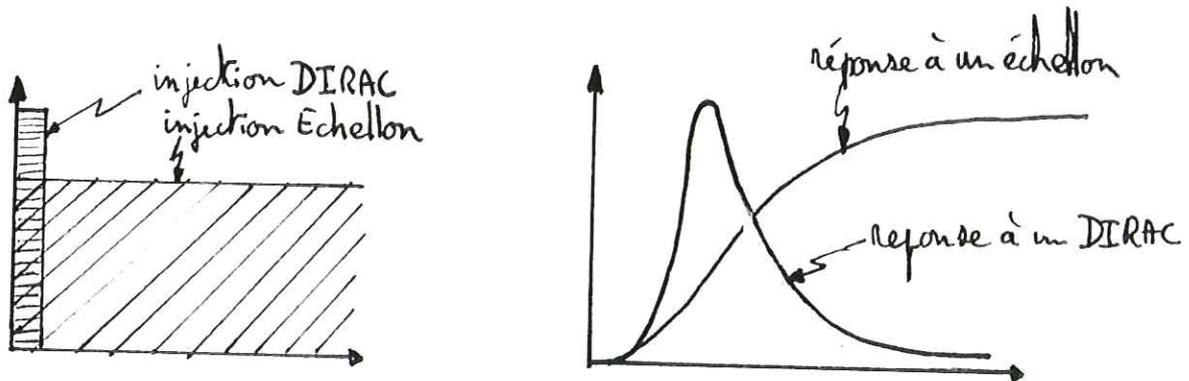


Figure n°29: injection de type DIRAC et de type échelon.



Photo n°13: injection du traceur (uranine) à la Camne Haros.

2 LES RESULTATS DU TRACAGE

La source de l'Orbiquet a été équipée d'un fluorimètre FL100 *data-link*, qui a mesuré la fluorescence en continu. Ce fluorimètre nous permet donc de faire un suivi quantitatif de la restitution du traceur. Il a clairement enregistré le passage du nuage à la source de l'Orbiquet.

Durant l'expérience, le fluorimètre a mesuré la fluorescence avec un pas de temps régulier de cinq minutes. Cette approche quantitative s'avère extrêmement riche en informations. Elle permet d'obtenir un grand nombre de paramètres hydrocinématiques et notamment la distribution des temps de séjour du traceur à l'intérieur du système karstique. Les paragraphes suivants sont consacrés à la définition et au calcul de ces paramètres d'après LEPILLER M et MONDAIN PH. (1986).

Paul Henic

2.1 Courbe de restitution

Elle décrit l'évolution de la concentration du traceur à l'émergence en fonction du temps. Le fluorimètre retranscrit directement la mesure de la fluorescence en concentration de uranine, par l'intermédiaire d'une courbe d'étalonnage (voir annexe). La courbe de restitution de l'uranine injectée à la Canne Haros montre une allure pointue avec de fortes valeurs. Ceci nous permet déjà de dire que le traceur a circulé rapidement dans les conduits karstiques, sans rencontrer d'obstruction majeure.

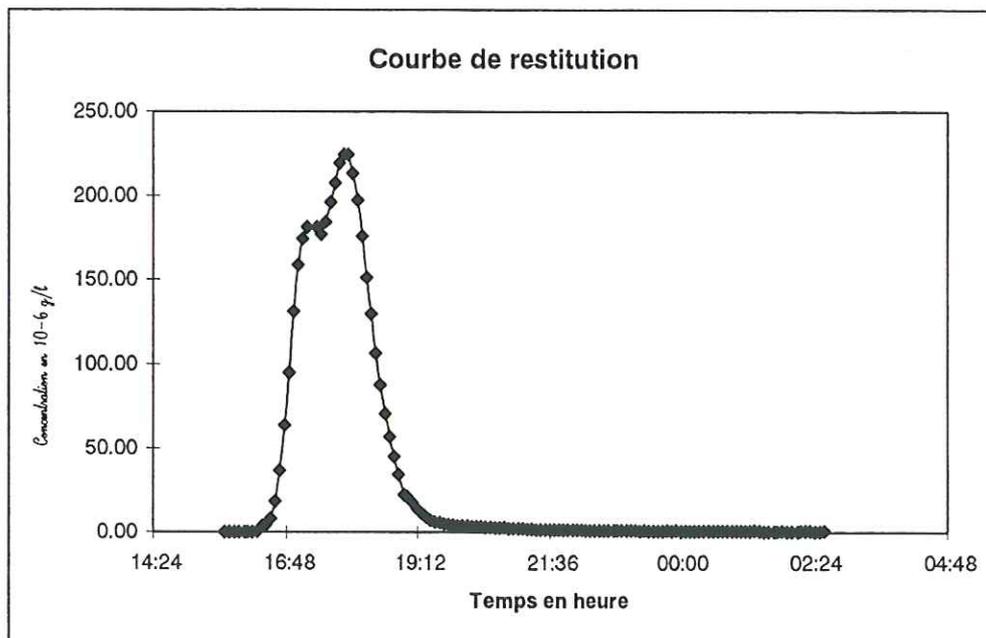


Figure n°30: courbe de restitution à l'émergence de l'Orbiquet, du traceur injecté à la Canne Haros.

- **Temps de transit des particules les plus rapides.** La courbe de restitution permet de déterminer le temps et la vitesse de transit des molécules de traceur les plus rapides. Il correspond au temps écoulé entre l'instant de l'injection et celui du début de restitution.

Temps de transit des particules les plus rapides=4 heures et 4 minutes.

- **La durée de la restitution.** C'est le temps écoulé entre l'instant du début et celui de la fin de la restitution. La restitution est considérée comme terminée lorsque la concentration des échantillons s'apparente au bruit de fond.

Temps début rest. – temps fin rest= 7 heures

- **Le temps modal.** C'est le temps de transit entre l'instant de l'injection et celui du maximum de concentration observé.

Temps modal= 5 heures et 36 min

- **La vitesse modale.** C'est la distance entre le point d'injection et le point d'observation divisé par le temps modal. On a considéré que la distance entre le point d'injection et le point de réapparition correspondait au segment de droite entre ces deux points. Ce qui revient à sous-estimer cette distance et la vitesse modale.

Vitesse modale=152 m/h

- **Vitesse des particules les plus rapides.** C'est la distance parcourue/temps de transit des particules les plus rapides=212 m/h.

- **La concentration maximale d'uranine.** C'est le pic de la courbe de restitution observée à l'émergence. Elle est de 224 ppb soit 0.22 mg/l

- La concentration moyenne d'uranine durant le passage de l'ensemble du nuage

Elle correspond à l'intégrale $C_m = \int_{dr} \frac{C(t)dt}{Tr}$. Elle est ici de 47.8 ppb.

- Volume d'eau écoulé pendant la restitution est égal au produit du débit par le temps de restitution.

$$Q \cdot Tr = 1.96 \text{ m}^3$$

2.2 Le flux massique du traceur

Le flux du traceur qui passe à l'exutoire est donné par le produit du débit par la concentration. On peut ainsi tracer la courbe de flux à l'exutoire.

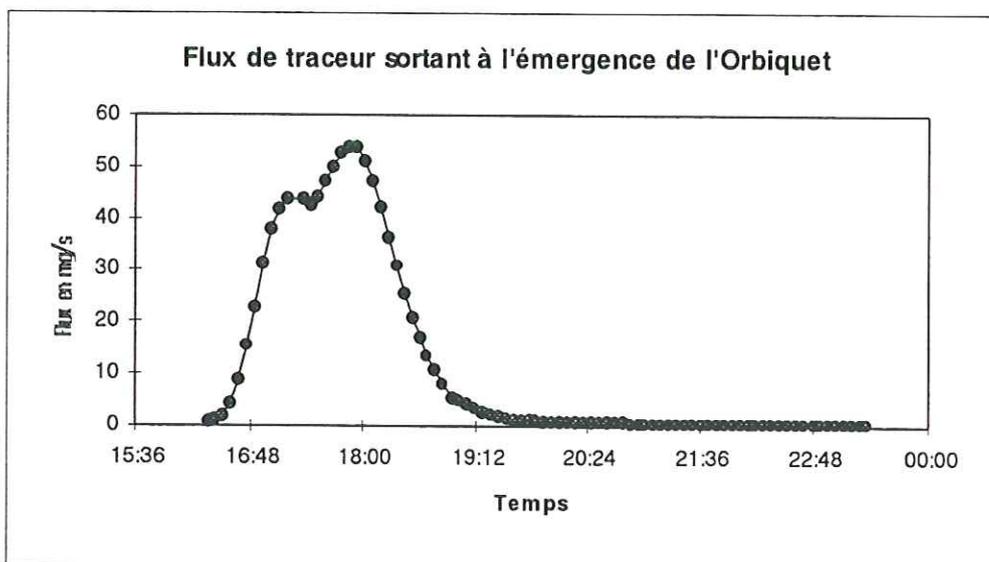


Figure n°31: le flux massique du traceur à l'émergence.

- masse de traceur restitué à l'exutoire L'intégration de cette courbe de flux donne la masse de

traceur restitué à l'exutoire.

$$Mr = \int_{dr}^{fr} Q(t) * C(t) dt$$

masse restituée = 292 g

- **Le taux de restitution du traceur à l'émergence** Il est donné par le rapport entre la masse restituée et la masse initialement injectée.

taux de restitution 97%

2.3 La distribution des temps de séjours

La distribution des temps de séjours représente la fonction de densité de probabilité qu'a une molécule d'eau de séjourner dans le système. Nous avons réalisé une injection de type DIRAC. On peut donc considérer que la DTS donne directement la réponse impulsionnelle du système traçage à l'instant du traçage.

Elle correspond à: $h(t) = \frac{C(t) * Q(t)}{\int C(t) * Q(t) dt} = \frac{DTS}{Mr}$

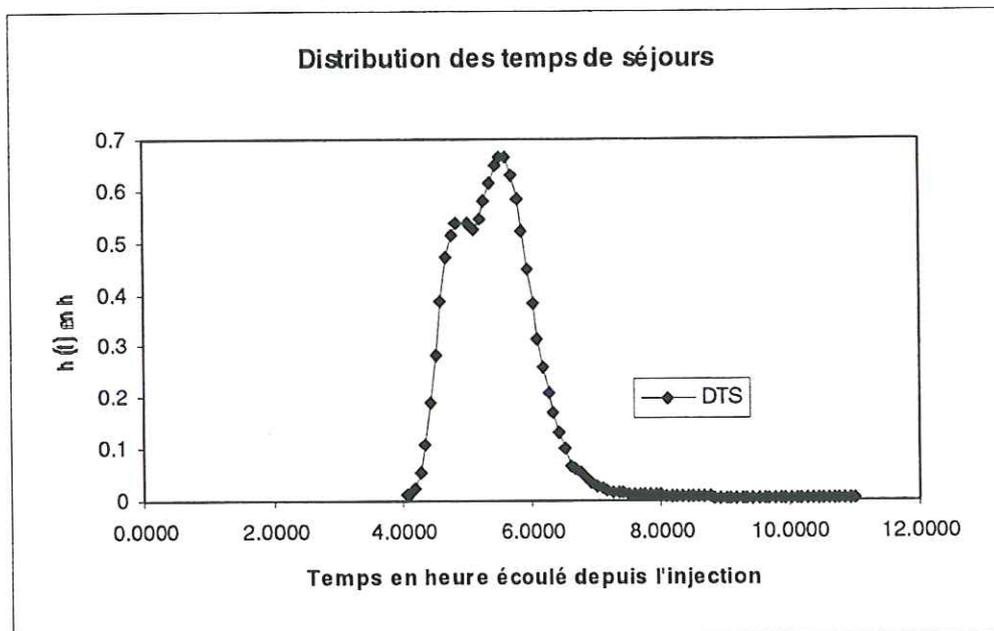


Figure n°32: distribution des temps de séjours pour le traçage à partir de la Canne Haros.

Traçages artificiels

- **Le temps moyen de séjour.** Il correspond à l'abscisse du centre de gravité du nuage.

$$Tms = \int_{dr}^{fr} t * h(t) dt$$

temps moyen de séjour = 5h 30 minutes

- **La vitesse moyenne de transit.** Cette vitesse prend en compte tous les phénomènes susceptibles d'affecter le traceur au cours de son parcours souterrain: diffusion, dispersion, adsorption. C'est une vitesse hydrocinématique. Elle est donnée par:

$$Vm = D * \int_{dr}^{fr} \frac{h(t) dt}{t}$$

vitesse moyenne de transit = 157 m/h

- **La vitesse apparente de transit .** Cette vitesse ne tient pas compte des phénomènes de dispersion, d'adsorption, de dispersion. Elle reflète le déplacement du nuage dans son ensemble. C'est une vitesse hydrodynamique. Elle est calculée par rapport au déplacement centre de gravité du nuage

$$vapp = \frac{D}{Tms}$$

Vitesse apparente de transit = 155 m/h

2.4 La dilution du traceur

La dilution du traceur durant son parcours dans le système karstique peut être approché par:

la dilution minimale: $Cs\ max / Ce\ max = 6,7 E^{-6}$

la dilution moyenne: $Cmoyenne\ sortie / Cmoyenne\ entrée = 1,4 E^{-6}$

3 INTERPRETATION ET CONCLUSION

Ce traçage s'est déroulé dans des conditions hydrodynamiques de basses eaux pour la saison, les faibles pluies des jours précédants n'ayant pas eu d'impact sur l'aquifère.

Les données récoltées sont nombreuses et de bonnes qualités. Ce traçage a permis de mettre en évidence le parcours de l'eau souterraine. Elle circule de la Canne Haros vers la source de l'Orbiquet. La photo n°14 nous montre le lieu d'injection de la Canne Haros qui déborde pour venir s'écouler dans la vallée sèche. Actuellement, ce site correspond donc à un trop plein hydraulique de la source de l'Orbiquet.

Grâce au fluorimètre placé à l'émergence de l'Orbiquet, nous pouvons faire une interprétation quantitative de ce traçage. Nous obtenons donc des paramètres sur l'aquifère, ce qui apporte une meilleure connaissance des modalités d'écoulement.

Ainsi les vitesses de parcours montrent des circulations rapides, de type karstique et qui se font dans des conduits bien développés (vitesse moyenne de transit de 157 m/h).

Le suivi quantitatif a également permis de dégager une réponse impulsionnelle (DTS) du système karstique. On connaît ainsi la fonction de transfert de l'aquifère sur ce parcours. Ceci pourra permettre si nécessaire, une simulation de transport de polluant par convolution.



photo n°14: le trop plein de la Canne Haros (lieu de l'injection) en débordement – hiver 95; et l'équipe spéléologique d'Hérouville – Saint – Clair.

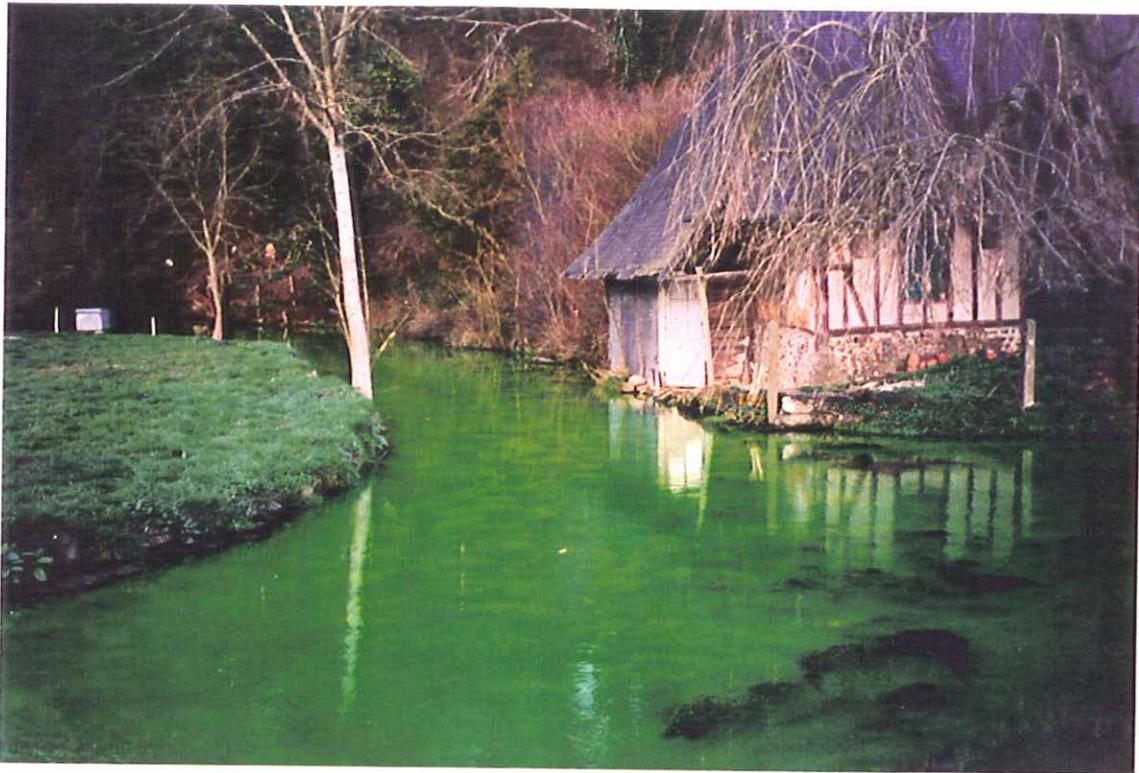


Photo n°15: sortie à l'émergence de l'Orbiquet du traceur (uranine) injecté à la Canne Haros.



Photo n°16: sortie du traceur (uranine) à l'émergence de l'Orbiquet—les membres de l'ESH, de l'équipe d'hydrométrie et de la qualité des eau.

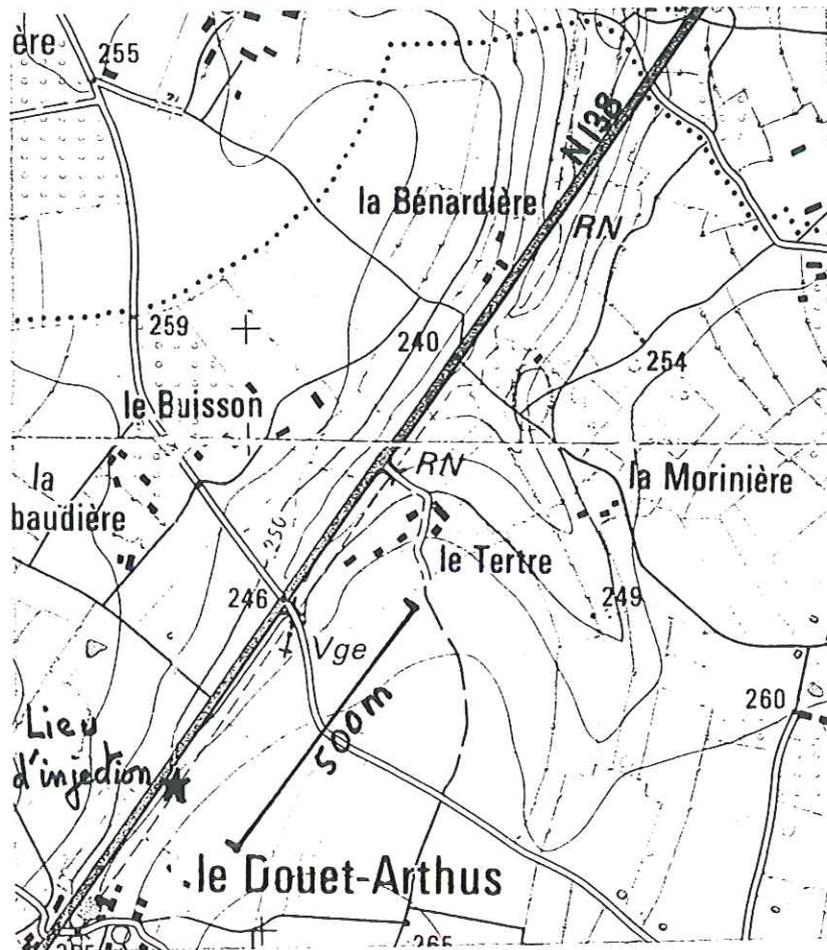
CHAPITRE IX: LE TRACAGE A PARTIR DU DOUET ARTHUS

1 MISE EN OEUVRE

1.1 Localisation de l'injection

Le traceur a été injecté mardi 25 mars 1998 à partir du ruisseau du Douet Arthus, qui est situé sur la commune de Heugon (voir la carte n°8). Ce ruisseau possède un fort débit en période de pluie car il récolte par l'intermédiaire de drains l'eau de ruissellement du plateau. En dehors de ces épisodes pluvieux, le débit chute fortement. Il est alors alimenté par drainage de la nappe en amont du bourg du Douet Arthus et par un puits situé sous la nationale qui déborde.

Ce ruisseau ne parcourt que quelques kilomètres en surface, puis l'eau rejoint le sous-sol. La plupart du temps, des pertes diffuses situées en aval du bourg du Douet Arthus soutirent la totalité du débit. Mais lors des fortes crues, des dolines qui sont situées en fin de parcours de surface du ruisseau fonctionnent. Elles absorbent alors le surplus du débit.



carte n°9: lieu de l'injection au Douet Arthus.

1.2 Conditions de l'injection

L'injection est précédée d'une période sèche, si bien qu'au moment de l'injection le débit n'était que d'environ 2 l/s . Mais une faible pluie est survenue après l'injection. Cette pluie a été sans incidence sur le débit à la source de l'Orbiquet. Elle peut néanmoins avoir facilité le transit du traceur, au moins au début de son parcours.

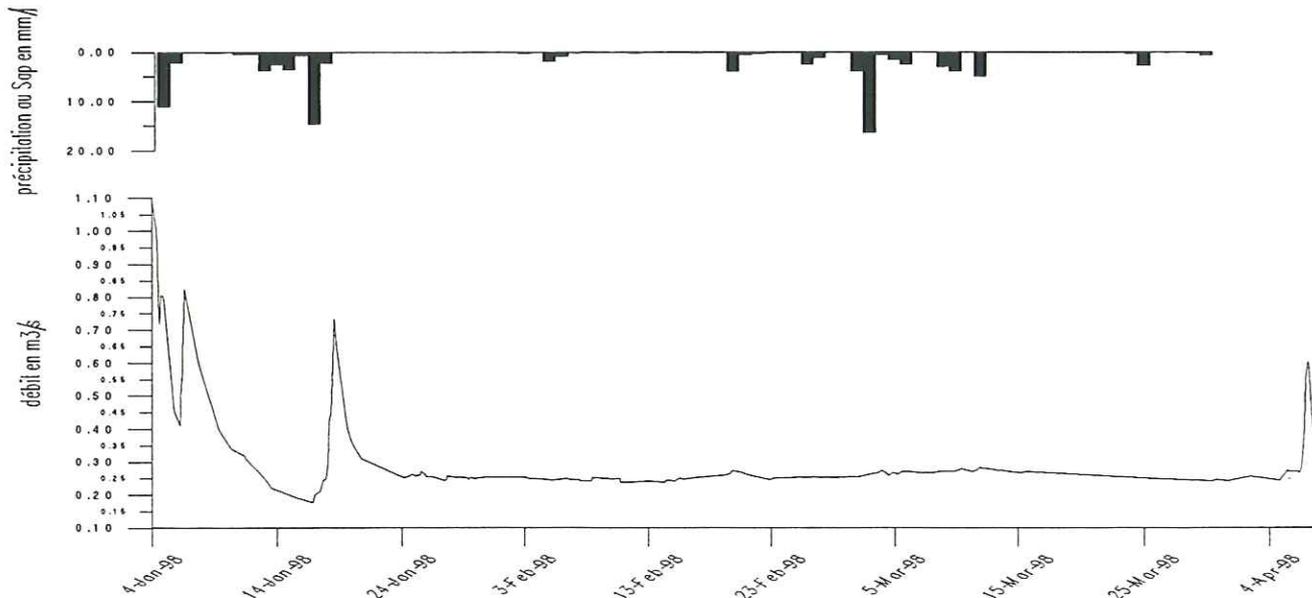


Figure n°33: hyétogramme à la station du Sap et hydrogramme à la source de l'Orbiquet du 4-Nov-98 au 4-Apr-99.

1.3 Produit utilisé, quantité injecté, type d'injection

Le traceur retenu pour l'expérience est la uranine. Nous en avons injecté 500 grammes. Elle avait été au préalable mélangée dans une solution comprenant 10l d'eau, 500 ml d'alcool et 500 ml d'ammoniaque.

L'injection du traceur a duré 5 minutes. Ce temps est bref, l'injection est donc de type DIRAC. Elle nous permettra d'avoir la réponse impulsionnelle du système.



photo n°17: injection du traceur (uranine) au Douet Arthus.

2 LES RESULTATS

Le fluorimètre placé sur le terrain à l'émergence de l'Orbiquet a permis de faire un suivi quantitatif de la réapparition du traceur. Durant l'expérience, cet appareil a mesuré la fluorescence avec un pas de temps régulier de une heure. Nous ne rappellerons pas ici la définition des paramètres. Elle est donnée dans le traçage à partir du trop plein de la Canne Haros.

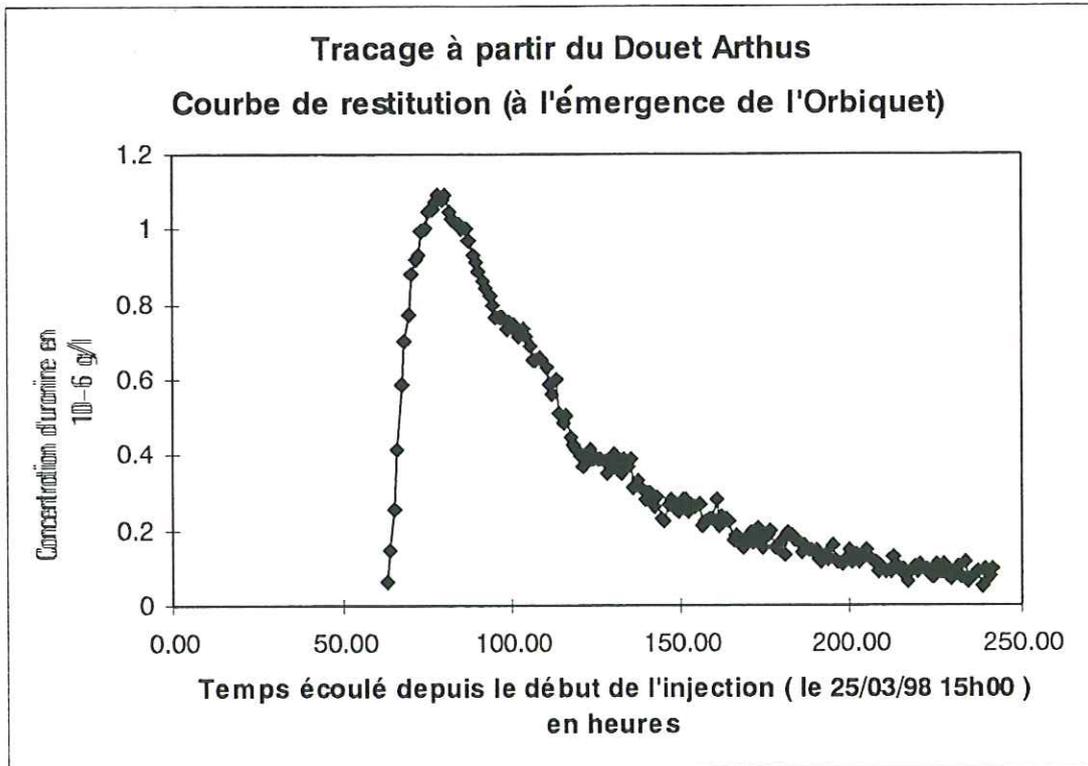


Figure n°34: courbe de restitution du traçage à partir du Douet Arthus

La courbe de restitution montre un seul pic, qui apparaît au bout de trois jours. Il représente 48% du traceur injecté. La partie manquante du traceur est restée piégée dans le réseau karstique. Ce phénomène a souvent été observé durant des expériences de traçage dans d'autres régions (traçage du trou des Casses; système karstique de Préroutge, massif subalpin des Bauges, Savoie, France; M.LEPILLER).

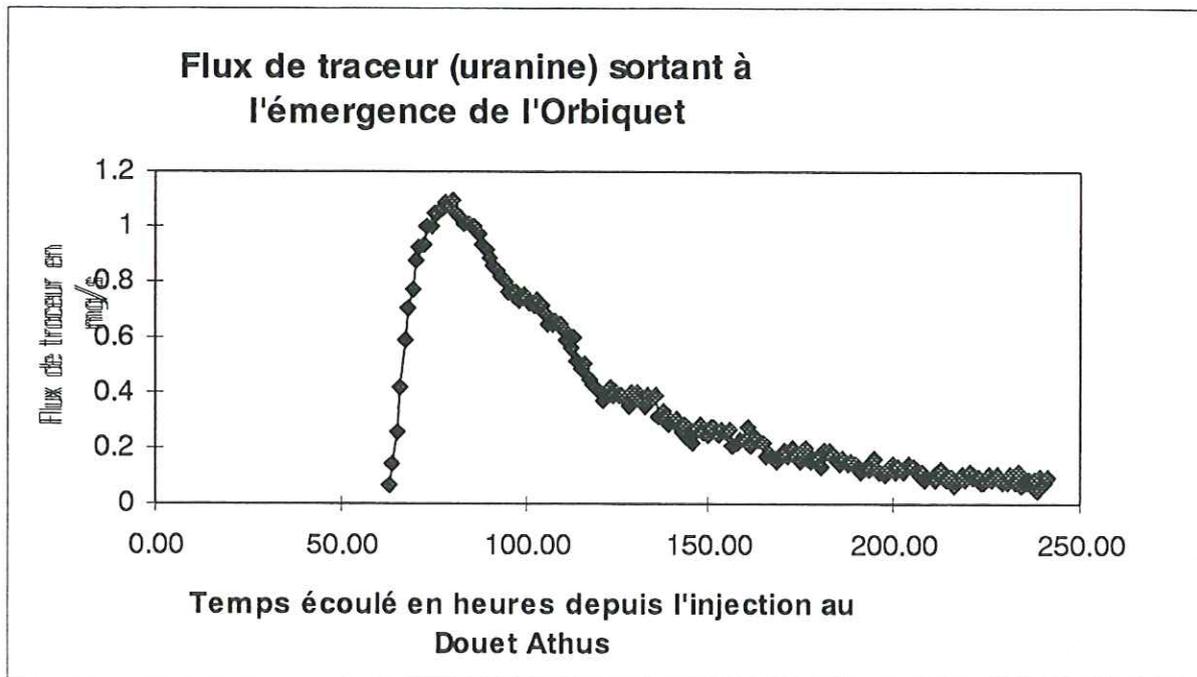


Figure n°35: courbe de flux du traceur (fluorescéine) à l'émergence de l'Orbiquet après injection à partir du Douet Arthus.

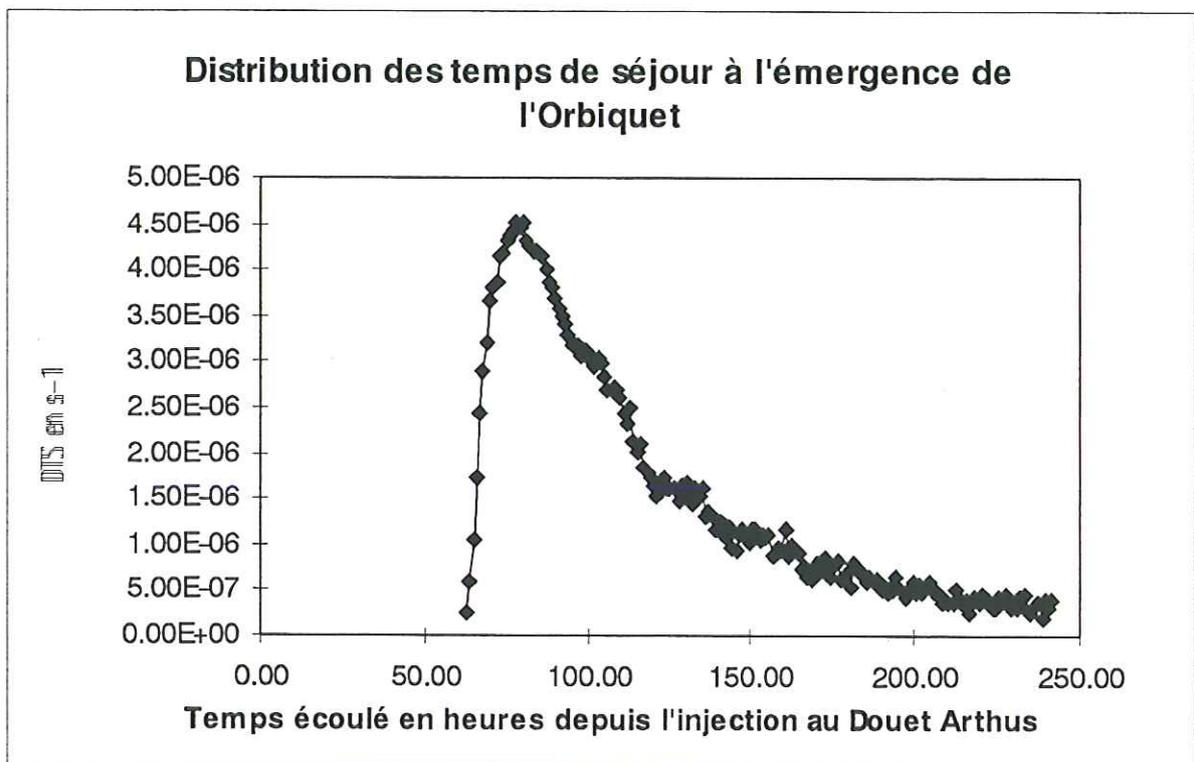


Figure n°36: distribution des temps de séjour à l'émergence de l'Orbiquet à partir d'une injection au Douet Arthus.

Traçages artificiels

LES PARAMETRES	DEFINITION	FORMULE	RESULTAT
temps de restitution	temps écoulé entre le début et la fin de la restitution	Tr	180 h
temps modal	temps écoulé entre l'injection et l'observation du pic de restitution à l'exutoire	T mod	80 h 15 min
distance entre point d'injection et de réapparition en mètres	distance linéaire entre ces deux points. Elle sous-estime donc la distance parcourue réellement parcourue par le traceur et les vitesses de celui-ci	D	15250 m
Vitesse modale	vitesse de déplacement du pic du nuage.	V mod	191 m/h
Concentration maximale en mg/l		C max	0.0045 mg/l
Concentration moyenne en micro-gramme /litre		$C_m = \int_{dr}^{fr} \frac{C(t)dt}{Tr}$	0.37 ppb
dilution minimale	rapport de la concentration maximale du traceur à la sortie sur la concentration maximale à l'entrée	$D_{mini} = \frac{C_s \max}{C_e \max}$	1,06 E-7
dilution moyenne	rapport de la concentration moyenne à la sortie sur la concentration maximale à l'entrée	$D_m = \frac{C_{sm}}{C_e \max}$	8.6 ^{E-9}
vitesse des particules les plus rapides		V1 = D/T1	242 m/h
temps de transit des particules les plus rapides	temps écoulé entre l'injection et l'apparition des premières particules de traceur	T1	63 h
Masse d'urarine restituée en g		$Mr = \int_{dr}^{fr} Q(t) * C(t)dt$	241 g
Taux de restitution en %	rapport entre la masse de traceur injectée et la masse de traceur restituée	R% = (Mr/Mi) * 100	48 %
Distribution des temps de séjour	fonction de densité de probabilité qu'a une molécule d'eau de rester dans le système un temps compris entre t et t+ dt (Guinerix, 1976)	$h(t) = \frac{C_{(t)} * Q_{(t)}}{\int C_{(t)} * Q_{(t)}dt}$	
Temps moyen de séjours en heure	c'est l'abscisse du centre de gravité du nuage du traceur	$Tms = \int_{dr}^{fr} t * h(t)dt$	116h
vitesse moyenne de transit en m/h	vitesse hydrocinématique. Elle prend en compte tous les phénomènes physiques susceptibles d'affecter le traceur durant son parcours (dispersion, diffusion, adsorption)		148 m/h
vitesse apparente de transit en m/h	vitesse hydrodynamique. C'est la vitesse de déplacement du centre de gravité du nuage.	$v_{app} = \frac{D}{Tms}$	131 m/h
volume d'eau écoulé à restitution du traceur pendant la restitution en m3		$V = \int_{dr}^{fr} Q(t)dt$	43.2 m3

Tableau N°2: interprétation quantitative du traçage à partir du Douet Arthus.

3 INTERPRETATION ET CONCLUSION

Ce traçage montre que le ruisseau du Douet Arthus se perd dans le sous-sol soit par des pertes diffuses soit par des dolines, pour rejoindre rapidement la source de l'Orbiquet et la source n°2. Le ruisseau du Douet Arthus fait donc partie du bassin d'alimentation de la source de l'Orbiquet.

Nous n'avons pas récupéré la totalité du traceur à l'émergence de l'Orbiquet. Outre le fait qu'une partie du traceur ressorte en d'autres points, il est normal que sur un parcours d'au minimum 15km une partie du traceur se perde dans l'aquifère ou soit adsorbé.

Mais le plus important est la grande vitesse à laquelle s'est propagé le traceur. La vitesse moyenne de transit atteint en effet 150 m/h, ce qui implique que sur l'ensemble de son parcours l'eau circule dans des conduits karstiques. Le réseau karstique semble donc bien développé même dans la partie aval du bassin d'alimentation de la source.

Ces vitesses montrent la fragilité du système karstique. L'eau circule rapidement; le phénomène d'épuration naturelle lors du trajet souterrain est donc très limité. Une pollution aux environs du ruisseau du Douet Arthus (N138), avec un produit au comportement semblable à celui de l'eau, atteindrait en trois jours la source de l'Orbiquet (en période basses eaux), ce qui laisserait un temps d'intervention très bref.

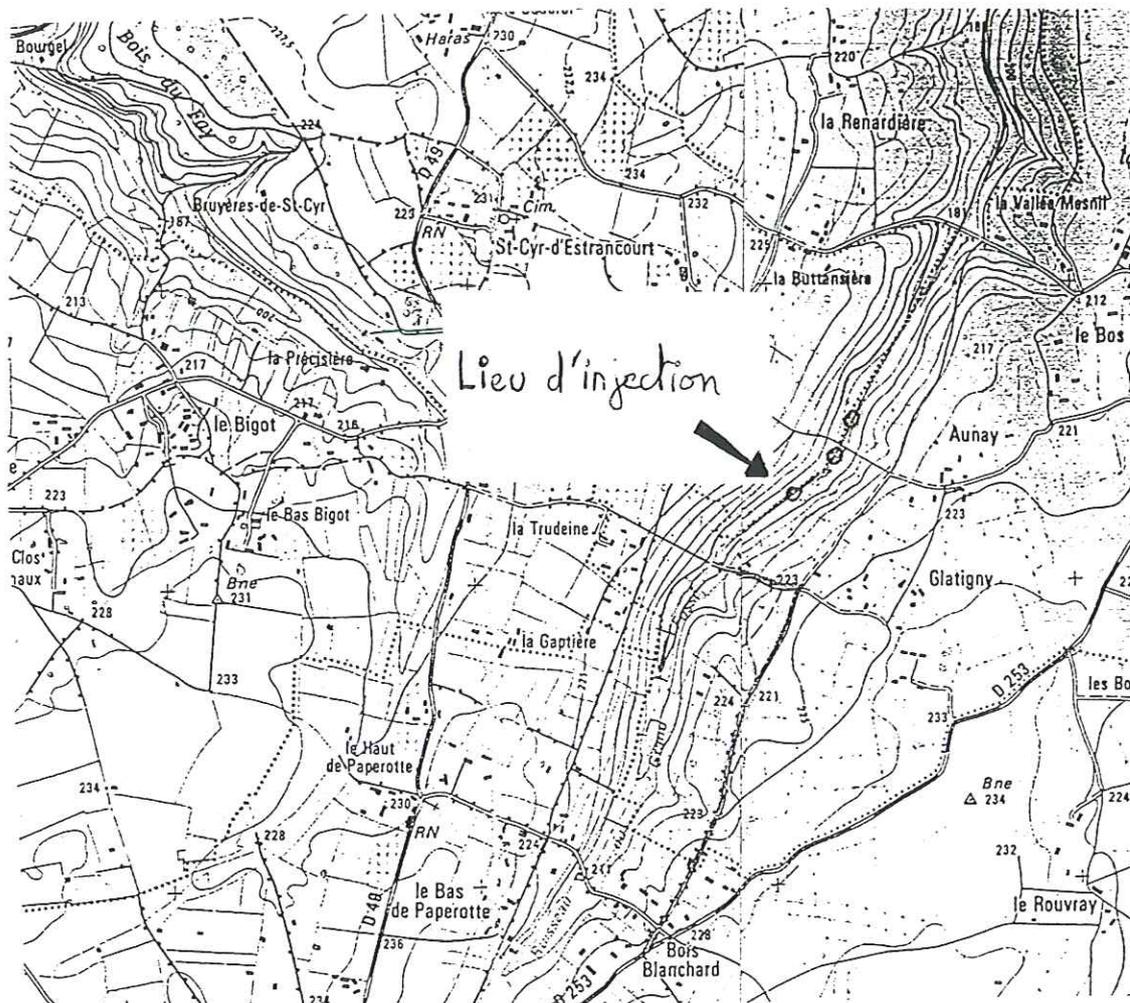
CHAPITRE X: LE TRACAGE A PARTIR D'UNE DES DOLINES DE PERCEPIERRE.

I MISE EN OEUVRE.

1.1 Localisation de l'injection.

Sur la commune de Saint-Germain-d'Aunay, on peut voir de nombreuses dolines situées en aval du ruisseau du grand fossé, au lieu dit « Percepierre ». Plusieurs habitants disent avoir vu fonctionner ces dolines lors de crues importantes.

Le traceur a été injecté le 08 avril 1998 dans une de ces dolines.



Carte n°9: lieu de l'injection à Percepierre (Saint-Germain-d'Aunay).



Photo n°18: Doline de percepierre (Saint Germain d'Aunay) où a été injectée l'uranine.

1.2 Conditions lors de l'injection.

Le traceur a été injecté lors d'un épisode pluvieux (voir figure n°37). Cependant, il n'était pas assez important pour que le ruisseau du grand fossé alimente les dolines de Percepierre. Nous avons donc réalisé une injection sous forçage hydraulique. 500 litres d'eau ont ainsi été injectés dans la doline en même temps que l'uranine.

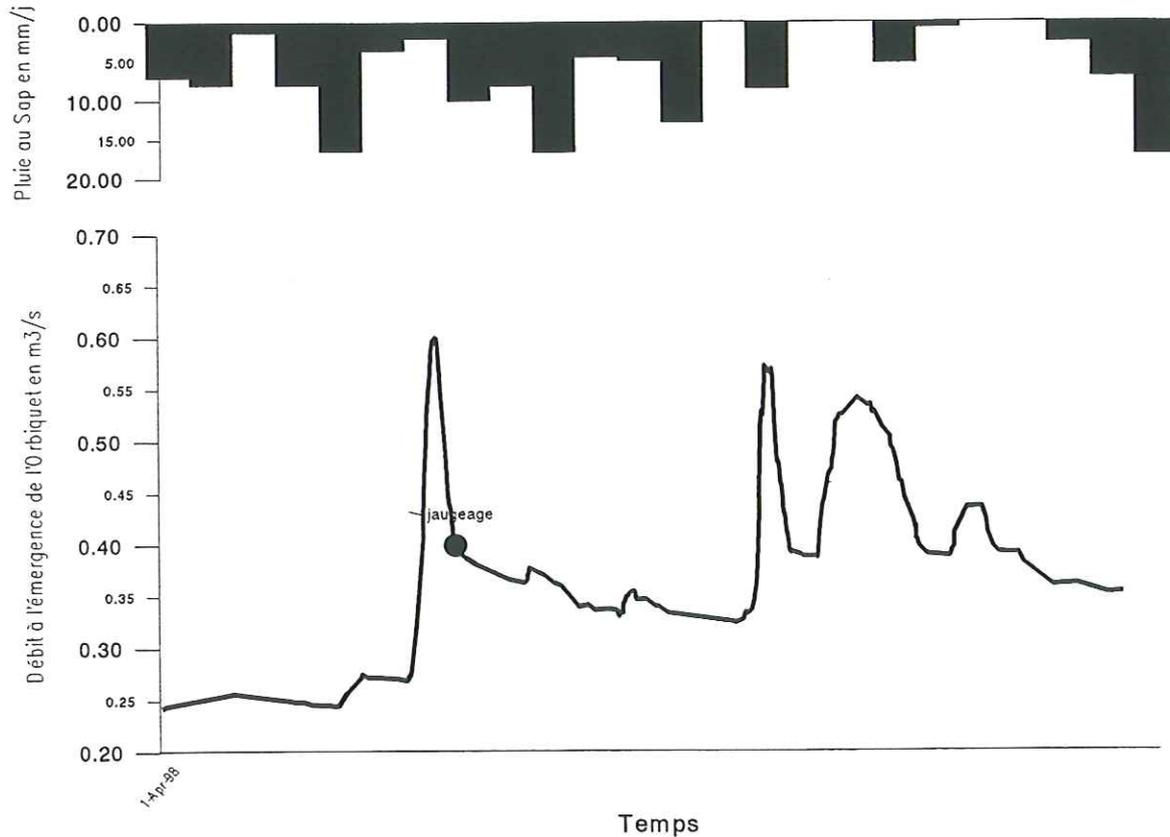


Figure n°37: hyétogramme à la station du Sap et hydrogramme à la station de l'Orbiquet.

1.3 Produit utilisé, quantité injectée, type d'injection.

Nous avons injecté 1.5 kg d'uranine en 20 minutes.



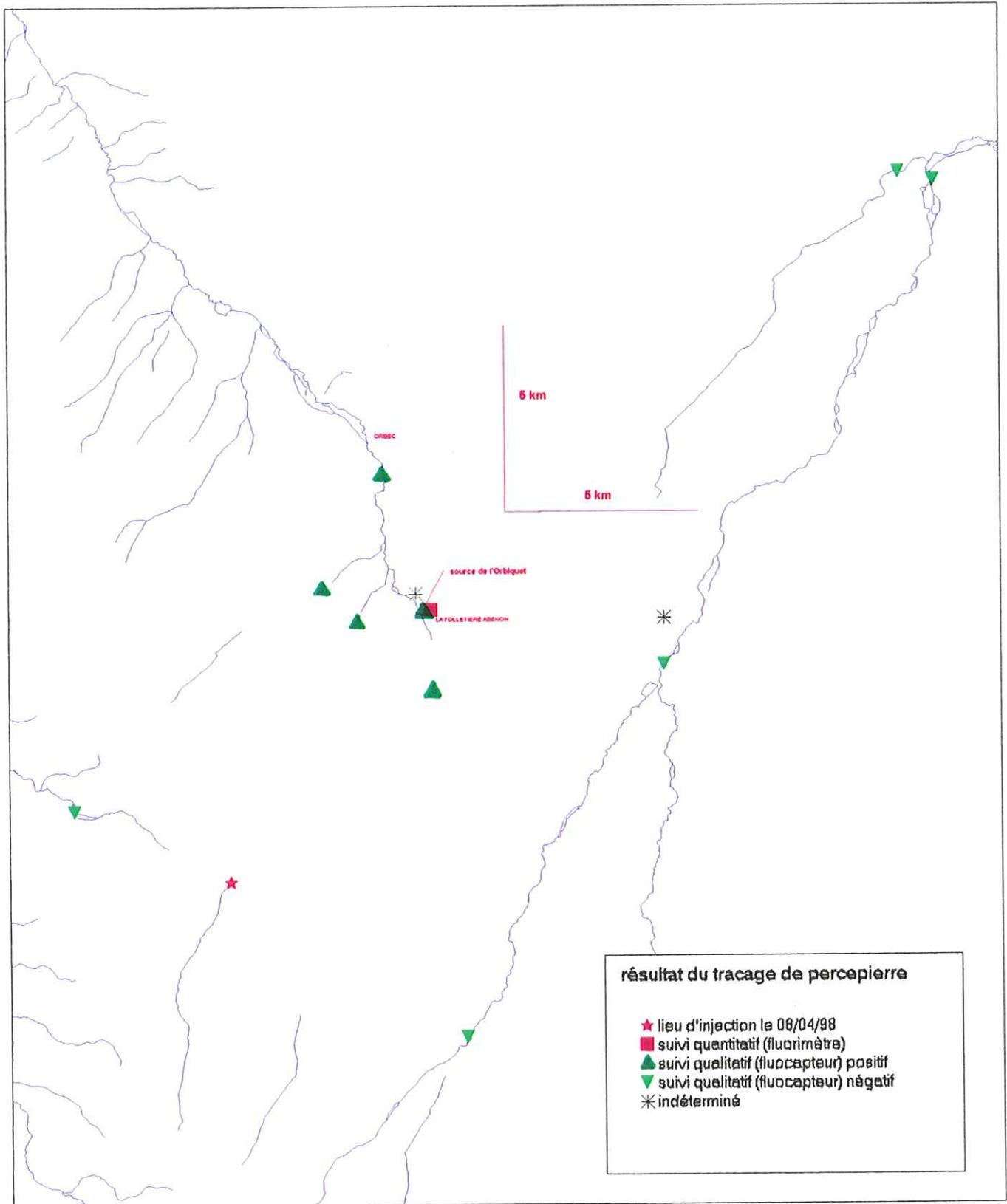
Photo n°19: injection de l'uranine dans une doline de Percepierre (Saint-Germain-d'Aunay) le 08/04/98.

2 RESULTATS QUALITATIFS.

Des fluocapteurs composés de grain de charbon actif ont été disposés à des emplacements stratégiques (voir carte n°10). Relevés et changés une fois par semaine, ils permettent de détecter le passage du traceur ou non sur ces sites. On travaille cette fois-ci de manière qualitative, c'est à dire en tout ou rien. On montre ainsi les connexions hydrauliques à l'intérieur du réseau karstique.

Le développement des fluocapteurs a eu lieu durant 24 heures dans un bain d'extraction. Pour 10 gramme de charbon actif, la solution d'extraction qui est de 50 ml, est composée de $\frac{1}{4}$ d'ammoniaque, $\frac{1}{4}$ d'alcool, $\frac{1}{2}$ d'eau distillée. La lecture de la fluorescence piégée par les fluocapteurs s'est faite avec le fluorimètre FL100 de *datalink*.

Ces résultats montrent d'une part une connexion de la doline de Percepierre vers la source de l'Orbiquet, la source de la Bigotière, le trop plein de la Canne Haros, et la source de Friardel. Dans de telles conditions d'injection le traceur met entre 8 à 14 jours pour parvenir à ces points.

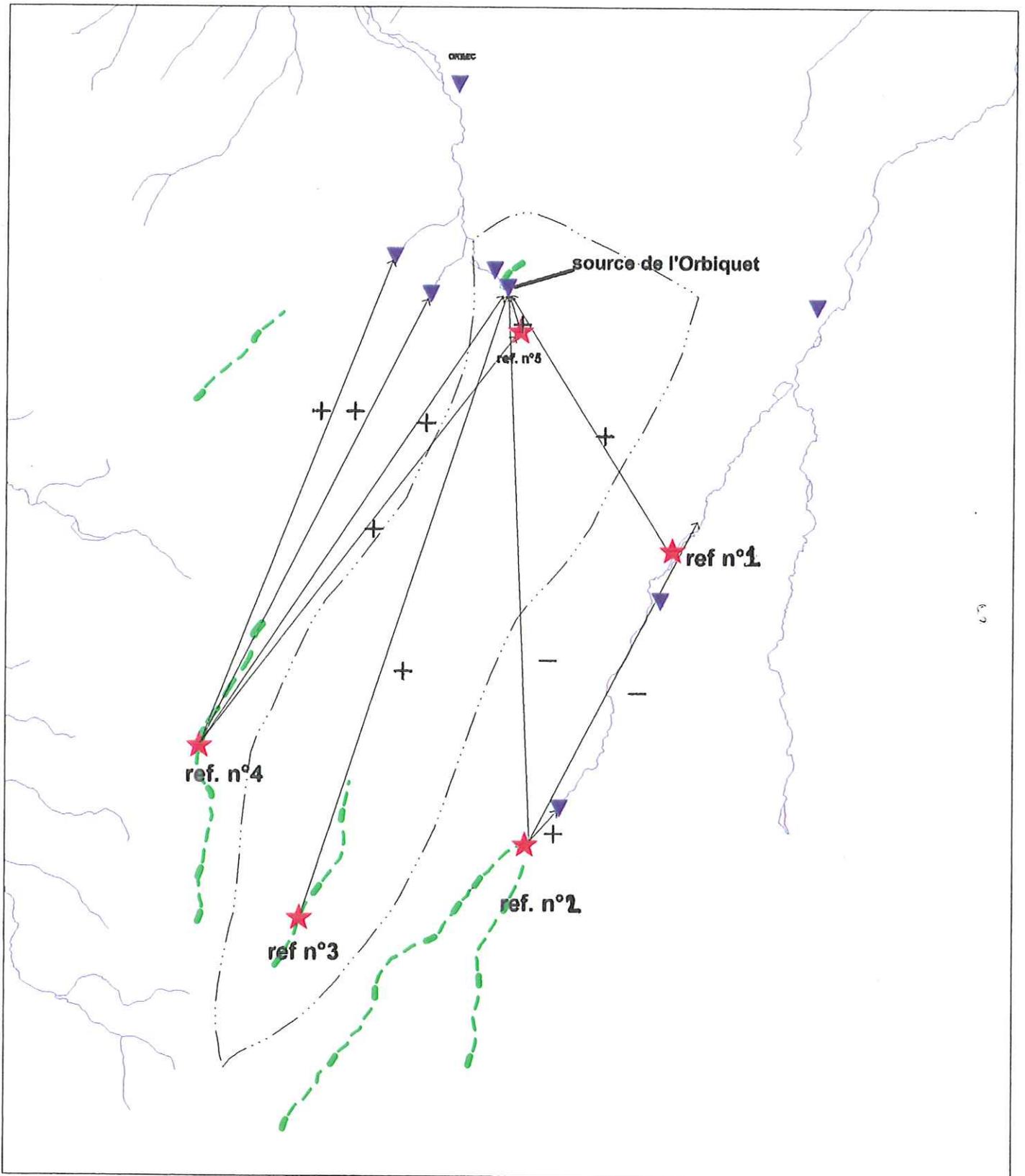


Carte n°10: résultats qualitatifs (fluocapteurs) du traçage à partir d'une doline de percepierre(Saint-Germain-d'Aunay).

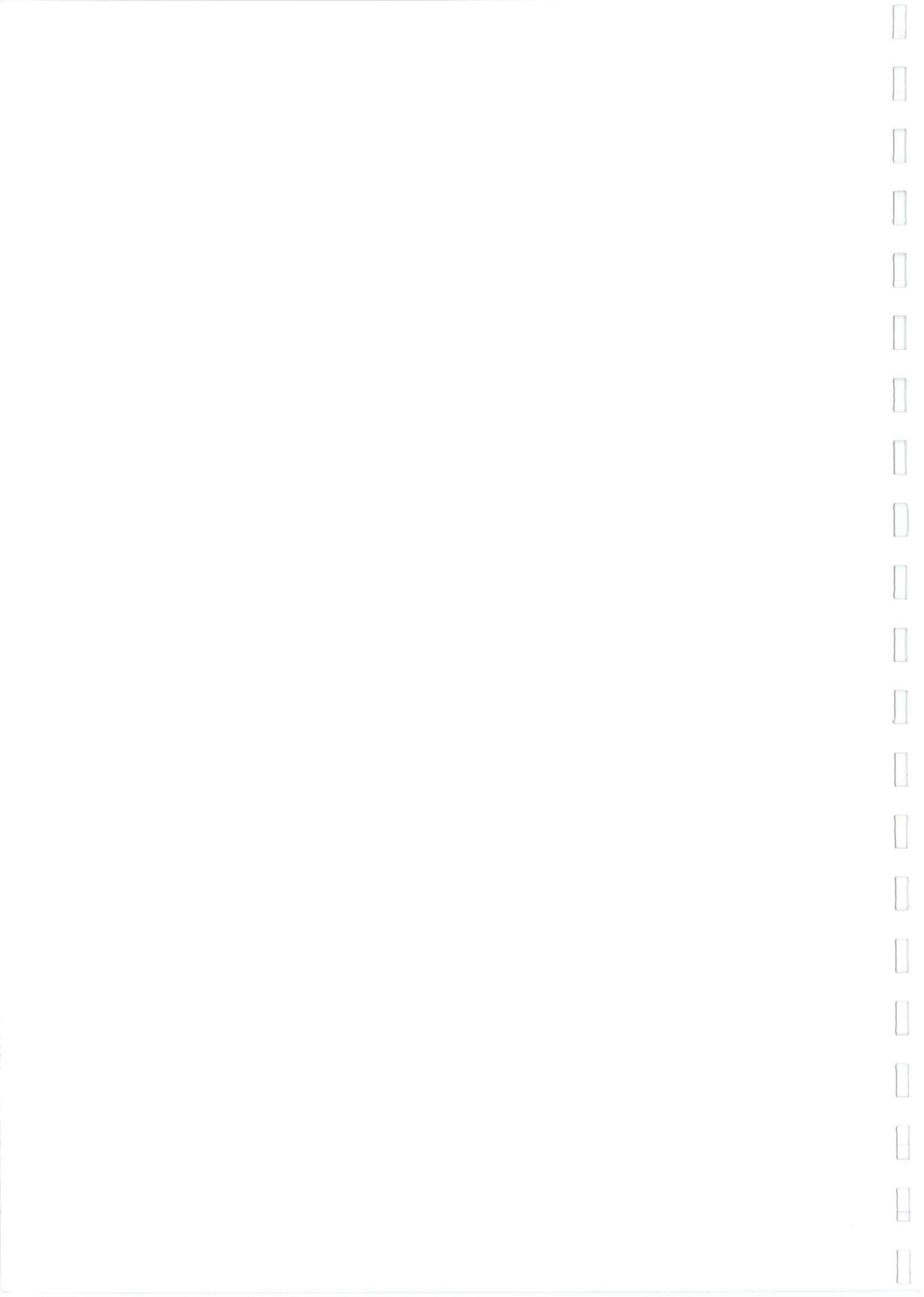
CHAPITRE XI: SYNTHESE DES DIFFERENTS TRACAGES.

tracage	tracage effectué par	traceur utilisé	lieu d'injection	lieu de réapparition	date de l'injection	date de réapparition des premières particules	remarques	fiabilité
1	Y.DRUET	balle d'avoine	bief du moulin à l'amont de Montreil l'Argillé	émergence de l'Orbiquet	hiver 1970		effectué en période de forte crue	faible
2	BRGM ref. 178.1.37	fluorescéine	perte de la Guiel à Heugon	source de la fontaine à Monnai	27/04/71 à 9h00	28/04/71 à 6h00		bonne
5	DIREN	300g d'uranine	trop plein de la Canne Haros à la Folletière Abenon	émergence de l'Orbiquet	11/03/98 à 12h20	11/03/98 à 16h20		bonne
3	DIREN	500g d'uranine	le Douet Arthus à Monnai	émergence de l'Orbiquet	25/03/98 à 15h00	28/03/98 à 7h00		bonne
4	DIREN	1500g d'uranine	doline de Percepierre à Saint Germain d'Aunay	source de la Bigotière; émergence de l'Orbiquet; trop plein du Canne Haros; source de Friardel.	08/04/98	entre le 15/04/98 et le 22/04/98		moyenne

Tableau n°6: synthèse des tracages artificiels.



Carte n°11: synthèse des résultats de traçages aux environs du bassin d'alimentation de la source de l'Orbiquet.

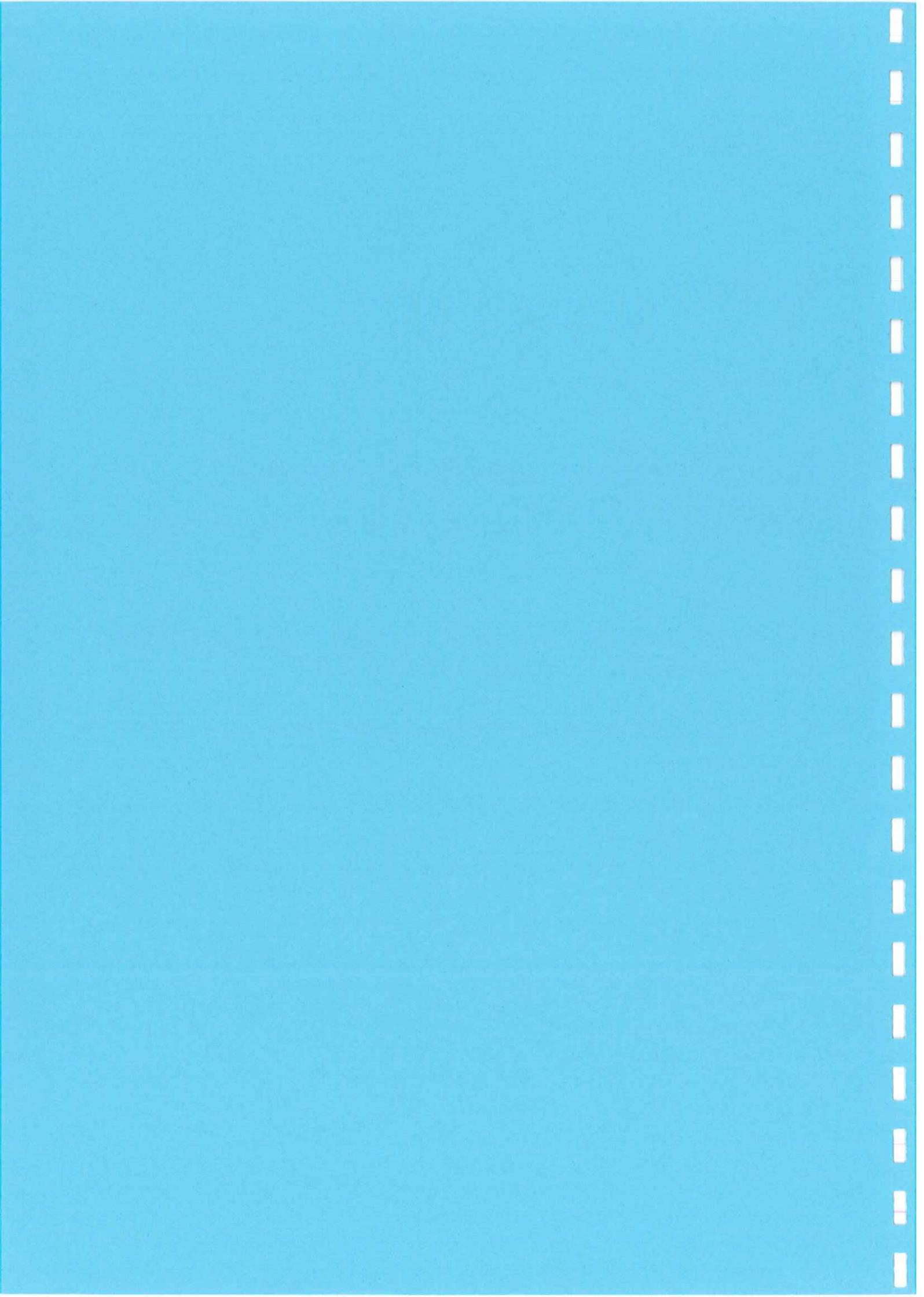


V^{eme} PARTIE

VULNERABILITE DU KARST ET PROBLEMES ENVIRONNEMENTAUX

CHAPITRE XII: LES ZONES D'INFILTRATION RAPIDES: DOLINES ET PERTES.

CHAPITRE XIII: EFFONDREMENTS.



V^{eme} PARTIE:

VULNERABILITE DU KARST ET PROBLEMES ENVIRONNEMENTAUX

CHAPITRE XIV: LES ZONES D'INFILTRATION RAPIDE: PERTES ET DOLINES

Les hydrogéologues classent souvent les aquifères karstiques comme la ressource en eau souterraine la plus vulnérable. Les dolines (bétoires) et les pertes constituent en effet des zones particulièrement sensibles à la pollution. Elles concentrent les eaux de ruissellement qui pénètrent alors directement dans le réseau karstique et atteignent rapidement l'exutoire (source de l'Orbiquet) en circulant dans des conduits.

Ce mode d'écoulement est trop rapide pour permettre à l'eau une épuration naturelle. C'est ce que montre les pics de nitrates et de sulfates observés à chaque crue à la source de l'Orbiquet.

A titre d'exemple, le résultat du traçage à partir du Douet Arthus montre que l'eau injectée dans les pertes temporaires atteint la source de l'Orbiquet située à 15 km en 76 heures. La vitesse moyenne de circulation est alors de 150 m/h. Une telle vitesse laisse penser que l'eau n'a pas été freinée durant son parcours et qu'elle a circulé dans des conduits bien développés, tant dans la zone noyée que dans la zone d'infiltration rapide.

Par ailleurs, certaines zones d'infiltration rapide sont situées dans des zones de fortes activités humaines (exemple du Douet Athus qui est en bordure de la N138). En cas de pollution, le temps d'intervention serait très réduit avant que la pollution n'atteigne l'exutoire et ce même si la distance est grande.

Dans le paysage, il est possible de distinguer des zones de sensibilités différentes. Ainsi la plupart des zones d'infiltrations rapides se situent dans les vallées sèches. A l'inverse, les plateaux sont protégés par une épaisse couche d'argiles imperméables et ils possèdent très peu de zones

d'infiltration rapide (voir carte n°5).

Cependant, parcequ'ils étaient justement imperméables, les plateaux ont fait l'objet d'une intense politique de drainage (voir rapports du BRGM ref. 72 SGN 217 PNO et 73 SGN 381 PNO) . Et il a été choisi d'évacuer ces eaux de drainage dans les dolines (bétoires). Ainsi, nous avons constaté que la plupart des drains aboutissent dans des zones d'infiltrations rapides du karst (exemple du Douet Arthus). On augmente ainsi la surface contribuant à l'alimentation rapide à l'ensemble de la surface drainée. L'aquifère en devient alors plus vulnérable et la qualité de l'eau à l'exutoire se dégrade nettement en période de crue.

CHAPITRE XV: RISQUE D'EFFONDREMENTS

1 TYPOLOGIE DES CAVITES ANTHROPIQUES (ref.hypogées n°8: ESH)

1.1 Les carrières souterraines

Utilisation, et mode d'extraction

Elles servaient essentiellement à l'extraction de matériau en vue de construction. Des blocs entiers de la craie étaient ainsi exploités. Des traces d'arrachement parallépipédiques sur les blocs de craie sont alors visibles

Dimension, ouverture et mode d'extension

De grande dimension, elles présentent souvent plusieurs ouvertures avec par exemple des entrées (de type galerie) sur le flanc de la vallée et un puits débouchant sur un replat ou sur le plateau.

Positionnement géographique

On les trouve le plus fréquemment à flanc de coteau, dès que la pente de celui-ci devient suffisante pour permettre à la craie d'affleurer. Quelques unes sont signalées sur le plateau. Il faut noter le grand nombre de ce type de cavités sur le site étudié, la craie était quasiment extraite à chaque fois que la morphologie du paysage y était favorable.

1.2 Les Marnières

Utilisation, et mode d'extraction

Les marnières fournissaient le calcaire nécessaire à l'amendement des sols argileux qui recouvrent presque intégralement le paysage. Répandu à même sur le sol, la marne permet notamment d'enrichir le sol en calcium et de lui conférer un caractère moins acide. Le mode d'extraction permet de faire une distinction avec les carrières souterraines *sensu-stricto*. La pierre était cette fois extraite par simple creusement, sans réel découpage géométrique. Pour ordre d'idée, on admet fréquemment qu'il fallait 15 à 40 m³ de marnes par hectares et par an, et environ une marnière pour quatre champs lorsque le paysage était encore bocage.

Positionnement géographique

Elles ont essentiellement été retrouvées au niveau des plateaux.

Dimension, ouverture et mode d'extension

La dimension de l'exploitation est plus modeste que dans le cas des carrières souterraines (*sensu-stricto*). Un plan type peu être dressé " un puits circulaire d'un diamètre avoisinant le mètre, d'une hauteur variant entre 10 et 30 mètres permet d'accéder à une série de chambres, disposée autour de celui-ci et accessibles par des galeries...

Le puits est maçonné à l'aide de silex, de section visible grossièrement carrée" (d'après Hypogées n°8)

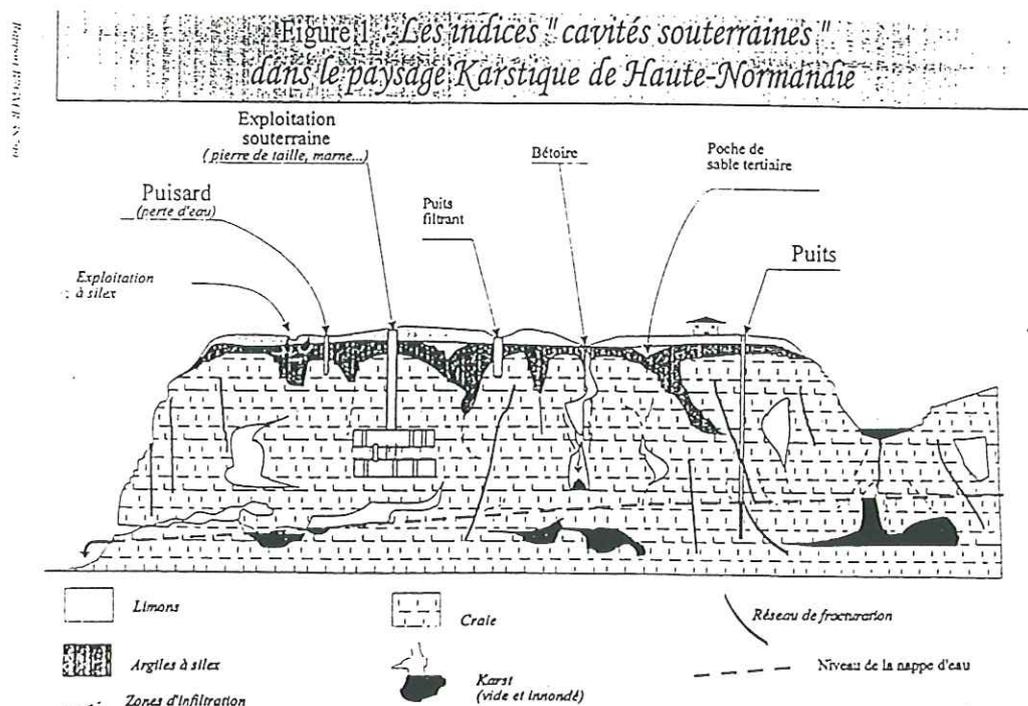


Figure n°38: les types de cavités souterraines (BRGM).

2 EFFONDREMENT SUR CAVITES ANTHROPIQUES.

Le nombre de cavités anthropiques sur le bassin de l'Orbiquet est particulièrement important. La craie étant un matériau relativement fragile, les effondrements sur ces cavités sont très nombreux.

2.1 Etat interne

Une exploration spéléologique de quelques marnières et carrières souterraines sur l'ensemble du bassin de l'Orbiquet nous a permis d'avoir un aperçu de l'état interne des cavités.

De la surface il n'est pas toujours possible de diagnostiquer l'état d'une cavité. En effet nous avons souvent observé des effondrements souterrains sans qu'en surface aucun signe n'apparaisse.

On distingue plusieurs types d'effondrements. Parmi les plus fréquents signalons le décollement d'un panneau du plafond qui observe surtout dans les grandes salles. Un bloc entier de craie de grande surface et d'une épaisseur pouvant atteindre l'ordre du mètre se détache alors du plafond en respectant une petite discontinuité sédimentaire. On voit aussi très souvent des effondrements de cheminée d'accès. Ils forment dans les salles des tas coniques qui s'accompagnent en général d'argile à silex. Enfin, il existe des effondrements entiers ou partiels de salle.

On mesure une diminution de la densité de fracturation depuis les vallées en direction des plateaux, une grande partie des fractures observées serait donc due à la décompression de la roche en bordure de vallée. Mais pour autant nous n'observons pas de diminution des risques d'effondrement. La structure intrinsèque de la craie semble suffisamment fragile pour rompre sans qu'il y est besoin d'une fracturation intense au préalable.

2.2 Manifestation en surface

Les grands effondrements souterrains engendrent en surface l'apparition des grandes dépressions circulaires. On observe ces dolines d'effondrement sur les plateaux au droit des marnières. Au cours de l'étude nous avons recensé ces dolines (voir carte n°6).

2.3 L'effondrement de Beaulabé à Courtonne-les-Deux-Eglises

Durant l'étude du karst de l'Orbiquet (97/98) un effondrement est survenu à Beaulabé sur la commune de Courtonne les Deux Eglises. Il a eu lieu après une période de forte pluie.

Lors d'un premier passage de terrain durant l'été 96, nous avons noté la présence d'une doline d'effondrement de grande dimension au même endroit que celle survenue le 19 janvier 98. Quelque temps après son apparition, cette doline avait été recouverte par des remblais (voir photo n°20).

Un effondrement même de grande dimension, n'est bien souvent que partiel et par conséquent, d'autres mouvements de terrain peuvent survenir par la suite.

Dans le même ordre d'idée, il apparaît que l'effondrement du 19 janvier 98 a en fait eu lieu en deux temps. C'est d'abord un premier effondrement de grande surface et d'environ 3 m de profondeur en son centre qui est survenu. Il a engendré l'effondrement d'un bâtiment agricole et l'apparition de larges fentes ouvertes dans le sol. Puis quelques heures plus tard, un deuxième effondrement (voir photo n°21) est intervenu à l'intérieur même du bâtiment agricole, moins étendu en superficie mais cette fois-ci plus profond et aux bordures franches (Effondrement probable d'une cheminée d'entrée). A cours terme, un effondrement peut donc comporter plusieurs étapes, répartis au sein d'une période d'instabilité. Ceci rend nécessaire des précautions pour une intervention éventuelle des secours et l'instauration d'un périmètre non pénétrable.

3 EFFONDREMENTS SUR LE RESEAU KARSTIQUE

Un effondrement d'un réseau karstique a été observé à Saint Germain d'Aunay au centre de la vallée de la Mont Joie (voir photo n°9). Il date probablement des épisodes pluvieux de janvier 98 et se présente sous la forme d'un trou cylindrique profond d'environ 3m et de bordures verticales. Nous n'avons pas trouvé d'autres exemples de ce phénomène sur l'ensemble du bassin de l'Orbiquet. Même s'ils sont moins importants que ceux dus aux marnières, il existe donc bien des risques d'effondrement dus aux cavités karstiques.



Photo n°20: effondrement remblayé noté au cours de l'été 96.



Photo n°21: effondrement survenu le 19/01/98 à l'intérieur du premier.

Affaissement spectaculaire à Courtonne-les-Deux-Églises

Un bâtiment agricole s'effondre

Aux environs de midi hier, un affaissement de terrain s'est produit sur une surface d'environ 1 000 m² entraînant l'effondrement d'un bâtiment agricole de 2 00 m² dans lequel se trouvait une jument. Un périmètre de sécurité a été dressé sur place. Une faille menaçant la maison d'habitation.

« C'est le voisin, M. Lepoivre qui a vu le bâtiment effondré alors qu'il venait de ranger son tracteur. Juste avant, il n'avait rien remarqué », explique la propriétaire encore toute bouleversée. Car tout le bâtiment, complètement évasté, se trouve sa jument.

Il était aux environs de midi. Sur cette propriété, située au lieu-dit « Beaulabé », près d'une ancienne carrière, le terrain s'est affaissé sur environ 1 000 m². Des failles en présentent le périmètre. Failles qui ont ceinturé, avec parfois des petits cratères, le bâtiment qui n'a pas résisté. Une des failles a même touché la maison et a découvert une partie des fondations.

Les pompiers d'Orbec et des hommes du service départemental d'incendie et secours, ainsi que la cellule sauvetage et déblaiement de Caen se sont retrouvés sur place. Un déblaiement uniquement à main était fait : « C'est impossible d'amener ici des moyens lourds. C'est trop risqué ! », a expliqué un des hommes tandis que les autres, avec le propriétaire Marc



La toiture du bâtiment a glissé sur ses fondations. Le terrain, tout autour, s'est affaissé de plusieurs mètres.

Duhutrel, dégageaient les bottes de foin et les gravats.

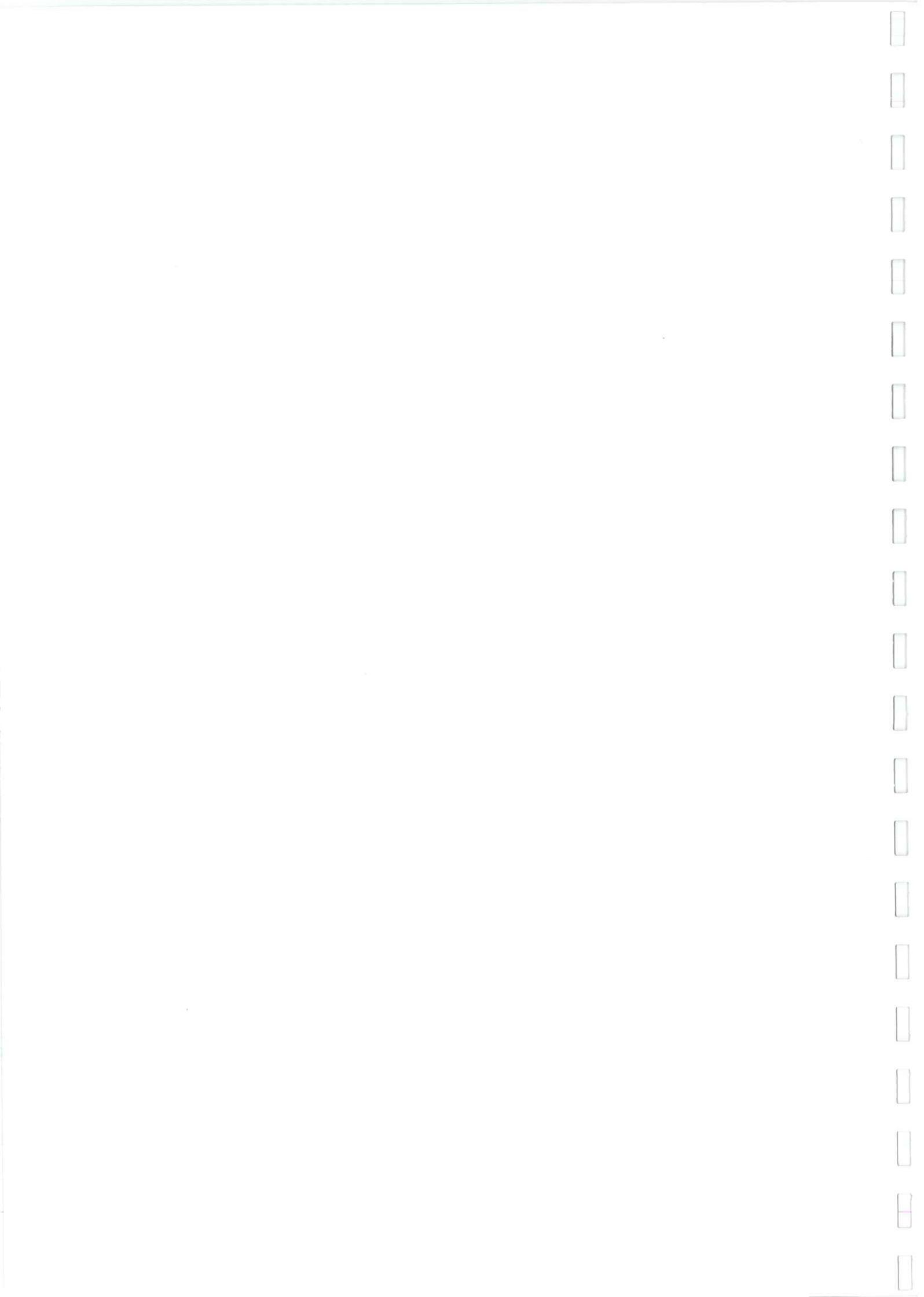
Deux trous ont été effectués dans la toiture juchée à terre pour permettre l'évacuation des hommes en cas de nouveau glissement. Une précaution utile car effectivement un mouvement de terrain a eu lieu pendant l'intervention. La jument a finalement été retrouvée morte. « Il y a déjà eu un effondre-

ment de terrain en 1986, à l'autre bout de la commune, au hameau de Goupillière. C'était une marinière qui était aussi à proximité d'une maison. Il y a trois ans, c'est une sablonnière qui s'est effondrée sur quelques mètres », commente Marie-Thérèse Leroux, maire de la commune et voisine de la propriété. Face aux risques de propagation des veines, dont cer-

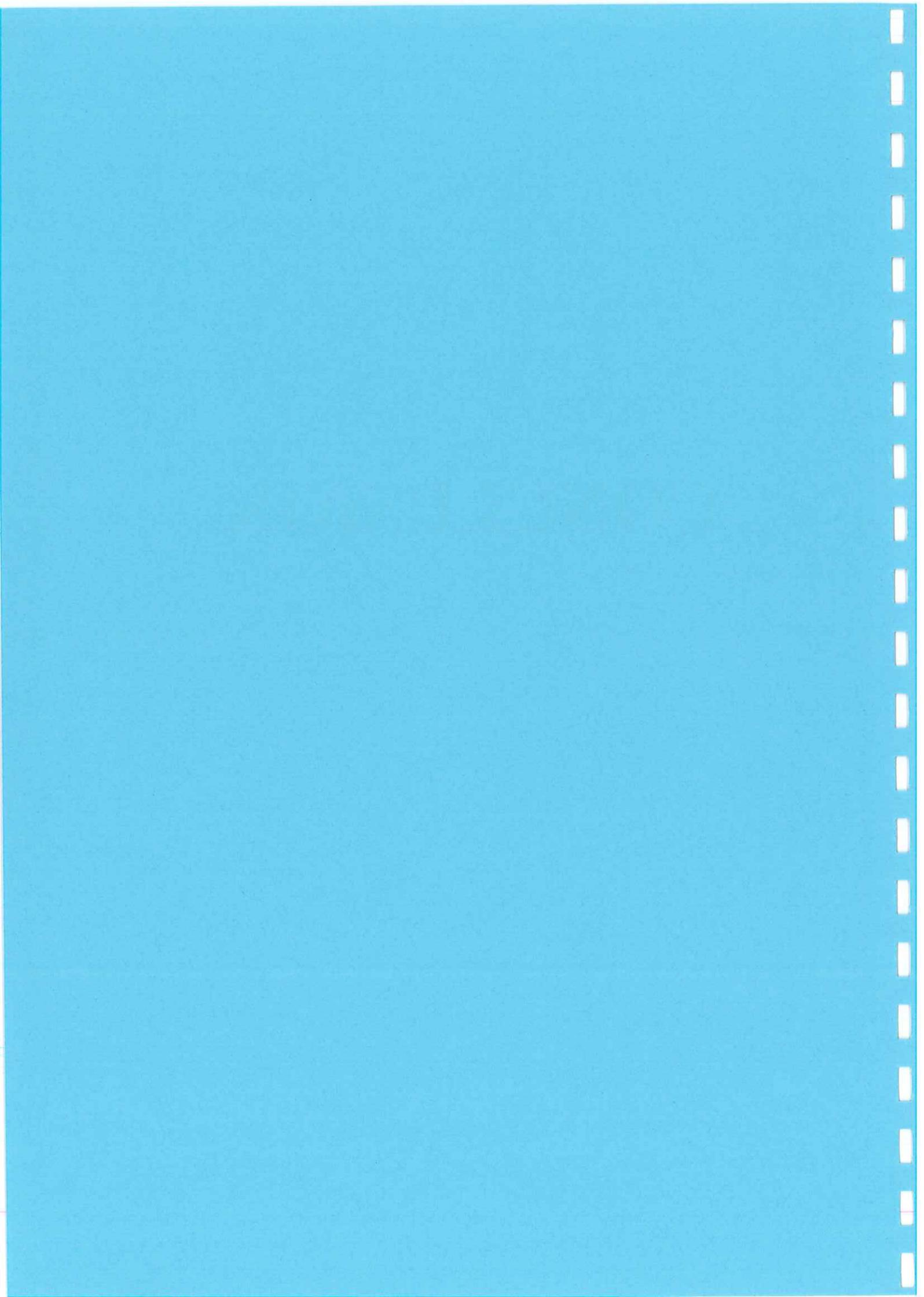
taines se sont élargies au cours de la soirée, les services de secours ont conseillé aux propriétaires de ne pas rester sur les lieux. A proximité de la demeure, un trou avait déjà été comblé.

Un ingénieur du Bureau de recherches géologiques et minières était attendu sur place.

Éric AUPOIX.



CONCLUSION



CONCLUSION

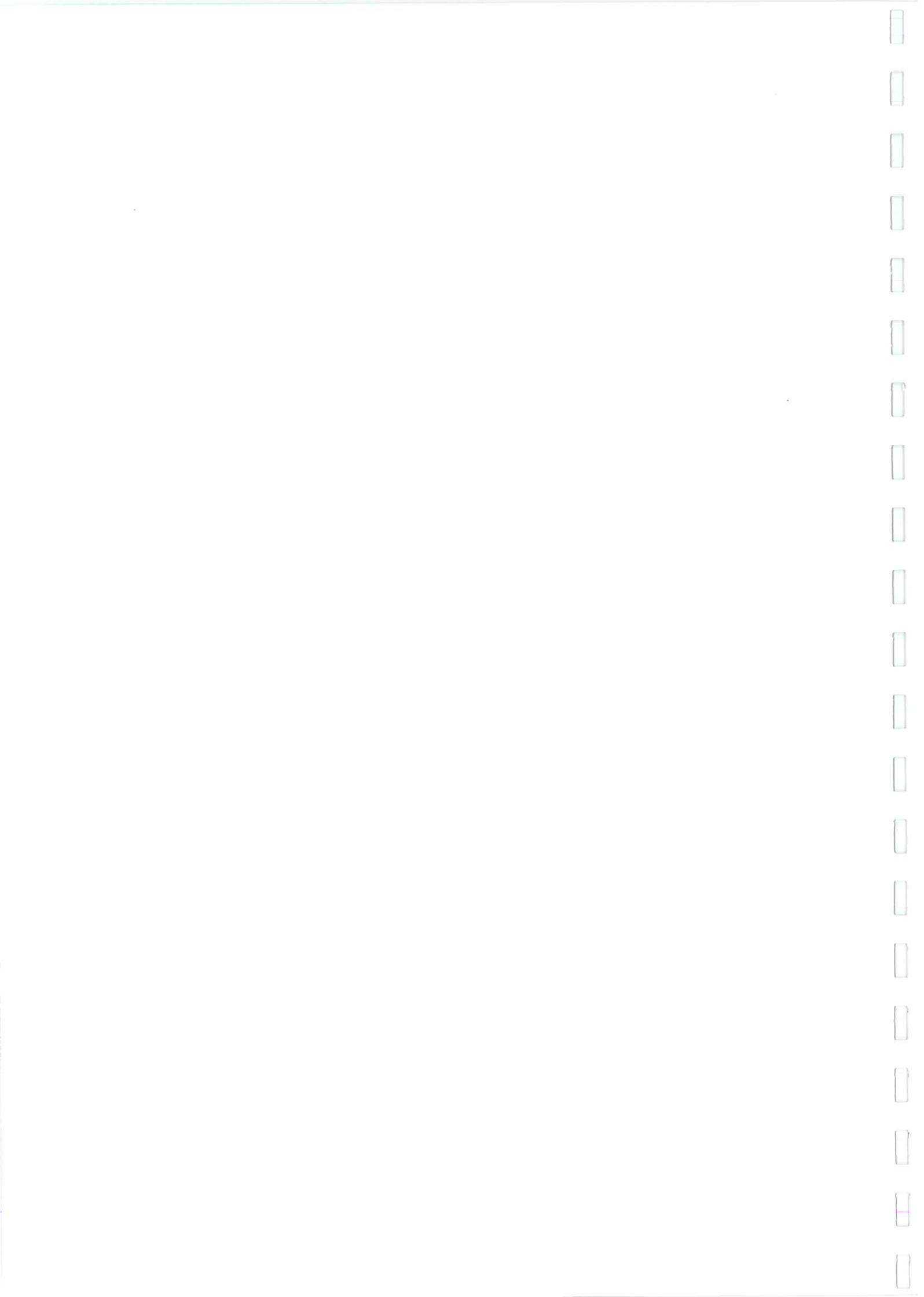
Pendant les périodes sèches, l'hydrogramme enregistré à la source de l'Orbiquet ne montre pas de tarissement perceptible, ce qui traduit des réserves importantes que l'on peut attribuer à la matrice de la craie. Par ailleurs, le chimisme de l'eau évolue très peu. Elle apparaît relativement minéralisée sous-saturée et de bonne qualité.

Durant les événements pluvieux importants, on observe une activation du réseau de drainage des plateaux recouverts d'argile à silex. Les drains concentrent alors les eaux de ruissellement vers les dolines où elles rejoignent le réseau karstique.

Parallèlement, on note une forte contribution des eaux de surface aux débits de l'émergence, qui se manifeste par une augmentation rapide du débit, une chute de la conductivité et une dégradation de la qualité de l'eau (NO₃ et Matières Organiques Dissoutes).

Les expériences de traçage ont révélé une connexion hydraulique du Douet-Arthus et du trop plein de la Canne-Haros vers l'émergence de l'Orbiquet.

Le réseau de conduits karstiques semble très actif et bien développé. En effet, Les vitesses de circulation issues de l'interprétation quantitative des traçages sont grandes. De même, la réponse impluvionnelle de la source aux événements pluvieux est pointue et peu étalée (analyses corrélatoires croisées).



LISTE DES FIGURES, TABLEAUX, CARTES, PHOTOS.

TABLEAUX

Tableau n°1: précipitations annuelles à Orbec.

Tableau n°2: interprétation quantitative du traçage à partir du Douet Arthus.

Tableau n° 4: bilan hydrologique sur le bassin versant topographique de l'émergence de l'Orbiquet.

Tableau n°5: comparaison des Volumes d'eau écoulés à la source et sur l'impluvium (d'après bilan hydrologique).

Tableau n°6: synthèse des tracages artificiels.

FIGURES

Figure n°1: modèle numérique de terrain du bassin de l'Orbiquet.

Figure n°2 et 3: schématisation et représentation conceptuelle de l'aquifère karstique (Mangin)

Figure n°4: modelé karstique (dictionnaire de géologie; ed. Masson)

Figure n°5: atténuation en surface des manifestations karstiques par les formations superficielles.

Figure n°6: doline d'infiltration rapide.

Figure n°7: naissance d'une doline liée à l'effondrement de l'endokarst.

Figure n°8: création d'une doline sur une racine crayeuse (d'après J.RODET).

Figure n°9: Le régime hydrologique de l'Orbiquet sur la période d'étude par rapport aux débits de référence à Beuvillers.

Figure n°10: hydrogramme à la source de l'Orbiquet et hyétogramme à la station du Sap.

Figure n°11: Modèle de Miallet et modèle à deux réservoir proposé par Mangin (1970).

Figure n°12: décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970).

Figure n°13: corrélogramme des débits à la source de l'Orbiquet.

Figure n°14: exemple de corrélogramme simple (système karstique d'Archiane).

Figure n°15: exemple de spectre simple (système karstique d'Archiane).

Figure n°16: exemples de corrélogrammes croisés

Figure n°17: spectre de variance des débits de la source de l'Orbiquet.

Figure n°18: spectre de densité de la pluie à la station du Sap.

Figure n°19: corrélogramme croisé pluie-débit à la source de l'Orbiquet.

Figure n°20: ACP des éléments dissous; cercle des corrélations pour les facteurs 1 et 2.

Figure n°21,22,23: évolution des teneurs en Chlorures, sulfates ,et nitrates à la source de l'Orbiquet.

Figure n°24, 25, 26: évolution des teneur en carbonate, en calcium, et en magnésium de l'eau à la source de l'Orbiquet.

Figure n°27: variation de la conductivité à l'émergence de l'Orbiquet durant les crues.

Figure n°28: hyétogramme à la station du Sap et hydrogramme à la source de l'Orbiquet du au

Figure n°29: injection de type DIRAC et de type échelon.

Figure n°30: courbe de restitution à l'émergence de l'Orbiquet, du traceur injecté à la Canne Haros.

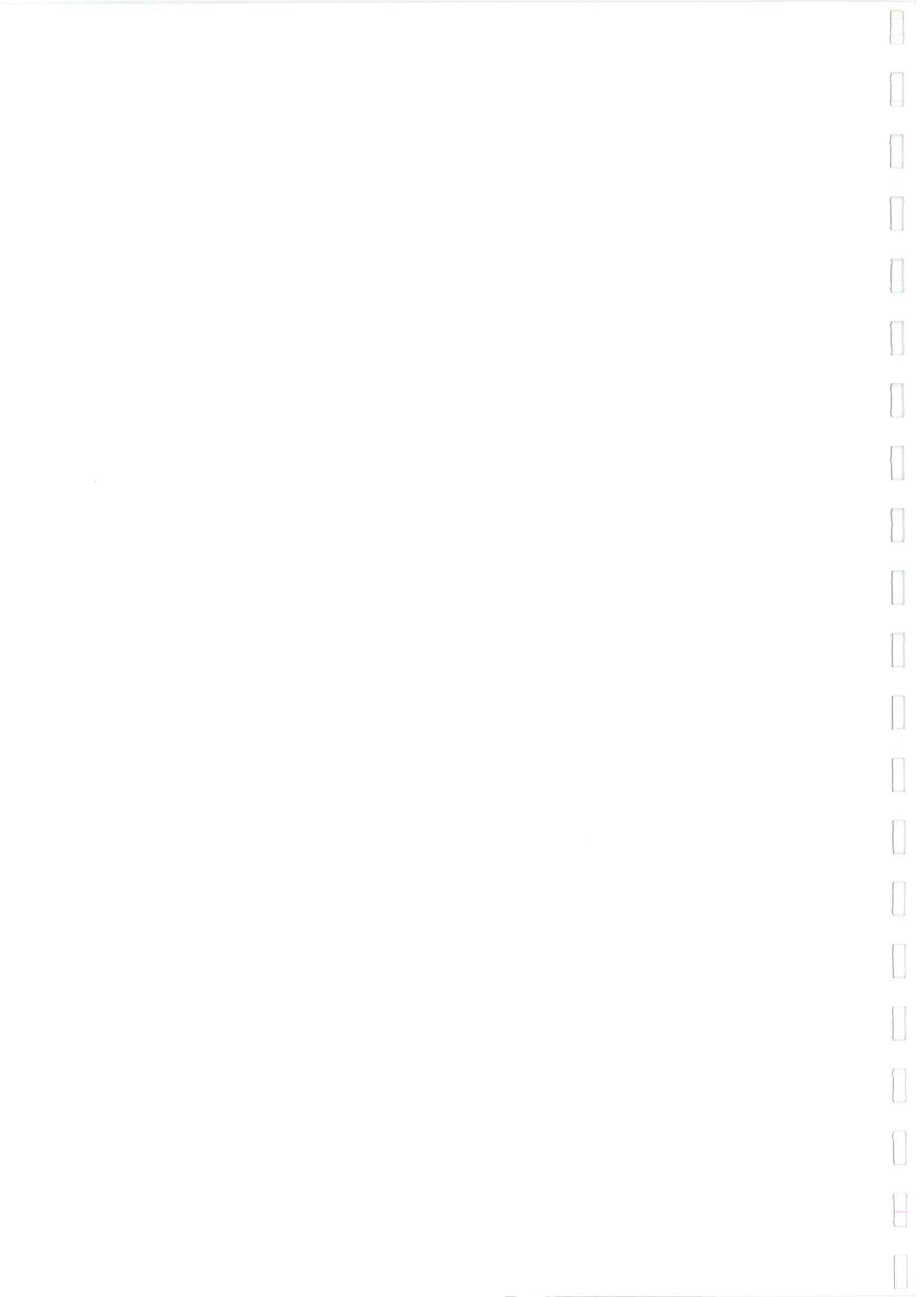


Figure n°31: le flux massique du traceur à l'émergence.

Figure n°32: distribution des temps de séjours pour le traçage à partir de la Canne Haros.

Figure n°33: hyétogramme à la station du Sap et hydrogramme à la source de l'Orbiquet du au

Figure n°34: courbe de restitution du traçage à partir du Douet Arthus

Figure n°35: courbe de flux du traceur (uranine) à l'émergence de l'Orbiquet après injection à partir du Douet Arthus.

Figure n°36: distribution des temps de séjours pour le traçage à partir du Douet Arthus

Figure n°37: distribution des temps de séjour à l'émergence de l'Orbiquet à partir d'une injection au Douet Arthus.

Figure n°38: les types de cavités souterraines (ref. BRGM).

CARTES

Carte n°1: positionnement du bassin versant de l'Orbiquet.

Carte n°2: modèle numérique de terrain du bassin de l'Orbiquet.

Carte n°3: carte géologique schématique de la Normandie et du Maine.

Carte n°4: carte géologique du bassin de L'Orbiquet (extrait de la carte géologique au 1/80 000 ème).

Carte n°5: les formes de surface sur le bassin de l'Orbiquet.

Carte n°6: les pertes et les émergences.

Carte n°7: lieu de l'injection, trop plein de la canne haros.

Carte n°8: lieu de l'injection au Douet Arthus.

Carte n°9: lieu de l'injection à percepierre (Saint Germain d'Aunay).

Carte n°10: résultats qualitatifs (fluocapteurs) du traçage à partir d'une doline de percepierre (Saint Germain d'Aunay).

Carte n°11: synthèse des résultats de traçage aux environs de l'émergence de l'Orbiquet.

PHOTOS

Photo n°1: station hydrométrique de la source de l'Orbiquet.

Photo n°2: sondes conductivité et turbidité placées sur le terrain à l'émergence de l'Orbiquet.

Photo n°3: récolte des données du conductimètre et turbidimètre de terrain, stockées dans la centrale d'acquisition..

Photo n°4: détermination de la concentration en nitrates.

Photo n°5: détermination de la concentration en calcium par volumétrie.

Photo n°6: pinacles et caries sur la surface crayeuse, carrière à ciel ouvert de courtonne les deux églises.

Photo n°7: doline d'infiltration rapide au lieu dit de « percepierre » à Saint Gremain d'Aunay.

Photo n°8: doline des fosses du roi à monnai

Photo n°9: doline d'effondrement de l'endokarst.

Photo n°10: conduit karstique fossile suivant une fracture, carrière souterraine de la Folletière Abenon.

Photo n°11: fentes de décompression concentriques à un conduit karstique fossile.

Photo n°12: le trop plein de la Canne Haros.

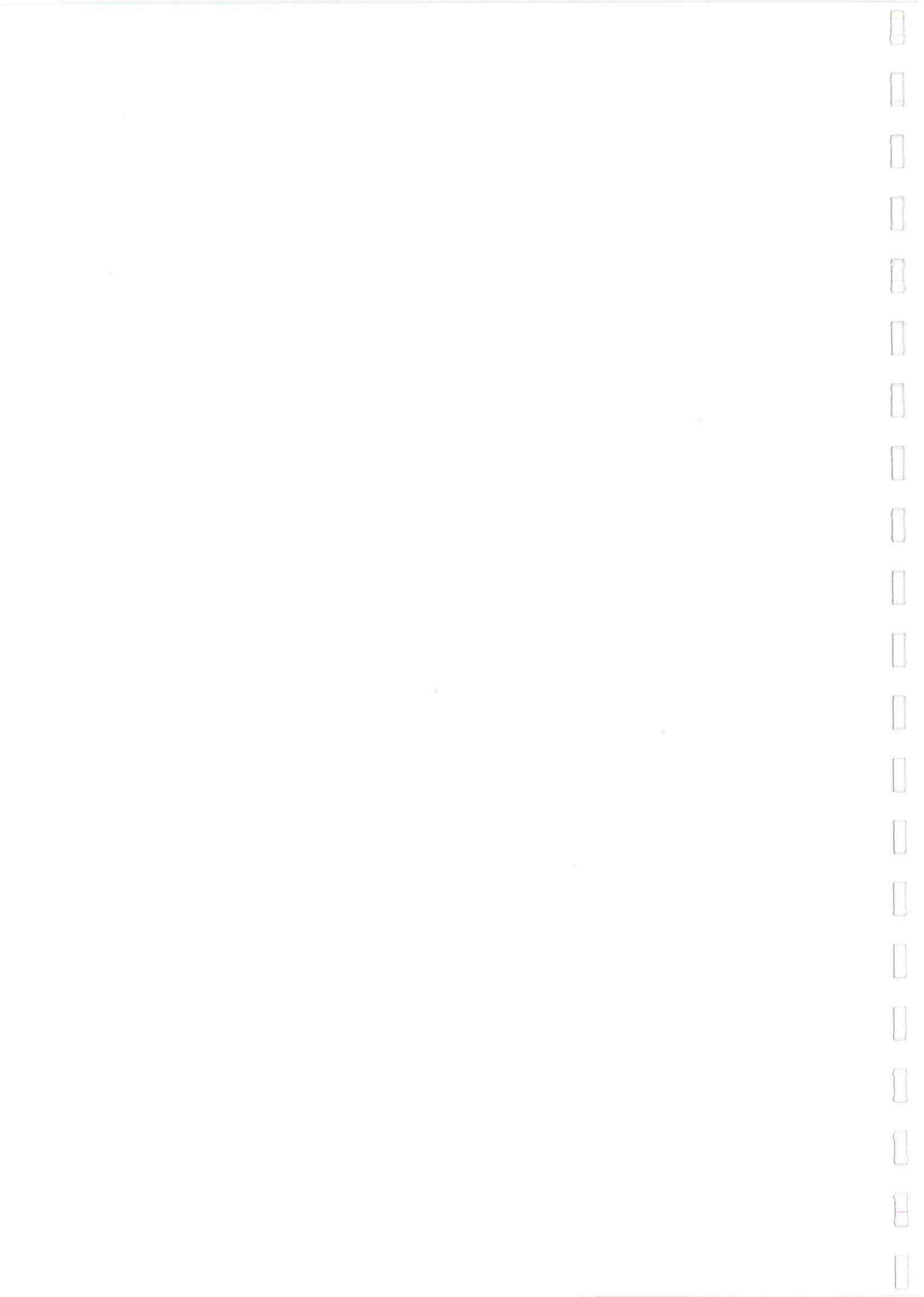


Photo n°13: injection du traceur (uranine) à la Canne Haros.

Photo n°14: le trop plein de la Canne Haros (lieu de l'injection) en débordement- hiver 95.

Photo n°15: sortie à l'émergence de l'Orbiquet du traceur (uranine) injecté à la Canne Haros.

Photo n°16: sortie du traceur (uranine) à l'émergence de l'Orbiquet-les membres de l'ESH, de l'équipe d'hydrométrie et de la qualité des eau.

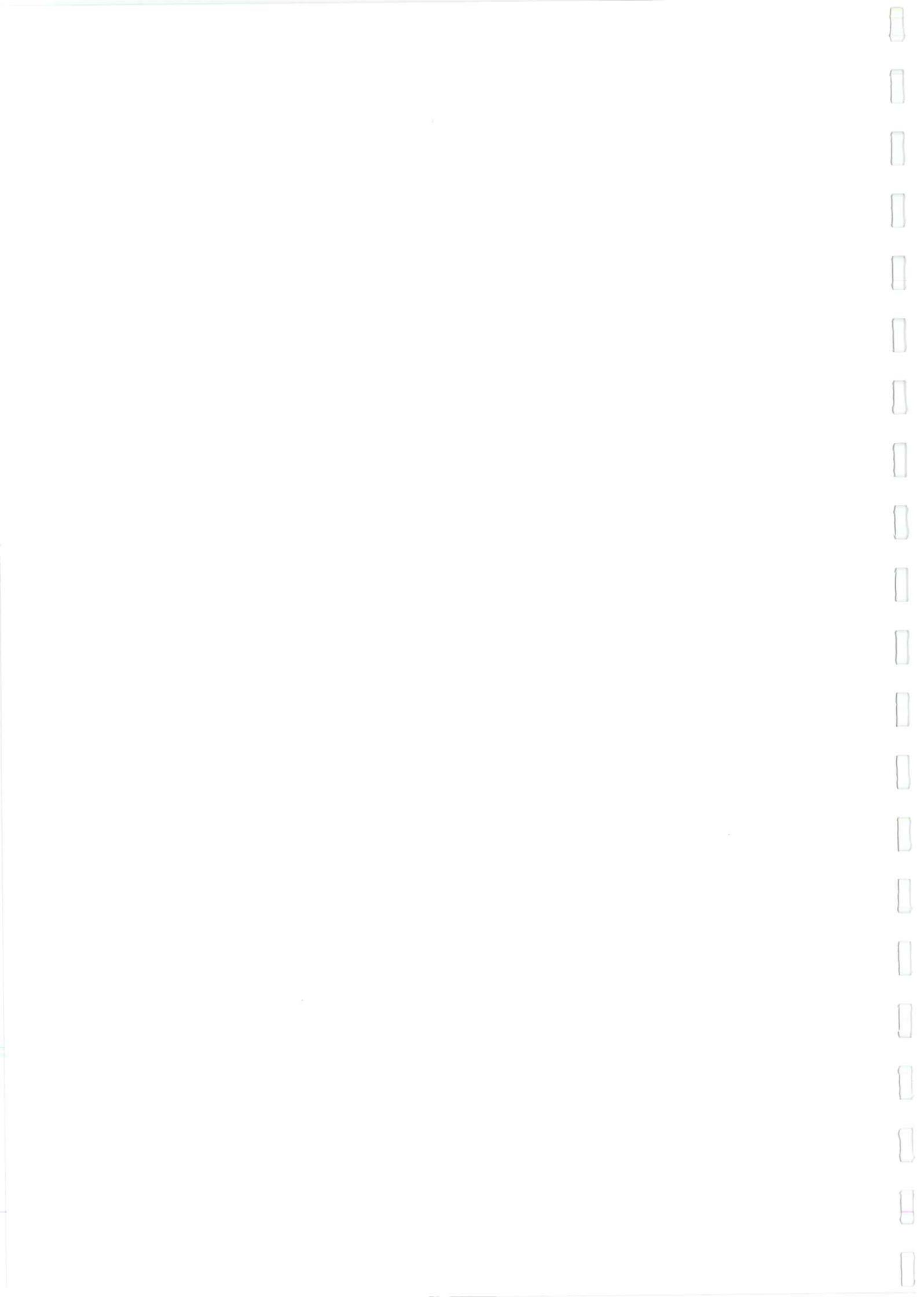
Photo n°17: injection du traceur (uranine) au Douet Arthus.

Photo n°18: Doline de percepierre (Saint Germain d'Aunay) où a été injectée l'uranine.

Photo n°19: injection de l'uranine dans une doline de percepierre (Saint Germain d'Aunay) le 08/04/98.

Photo n°20: effondrement remblayé noté au cours de l'été 96.

Photo n°21: deuxième effondrement survenu le 19/01/98 à l'intérieur du premier.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARTIS H.-de LA QUERIERE P.- VAN DEN AVENNE S (1972): assainissement du Pays d'Ouche (Eure et Orne); rapport du BRGM ref. 72 SGN 217 PNO, 36p.

BACALOWICZ M. (1979)-Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse de Doctorat de Science Naturelles, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 269p.

EVARD.D (1986):Schéma d'aménagement hydraulique du bassin versant de l'Orbiquet; mémoire de troisième année; Ecole Nationale des Ingénieurs des travaux ruraux et techniques sanitaires; DDAF 14; 80p.

FORD.D-WILLIAMS.P (1994): Karst geomorphology and hydrology; edition Chapman and Hall; 601p.

LEPILLER M, MONDAIN P.H. (1986)- les tracages artificiels en hydrogéologie karstique. Hydrogéologie, BRGM, 1, 33-52.

LSBN (1995): Les marnières du Pays d'Auge. Hypogées n°8-1995.

MANGIN A. (1975): contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de doctorat ès sciences, Univ. de Dijon.

MANGIN A. (1984): pour une meilleure connaissance des système hydrologique à partir des analyses corrélatrices et spectrales. Journal of hydrology, 67, 25-43.

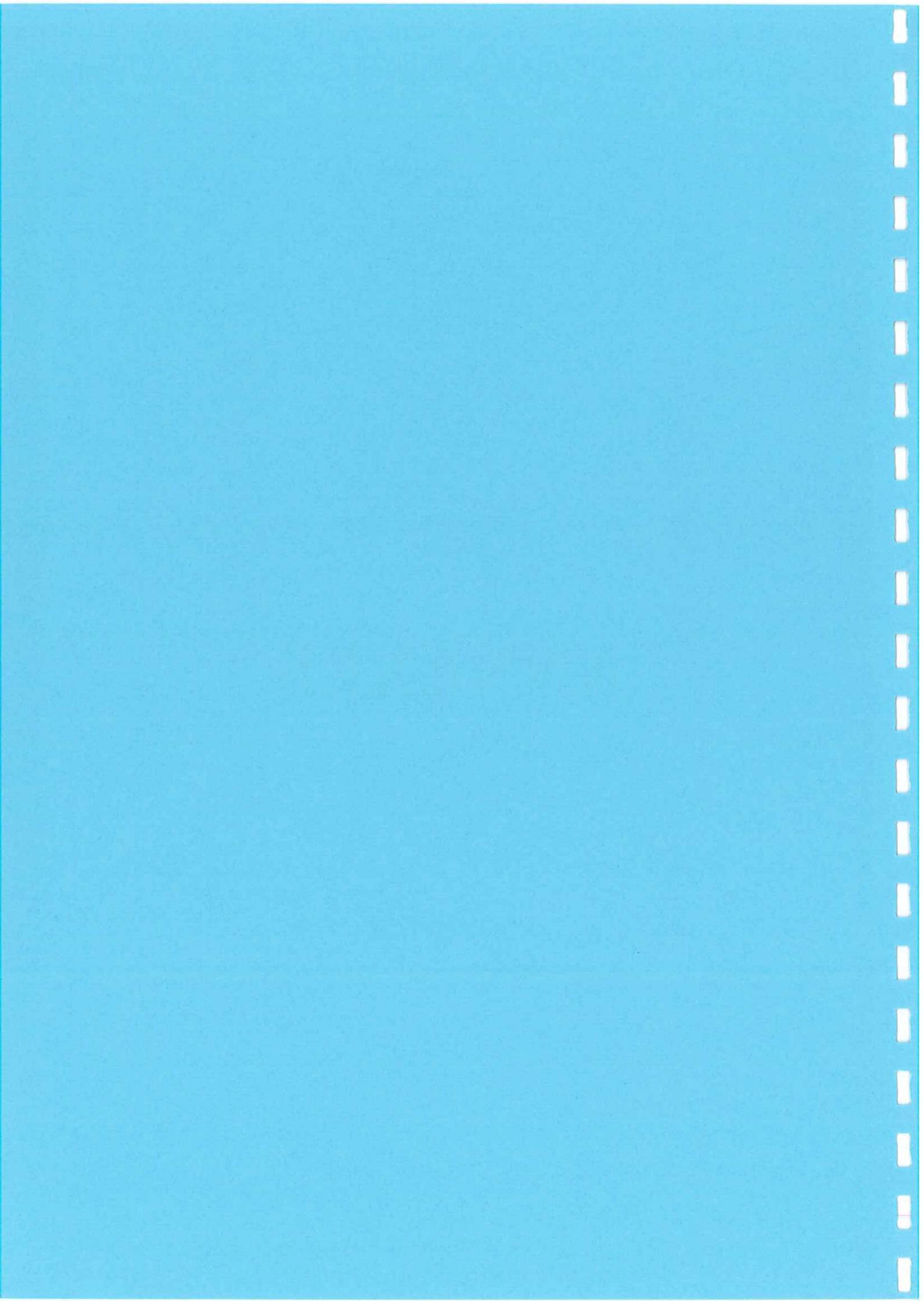
POOLE.S (1983): Bétoires... ou le méro-karst tabulaire, tertiaire du Pays d'Ouche crayeux Normandie, France; Amicale de prospection du Pays d'Ouche; LSBN; Fédération Française de spéléologie; 30p.

de LA QUERIERE P. (1973): assainissement du Pays d'Ouche (Eure et Orne)- rapport BRGM ref.73 SGN 381 PNO, 11p.

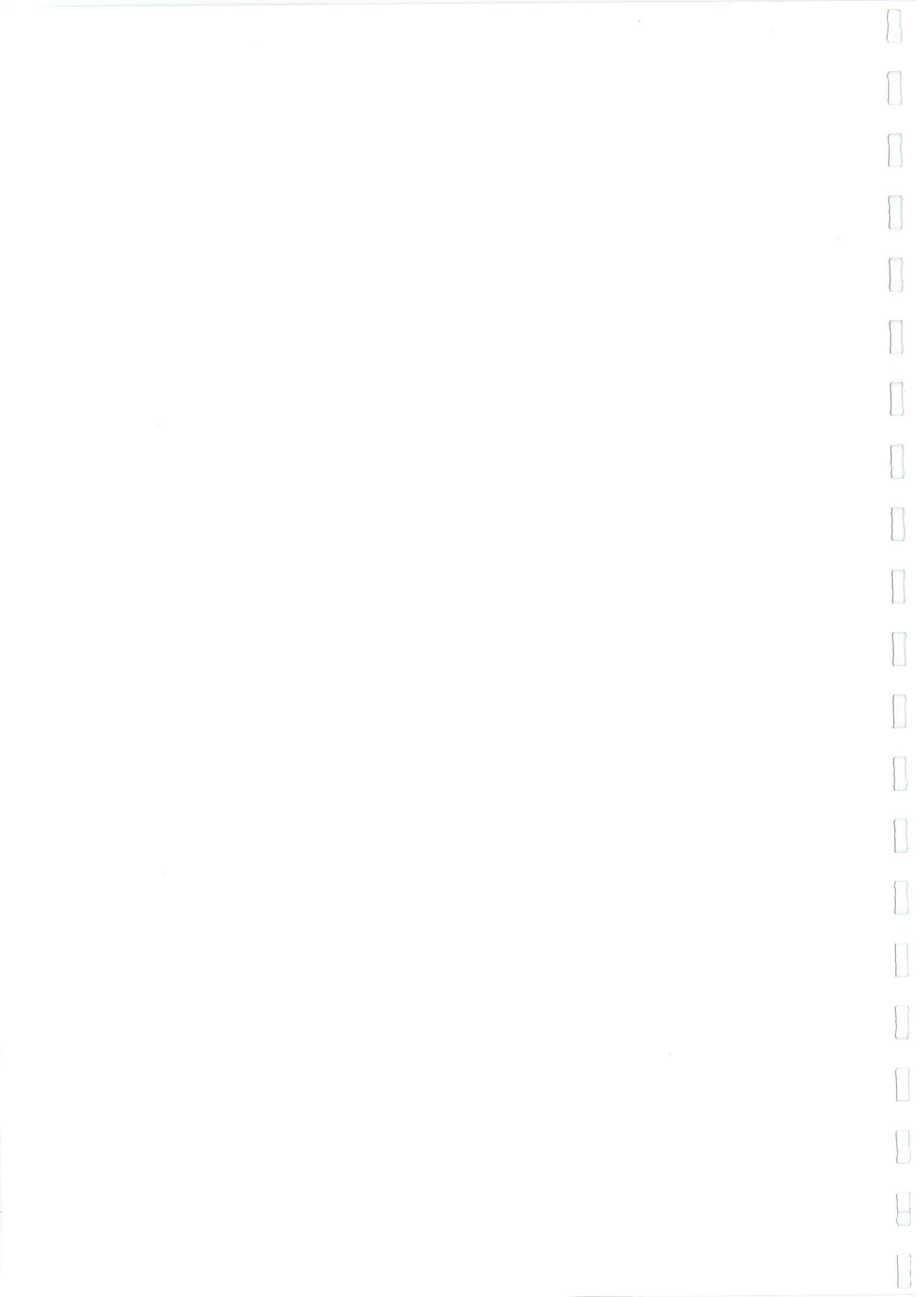
RODET.J: La craie et ses karsts; Thèse de Doctorat, Univ. d'Aix-en-provence, 498p.

SOUADI.T (1995): Projet de mise en place d'une base de données cavités souterraines "BDCS": Rapport du BRGM R 38799.

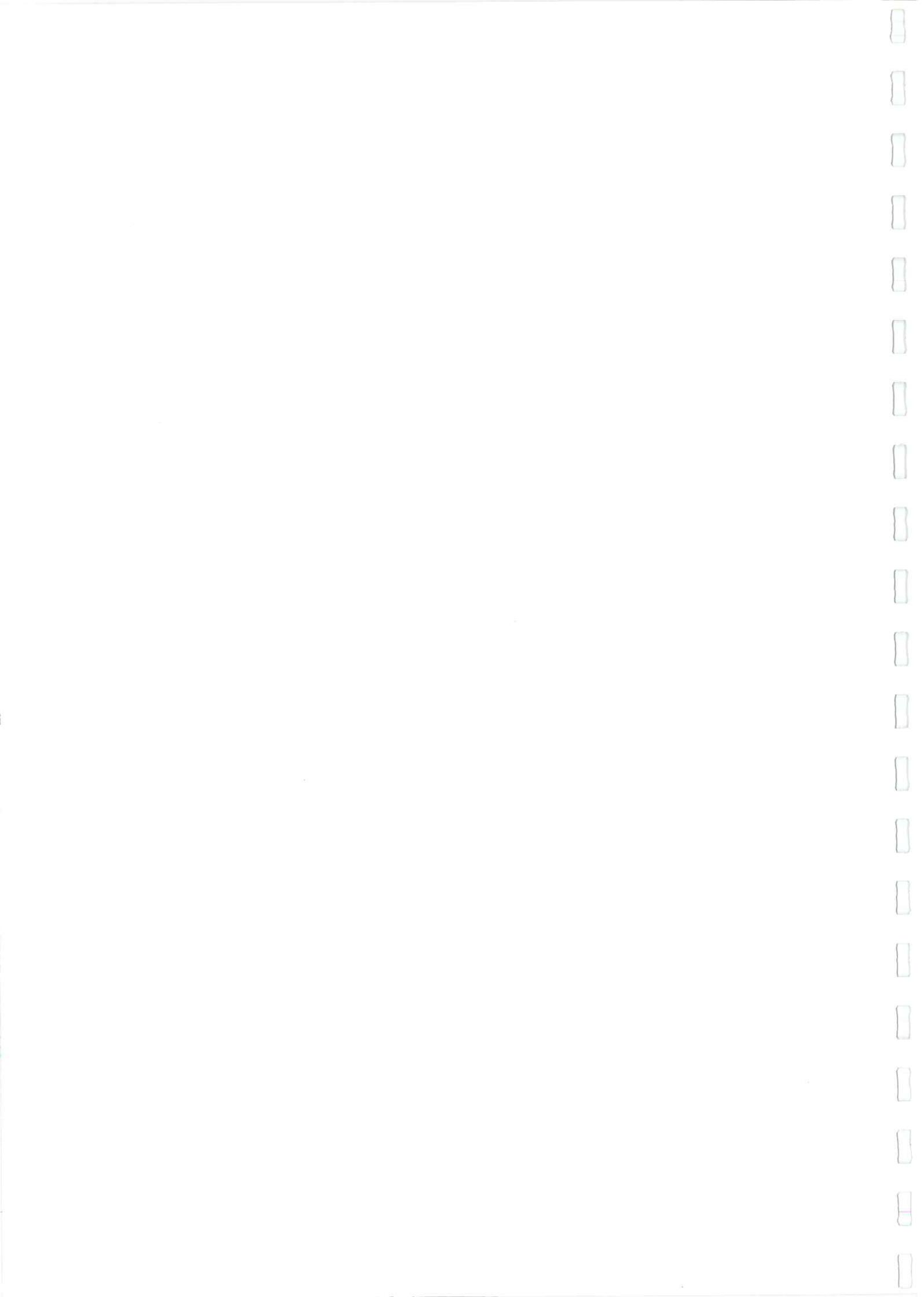
ANNEXES



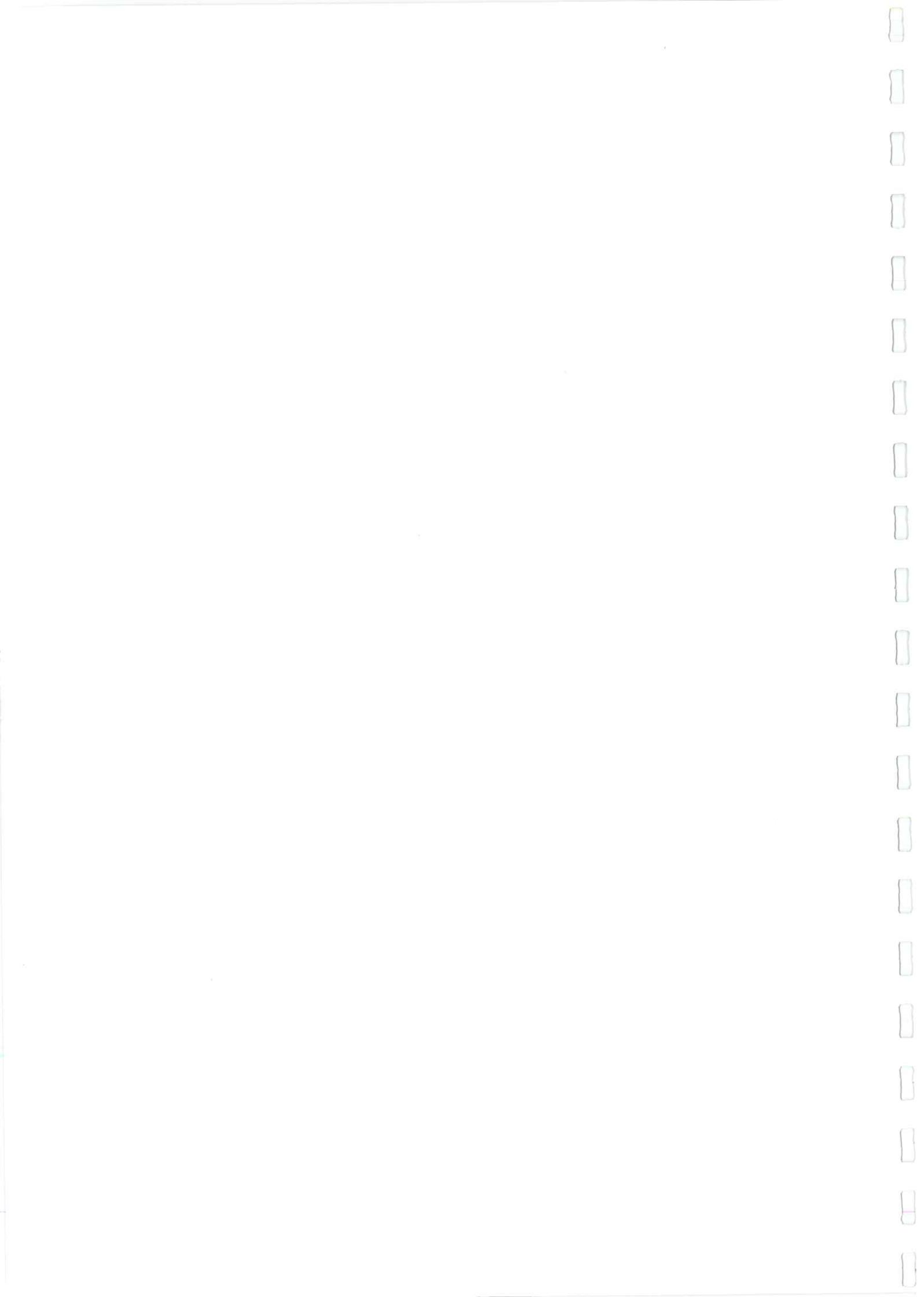
SUIVI CHIMIQUE



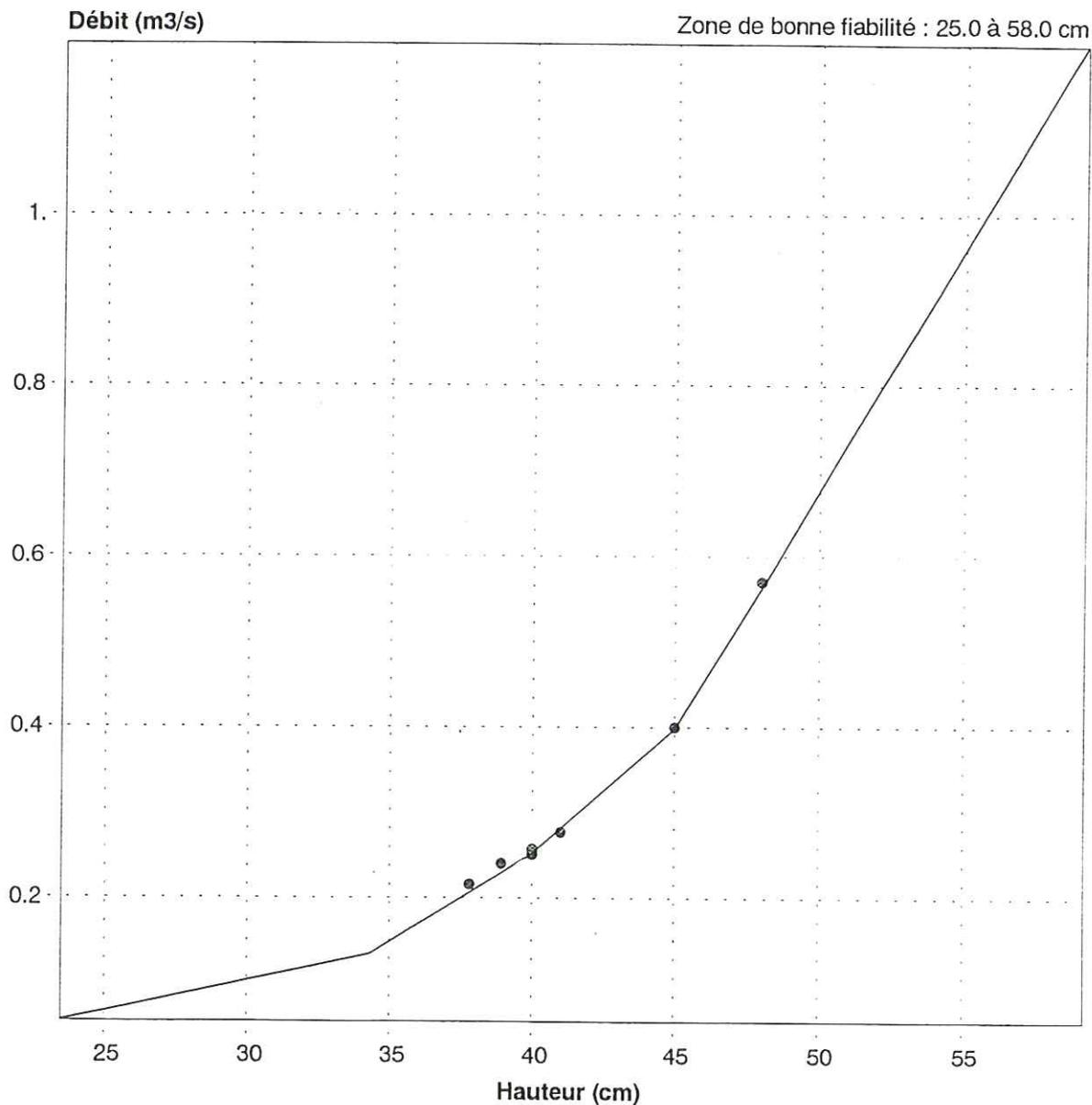
date	anions		alcalinité	so4--	no3--	cations		mg++	na+	k+
	cl-					ca++				
09/12/1997	16.5		293	14	12.6	100		4.5	6	1.3
15/12/1997	17		297	14.4	16	99		8	6.2	1.7
22/12/1997	20		273	15	22.8	98		8.6	7.6	0.4
29/12/1997	20		266	15	22.6	97		2	7.6	0.5
05/01/1998	26		134.2	20	41.5	62.5		3	7.6	0.75
12/01/1998	21		295	15	26.4	100		2.8	7.6	0.4
19/01/1998	20		288	16	24.5	97.5		3	7.6	0.5
23/01/1998	21		261	15	25.2	99		2.2	7.6	0.5
26/01/1998	18		290	14	18.2	105		1.2	7.4	0.3
09/02/1998	17		312	13	14	105		2.9	7.4	0.2
16/02/1998	18		312.32	13	13.3	106.5		2.0375	6.8	1.2
24/02/1998	17		317.2	13	13	108		0.841	6.8	1.3
03/03/1998	17		317.2	13	12.8	107.5		1.1435	6.8	1.2
12/03/1998	17		309.88	13	13.5	103		1.843	6.8	1.3
17/03/1998	18		312.32	13	13.4	102		3.026	6.8	1.3
25/03/1998	19		322.08	13	12.4	106		1.762	6.8	1.2
31/03/1998	17		312.32	13	11.9	106		3.785	6.8	1.2
08/04/1998	19		256.2	15.5	20	91		1.589	6.8	2.3
15/04/1998	18		280.6	15	17	97.5		4.0145	6.8	1.7
22/04/1998	18		263.52	14	17.7	92.5		2.1265	6.8	1.8
30/04/1998	18		292.8	13	15.1	99		3.685	6.8	1.6
06/05/1998	17		312.32	13	14	104		3.026	6.8	1.5
13/05/1998	16		317.2	13	13	102		4.182	6.8	1.3
22/05/1998	16		317.2	13.2	12.9	105		2.448	6.5	1.4
27/05/1998	18		334.28	13.1	12.9	108		1.677	6.5	1.1
02/06/1998	19		313.54	13.2	12.7	105		3.48	6.8	2.9
11/06/1998	17		311.1	12.7	13	106		2.879	6.5	1.2
17/06/1998	18		300.12	13.4	13.6	104		2.6445	6.7	1.4
24/06/1998	17		309.88	12.4	12.2	117		2	6.5	1.2
01/07/1998	18		305	12.5	13.5	108		2.835	6.5	1.3
09/07/1998	23		302.4	12.2	13.1	106		2.3	6.5	1.3
15/07/1998	17		304.8	12.1	13	104.5		3.7805	6.5	1.2
12/08/1998	19		312	11.9	13.1	104		6.1185	6.6	1.2
17/08/1998	17		316.8	12	13.2	108		2.835	6.6	1.2
24/08/1998	19		310	12.2	13	110		3	6.5	1.3



COURBE DE TARAGE



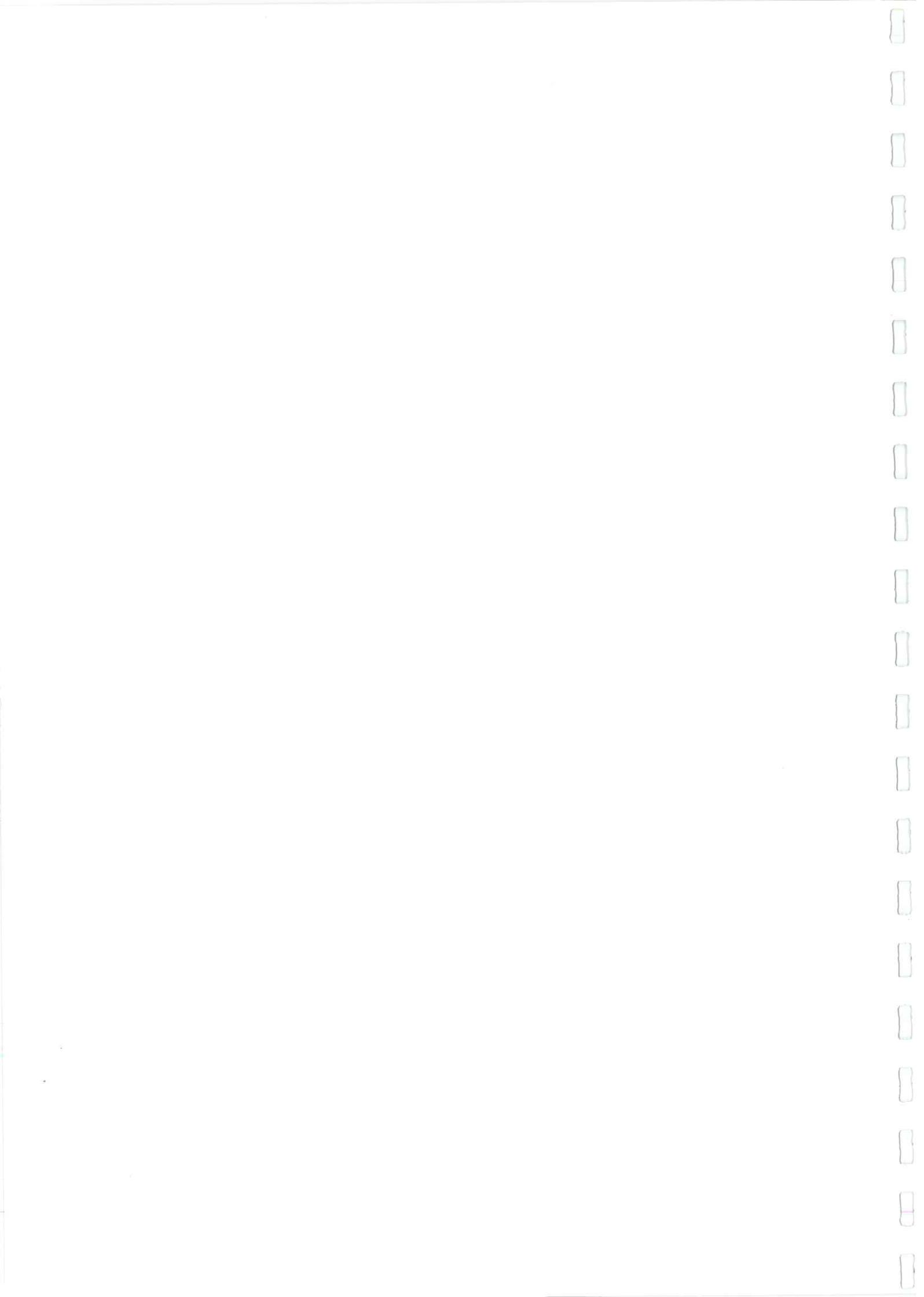
ORBIQUET à FOLLETIÈRE (LA) (I1103020)
Courbe numéro 3 valide du 25/11/1997 00:00 au 31/12/1999 00:00



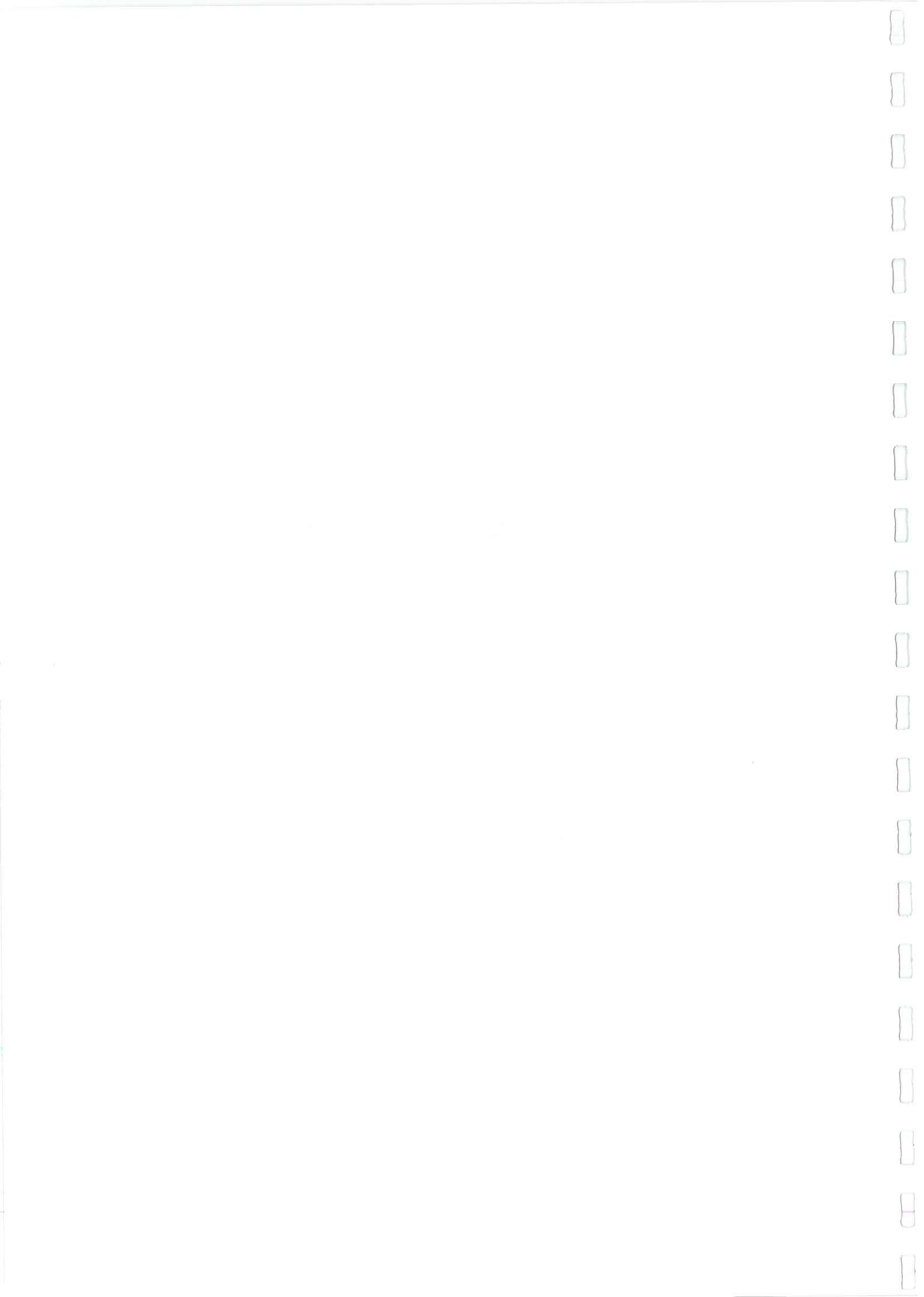
barème de tarage (Hauteur en cm – Débit en m3/s)

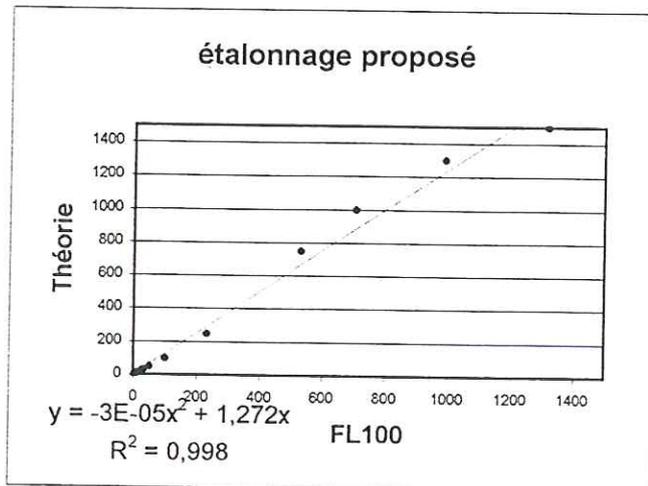
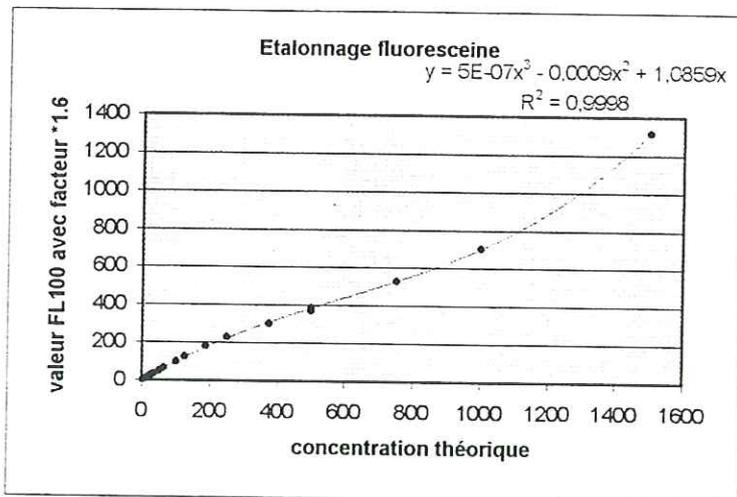
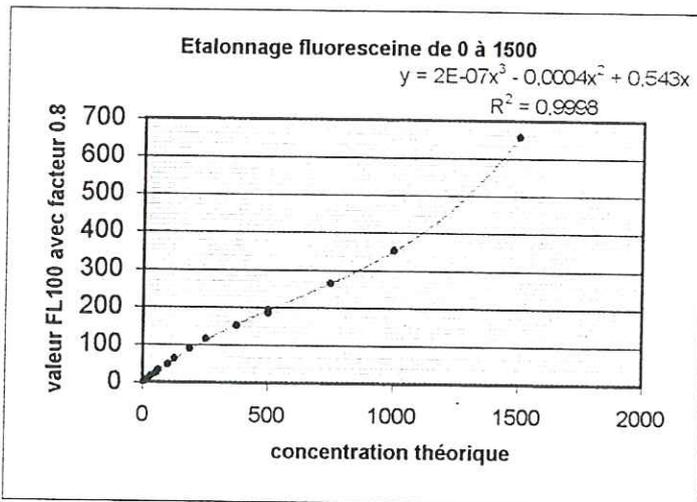
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20					0.060	0.067	0.074	0.081	0.089	0.096
30	0.103	0.110	0.117	0.125	0.132	0.148	0.169	0.190	0.210	0.231
40	0.253	0.282	0.311	0.340	0.369	0.398	0.453	0.509	0.564	0.621
50	0.678	0.734	0.791	0.848	0.905	0.961	1.02	1.08	1.13	1.19

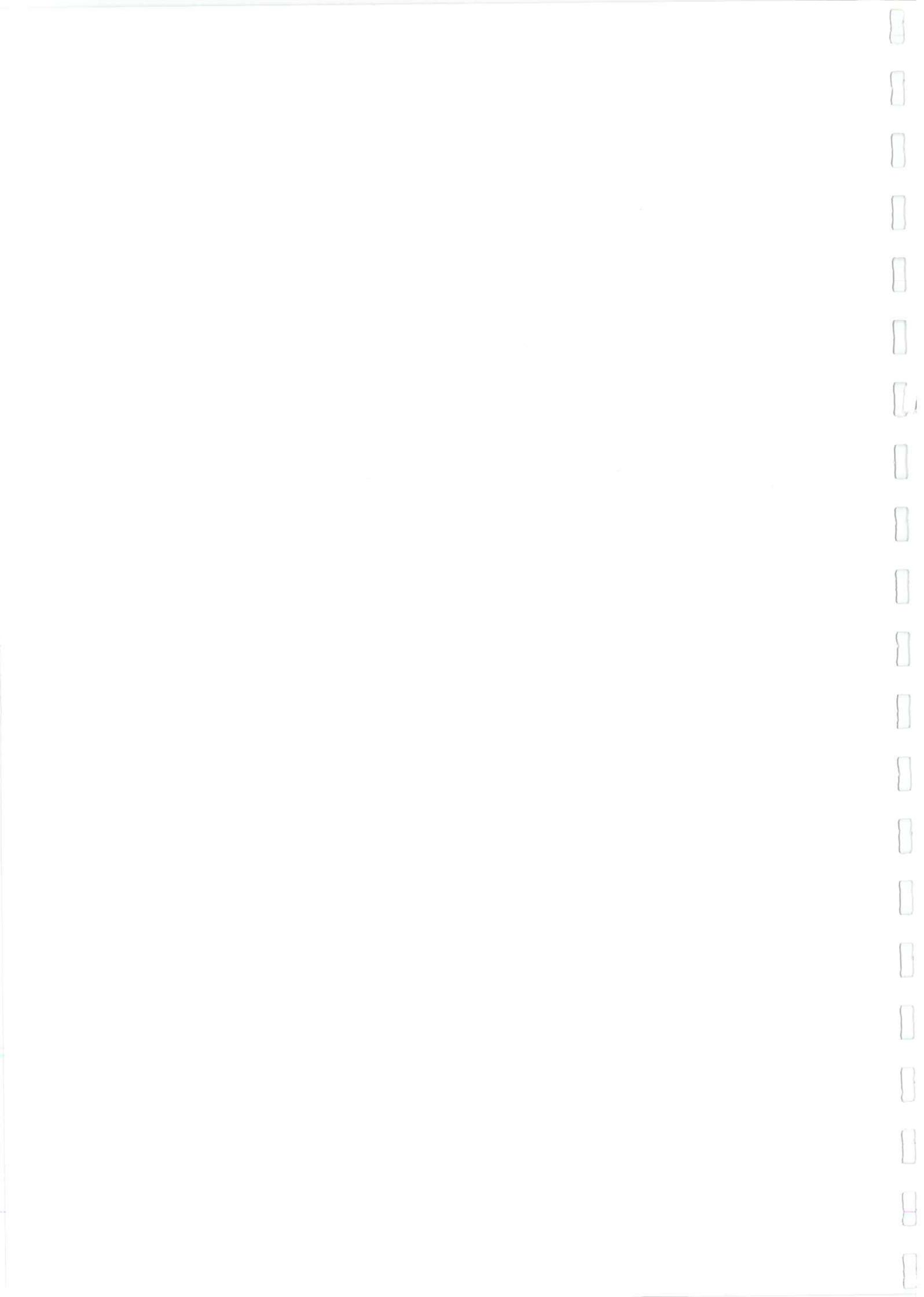
Exemple : pour H = 41 cm, Q = 0.282 m3/s



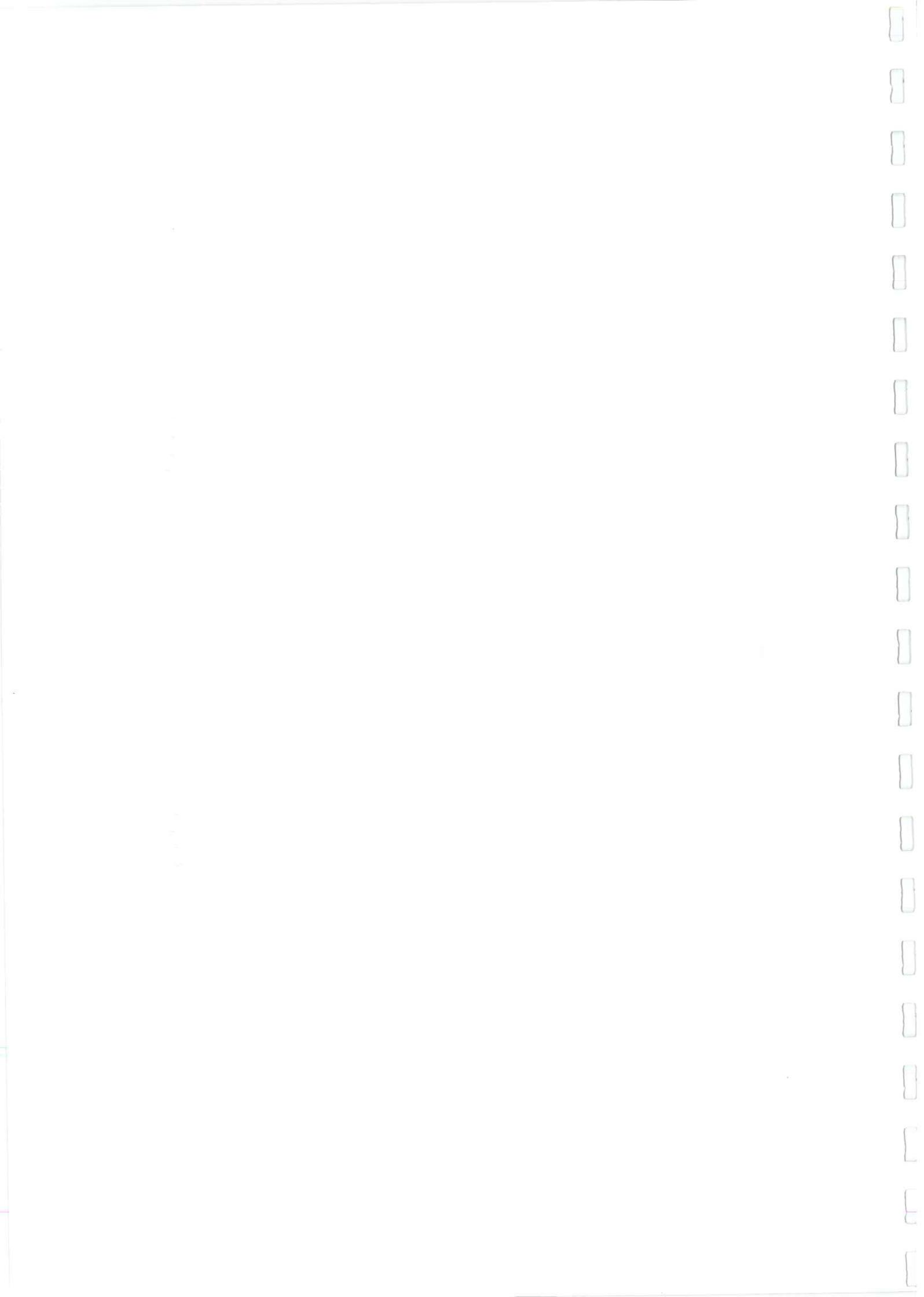
ETALONNAGE DU FLUORIMETRE







**DETAIL DE L'ACP
DES VARIATIONS
DU CHIMISME DE
L'EAU**



- Corrélations et Analyse en Composantes Principales								
Type de coefficient de corrélation : Pearson								
Plage de données : classeur = CHRONIQ.XLS / feuille = ACP / page = \$A\$1:\$I\$32								
Matrice des corrélations :								
	cl-	alcalinité	so4--	no3--	ca++	mg++	na+	k+
cl-	1	-0.7413	0.6915	0.8017	-0.6633	0.0201	0.5576	-0.2692
alcalinité	-0.7413	1	-0.9057	-0.8931	0.9306	-0.1174	-0.4793	0.1695
so4--	0.6915	-0.9057	1	0.9414	-0.9066	0.2144	0.5764	-0.2530
no3--	0.8017	-0.8931	0.9414	1	-0.8463	0.1371	0.7240	-0.4159
ca++	-0.6633	0.9306	-0.9066	-0.8463	1	-0.2567	-0.4209	0.0677
mg++	0.0201	-0.1174	0.2144	0.1371	-0.2567	1	-0.0016	0.0158
na+	0.5576	-0.4793	0.5764	0.7240	-0.4209	-0.0016	1	-0.6421
k+	-0.2692	0.1695	-0.2530	-0.4159	0.0677	0.0158	-0.6421	1
Valeurs propres et vecteurs propres :								
aleur propre	1	2	3	4	5	6	7	8
Valeur	4.9020	1.3599	0.9463	0.3539	0.2744	0.0903	0.0516	0.0217
% de variabilit	0.6127	0.1700	0.1183	0.0442	0.0343	0.0113	0.0065	0.0027
% cumulé	0.6127	0.7827	0.9010	0.9453	0.9795	0.9908	0.9973	1.0000
Vecteurs :	1	2	3	4	5	6	7	8
cl-	0.3739	-0.0325	-0.2013	0.8603	-0.2051	0.0231	0.1240	-0.1428
alcalinité	-0.4179	-0.1990	0.1685	0.1780	0.1927	0.4248	0.6903	0.1773
so4--	0.4278	0.1419	-0.0049	-0.2925	0.0328	0.6537	0.0993	-0.5225
no3--	0.4448	-0.0393	-0.0136	-0.0449	0.0270	0.3606	-0.1623	0.8008
ca++	-0.4023	-0.3197	0.0589	0.2501	0.0352	0.4511	-0.6718	-0.1178
mg++	0.0792	0.3925	0.8866	0.2073	0.0237	-0.0286	-0.0964	-0.0056
na+	0.3233	-0.4727	0.1384	0.0448	0.7637	-0.2244	-0.0280	-0.1282
k+	-0.1790	0.6768	-0.3496	0.1817	0.5778	0.0829	-0.1023	0.0593
Corrélations entre variables et facteurs principaux :								
	facteur 1	facteur 2	facteur 3	facteur 4	facteur 5	facteur 6	facteur 7	facteur 8
cl-	0.8279	-0.0379	-0.1959	0.5118	-0.1074	0.0069	0.0282	-0.0211
alcalinité	-0.9254	-0.2321	0.1640	0.1059	0.1009	0.1276	0.1569	0.0261
so4--	0.9471	0.1654	-0.0048	-0.1740	0.0172	0.1964	0.0226	-0.0770
no3--	0.9848	-0.0458	-0.0132	-0.0267	0.0141	0.1083	-0.0369	0.1180
ca++	-0.8907	-0.3728	0.0573	0.1488	0.0185	0.1355	-0.1527	-0.0174
mg++	0.1754	0.4577	0.8624	0.1233	0.0124	-0.0086	-0.0219	-0.0008
na+	0.7158	-0.5512	0.1346	0.0267	0.4000	-0.0674	-0.0064	-0.0189
k+	-0.3962	0.7892	-0.3401	0.1081	0.3027	0.0249	-0.0232	0.0087
Coordonnées des individus sur les axes principaux :								
	axe 1	axe 2	axe 3	axe 4	axe 5	axe 6	axe 7	axe 8
1	-1.1137	1.5758	0.6493	-0.7224	-1.2730	0.1708	0.0400	-0.1667
2	-0.4892	2.6242	2.1621	-0.0734	-0.4790	0.4442	-0.1106	0.1043
3	2.5123	-0.1631	3.2722	0.6456	0.2835	-0.1275	-0.3568	-0.0885
4	2.3031	-1.4184	-0.1069	-0.1516	0.2536	-0.1553	-0.0743	-0.1053
5	9.2839	1.3663	-1.2649	-0.2540	-0.7412	-0.1650	0.0724	0.0038
6	2.3378	-1.6748	0.4066	0.5267	0.2531	0.5557	0.2011	0.4108
7	2.4839	-1.2591	0.4915	-0.1184	0.4200	0.6678	0.2831	-0.1069
8	2.6452	-1.4512	-0.1202	0.2963	0.1501	0.0463	-0.3459	0.1094
9	0.5687	-2.0781	-0.0707	-0.5745	0.0094	-0.0792	-0.1937	-0.1341
10	-0.3526	-2.0000	1.0494	-0.4833	0.1098	-0.5458	0.1501	-0.1641
11	-1.0935	-0.4222	-0.2644	0.1338	-0.0369	-0.0262	0.0252	-0.0583
12	-1.5056	-0.6320	-0.7892	-0.3152	0.1780	0.1155	0.0014	-0.0101

111



ACP

13	-1.4522	-0.6643	-0.5808	-0.3247	0.0781	0.0587	0.0465	-0.0405
14	-1.1080	-0.1906	-0.3615	-0.3826	0.1331	-0.2180	0.1739	0.0817
15	-0.8669	0.0773	0.1349	0.1510	0.0596	-0.2537	0.2969	0.0225
16	-1.0848	-0.5298	-0.4520	0.5553	-0.0909	0.0294	0.3536	-0.1859
17	-1.2724	0.0047	0.6996	-0.0791	0.0763	-0.1725	-0.0534	-0.1695
18	1.2972	1.8448	-1.6532	-0.4215	0.6837	0.1521	-0.0131	-0.0922
19	0.4660	1.2791	0.1840	-0.3132	0.3439	0.2536	-0.0691	-0.2710
20	0.5493	1.1629	-0.9289	-0.5403	0.2871	-0.5619	-0.0221	0.1651
21	-0.4389	0.7870	0.1610	0.1256	0.2596	-0.5132	0.0090	0.2128
22	-1.1573	0.2527	0.1211	-0.1443	0.3706	-0.0978	0.0324	0.1622
23	-1.2604	0.3374	0.9261	-0.5105	0.2963	-0.2585	0.2223	0.1286
24	-1.6795	0.3102	-0.0719	-0.6635	-0.1359	0.1745	0.1029	0.1098
25	-1.6320	-0.4616	-0.3614	0.1671	-0.5418	0.4836	0.4163	0.0252
26	-1.3143	1.9623	-0.6874	1.1818	1.6048	0.1979	-0.1292	-0.0756
27	-1.5275	0.1028	0.1469	-0.1708	-0.4705	-0.0849	-0.0579	0.1622
28	-0.8074	0.2531	-0.1945	0.0439	-0.0692	-0.0402	-0.0666	-0.1387
29	-2.3267	-1.1326	-1.6278	-0.2297	-0.4922	0.3496	-0.7248	0.0208
30	-1.4222	0.1354	-0.0487	0.3291	-0.4958	-0.0876	-0.3141	0.1809
31	-0.5426	0.0019	-0.8203	2.3166	-1.0242	-0.3125	0.1045	-0.0926
Cosinus carrés des angles entre les données et chacun des axes :								
	axe 1	axe 2	axe 3	axe 4	axe 5	axe 6	axe 7	axe 8
1	0.1954	0.3913	0.0664	0.0822	0.2554	0.0046	0.0003	0.0044
2	0.0195	0.5619	0.3814	0.0004	0.0187	0.0161	0.0010	0.0009
3	0.3567	0.0015	0.6051	0.0236	0.0045	0.0009	0.0072	0.0004
4	0.7114	0.2698	0.0015	0.0031	0.0086	0.0032	0.0007	0.0015
5	0.9545	0.0207	0.0177	0.0007	0.0061	0.0003	0.0001	0.0000
6	0.5880	0.3018	0.0178	0.0299	0.0069	0.0332	0.0044	0.0182
7	0.7072	0.1817	0.0277	0.0016	0.0202	0.0511	0.0092	0.0013
8	0.7474	0.2250	0.0015	0.0094	0.0024	0.0002	0.0128	0.0013
9	0.0642	0.8570	0.0010	0.0655	0.0000	0.0012	0.0074	0.0036
10	0.0214	0.6875	0.1893	0.0401	0.0021	0.0512	0.0039	0.0046
11	0.8146	0.1214	0.0476	0.0122	0.0009	0.0005	0.0004	0.0023
12	0.6602	0.1163	0.1814	0.0289	0.0092	0.0039	0.0000	0.0000
13	0.7015	0.1468	0.1122	0.0351	0.0020	0.0011	0.0007	0.0005
14	0.7471	0.0221	0.0795	0.0891	0.0108	0.0289	0.0184	0.0041
15	0.7869	0.0063	0.0191	0.0239	0.0037	0.0674	0.0923	0.0005
16	0.5501	0.1312	0.0955	0.1442	0.0039	0.0004	0.0585	0.0162
17	0.7420	0.0000	0.2243	0.0029	0.0027	0.0136	0.0013	0.0132
18	0.1981	0.4006	0.3217	0.0209	0.0550	0.0027	0.0000	0.0010
19	0.0967	0.7285	0.0151	0.0437	0.0527	0.0286	0.0021	0.0327
20	0.0933	0.4181	0.2667	0.0902	0.0255	0.0976	0.0002	0.0084
21	0.1566	0.5036	0.0211	0.0128	0.0548	0.2142	0.0001	0.0368
22	0.8304	0.0396	0.0091	0.0129	0.0851	0.0059	0.0007	0.0163
23	0.5223	0.0374	0.2820	0.0857	0.0289	0.0220	0.0163	0.0054
24	0.8214	0.0280	0.0015	0.1282	0.0054	0.0089	0.0031	0.0035
25	0.7128	0.0570	0.0350	0.0075	0.0786	0.0626	0.0464	0.0002
26	0.1713	0.3819	0.0469	0.1385	0.2554	0.0039	0.0017	0.0006
27	0.8795	0.0040	0.0081	0.0110	0.0834	0.0027	0.0013	0.0099
28	0.8296	0.0815	0.0481	0.0025	0.0061	0.0021	0.0056	0.0245
29	0.5261	0.1247	0.2575	0.0051	0.0235	0.0119	0.0511	0.0000
30	0.7974	0.0072	0.0009	0.0427	0.0969	0.0030	0.0389	0.0129
31	0.0393	0.0000	0.0897	0.7155	0.1399	0.0130	0.0015	0.0011

